

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Факультет
будівництва, транспорту та
енергетики

Кафедра електротехнічних
систем та енергетичного
менеджменту

**ЕФЕКТИВНЕ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
В СИСТЕМАХ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ**

*методичні рекомендації до виконання курсового проекту
для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності
141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"*

Кропивницький
2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Факультет
будівництва, транспорту та
енергетики

Кафедра електротехнічних
систем та енергетичного
менеджменту

**ЕФЕКТИВНЕ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
В СИСТЕМАХ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ**

*методичні рекомендації до виконання курсового проекту
для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності
141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"*

Затверджено
на засіданні кафедри
електротехнічних систем та
енергетичного менеджменту
Протокол № 13 від 13.02.2023 р.

Кропивницький
2023

Ефективне використання електроенергії в системах енергоспоживання: методичні рекомендації до виконання курсового проекту для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" / [уклад.: П. Г. Плешков, К. Г. Петрова, О. І. Сіріков, В. В. Зінзура, В. П. Солдатенко,], Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: ЦНТУ, 2023 – 128 с.

Укладачі:

П. Г. Плешков – канд. техн. наук, проф., завідувач кафедри ЕТС та ЕМ
К. Г. Петрова – канд. техн. наук, доцент кафедри ЕТС та ЕМ
О. І. Сіріков – канд. техн. наук, доцент кафедри ЕТС та ЕМ
В. В. Зінзура – канд. техн. наук, доцент кафедри ЕТС та ЕМ
В. П. Солдатенко – канд. техн. наук, доцент кафедри ЕТС та ЕМ

Рецензент: С. І. Осадчий – д.т.н., професор кафедри конструкції повітряних суден, авіадвигунів та підтримання льотної придатності. ДЛІАУ

© Плешков П.Г., Петрова К.Г.,
Сіріков О.І., Зінзура В.В.
Солдатенко В.П.
2023
© Центральноукраїнський
національний технічний
університет, 2023

ЗМІСТ

ВСТУП	6
Розділ 1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ	8
1.1. Зміст курсового проекту.....	8
1.2. Вихідні дані до виконання курсового проекту.....	10
1.3. Вимоги до оформлення курсового проекту.....	11
1.3.1. Вимоги до оформлення тексту.....	11
1.3.2. Правила нумерації.....	12
1.3.3. Вимоги до оформлення формул.....	14
Розділ 2. ВИКОНАННЯ ОКРЕМИХ РОЗДІЛІВ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ	16
2.1. Розрахунок електричних навантажень.....	16
2.2. Вибір схеми системи електропостачання.....	17
2.3. Вибір кількості та потужності силових трансформаторів.....	18
2.4. Розрахунок струмів коротких замкнень в системі електропостачання.....	21
2.5. Вибір електричних апаратів високої напруги.....	27
2.5.1. Вибір високовольтних вимикачів.....	27
2.5.2. Вибір роз'єднувачів.....	30
2.5.3. Вибір розрядників та обмежувачів перенапруги.....	32
2.6. Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб.....	32
2.7. Вибір електричних схем підключення лічильників електроенергії та вибір трансформаторів струму та напруги.....	36
2.7.1. Вибір трансформаторів струму.....	37
2.7.2. Вибір трансформаторів напруги.....	41
2.8. Розробка заходів з економії електроенергії в дугових сталеплавильних печах.....	42
2.8.1. Загальні положення.....	42
2.8.2. Підвищення маси садки і вдосконалення підготовки шихти.....	43
2.8.3. Зниження електричних втрат в ДСП.....	47
2.8.4. Зниження теплових втрат в ДСП.....	53
2.8.5. Скорочення простоїв печі.....	57
2.8.6. Оптимізація електричних і технологічних режимів роботи електропечей.....	60
2.8.7. Робочі характеристики і явища переносу потужності.....	62
2.8.8. Оптимальний електричний режим розплавлення. Добова продуктивність і питома витрата електроенергії.....	63
2.8.9. Методика побудови норм питомої витрати електроенергії на виплавку електросталі.....	66
2.9. Розробка заходів з економії електроенергії в індукційних печах.....	82
2.9.1. Загальні положення.....	82
2.9.2. Економія електроенергії в індукційних установках.....	85

2.9.3. Конструктивний розрахунок індукційної печі без осердя.....	89
2.10. Розробка заходів з економії електроенергії в компресорних установках.....	100
2.10.1. Визначення потужності, яка споживається компресорами	101
2.10.2. Зниження номінального робочого тиску компресорної установки	104
2.10.3. Впровадження прямоточних клапанів в поршневих компресорах.....	105
2.10.4. Резонансний наддув поршневих компресорів	106
2.10.5. Підігрів стисненого повітря перед пневмоприймачами	107
2.10.6. Заміна компресорів старих конструкцій на нові з вищим ККД....	108
2.10.7. Витік стисненого повітря, технічної води, кисню, інших рідин і газів, через поганий стан трубопроводів, з'єднувальної і запірної арматури.....	108
2.10.8. Скорочення витоків стисненого повітря	109
2.10.9. Заміна стисненого повітря іншими енергоносіями	110
2.10.10. Заміна пневмоінструмента електроінструментом	111
2.10.11. Заміна стисненого повітря вентиляторним дуттям	112
2.11. Розробка заходів з економії електроенергії у вентиляційних установках.....	112
2.11.1. Загальні положення.....	112
2.11.2. Заміна вентиляторів старих типів на сучасні.....	113
2.11.3. Впровадження економічних способів регулювання подачі вентиляторів	114
2.11.4. Блокування вентиляторів теплових завіс з пристроями відкривання і закривання воріт	114
2.11.5. Покращення роботи вентиляторів.....	115
2.11.6. Усунення дефектів при експлуатації вентиляторних установок	116
2.11.7. Впровадження автоматичного керування вентиляційними установками.....	116
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	118
ДОДАТКИ.....	120
ДОДАТОК А. Зразок титульного аркушу	120
ДОДАТОК Б. Зразок листа завдання	121
ДОДАТОК В. Приклад виконання графічної частини.....	123
ДОДАТОК Г. Варіанти індивідуальних завдань	125

ВСТУП

Підвищення рівня енергоефективності є пріоритетним напрямом енергетичної політики більшості країн світу. Це обумовлено вичерпанням традиційних невідновлюваних паливно-енергетичних ресурсів та відсутністю реальних альтернатив їх заміни.

Курс на активізацію та інтенсифікацію політики заощадження електричної енергії знайшов відображення в Законах України «Про електроенергетику» та «Про енергозбереження», комплексній державній програмі енергозбереження, регіональних програмах, рекомендаціях Ради Європи тощо.

Рівень ефективності використання електричної енергії у виробництві визначається відношенням результатів використання енергії до значення витрат енергії для отримання цих результатів. Показниками рівня ефективності використання енергії можуть бути: *енерговіддача* – прямий показник та *енергоємність* – зворотний показник рівня ефективності.

Вочевидь, цілеспрямоване заощадження електричної енергії потребує як організаційного, практичного, так і наукового та інформаційного забезпечення, спрямованого на раціоналізацію використання енергетичних ресурсів.

Використання електричної енергії обумовлюється специфічними властивостями електричної енергії як найбільш технологічного виду енергії. Електрична енергія з достатньо високим рівнем ефективності дозволяє реалізувати різноманітні технологічні процеси, а деякі з них взагалі не можуть бути виконані з використанням інших видів енергії.

Електричну енергію легко можна перетворити в інші види енергії (теплову, механічну, світлову, хімічну тощо), передавати на значні відстані; вона дозволяє отримати потужні щільності енергетичного потоку. Окрім того, власне рівень виробництва електричної енергії в країні та її споживання галузями економіки значною мірою свідчать як про потенціал країни, так і про рівень ефективності промислового виробництва.

Основними споживачами електричної енергії в промисловості є електропривод, електричне освітлення та значна група електротехнологічних установок.

Система електропостачання утворює єдиний комплекс з технологічною системою виробництва, тому розроблення та впровадження в ній заходів із заощадження електричної енергії потрібно здійснювати з врахуванням вимог технологічного комплексу, що дозволить реалізувати наявний потенціал.

Підвищувати рівень ефективності використання електричної енергії можна шляхом:

- зменшення питомих витрат електричної енергії на одиницю продукції за рахунок вдосконалення технологій виробництва та раціоналізації режиму роботи електроустаткування;

- зменшення втрат електричної енергії під час її транспортування та перетворення.

В результаті виконання курсового проекту здобувачі освіти поглиблюють свої теоретичні знання та набувають практичних навичок із вирішення задач заощадження електричної енергії, можливості підвищення рівня ефективності використання електричної енергії в електричних мережах, дугових сталеплавильних та індукційних печах, вентиляційних та компресорних установках та ін.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

1.1. Зміст курсового проекту

В курсовому проекті вирішуються завдання проектування системи електропостачання промислового об'єкта та підвищення рівня ефективності використання електричної енергії в окремих типах електроустановок (згідно варіанту завдання).

Курсовий проект складається з пояснювальної записки та графічної частини.

Зміст пояснювальної записки курсового проекту включає:

Вступ

Розділ 1. Розрахунок електричних навантажень

Розділ 2. Вибір схеми системи електропостачання

Розділ 3. Вибір кількості та потужності силових трансформаторів

Розділ 4. Розрахунок струмів коротких замкнень в системі електропостачання

Розділ 5. Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ для високовольтної мережі

Розділ 6. Вибір електричних апаратів високої напруги

Розділ 7. Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб

Розділ 8. Вибір електричних схем підключення лічильників електроенергії та вибір трансформаторів струму та напруги

Розділ 9. Розробка заходів з економії електроенергії в електроустановках (згідно варіанту).

Висновки

Список використаних джерел

В наведений вище зміст можуть бути внесені зміни, що узгоджуються з керівником курсового проекту.

Курсовий проект повинен містити обов'язкові складові частини, що розташовуються в наступній послідовності:

1. Титульний аркуш (Додаток А).
2. Завдання на курсовий проект (Додаток Б).
3. Список умовних позначень (у разі потреби).
4. Зміст.
5. Вступ.
7. Основна частина.
8. Висновки.
9. Список використаних джерел.
10. Додатки (за необхідності).

Зміст подають на початку курсового проекту. Він містить найменування та номери початкових сторінок усіх розділів, підрозділів та пунктів, а також вступу, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків.

Список умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів подається у вигляді окремого списку, якщо в курсовому проекті вжита специфічна термінологія, а також використано маловідомі скорочення, нові символи, позначення і таке інше. Перелік слід друкувати у вигляді двох колонок, в яких зліва за алфавітом наводять скорочення чи символ, а справа – їх детальну розшифровку або пояснення. Наприклад:

ЕПП – електропостачання промислового підприємства;

ТП – трансформаторна підстанція;

РП – розподільчий пункт.

Вступ розкриває сутність проекту, містить вихідні дані для розробки теми, обґрунтування необхідності проведення розрахунків.

Основна частина курсового проекту складається з розділів, підрозділів, пунктів. Кожний розділ починається з нової сторінки.

У *висновках* викладають найбільш важливі результати, одержані в процесі роботи над курсовим проектом. У висновках необхідно звернути увагу на якісні

та кількісні показники здобутих результатів, обґрунтувати достовірність результатів, викласти рекомендації щодо їх використання.

Перелік посилань слід складати в порядку згадування джерел у тексті за їх наскрізною нумерацією. Бібліографічний опис джерел складають відповідно до чинних стандартів з бібліотечної та видавничої справи. Зокрема, потрібну інформацію можна одержати із стандарту ДСТУ ГОСТ 7.1 - 2006 «Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання», ДСТУ 3582-97 «Інформація та документація. Скорочення слів в українській мові у бібліографічному описі. Загальні вимоги та правила».

До додатків доцільно включати допоміжний матеріал, необхідний для повноти сприйняття курсового проекту:

- проміжні математичні доведення, формули і розрахунки;
- таблиці допоміжних цифрових даних;
- ілюстрації допоміжного характеру.

Методику та послідовність виконання розрахунків викладено у відповідних підрозділах даних методичних вказівок.

Графічна частина курсового проекту повинна містити 2 креслення, виконаних на листах формату А1:

1. Схема первинних з'єднань.
2. Ілюстрації до розділу 8 («Розробка заходів з економії електроенергії в електроустановках»).

Графічну частину допускається виконувати на листах формату А4 (за умови погодження з керівником).

Приклад виконання графічної частини наведено в додатку В.

1.2. Вихідні дані до виконання курсового проекту

Вихідними даними до виконання курсового проекту є:

1. Номінальна напруга живлячої мережі (U_M)
2. Кількість приєднань ($N_{пр}$) до шин головної знижувальної підстанції (ГЗП).

3. Розрахункова активна потужність ($P_{пр}$), коефіцієнт використання (K_B) та коефіцієнт реактивної потужності $\text{tg}\varphi_{пр}$ для кожного з приєднань.
4. Число годин використання максимуму електричного навантаження.
5. Тип та характеристики електроспоживача, для якого необхідно розробити заходи з енергозбереження.

Варіанти індивідуальних завдань наведено в додатку Г.

1.3. Вимоги до оформлення курсового проекту

1.3.1. Вимоги до оформлення тексту. Пояснювальну записку роздруковують на листах формату А4 (односторонній друк). Виключенням є лише бланк завдання, який друкується з обох боків одного аркушу. Параметри друку наведені у табл. 1.1.

Таблиця 2.1. Параметри оформлення текстової частини курсового проекту

№ з/п	Параметр	Значення
1	Міжрядковий інтервал	1,5
2	Шрифт	Times New Roman 14 пт
3	Розмір абзацного відступу	1,25-1,27 см
4	Кількість знаків у рядку	70-80
5	Рядків на сторінці	Не більше 40
6	Лівий відступ	25 мм
7	Правий відступ	10 мм
8	Верхній відступ	10 мм
9	Нижній відступ	25 мм

Текст основної частини курсового проекту поділяють на розділи, підрозділи та пункти.

Заголовки структурних частин курсового проекту потрібно оформлювати відповідно до діючого стандарту ДСТУ ГОСТ 7.80:2007 «Система стандартів з інформації, бібліотечної та видавничої справи. Бібліографічний запис. Заголовок. Загальні вимоги та правила».

Заголовки структурних частин курсового проекту “ЗМІСТ”, “ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ”, “ВСТУП”, “РОЗДІЛ”, “ВИСНОВКИ”, “СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ”, “ДОДАТКИ” друкують великими літерами симетрично до тексту. *Заголовки підрозділів* друкують маленькими літерами (крім першої великої) без абзацного відступу симетрично до тексту. Крапку в кінці заголовка не ставлять. Якщо заголовок складається з двох або більше речень, їх розділяють крапкою. Заголовки розділів та підрозділів можуть бути надруковані жирним шрифтом. *Заголовки пунктів* друкують маленькими літерами (крім першої великої) з абзацного відступу в підбір до тексту. В кінці заголовка, надрукованого в підбір до тексту, ставиться крапка.

Між заголовком (за виключенням заголовка пункту) та текстом повинен вставлятися один пустий рядок.

Кожний розділ курсового проекту необхідно починати з нової сторінки. Підрозділи та пункти друкуються в підбір до тексту. Після основного тексту підрозділів та пунктів повинен вставлятися один пустий рядок.

1.3.2. Правила нумерації. Нумерацію сторінок, розділів, підрозділів, пунктів, рисунків, таблиць, формул подають арабськими цифрами без знака “№”.

Першою сторінкою курсового проекту є титульний аркуш, який включають до загальної нумерації сторінок. Другою та третьою сторінками є бланк завдання. На титульному аркуші та бланку завдання номер сторінки не ставлять, на наступних сторінках номер проставляють у верхньому правому кутку.

Зміст та перелік умовних позначень не нумерують. Розділи, підрозділи, пункти, підпункти роботи слід нумерувати арабськими цифрами. Розділи повинні мати порядкову нумерацію в межах викладення суті роботи і позначатися арабськими цифрами без крапки, наприклад: 1, 2, 3, і т.д.

Підрозділи нумерують у межах кожного розділу. Номер підрозділу складається з номера розділу і порядкового номера підрозділу, між якими ставлять крапку, наприклад: “2.3” (третій підрозділ другого розділу). Потім у тому ж рядку йде заголовок підрозділу.

Пункти нумерують у межах кожного підрозділу. Номер пункту складається з порядкових номерів розділу, підрозділу та пункту, між якими ставлять крапки, наприклад: «1.3.2» (другий пункт третього підрозділу першого розділу). Потім у тому ж рядку йде заголовок пункту.

Ілюстрації (фотографії, креслення, схеми, графіки, карти) і таблиці необхідно подавати безпосередньо після тексту (проміж абзацами), де вони згадані вперше, або на наступній сторінці.

Ілюстрації і таблиці, які розміщені на окремих сторінках, включають до загальної нумерації сторінок. Таблицю, малюнок або креслення, розміри якого більше формату А4, враховують як одну сторінку і розміщують у відповідних місцях після згадування в тексті або у додатках.

Ілюстрації позначають словом «Рис.» і нумерують послідовно в межах розділу, за виключенням ілюстрацій, поданих у додатках.

Номер ілюстрації повинен складатися з номера розділу і порядкового номера ілюстрації, між якими ставиться крапка, наприклад: «Рис. 3.1» (перший рисунок третього розділу). Ілюстрації, що подані у додатках, нумеруються аналогічно, вважаючи кожний додаток окремим розділом, наприклад, «Рис. Б.3».

Номер ілюстрації та її назва, а також пояснювальні підписи розміщують під ілюстрацією.

Таблиці нумерують послідовно (за винятком таблиць, поданих у додатках) в межах розділу. Над таблицею розміщують напис «Таблиця» із зазначенням її номера та назву таблиці, які розділяються знаком тире (див. Таблиця 3.1). Номер таблиці повинен складатися з номера розділу і порядкового номера таблиці, між якими ставиться крапка, наприклад: «Таблиця 3.1» (перша таблиця третього розділу).

При переносі частини таблиці на інший аркуш (сторінку) слово «Таблиця», її номер та назву вказують один раз над першою частиною таблиці, над іншими частинами пишуть слова «Продовження таблиці» і вказують номер таблиці, наприклад: «Продовження таблиці 3.1».

Формули в курсовому проекті (якщо їх більше однієї) нумерують у межах розділу. Номер формули складається з номера розділу і порядкового номера формули в розділі, між якими ставлять крапку. Нумери формул пишуть біля правого поля аркуша на рівні відповідної формули в круглих дужках, наприклад: “(3.1)” (перша формула третього розділу).

1.3.3. Вимоги до оформлення формул. При використанні формул необхідно дотримуватися певних техніко-орфографічних правил.

Найбільші, а також довгі і громіздкі формули, котрі мають у складі знаки суми, добутку, диференціювання, інтегрування, розміщують на окремих рядках. Це стосується також і всіх нумерованих формул. Для економії місця кілька коротких однотипних формул, відокремлених від тексту, можна подати в одному рядку, а не одну під одною. Невеликі і нескладні формули, що не мають самостійного значення, вписують всередині рядків тексту.

Рівняння і формули треба виділяти з тексту вільними рядками, тобто вище і нижче кожної формули потрібно залишити по одному вільному рядку. Якщо рівняння не вміщується в один рядок, його слід перенести після знака рівності (=) або після знаків плюс (+), мінус (-), множення (·) чи ділення (:).

Пояснення значень символів і числових коефіцієнтів слід подавати безпосередньо під формулою в тій послідовності, в якій вони подані у формулі. Значення кожного символу і числового коефіцієнта слід подавати з нового рядка. Перший рядок пояснення починають зі слова «де» без двокрапки.

Наприклад:

$$R_i = \sqrt{\frac{P_i}{\pi t}}, \quad (3.4.1)$$

де P_i – сумарне (силове і освітлювальне) електричне навантаження i -го цеху, кВт;

t – масштаб кола, кВт/мм².

Якщо формула займає декілька рядків, її номер розміщується проти останнього рядка.

Формули, що йдуть одна за одною й не розділені текстом, відокремлюють комою.

Нумерувати слід лише ті формули, на які є посилання у наступному тексті. Інші нумерувати не рекомендується. Порядкові номери позначають арабськими цифрами в круглих дужках біля правого відступу сторінки без крапок від формули до її номера.

Якщо формула знаходиться у рамці, то номер такої формули записують ззовні рамки з правого боку навпроти основного рядка формули. Номер формули-дробу подають на рівні основної горизонтальної риски формули.

Номер групи формул, розміщених на окремих рядках і об'єднаних фігурною дужкою (парантезом), ставиться справа від вістря парантеза, яке знаходиться в середині групи формул і звернене в сторону номера.

Загальне правило пунктуації в тексті з формулами таке: формула входить до речення як його рівноправний елемент. Тому в кінці формул і в тексті перед ними розділові знаки ставлять відповідно до правил пунктуації. Двокрапку перед формулою ставлять лише у випадках, передбачених правилами пунктуації:

- а) у тексті перед формулою є узагальнююче слово;
- б) цього вимагає побудова тексту, що передує формулі.

Розділовими знаками між формулами, які йдуть одна за одною і не відокремлені текстом, можуть бути кома або крапка з комою безпосередньо за формулою до її номера. Розділові знаки між формулами при парантезі ставлять всередині парантеза. Після таких громіздких математичних виразів, як визначники і матриці, можна розділові знаки не ставити.

Формула центрується посередині сторінки без абзацного відступу, а її номер по правому краю. Для центрування формули та номеру бажано користуватися табуляцією.

Формули набираються за допомогою основного тексту. Лише у випадку складних формул, які не можливо набрати за допомогою основного тексту, необхідно користуватися редакторами формул Microsoft Equation або MathType.

РОЗДІЛ 2

ВИКОНАННЯ ОКРЕМИХ РОЗДІЛІВ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

2.1 Розрахунок електричних навантажень

В даному розділі курсового проекту необхідно провести розрахунок електричних навантажень на шинах напругою 10 кВ головної знижувальної підстанції (ГЗП).

Вихідними даними до розрахунку є кількість приєднань (фідерів) шин 10 кВ ГЗП та значення їх розрахункової активної потужності (для спрощення розрахунків значення розрахункової активної потужності для кожного з приєднань приймаються рівними між собою).

Визначення активних та реактивних навантажень на шинах напругою 10 кВ проводиться в наступній послідовності.

Визначається значення розрахункової реактивної потужності для кожного з приєднань:

$$Q_{\text{пр}} = P_{\text{пр}} \operatorname{tg}\varphi_{\text{пр}} \quad (2.1)$$

де $P_{\text{пр}}$ – розрахункове активне навантаження приєднання (КЛ 10 кВ);

$Q_{\text{пр}}$ – розрахункове реактивне навантаження приєднання;

$\operatorname{tg}\varphi_{\text{пр}}$ – коефіцієнт реактивної потужності приєднання.

Розрахункове активне та реактивне навантаження на шинах напругою 10 кВ ГЗП визначається за виразами:

$$P_{\text{р}} = K_{\text{o}} N_{\text{пр}} P_{\text{пр}} \quad (2.2)$$

$$Q_{\text{р}} = K_{\text{o}} N_{\text{пр}} Q_{\text{пр}} \quad (2.3)$$

де K_{o} – коефіцієнт одночасності максимумів навантаження,

$N_{пр}$ – кількість приєднань.

Значення K_0 наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Значення коефіцієнта одночасності K_0 для визначення розрахункового навантаження на шинах 10 кВ ГЗП

№ з/п	Середньозважене значення K_B	Кількість приєднань ($N_{пр}$) на шинах 10 кВ ГЗП			
		2 – 4	5 – 8	9 – 25	>25
1	$K_B < 0,3$	0,9	0,8	0,75	0,7
2	$0,3 \leq K_B < 0,5$	0,95	0,9	0,85	0,8
3	$0,5 \leq K_B \leq 0,8$	1,0	0,95	0,9	0,85
4	$K_B > 0,8$	1,0	1,0	0,95	0,9

2.2 Вибір схеми системи електропостачання

Раціональна побудова системи електропостачання об'єктів багато в чому визначається правильним вибором напруги та схеми електропостачання. Як відомо, система електропостачання повинна задовольняти таким вимогам, як економічність, надійність, безпечність та зручність в експлуатації, гнучкість та ін. І багато в чому виконання даних вимог залежить від правильного вибору схеми електропостачання об'єкту.

На вибір напруги і схеми електропостачання впливає велика кількість факторів, основними з яких є:

- розрахункове навантаження;
- значення напруги можливих джерел живлення;
- відстань між джерелом живлення і споживачем;
- необхідний рівень надійності електропостачання та ін.

Вибір напруги системи електропостачання зводиться до визначення такого його стандартного значення, котре задовольняє усім технічним вимогам і є найбільш економічним.

Зазвичай число можливих варіантів вибору обмежується не більше ніж двома або трьома в залежності від існуючих напруг в найближчих можливих точках приєднання до енергосистеми. При цьому на стадії орієнтовних розрахунків величини раціональних напруг можуть бути визначені за

номограмами. Застосування номограм дозволяє попередньо оцінювати можливі варіанти, а у ряді випадків виключити із розглядання деякі із них, не виконуючи при цьому спеціальні розрахунки.

При виборі оптимального варіанта розглядається декілька альтернативних схем електропостачання об'єкту. Кінцеве проектне рішення обирається порівнянням зведених витрат по варіантам.

В процесі виконання курсового проекту дозволяється здійснювати вибір схеми не проводячи техніко-економічні розрахунки.

Приклад спрощеної схеми електропостачання наведено на рис. 2.1.

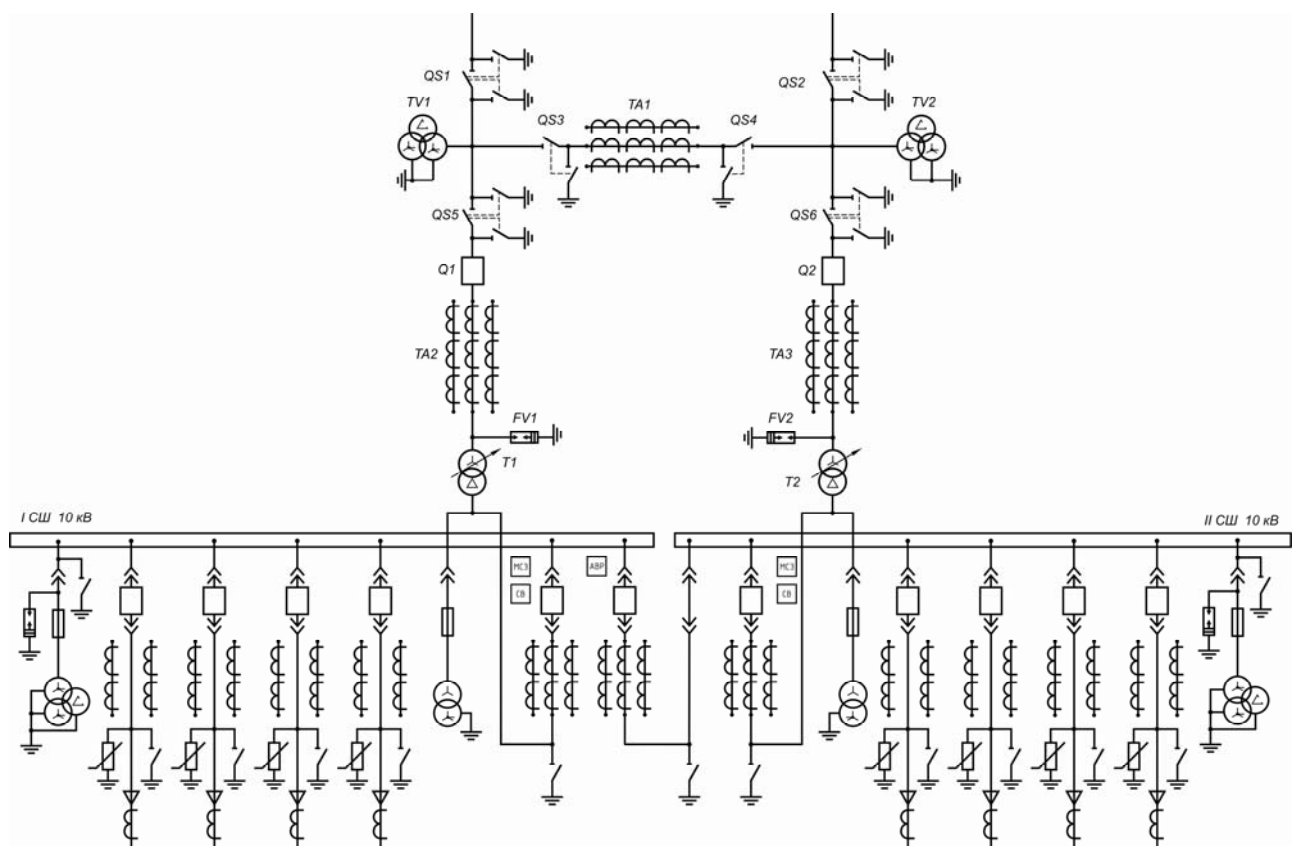


Рис. 2.1. Приклад спрощеної схеми електропостачання

2.3 Вибір кількості та потужності силових трансформаторів

В курсовому проекті необхідно провести розрахунки з вибору силових трансформаторів головної знижувальної підстанції. Силові ГЗП – це знижувальні трансформатори з первинною напругою 35 – 220 кВ, що

призначені для зниження рівня живлячої напруги до номінальних значень напруги внутрішньозаводської системи електропостачання (6 – 10 кВ). На ГЗП великих підприємств застосовують трансформатори потужністю із ряду 32, 40, 63 і 80 МВА. Трансформатори меншої потужності (10, 16 і 25 МВА) застосовуються на менших підприємствах, а також у випадку значного розосередження електричних навантажень по території підприємства (гірничорудні та рудопідготовчі підприємства, кар'єри і т.п.).

Враховуючи високу надійність сучасних конструкцій трансформаторів і мале повторення їх пошкоджень за 20-25 років, ПУЕ допускає аварійні перевантаження силових масляних трансформаторів у розмірі 40% номінальної потужності на час максимуму загальної добової роботи не більше 6 годин на протязі не більше 5 діб. При цьому коефіцієнт заповнення добового графіка в умовах перевантаження трансформатора повинен бути не більше 0,75.

Для більшості трансформаторних ГЗП, що живлять навантаження I і II категорії, на основі досвіду експлуатації і проектування є доцільною установка двох трансформаторів однакової потужності.

При кількості трансформаторів $n \geq 2$ потужність кожного з них вибирається за умовою:

$$S_{\text{ном.т}} \geq \frac{S_{\text{max}} K_{1,2}}{K_{\text{ав}} (n_{\text{т}} - 1)}, \quad (2.4)$$

де $S_{\text{ном.т}}$ – номінальна потужність силового трансформатора ГЗП;

S_{max} – максимальне (розрахункове) значення потужності електричного навантаження підприємства;

n – кількість силових трансформаторів ГЗП;

$K_{1,2}$ – коефіцієнт, що враховує долю споживачів I і II категорії у складі навантаження;

$K_{\text{ав}}$ – коефіцієнт допустимого аварійного перевантаження трансформатора, $K_{\text{ав}} = 1,4$.

Після визначення стандартного значення номінальної потужності трансформаторів $S_{\text{НОМ}}$ перевіряється їх завантаженість у номінальному режимі по коефіцієнту завантаження K_3 :

$$K_3 = \frac{S_{\text{max}}}{n_T S_{\text{НОМ.Т}}} \leq 0,6 \dots 0,7. \quad (2.5)$$

При K_3 , що перевищує допустимі значення, номінальна потужність трансформатора збільшується до найближчого стандартного значення з ряду номінальних потужностей трансформаторів.

Потужність трансформаторів ГЗП, що живлять електроустановки з різкозмінним ударним навантаженням (дугові електропечі, прокатні стани і т. д.), повинна обиратися таким чином, щоб відношення діючого значення струму навантаження до номінального струму трансформатора (кратність) не перевищувало значень, що приведені в стандартах на силові трансформатори, або систематичні ударні навантаження трансформатора струмом більшим за номінальний.

Нижче наведено приклад розрахунку з вибору трансформатора ГЗП. Потужність трансформатора ГЗП заводу, МВА:

$$S_{\text{НОМ.Т}} = \frac{S_{\text{max}} K_{1,2}}{1,4(n_T - 1)} = \frac{14,924 \cdot 0,8}{1,4 \cdot (2 - 1)} = 8,5 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

Обираємо трансформатор ТМН 10000/35 з такими параметрами: $S_{\text{НОМ.Т}} = 10000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $\Delta P_{\text{ХХ}} = 13,5 \text{ кВт}$, $\Delta P_{\text{кз}} = 70 \text{ кВт}$, $u_{\text{к,}\%} = 8\%$.

Коефіцієнт завантаження силового трансформатора в нормальному режимі:

$$K_3 = \frac{S_{\text{max}}}{n_T S_{\text{НОМ.Т}}} = \frac{14924}{2 \cdot 10000} = 0,75.$$

Даний коефіцієнт завантаження близький до рекомендованого у виразі (2.5), тому задовольняє умовам вибору трансформаторів ГЗП.

2.4 Розрахунок струмів коротких замкнень в системі електропостачання

Для розрахунку струмів короткого замикання складається розрахункова схема в однолінійному зображенні (рис. 2.2 а).

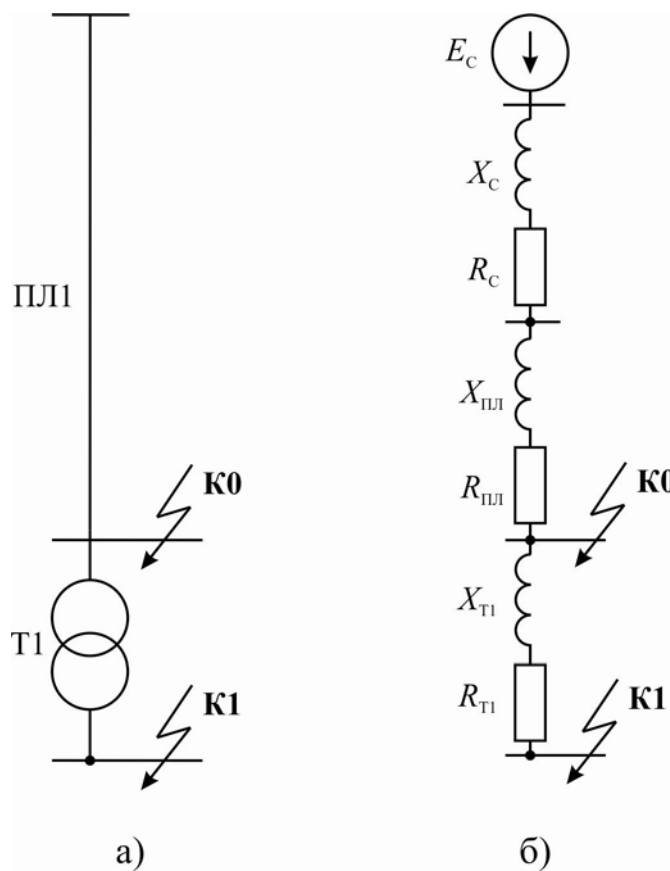


Рис. 2.2. Розрахункова схема (а) та схема заміщення (б) системи електропостачання для розрахунку струмів коротких замикань

В розрахункову схему вводяться всі джерела, які приймають участь в живленні місця короткого замикання (к. з.), та всі елементи системи електропостачання (трансформатори, лінії, реактори), які розташовані між

джерелами та місцем к. з. Синхронні компенсатори, синхронні та асинхронні двигуни враховуються як джерела живлення.

За розрахунковою схемою складається схема заміщення (рис. 2.2 б), де всі елементи замінюються опорами, приведеними до базисних умов. Потім схема заміщення перетворюється і спрощується в еквівалентну схему.

У відповідності зі схемою заміщення, приведеною до найпростішого вигляду з результируючою е. р. с. та результируючим опором, початкове значення періодичної складової струму к. з. визначається за формулою:

$$I_{п0} = I'' = \frac{E''_{\Sigma}}{\sqrt{3} \sqrt{r_{рез}^2 + x_{рез}^2}}, \quad (2.6)$$

де E''_{Σ} – результируюча надперехідна е. р. с, кВ;

$r_{рез}$, $x_{рез}$ – результируючі активний та індуктивний опори, приведені до тієї ступені напруги, де розраховується струм к. з., Ом.

У випадку великої віддаленості точки к. з. від джерел вважається, що точка к. з. живиться від джерела нескінченної потужності, що означає наступне: $S_{к.з.} = \infty$, $x_c = 0$, $E''_{\Sigma} = U_c = \text{const}$.

Ударний струм к. з. визначається за виразом:

$$i_{уд} = \sqrt{2} I'' \left(1 + e^{\frac{-0,01}{T_a}} \right), \quad (2.7)$$

де T_a – стала часу затухання аперіодичної складової струму к. з., що визначається за формулою:

$$T_a = \frac{x_{рез}}{\omega r_{рез}} = \frac{x_{рез}}{2\pi f r_{рез}}. \quad (2.8)$$

Реактивні опори різних елементів схеми електропостачання визначають за наступними формулами:

- опір енергосистеми:

$$x_c = \frac{U_6^2}{S_{к.з.}}; \quad (2.9)$$

- опір двохобмоткового трансформатора:

$$x_{тр} = \frac{u_{к\%}}{100} \cdot \frac{U_6^2}{S_{НОМ}}; \quad (2.10)$$

- опір трансформаторів з розщепленою обмоткою НН:

$$x_{тр(р)} = 0,125 \frac{u_{к\%}}{100} \cdot \frac{U_6^2}{S_{НОМ}}, \quad x_{н1} = x_{н2} = 1,75 \frac{u_{к\%}}{100} \cdot \frac{U_6^2}{S_{НОМ}}; \quad (2.11)$$

- опір реакторів:

$$x_p = \frac{x_{р\%}}{100} \cdot \frac{U_6^2}{\sqrt{3} I_{НОМ} U_{ср}}; \quad (2.12)$$

- опір повітряних та кабельних ліній:

$$x_{л} = x_0 l \frac{U_6^2}{U_{ср}^2}, \quad (2.13)$$

де U_6 – базисна напруга, кВ;

$U_{ср}$ – середня номінальна напруга в місці встановлення даного елемента, кВ;

$S_{НОМ}$ – номінальна потужність даного елемента, МВА;

$I_{НОМ}$ – номінальний струм елемента, кА;

$S_{к.з.}$ – потужність короткого замикання системи, МВА;

$x_{p\%}$ – реактивний опір реактора, в.о.;

$u_{к\%}$ – напруга к.з. трансформатора, в.о.;

x_0 – питомий реактивний опір лінії, Ом/км.

Активні опори елементів системи електропостачання визначаються по розрахунковим кривим або по співвідношенням, наведеним в [11].

Діюче значення усталеного струму к.з. для віддаленої точки к.з. дорівнює надперехідному. В системі електропостачання промислового підприємства к.з. в будь-якій точці можна вважати віддаленим, якщо немає місцевих джерел живлення (синхронних генераторів, високовольтних синхронних та асинхронних двигунів).

Наведемо приклад розрахунку струмів коротких замкнень в системі електропостачання, розрахункова схема та схема заміщення якої зображені на рис. 2.2 а, б відповідно.

Активний та індуктивний опори системи:

$$x_c = \frac{U_c^2}{S_{к.з.}} = \frac{37^2}{2000} = 0,68 \text{ Ом}, \quad r_c = \frac{x_c}{25} = \frac{0,68}{25} = 0,03 \text{ Ом}.$$

Активний та індуктивний опори повітряної лінії 35 кВ, що виконана проводом марки АС 120/19 та має довжину 25 км:

$$r_{пл} = r_{0пл} l_{пл} = 0,249 \cdot 25 = 6,225 \text{ Ом},$$

$$x_{пл} = x_{0пл} l_{пл} = 0,427 \cdot 25 = 10,68 \text{ Ом}.$$

Активний та індуктивний опори силового трансформатора ТМН 10000/35 (приведені до сторони низької напруги):

$$r_T = \frac{\Delta P_{к.з.} U_{ср.ном}^2}{S_{ном.т}^2} \cdot 10^3 = \frac{6,5 \cdot 10,5^2}{10000^2} \cdot 10^3 = 0,07 \text{ Ом},$$

$$x_T = \frac{u_{к,\%}}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном.}}^2}{S_{\text{ном. T}}} \cdot 10^3 = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{10,5^2}{10000} \cdot 10^3 = 0,83 \text{ Ом.}$$

Результуючі активний та індуктивний опори до точки К0:

$$x_{K0} = x_c + x_{\text{пл}} = 0,68 + 10,68 = 11,36 \text{ Ом,}$$

$$r_{K0} = r_c + r_{\text{пл}} = 0,03 + 6,225 = 6,255 \text{ Ом,}$$

Надперехідний струм в точці К0:

$$I''_{K0} = \frac{U_{\text{ср.ном.}}}{\sqrt{3}z_{K0}} = \frac{37}{\sqrt{3} \cdot 12,97} = 1,65 \text{ кА.}$$

Стала часу в точці К0:

$$T_{a0} = \frac{x_{K0}}{\omega r_{K0}} = \frac{11,36}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 6,255} = 0,0058 \text{ с.}$$

Ударний коефіцієнт в точці К0:

$$k_{\text{уд0}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a0}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0058}} = 1,178.$$

Ударний струм в точці К0:

$$i_{\text{уд0}} = \sqrt{2}k_{\text{уд0}}I''_{K0} = \sqrt{2} \cdot 1,178 \cdot 1,65 = 2,75 \text{ кА.}$$

Результуючі активний та індуктивний опори до точки К0, приведені до сторони низької напруги ГЗП:

$$x'_{K0} = x_{K0} \left(\frac{U_{\text{ср.нн}}}{U_{\text{ср.вн}}} \right)^2 = 11,36 \cdot \left(\frac{10,5}{37} \right)^2 = 0,915 \text{ Ом};$$

$$r'_{K0} = r_{K0} \left(\frac{U_{\text{ср.нн}}}{U_{\text{ср.вн}}} \right)^2 = 6,255 \cdot \left(\frac{10,5}{37} \right)^2 = 0,504 \text{ Ом};$$

Результуючі активний та індуктивний опори до точки К1:

$$x_{K1} = x'_{K0} + x_T = 0,915 + 0,83 = 1,745 \text{ Ом};$$

$$r_{K1} = r'_{K0} + r_T = 0,504 + 0,07 = 0,574 \text{ Ом};$$

Надперехідний струм в точці К1:

$$I''_{K1} = \frac{U_{\text{ср.ном.}}}{\sqrt{3}z_{K1}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 1,873} = 3,3 \text{ кА.}$$

Стала часу в точці К1:

$$T_{a1} = \frac{x_{K1}}{\omega r_{K1}} = \frac{1,745}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,574} = 0,0097 \text{ с.}$$

Ударний коефіцієнт в точці К1:

$$k_{\text{уд1}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{T_{a1}}} = 1 + e^{\frac{-0,01}{0,0097}} = 1,357.$$

Ударний струм в точці К1:

$$i_{уд1} = \sqrt{2}k_{уд1}I''_{К1} = \sqrt{2} \cdot 1,357 \cdot 3,3 = 6,33 \text{ кА.}$$

Тепловий імпульс від струму к. з.:

$$B_{к1} = I''_{К1}^2 (t_{р.з.мин} + T_{ал}) = 3,3^2 \cdot (0,525 + 0,0097) = 5,82 \text{ кА}^2\text{с.}$$

2.5 Вибір електричних апаратів високої напруги

В курсовому проекті необхідно здійснити вибір таких електричних апаратів: високовольтні вимикачі в розподільчих пристроях (РП) усіх класів напруг, роз'єднувачі, розрядники, обмежувачі перенапруги.

2.5.1. Вибір високовольтних вимикачів. Область застосування тих чи інших типів вимикачів залежить від конкретних умов їх експлуатації. При проектуванні системи електропостачання рекомендується надавати перевагу новим типам вимикачів, що виробляються вітчизняною чи зарубіжною промисловістю.

Умови вибору високовольтних вимикачів наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Умови вибору високовольтних вимикачів

№ з/п	Параметр вимикача	Умови вибору
1	Номінальна напруга	$U_{уст} \leq U_{ном}$
2	Довготривалий номінальний струм	$I_{роб.форс.} \leq I_{ном}$
3	Відключаюча здатність:	
	- симетричний струм	$I''_{К0} \leq I_{дин.ст}$
	- асиметрична складова	$i_{ат} \leq \sqrt{2}\beta_{н} I_{відкл.ном}$
	- повний струм	$\sqrt{2}I_{пт} + i_{ат} \leq \sqrt{2}I_{ном.відкл} (1 + \beta_{н})$
4	Динамічна стійкість:	
	- симетричний струм	$I_{пт} \leq I_{дин.ст.}$
	- ударний струм	$i_{уд} \leq 1,8\sqrt{2}I_{дин.ст.}$
5	Термічна стійкість	$B_{к} \leq I_{ТН}^2 t_{ТН}$

В табл. 2.2:

$I_{пт}$ – періодична складова струму к. з. в момент часу τ розходження контактів (приймають рівним $I_{пт} = I''_{к.з.}$);

$i_{ат}$ – аперіодична складова струму к. з. для моменту часу $\tau = t_{в} + t_{рз.мін}$;

$t_{в}$ – власний час відключення вимикача;

$t_{рз.мін}$ – мінімальний час спрацювання релейного захисту.

Нижче наведено приклад розрахунків із вибору ввідного вимикача напругою 35 кВ (табл. 2.3).

Таблиця 2.3. Результати вибору ввідного вимикача напругою 35 кВ

Параметр вимикача	Умови вибору	Розрахунок
Номінальна напруга	$U_{уст} \leq U_{ном}$	$35 \leq 35$
Довготривалий номінальний струм	$I_{роб.форс.} \leq I_{ном}$	$343,33 \leq 1600$
Відключаюча здатність:		
- симетричний струм	$I''_{к0} \leq I_{дин.ст}$	$1,65 \leq 20$
- асиметрична складова	$i_{ат} \leq \sqrt{2}\beta_{н} I_{відкл.ном}$	$0 \leq 11,31$
- повний струм	$\sqrt{2}I_{пт} + i_{ат} \leq \sqrt{2}I_{ном.відкл} (1 + \beta_{н})$	$1,41 \cdot 1,65 + 0 = 2,33 \leq 1,41 \cdot 20 \cdot (1 + 0,4) = 39,6$
Динамічна стійкість:		
- симетричний струм	$I_{пт} \leq I_{дин.ст.}$	$1,65 \leq 52$
- ударний струм	$i_{уд} \leq 1,8\sqrt{2}I_{дин.ст.}$	$2,75 \leq 132,7$
Термічна стійкість	$B_{к} \leq I_{ТН}^2 t_{ТН}$	$2,93 \leq 1200$

Найменший час від моменту початку к. з. до моменту розходження контактів вимикача:

$$\tau = t_{рз.мін} + t_{с.в} = 0,02 + 0,05 = 0,07 \text{ с.}$$

Аперіодична складова струму к. з. для моменту розходження контактів:

$$i_{ат} = \sqrt{2} I_{K0}'' e^{\frac{-\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 1,65 \cdot e^{\frac{-0,07}{0,0058}} \approx 0 \text{ кА.}$$

Тепловий імпульс від струму к. з.:

$$B_k = I_{K0}''^2 (t_{с.в.} + t_{рз.мах} + T_a) = 1,65^2 (0,05 + 1,02 + 0,0058) = 2,93 \text{ кА}^2\text{с.}$$

Таким чином, обираємо до встановлення вакуумний вимикач типу ВР35НС-35-20/1600 У1.

Технічні дані вимикача: $U_{ном} = 35 \text{ кВ}$; $U_{мах.роб} = 40,5 \text{ кВ}$; $I_{ном} = 1600 \text{ А}$;
 $I_{відкл} = 20 \text{ кА}$; $t_{ТН} = 3 \text{ с}$; $I_{ТН} = 20 \text{ кА}$; $I_{дин.ст.} = 52 \text{ кА}$; $t_{відкл.вл} = 0,05 \text{ с}$;
 $t_{відкл.заг} = 0,065 \text{ с}$; $\beta_n = 0,4$.

Вибір секційного вимикача номінальною напругою 35 кВ проводиться аналогічно.

Приклад розрахунків із вибору ввідного вимикача напругою 10 кВ наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4. Результати вибору ввідного вимикача напругою 10 кВ

Параметр вимикача	Умови вибору	Розрахунок
Номінальна напруга	$U_{уст} \leq U_{ном}$	$10 \leq 11$
Довготривалий номінальний струм	$I_{роб.форс.} \leq I_{ном}$	$860,8 \leq 1000$
Відключаюча здатність:		
- симетричний струм	$I_{K0}'' \leq I_{дин.ст.}$	$4,25 \leq 20$
- асиметрична складова	$i_{ат} \leq \sqrt{2} \beta_n I_{відкл.ном}$	$0 \leq 11,31$
- повний струм	$\sqrt{2} I_{пт} + i_{ат} \leq \sqrt{2} I_{ном.відкл} (1 + \beta_n)$	$1,41 \cdot 4,25 + 0 = 6,01 \leq 1,41 \cdot 20 \cdot (1 + 0,4) = 39,6$
Динамічна стійкість:		
- симетричний струм	$I_{пт} \leq I_{дин.ст.}$	$4,25 \leq 52$
- ударний струм	$i_{уд} \leq 1,8 \sqrt{2} I_{дин.ст.}$	$8,75 \leq 132,7$
Термічна стійкість	$B_k \leq I_{ТН}^2 t_{ТН}$	$22,61 \leq 1200$

Найменший час від моменту початку к. з. до моменту розходження контактів вимикача:

$$\tau = t_{\text{pz.min}} + t_{\text{с.в}} = 0,5 + 0,042 = 0,542 \text{ с.}$$

Аперіодична складова струму к. з. для моменту розходження контактів:

$$i_{a\tau} = \sqrt{2} I''_{K0} e^{\frac{-\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 2,25 \cdot e^{\frac{-0,542}{0,0058}} \approx 0 \text{ кА.}$$

Тепловий імпульс від струму к. з.:

$$B_k = I''_{K0}{}^2 (t_{\text{с.в.}} + t_{\text{pz.max}} + T_a) = 4,25^2 (0,042 + 1,2 + 0,0097) = 22,61 \text{ кА}^2\text{с.}$$

Обираємо до встановлення вакуумний вимикач типу ВР1-10-20/1000 У2.

Технічні дані вимикача: $U_{\text{ном}} = 11 \text{ кВ}$; $U_{\text{max.роб}} = 12 \text{ кВ}$; $I_{\text{ном}} = 1000 \text{ А}$;
 $I_{\text{відкл}} = 20 \text{ кА}$; $t_{\text{ТН}} = 3 \text{ с}$; $I_{\text{ТН}} = 20 \text{ кА}$; $I_{\text{дин.ст.}} = 52 \text{ кА}$; $t_{\text{відкл.вл}} = 0,042 \text{ с}$;
 $t_{\text{відкл.заг}} = 0,057 \text{ с}$; $\beta_n = 0,4$.

Вибір секційного вимикача та вимикачів на відхідних лініях номінальною напругою 10 кВ проводиться аналогічно.

2.5.2. Вибір роз'єднувачів. Роз'єднувачами називають комутаційні апарати, призначені для відключення і включення ланцюгів без струму і для створення видимого розриву в ланцюгу. Рівень ізоляції розриву (проміжку) повинен відповідати максимальній імпульсній напрузі при повній хвилі.

В залежності від конструкції розрізняють рублячі, поворотні, коливаючі і пантографічні роз'єднувачі.

Умови вибору роз'єднувачів подібні до умов вибору високовольтних вимикачів. Різниця полягає лише у відсутності необхідності перевірки їх на відключаючу здатність.

В табл. 2.5 наведено умови вибору роз'єднувача.

Таблиця 2.5. Умови вибору роз'єднувача

№ з/п	Параметр роз'єднувача	Умови вибору
1	Номінальна напруга	$U_{уст} \leq U_{ном}$
2	Довготривалий номінальний струм	$I_{роб.форс.} \leq I_{ном}$
3	Динамічна стійкість:	
	- симетричний струм	$I_{пт} \leq I_{дин.ст.}$
	- ударний струм	$i_{уд} \leq 1,8\sqrt{2}I_{дин.ст.}$
4	Термічна стійкість	$B_k \leq I_{ТН}^2 t_{ТН}$

Приклад розрахунків із вибору роз'єднувача напругою 35 кВ наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6. Результати вибору роз'єднувача номінальною напругою 35 кВ

Параметр роз'єднувача	Умови вибору	Розрахунок
Номінальна напруга	$U_{уст} \leq U_{ном}$	$35 \leq 35$
Довготривалий номінальний струм	$I_{роб.форс.} \leq I_{ном}$	$343,33 \leq 1600$
Динамічна стійкість:		
- симетричний струм	$I_{пт} \leq I_{дин.ст.}$	$1,65 \leq 63$
- ударний струм	$i_{уд} \leq 1,8\sqrt{2}I_{дин.ст.}$	$2,75 \leq 132,7$
Термічна стійкість	$B_k \leq I_{ТН}^2 t_{ТН}$	$2,79 \leq 1200$

Тепловий імпульс від струму к.з.:

$$B_k = I_{к0}^2 (t_{рз.мах} + T_a) = 1,65^2 (1,02 + 0,0058) = 2,79 \text{ кА}^2\text{с.}$$

Обираємо до встановлення роз'єднувач типу РНДЗ.2-35/1000 У1.

2.5.3. Вибір розрядників та обмежувачів перенапруги. Для захисту обладнання підстанції від атмосферних та внутрішніх перенапруг застосовуються розрядники або обмежувачі перенапруги.

Установка вентильних розрядників необхідна на усіх вводах силових трансформаторів, при цьому не допустимо встановлення комутаційних апаратів між розрядниками і вводом.

Вентильні розрядники підключають до контуру заземлення підстанції по найближчому шляху.

Основним і головним критерієм вибору розрядника (або обмежувача перенапруги) є відповідність значення номінальної напруги мережі значенню номінальної напруги розрядника (обмежувача перенапруги): $U_{уст} \leq U_{ном}$.

Приклад вибору розрядників та обмежувачів перенапруги наведено нижче (табл. 2.7).

Таблиця 2.7. Результати вибору розрядника напругою 35 кВ

Тип	$U_{ном}$, кВ	Номінальна допустима напруга (діюче знач.), кВ	Пробивна напруга при $f = 50$ Гц		Імпульс пробивної напруги, не більше, кВ	Найбільша залишкова напруга, кВ, при імпульсі струму з довжиною фронту хвилі 8 мкс та амплітуді, А		
			Не менше	Не більше		3000	5000	10000
РВС 35У1	35	40,5	78	98	125	122	130	143

На напругу 10 кВ приймаємо до встановлення обмежувачі перенапруги ОПН-10/420/12-УХЛ1 з наступними технічними характеристиками:

- найбільша тривала допустима напруга: 12 кВ.
- номінальна напруга обмежувача – 10.5 кВ.
- номінальний розрядний струм – 200 А

2.6 Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб

Власні потреби підстанції є одним з найбільш відповідальних споживачів, тому що їх робота визначає нормальне функціонування всієї підстанції, а як наслідок, і надійність електропостачання інших споживачів.

Склад споживачів власних потреб підстанції залежить від типу підстанції, потужності трансформаторів, наявності синхронних компенсаторів й типу обладнання.

До електричних приймачів системи власних потреб підстанції відносяться: електродвигуни обдуву силових трансформаторів й синхронних компенсаторів; кола оперативного струму; пристрої підігріву вимикачів, від'єднувачів, короткозамикачів й шаф КРПЗ з встановленими в них електричними апаратами і приладами; робоче та аварійне освітлення й опалення; система пожежогасіння; системи релейного захисту, автоматики і телемеханіки; джерела оперативного струму.

Найбільш відповідальними споживачами власних потреб підстанцій є кола оперативного струму, системи релейного захисту, зв'язку і телемеханіки, системи охолодження трансформаторів, системи пожежної безпеки, електроприймачі компресорної.

Для електропостачання системи власних потреб підстанцій використовують знижувальні трансформатори із вторинною напругою 380/220 В. із заземленою нейтраллю. Номінальну потужність трансформатора власних потреб (ТВП) вибирають по розрахунковій потужності споживачів власних потреб.

Розрахункове навантаження трансформаторів власних потреб визначається за виразом:

$$S_p = K_{\text{п}} S_{\text{уст}} \text{ ,} \quad (2.14)$$

де $K_{\text{п}}$ – коефіцієнт попиту, приймається $K_{\text{п}} = 0,7 \dots 0,8$;

$S_{\text{уст}}$ – сумарна встановлена потужність споживачів власних потреб підстанції.

На усіх двотрансформаторних підстанціях 35 – 750 кВ передбачається встановлення двох ТВП, які приєднуються до різних джерел живлення. На стороні низької напруги ТВП повинні працювати окремо, кожний на свою секцію, з АВР на міжсекційному зв'язку.

Потужність ТВП підстанції вибирається з розрахунку, щоб коефіцієнт їх завантаження в нормальному режимі складав $K_3 = 0,7...0,75$.

Для живлення оперативних кіл підстанції застосовується змінний та постійний струм.

Постійний оперативний струм застосовується на усіх підстанціях 330-750 кВ й на підстанціях з розподільвальним пристроєм 110-220 кВ із збірними шинами. Рекомендується також застосування постійного оперативного струму на підстанціях 110-220 кВ, якщо кількість вимикачів ВН три і більше, а також при наявності повітряних вимикачів.

Оперативний змінний струм застосовується на підстанціях 110-220 кВ без вимикачів на стороні ВН, а також на підстанціях 35/6...10 кВ з вимикачами на стороні ВН. Застосування випрямленого оперативного струму можливе на підстанціях 110-220 кВ з вимикачами на стороні ВН, якщо виключена можливість одночасного увімкнення більш ніж одного вимикача.

Схема підключення трансформаторів власних потреб для випадку змінного оперативного струму наведена на рис. 2.3.

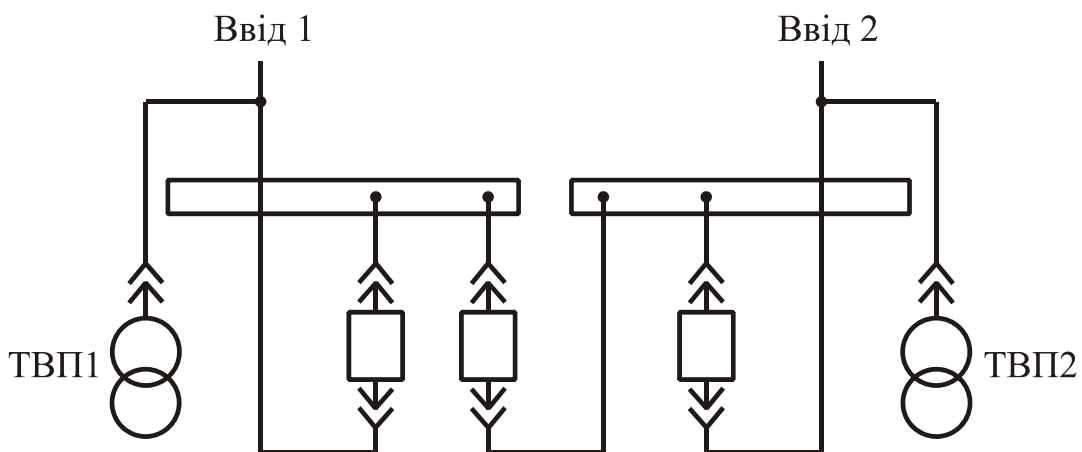


Рис. 2.3. Схема під'єднання ТВП на ГЗП зі змінним оперативним струмом

При виконанні курсового проекту для визначення навантаження ТВП можливо користуватись даними, що наведені в табл. 2.8.

Таблиця 2.8. Активна потужність споживачів власних потреб підстанції

№ з/п	Споживачі	Встановлена потужність, кВт
1	Електродвигуни обдуву трансформаторів номінальною потужністю:	
	16-40МВА	6-8
	60 - 80 МВА	8-12
	80 - 250 МВА	12-18
2	Пристрої підігріву вимикачів 110-220 кВ	1,75
3	Пристрої підігріву вимикачів 35 кВ	1,15
4	Обігрів:	
	шафа КРПЗ	0,6
	шафа релейної апаратури	0,5
5	Опалення і освітлення приміщення оперативного персоналу	5-6
6	Зовнішнє освітлення	4-5
7	Споживання оперативними колами	2-3
8	Компресорна установка	13-20

В табл. 2.9 наведено числовий приклад розрахунку із вибору ТВП.

Таблиця 2.9. Вибір трансформаторів власних потреб

№ з/п	Споживачі	$P_{ном},$ кВт	$n,$ шт.	$P_{сум},$ кВт	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	$P_{уст},$ кВт	$Q_{уст},$ квар
1	Електродвигуни обдуву трансформаторів 10 МВА	4	4	16	0,8	0,75	16	12
2	Пристрої підігріву вимикачів 35 кВ	3	3	9	0,97	0,25	9	2
3	Пристрої підігріву комірок КРП	0,6	34	20,4	0,97	0,25	20,4	5
4	Опалення та освітлення приміщення оперативного персоналу	6	3	18	0,97	0,25	18	5
5	Зовнішнє освітлення	4,5	4	18	0,97	0,25	18	5
6	Споживання оперативними колами	3	6	18	0,97	0,25	18	5
<i>Всього</i>							99,4	34

Сумарне встановлене навантаження ТВП:

$$S_{\text{уст}} = \sqrt{P_{\text{уст}}^2 + Q_{\text{уст}}^2} = \sqrt{99,4^2 + 34^2} = 105,05 \text{ кВА.}$$

Розрахункова потужність ТВП:

$$S_p = K_{\text{п}} S_{\text{уст}} = 0,8 \cdot 105,05 = 84,04 \text{ кВА.}$$

Обираємо до встановлення 2 трансформатори власних потреб типу ТМ-63/10. Технічні дані ТВП: ТМ-63/10: $S_{\text{ном}} = 63 \text{ кВА}$; $U_{\text{ВН}} = 10 \text{ кВ}$; $U_{\text{НН}} = 0,4 \text{ кВ}$.

Коефіцієнт завантаження ТВП:

$$K_3 = \frac{S_p}{n_{\text{ТВП}} S_{\text{ном}}} = \frac{84,04}{2 \cdot 63} = 0,67.$$

2.7 Вибір електричних схем підключення лічильників електроенергії та вибір трансформаторів струму та напруги

Схеми підключення лічильників електроенергії різняться в залежності від типу обліку (комерційний або технічний), а також від типу вимірювальних приладів і місця їх встановлення (номінальної напруги мережі в точці приєднання лічильника). На рис. 2.4 в якості прикладу наведена схема підключення лічильника типу МТХ 3G20 RG до мережі напругою вище 1 кВ, що може застосовуватись як для технічного, так і для комерційного обліку.

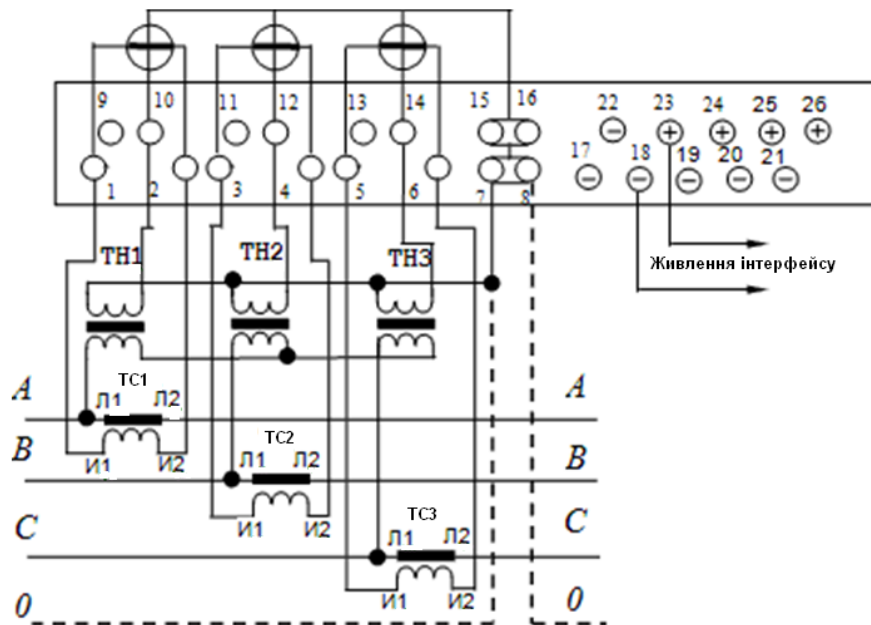


Рис. 2.4. Схема підключення лічильника типу МТХ 3G20 до високовольтної мережі

Як видно з рис. 2.4, для підключення приладів обліку до мережі з напругою вище 1 кВ застосовуються вимірювальні трансформатори струму та напруги.

Нижче наведено короткі теоретичні відомості з вибору даних вимірювальних трансформаторів.

2.7.1. Вибір трансформаторів струму Умови вибору трансформаторів струму наведено в табл. 2.10.

Таблиця 2.10. Умови вибору трансформаторів струму

№ з/п	Параметр трансформатора струму	Умова вибору
1	Номінальна напруга	$U_{уст} \leq U_{ном}$
2	Довготривалий номінальний струм	$I_{роб.форс} \leq I_{1ном}$
3	Динамічна стійкість	$i_{уд} \leq i_{дин} = \sqrt{2}k_{ед}I_{1ном}$
4	Термічна стійкість	$B_k \leq I_{тер}^2 t_{тер} = (k_T I_{1ном})^2 t_{тер}$
5	Вторинне навантаження	$Z_2 \leq Z_{2ном}$

В табл. 2.10:

$k_{ед}$ – кратність електродинамічної стійкості по каталогу;

$I_{1\text{ном}}$ – номінальний первинний струм трансформатора струму;

Якщо в каталозі немає даних про $k_{\text{ед}}$, тоді перевірка на електродинамічну стійкість здійснюється за виразом : $i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин.ст}}$;

$k_{\text{т}}$ – кратність термічної стійкості по каталогу;

$t_{\text{тер}}$ – час термічної стійкості по каталогу,

$Z_{2\text{ном}}$ – номінальне вторинне навантаження ТС в заданому класі точності.

Для перевірки за умовою вторинного навантаження необхідно привести схему включення приладів:

$$Z_2 = Z_{\text{прил}} + R_{\text{пров}} + R_{\text{к}}, \quad (2.15)$$

де $Z_{\text{прил}}$ – опір приладів послідовно підключених до вторинних кіл:

$$Z_{\text{прил}} = S_{\text{прил}} / I_{2\text{ном}}^2; \quad (2.16)$$

$R_{\text{к}}$ – опір контактів, в розрахунках приймають $R_{\text{к}} = 0,05 \dots 0,1$ Ом;

$R_{\text{пров}}$ – опір з'єднувальних проводів.

Щоб ТС працював в обраному класі точності (як правило, 0,5), необхідно дотримуватися умови:

$$Z_{\text{прил}} + R_{\text{пров}} + R_{\text{к}} \leq Z_{2\text{ном}}. \quad (2.17)$$

Звідки опір проводів:

$$R_{\text{пров}} \leq Z_{2\text{ном}} - Z_{\text{прил}} - R_{\text{к}}. \quad (2.18)$$

З формули (2.18) легко визначити переріз з'єднувальних проводів, при якому трансформатор струму буде працювати в заданому класі точності:

$$F_{\text{пр}} = \frac{\rho l_{\text{розр}}}{R_{\text{пров}}}, \quad (2.19)$$

де ρ – питомий опір матеріалу проводу, Ом·мм²/м;

$l_{\text{розр}}$ – розрахункова довжина проводу, що залежить від схеми з'єднання ТС та відстані від приладів до ТС, м.

Нижче наведено приклад вибору трансформаторів струму, що встановлюються на вводах 10 кВ і призначені для приєднання приладів комерційного обліку. В якості вихідних даних було використано результати розрахунків, що наведені в [1].

В табл. 2.11 наведено результати розрахунку параметрів по вибору трансформаторів струму.

Таблиця 2.11. Результати розрахунку параметрів по вибору трансформаторів струму

№ з/п	Параметр ТС	Умова вибору	Розрахунок
1	Номінальна напруга	$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}$	$10 \leq 10$
2	Довготривалий номінальний струм	$I_{\text{роб.форс}} \leq I_{1\text{ном}}$	$860,8 \leq 1000$
3	Динамічна стійкість	$i_{\text{уд}} \leq i_{\text{дин}} = \sqrt{2}k_{\text{ед}}I_{1\text{ном}}$	$8,75 \leq 81$
4	Термічна стійкість	$B_{\text{к}} \leq I_{\text{тер}}^2 t_{\text{тер}}$	$22,61 \leq 2967,7$
5	Вторинне навантаження	$Z_2 \leq Z_{\text{ном}}$	$0,2 \leq 0,4$

Обираємо до встановлення трансформатор струму ТЛК-10/1000. Його технічні характеристики: $U_{\text{ном}} = 10$ кВ, $I_{1\text{ном}} = 1000$ А, $I_{\text{дин.ст.}} = 81$ кА, $I_{\text{терм.ст.}} = 31,5$ кА, $Z_{2\text{ном}} = 0,4$ Ом, $t_{\text{ТН}} = 3$ с.

Результати розрахунку вторинного навантаження ТС наведено в табл. 2.12.

Таблиця 2.12. Результати розрахунку вторинного навантаження ТС

Назва обладнання	Тип	$S_{\text{прил}}, \text{ВА}$		
		Фаза А	Фаза В	Фаза С
Амперметр	Е 377	0,1		0,1
Прилад обліку	МТХ 3G20	0,1	0,1	0,1
Всього на вводі		0,2	0,1	0,2

Опір приладів, що послідовно приєднані до вторинних кіл ТС:

$$Z_{\text{прил}} = \frac{S_{\text{прил}}}{I_{2\text{ном}}^2} = \frac{0,2}{5^2} = 0,01 \text{ Ом.}$$

Опір проводів, при яких ТС буде працювати в заданому класі точності:

$$R_{\text{пров}} = Z_{2\text{ном}} - Z_{\text{прил}} - R_{\text{к}} = 0,4 - 0,01 - 0,1 = 0,29 \text{ Ом.}$$

Переріз проводів:

$$F_{\text{пр}} = \frac{\rho l_{\text{розр}}}{R_{\text{пров}}} = \frac{0,0283 \cdot 20}{0,29} = 1,95 \text{ мм}^2.$$

Обираємо до встановлення контрольний кабель типу АКРВГ-6.

Опір контрольного кабелю:

$$R_{\text{пров}} = \frac{\rho l_{\text{розр}}}{F_{\text{пр}}} = \frac{0,0283 \cdot 20}{6} = 0,09 \text{ Ом.}$$

Вторинне навантаження трансформатора струму, Ом:

$$Z_2 = Z_{\text{прил}} + R_{\text{пров.ст}} + R_{\text{к}} = 0,01 + 0,09 + 0,1 = 0,2 \text{ Ом.}$$

2.7.2. Вибір трансформаторів напруги. Трансформатори напруги (ТН) вибираються по наступним умовам:

1. По напрузі установки:

$$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}} ; \quad (2.20)$$

2. По конструкції та схемі з'єднання обмоток.

3. По класу точності.

4. По вторинному навантаженню:

$$S_{2\Sigma} \leq S_{2\text{ном}} , \quad (2.21)$$

де $S_{2\text{ном}}$ – номінальне навантаження ТН у вибраному класі точності.

Сумарне навантаження усіх приладів $S_{2\Sigma}$, підключених до ТН визначається за виразом:

$$S_{2\Sigma} = \sqrt{(\sum P_{\text{прил}})^2 + (\sum Q_{\text{прил}})^2} . \quad (2.22)$$

В мережах з ефективно заземленою нейтраллю використовуються трансформатори напруги типу НКФ або емнісні дільники напруги НДЕ. В мережах з ізольованою нейтраллю, де потрібний контроль ізоляції мережі встановлюються трифазні ТН типу НТМИ, НАМИ або групи з трьох однофазних трансформаторів ЗНОМ, ЗНОЛ.

В якості прикладу нижче наведено розрахунки з вибору ТН для схеми електропостачання, що розглядалась в [1].

Результати розрахунку вторинного навантаження трансформатора напруги наведено в табл. 2.13.

Таблиця 2.13. Результати розрахунку вторинного навантаження трансформатора напруги

№ з/п	Прилад	Тип	S, ВА	К-сть обмот.	К-сть прил.	S _{2Σ} , ВА
1	Вольтметр	Е 377	1	1	1	1
2	Ватметр	Д-335	1,5	1	1	1,5
3	Варметр	Д-304	2	1	1	2
4	Багатофункц. лічильник	МТХ 3G20	7,5	3	1	22,5
5	Багатофункц. лічильник	МТХ 3G30	7,5	2	14	210
6	Всього					237

Приймаємо до встановлення трансформатор напруги типу НАМИ-10-66-У3 з технічними характеристиками: $U_{\text{ном}} = 10$ кВ, $S_{\text{ном}} = 200$ ВА, клас точності – 0,5.

2.8 Розробка заходів з економії електроенергії в дугових сталеплавильних печах

2.8.1. Загальні положення. Питома витрата електроенергії на виплавку 1 тони сталі в дуговій сталеплавильній електропечі:

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

де P – підведена до трансформатора (з боку ВН) потужність, кВт;

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

T_2 – період розплавлення металу, год.;

T_3 – період кипіння і рафінування, год.;

q – маса садки, т;

ΔP_1 – потужність теплових втрат в період простою, кВт;

ΔP_2 – потужність теплових втрат печі в період розплавлення металу, кВт;

ΔP_3 – потужність теплових втрат в період кипіння і рафінування, кВт;

$$\eta_{\text{ел}} = \frac{P_{\text{д}}}{p} \cdot 100\% = \frac{P - p}{p} \cdot 100\%;$$

$P_{\text{д}}$ – потужність дуги, кВт;

p – втрати електричної потужності в дроселі, трансформаторі, провідниках, в електродах, кВт;

ΔE_T – теоретично необхідна витрата електроенергії на розплавлення 1 т металу, кВт·год.

Із аналізу приведенного виразу можливо зробити наступні висновки:

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

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

в) витрата енергії, обумовлена простоем печі, також обернено пропорційна масі садки і прямо пропорційна часу простою печі, тобто в значній мірі залежить від способу завантаження печі.

Таким чином, заходи по економії енергії повинні в першу чергу передбачати:

- підвищення маси садки і вдосконалення підготовки шихти;
- зниження електричних і теплових втрат печі;
- скорочення простоїв печі;
- оптимізацію електричних і технологічних режимів роботи печі.

2.8.2. Підвищення маси садки і вдосконалення підготовки шихти.

Питомі витрати електроенергії залежать від маси садки, із-за цього доцільно перевантажувати печі по ємності, збільшуючи порівняно з номінальною, масу завалки. Можливе перевантаження печі по ємності залежить від потужності пічного трансформатора, розмірів ванни печі, стійкості футерівки. В залежності від цих факторів для кожної печі повинно бути вибрано оптимальне значення перевантаження (табл. 2.14).

Таблиця 2.14. Оптимальна маса завалки, т, дугових сталеплавильних печей

№ з/п	Номінальна ємність печі, т	При плавці рядових сталей	При плавці сталей підвищеної якості
1	0,5	0,8-0,9	0,7-0,8
2	1,5	2,3-2,5	2,0-2,2
3	3	4,4-5,0	3,8-4,2
4	5	7,5-8,0	6,0-7,0
5	8	11,0-13,0	9,6-11,0
6	10	14-16	дек.13
7	15	20-23	18-20
8	20	28-31	24-28
9	30	40-42	35-38
10	40	50-55	46-50
1	0,5	0,8-0,9	0,7-0,8
2	1,5	2,3-2,5	2,0-2,2

Для визначення ефективності перевантаження печі можливо користуватися залежністю зміни питомих витрат електроенергії від маси плавки (рис 2.5).

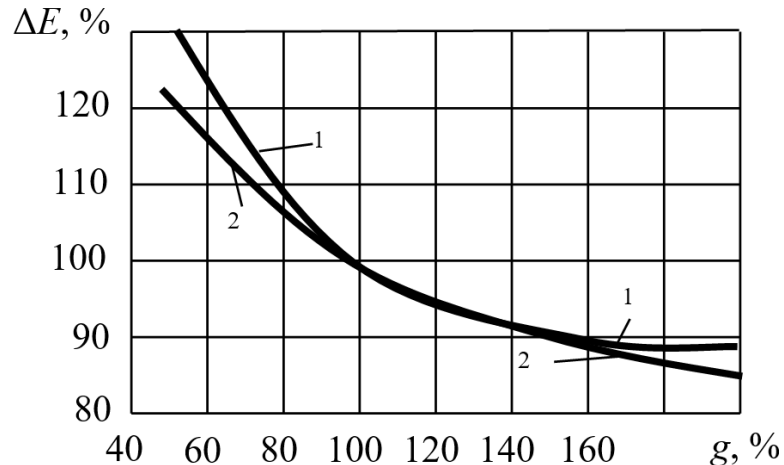


Рис 2.5. Залежність зміни питомих витрат електроенергії від маси плавки.

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

Розроблені заходи дозволяють довести масу завалки до 7 т, тобто до 140 % номінальної ємності. По рис. 2.5 (крива 2) визначаємо питомі витрати електроенергії до здійснення заходів по збільшенню завантаження і після, які в

даному випадку складають відповідно 102 і 89 % питомої витрати енергії при повному (100 %) використанні ємності печі.

Визначаємо економічний ефект розроблених заходів:

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

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

Питома економія енергії при виплавці 1 т сталі складає:

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

Шихта до її завантаження в піч повинна бути підготовлена таким чином, щоб в процесі її плавки виключалась необхідність додаткових підвалок. Це забезпечується підбором оптимальної об'ємної маси шихти, яка для печі ємністю 1-5 т повинна складати 3-4,5 т/м³. Для отримання оптимального значення об'ємної маси шихти лом і відходи підбирають в певних поєднаннях. Так для печі ємністю 10-40 т рекомендується співвідношення: 20 % дрібного, 40 % середнього і 40 % великого лому. Можна вважати оптимальним співвідношення між великою та дрібною шихтою приблизно 60-70 % : 40-30 %.

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

Нарівні з підбором шихти повинно бути забезпечено правильне розташування шихти в робочому просторі печі: на під укладається половина дрібного лому, в центрі печі під електродами щільно укладаються найбільші шматки лому. В подальшому все це закривається спочатку шматками

середнього розміру, а потім дрібного. Під кожен електрод для полегшення запалювання і стійкого горіння електричних дуг завантажується кокс.

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

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

Приклад 2. Відповідний якісний підбір шихти на машинобудівному заводі дозволив проводити плавки без окислення. Це дало змогу скоротити час плавки на 4-тонній печі з 8 год. 20 хв. до 5 год. 50 хв. і питому витрату електроенергії з 1186 до 993 кВт·год/т, а на 5-тонній печі – знизити питому витрату електроенергії з 1026 до 819 кВт·год/т.

При оформленні плану організаційно-технічних заходів по економії енергії можливо орієнтовно оцінювати економічний ефект від впровадження заходів по вдосконаленню підбору шихти в розмірах 5-15 % фактичних питомих витрат на плавку металу, які склалися в попередньому складанні плану на рік.

Найбільш енергоємними операціями в електропечах є нагрів і розплавлення твердої завалки. Період плавлення займає біля половини часу всієї плавки. В цей період витрачається 60-70 % всієї електроенергії, яка використовується на плавку. Питома витрата електроенергії в цей період складає 380-420 кВт·год/т. Тому попередній підігрів шихти значно впливає на зниженні питомих витрат електроенергії. Крім того, попередній підігрів шихти до 600-700 °С покращує умови роботи пічного трансформатора за рахунок значного зменшення кидків струму, покращує якісний склад шихти за рахунок видалення вологи і вигорання вуглецю із забруднюючої шихту змазки, дозволяє проводити увесь період плавлення при включеному дроселі.

Особливо ефективний попередній нагрів шихти за рахунок тепла відхідних газів з температурою біля 1000 °С від різних термічних установок у випадку їх наявності в цеху. Можна також використовувати тепло

охлаждающих колодязів та інших джерел вторинних енергоресурсів. Можливі спеціальні установки попереднього нагріву з мазутними або газовими пальниками. Використання спеціальних установок повинно бути обґрунтовано техніко-економічними розрахунками, які підтверджують доцільність додаткових капітальних вкладень та витрат палива. Попередній нагрів шихти до 600-700 °С забезпечує зниження питомих витрат електроенергії на 20 %.

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

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

де ΔE – економія електроенергії в розрахунку на 1 т виплавленого металу, кВт·год/т.;

t_1 – температура попереднього нагріву шихти, °С.

2.8.3. Зниження електричних втрат в ДСП.

Вибір оптимальної густини струму в елементах вторинного струмопроводу. На основі практики роботи дугових сталеплавильних печей можна рекомендувати економічну густину струму в елементах вторинного струмопроводу:

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

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

- мідні водоохолоджувані труби – 4-6 А/мм².

В табл. 2.15 приведено значення економічної густини струму електродів.

В табл. 2.16 приведені значення втрати електроенергії при різних значеннях економічної густини струму в електродах.

При збільшенні густини струму в елементах вторинного струмопроводу збільшаться втрати електроенергії, а також питомі витрати на плавку. Орієнтовно для попередніх розрахунків можна користуватися умовними коефіцієнтами (табл. 2.17) збільшення втрат електроенергії в елементах

вторинного струмопроводу, віднесеного до 1 т виплавленого металу при збільшенні густини струму вище економічного.

Таблиця 2.15 Економічна густина струму в електродах

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

Таблиця 2.16. Втрати електроенергії при різних значеннях економічної густини струму в електродах

№ з/п	Елементи вторинного струмопроводу	Втрати електроенергії, %, для печей ємністю	
		0,5-5 т	8-20 т
1	Шини, кабелі і труби на стороні НН	3,5-4,5	3-4
2	Вугільні електроди	6-8	3-4
3	Графітізовані електроди	4-5	3-4

Таблиця 2.17. Коефіцієнти збільшення втрат електроенергії $k_{втр}$ в елементах вторинного струмопроводу на 1 т виплавленого металу при збільшенні щільності струму

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

Втрати електроенергії визначаються із виразу:

$$\Delta E = k_{\text{втр}} \left(\frac{J_{\Phi}}{J_e} - 1 \right),$$

де ΔE – втрати електроенергії кВт·год/т;

$k_{\text{втр}}$ – коефіцієнт збільшення втрат (із табл. 2.17);

J_{Φ} – фактична густина струму А/мм²;

J_e – економічна густина струму А/мм².

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

Для цього випадку економічна густина струму $J_e = 2$ А/мм², а коефіцієнт збільшення втрат $k_{\text{втр}} = 28$ (табл. 2.17).

Відповідно,

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

Зменшення опору електричних контактів. Електричний перехідний опір в контактах залежить від роду матеріалу та характеру виконання контакту (роз'ємний або нероз'ємний). Нероз'ємні контакти, як правило, виконуються зварні. В роз'ємних контактах перехідний опір залежить від стану контактних поверхонь та від тиску в контакті, Ом,

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

де C – розрахунковий коефіцієнт, який залежить від матеріалу контакту;

m – показник степені (приймається рівним 0,5-1);

p^m – тиск в контакті, для мідних шин приймається рівним 60 МПа.

Значення розрахункових коефіцієнтів C в залежності від матеріалу контакту приведені в табл. 2.18.

Таблиця 2.18. Значення розрахункового коефіцієнту C

№ з/п	Матеріал контакту	Коефіцієнт $C \cdot 10^4$
1	Мідь–мідь	0,8-1,4
2	Мідь–мідь (луженні)	0,9-1,1
3	Мідь–сталь	30
4	Мідь–алюміній	10
5	Сталь–сталь	75-80

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

Для нормальної роботи контактного з'єднання рекомендується дотримуватись значень густини струму, А/мм², що приведені в табл. 2.19.

Таблиця 2.19. Рекомендовані значення густини струму для різних видів матеріалів контакту

№ з/п	Матеріал контакту	Густина струму, А/мм ²
1	Мідь – мідь	0,3
2	Алюміній – алюміній	0,16
3	Мідь – алюміній	0,13
4	Мідь – сталь	0,1
5	Алюміній – сталь	0,08

Опір контактів періодично перевіряється та не повинен перевищувати опору суцільної ділянки шин рівної довжини, що і контактне з'єднання, більш ніж на 20 %.

Збільшення опору контакту призводить до додаткових втрат потужності, які визначаються за формулою, кВт:

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

де I – струм, який проходить через контакт (середній за плавку), А;

R_k – опір контакту, який відповідає суцільній ділянці шини тієї ж довжини, що і контактне з'єднання, Ом;

$R_{к.ф}$ – фактичний опір контакту, Ом.

Зменшення опору контакту електрод-електродотримач. Опір контакту електрода з електродотримачем залежить від степені затиску електрода в електродотримачу та від їх матеріалу. Зусилля зтяжки електрода в електродотримачу рекомендується приймати рівним $4G...5G$ (G – повна маса електродної свічі, кг).

Опір контакту електрод-електродотримач не повинен перевищувати значень, які вказані в табл. 2.20. Збільшення опору контакту електрод-електродотримач порівняно з рекомендованими значеннями приводить до збільшення втрат електроенергії. Визначення цих додаткових втрат проводиться за вказаною вище формулою.

Таблиця 2.20. Значення опору контакту електрод-електродотримач

№ з/п	Електрод	Електродотримач	Опір контакту, мОм
1	Графітізований	латунний	0,08
2	Вугільний	латунний	0,42
3	Графітізований	стальний	0,35

Зменшення опору електродної свічі. Опір електродної свічі залежить від матеріалу електрода і якості контактів. Для отримання доброго щільного стику при скручуванні свічі рекомендується дотримуватись значень зусилля в залежності від діаметру електрода, що наведені в табл. 2.21.

Таблиця 2.21. Рекомендовані значення зусилля для електродів різного діаметру

№ з/п	Діаметр електрода, мм	Зусилля яке прикладається, Н·м (кгс·м)
1	100	70 (7)
2	200	280 (28)
3	250	590 (59)
4	300	830 (83)
5	355	1460 (146)

З метою зменшення опору контакту вугільних електродів рекомендується використовувати графітові пасти.

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

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

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

Зміна схеми короткої мережі. Найбільш поширеною схемою короткої мережі є схема трикутника на шинах трансформатора, зірка на електродах (рис. 2.6, а).

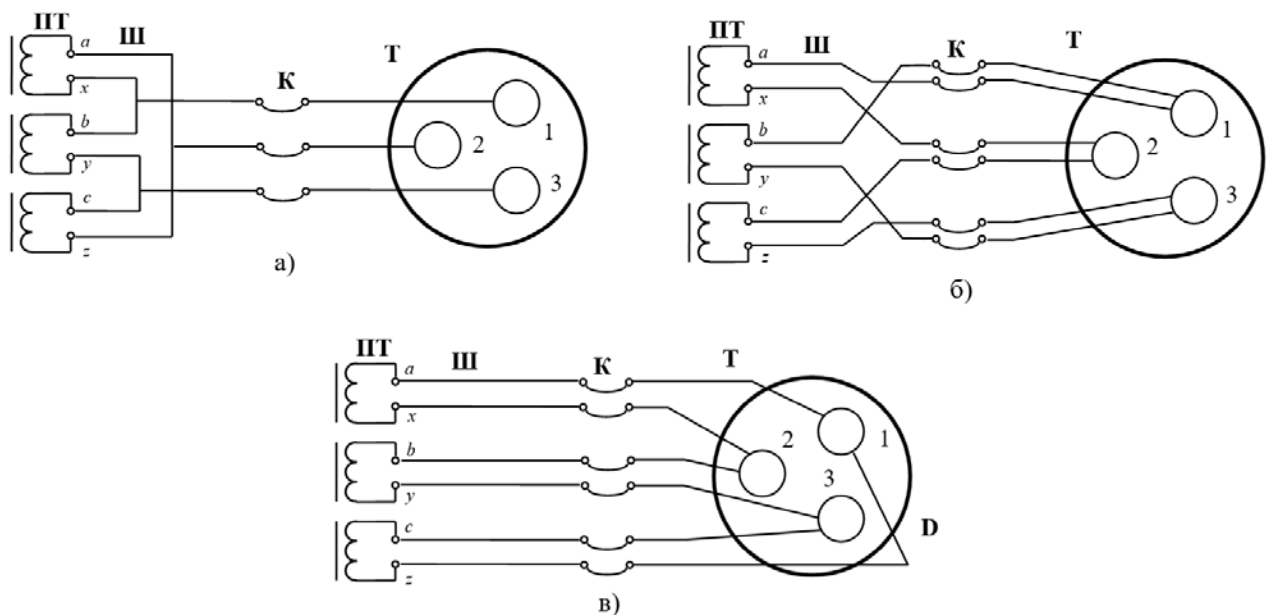


Рис. 2.6. Схема короткої мережі:
 а – трикутник на шинах трансформатора і зірка на електродах;
 б – несиметричний трикутник на електродах;
 в – симетричний трикутник на електродах з четвертим рукавом;

На рис. 2.6:

ПТ – пічний трансформатор;

Ш – ділянка шин;

К – ділянка гнучких кабелів;

Т – струмопроводи по рукавам;

D – четвертий рукав; 1, 2, 3 – електроди.

Ця схема характеризується значною індуктивністю, несиметричністю розподілу навантаження по фазам, що негативно позначається на роботі печі.

Кращими параметрами характеризуються схеми: несиметричний трикутник на електродах (двобіфілярна коротка мережа, рис 2.6, б) і симетричний трикутник на електродах з четвертим рукавом (трибіфілярна коротка мережа, рис 2.6, в).

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

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

2.8.4. Зниження теплових втрат в ДСП.

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

Стійкість футерівки може бути підвищена за рахунок:

- використанням високоякісних футерувальних матеріалів;
- вибору і підтримання оптимальної висоти склепіння над рівнем металу в період рафінування;
- зменшення тривалості рафінування;

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

Застосування цих заходів збільшує стійкість футерівки печі в 1,5-3 рази і зменшує теплові втрати на 10-15 %. Потужність теплових втрат в залежності від ємності печі і стану футерівки приведена в табл. 2.22.

Таблиця 2.22. Потужність теплових втрат в залежності від ємності печі та стану футерівки

№ з/п	Ємність печі, т	Потужність теплових втрат ΔP_T , кВт	
		Нова футерівка	Зношена футерівка
1	2	250	350
2	3	350	400
3	5	375	500
4	10	425	625

При цьому втрати із зовнішніх поверхонь печі можна прийняти у відсотках від загальних теплових втрат: печі до 5 т – 40 %; печі вище 5 т – 49 %.

Розрахунок очікуваної ефективності від здійсненні вказаних заходів можна вести наступним чином: за відповідною потужністю тепловтрат ΔP_T (табл. 2.22) визначається потужність тепловтрат із зовнішніх поверхонь печі, кВт,

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

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

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

кожуху і для додаткової теплоізоляції зовнішню поверхню кожуха печі вистеляють листовим азбестом шаром 10-20 мм.

При належній теплоізоляції печі температура на поверхні кожуха, за умови середнього зносу футерівки, не повинна перевищувати: у стін 170 °С; у поду 140 °С; у склепіння 300 °С. Підтримання цих температур дозволяє підвищити стійкість стін у 1,5 рази, знизити тепловтрати з поверхні кожуха в 1,5-2 рази.

При визначенні ефективності заходів по вдосконаленню теплоізоляції можна користуватися вказаною вище формулою. В цьому випадку зниження потужності тепловтрат: для печі до 5 т $\Delta P = 0,2\Delta P_T$; для печей понад 5 т $\Delta P = 0,25\Delta P_T$.

Економія електроенергії визначається добутком зниження потужності тепловтрат на річний час роботи печі.

Фарбування зовнішніх поверхонь кожуха печі алюмінієвою фарбою дозволяє зменшити тепловтрати через стіни і под печі на 3-5 %, що при умові систематичного підтримування стану пофарбованої поверхні забезпечує зниження питомої витрати електроенергії на 1-1,5 кВт·год/т.

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

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

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

$$\Delta E_{o,b} = \frac{Q(t_1 - t_2)}{860},$$

де Q – кількість води (зазвичай від 800 до 1800 л на 1 т виплавленої сталі), л;
 t_1, t_2 – температура охолоджуючої води на вході та виході печі.

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

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

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

Враховуючи складність визначення втрат з відхідними газами, в попередніх розрахунках можна приймати значення економії електроенергії після проведення комплексу заходів по створенню надійного ущільнення електропечі, що наведені в табл. 2.23.

Таблиця 2.23. Орієнтовні значення економії електроенергії після проведення комплексу заходів по створенню надійного ущільнення електропечі

№ з/п	Ємність печі, т	Економія електроенергії кВт·год/т
1	0,5-1,5	8,5
2	3-8	7,5
3	10-20	7,2
4	25-40	7,0

Зменшення втрат тепла на випромінювання через вікна і отвори печі. Ці втрати можуть бути визначені за формулою, кВт:

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

де $C = 4,95$ – коефіцієнт випромінювання футерівки, кал/(м·год);

α – коефіцієнт діафрагмування, який залежить від співвідношення розмірів вікон і товщини стінки;

t_1 – температура оточуючого піч повітря, К;

t_2 – температура пічного простору, К;

F – площа відкритого вікна (дверей), м²;

T_1 – тривалість відкривання вікна, год.

Втрати тепла відкритих дверей визначаються за рекомендованими температурам для періоду завантаження ($t_2 = 1000 \div 1200^\circ\text{C}$), розплавлення твердої шихти до появи рідкого металу ($t_2 = 1500^\circ\text{C}$), підігріву розплавленого металу ($t_2 = 1780^\circ\text{C}$), очищення печі від шламу, заправка поду ($t_2 = 1700^\circ\text{C}$).

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

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

2.8.5. Скорочення простоїв печі. Період простою печі в нормальних умовах визначається часом, який необхідно на злив металу, очищення печі, і завантаження шихти. Простої печі залежить від ступеню механізації завантаження, зливу металу і вдосконалення експлуатації. Електроенергія в період завалки шихти в піч не надходить, але акумульоване в кладці печі тепло розсіюється кожухом і склепінням, в зв'язку з чим при включенні печі в мережу частина енергії іде на нагрівання футерівки. Втрати на нагрівання футерівки після нормальної перерви в роботі печі доходять до 15-20 % всієї підведеної електроенергії для чергової плавки. Таким чином, скорочення часу завалки

шихти, залежить від рівня механізації, в значній мірі визначається збільшенням продуктивності печі та зменшенням питомої витрати електроенергії.

Тривалість завантаження шихти в піч визначається способом завантаження. В табл. 2.24 наведено значення тривалості завантаження печей ємністю до 15 т для випадку ручного завантаження.

Таблиця 2.24. Тривалість завантаження печей при ручному завантаженні

№ з/п	Ємність печі, т	Тривалість завантаження, хв.
1	1,5-2	8-12
2	3-4	12-20
3	5-6	20-25
4	10-12	35-45

Тривалість механізованого завантаження значно скорочується: при мультідовому завантаженні печі ємністю 25-35 т воно триває 30-35 хв., а при механізованому завантаженні зверху не перевищує 5-10 хв. Найкращим методом є механізоване завантаження зверху, яке забезпечує економію питомої витрати електроенергії 7-8 %.

Вплив простоїв і затримок на питому витрату електроенергії можна встановити в залежності від тривалості простою з відключенням печі, враховуючи втрати холостого ходу печі, кВт·год/т:

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

де $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність печі, кВт;

P_0 – потужність холостого ходу (втрати холостого ходу), кВт;

t – кількість годин простою печі на протязі доби;

$E_{\text{ном}}$ – номінальна витрата електроенергії кВт·год/т.

На рис 2.7 приведені криві питомих витрат енергії в залежності від тривалості відключення печі.

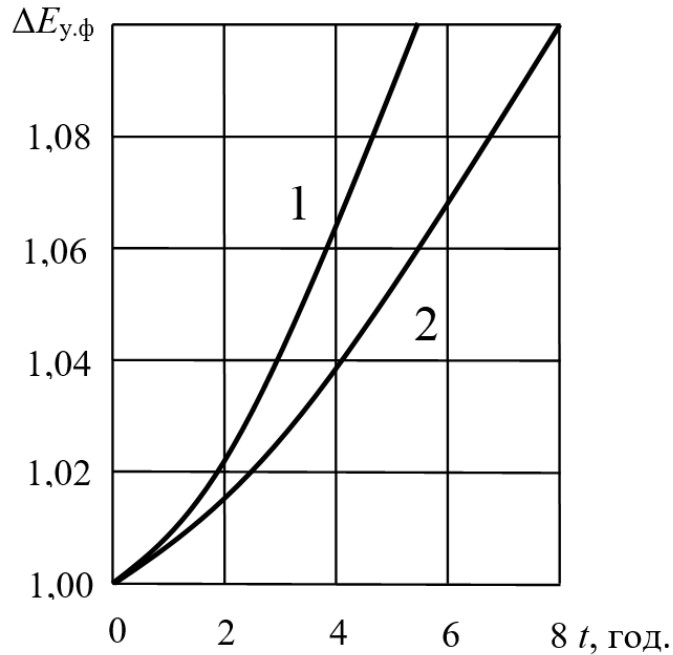


Рис 2.7. Залежність питомих витрат електроенергії від тривалості простоїв печі: 1 – при $P_0 = 0,2P_n$; 2 – при $P_0 = 0,3P_n$.

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

Номінальна питома витрата

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

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

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

де 1,075 і 1,01 – коефіцієнти збільшення питомих витрат енергії в залежності від простою печі по кривій 2 (рис 2.7).

Отримана економія енергії, віднесена до 1 т металу який виплавляється,

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

2.8.6. Оптимізація електричних і технологічних режимів роботи електропечей.

Робота печі при раціональних електричних режимах. Раціональний електричний режим печі визначається оптимальною активною потужністю пічної установки для кожного технологічного режиму.

Значення середньої активної потужності P_{cp} , яка визначає раціональний електричний режим, орієнтовно визначаються так:

- плавлення $P_{\text{cp}} = 500G^{3/4}$ кВт;
- окислення $P_{\text{cp}} = 380G^{3/4}$ кВт;
- відновлення $P_{\text{cp}} = 205G^{3/4}$ кВт,

де G – маса завалки, т.

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

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

Ці переваги дозволяють окупити додаткові витрати на використання відбірної металічної шихти з низьким вмістом сірки та фосфору.

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

Використання кисню. Використання продувки кисню веде до зниження витрати електроенергії та збільшення продуктивності печі за рахунок скорочення періоду плавлення і окислення. При цьому використання продувки кисню в період плавлення скорочує тривалість роботи і витрату електроенергії в наступних періодах плавки за рахунок більш високого нагріву металу к кінці періоду плавлення. Ефективність використання кисню залежить від способу його отримання і марок сталі, яка виплавляється. В середньому використання кисню знижує питому витрату електроенергії на 5-15 %.

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

Також скорочується відновлювальний період за рахунок:

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

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

Встановлення автоматичного керування рухом електродів. Автоматичне керування призначене для забезпечення заданої по періодам плавки активної потужності, яка підводиться до печі. Робота ДСП з використанням сучасної апаратури для автоматичного регулювання рухом електродів приводить до зниження питомої витрати електроенергії в середньому на 8-10 %.

2.8.7. Робочі характеристики і явища переносу потужності. Робочими характеристиками називаються залежності основних параметрів печі в функції від вторинного струму I_2 , кА.

Вони будуються за формулами:

1. Загальна активна потужність печі, кВт

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

2. Потужність електричних втрат, кВт

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

3. Потужність на дузі, кВт

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

4. Коефіцієнт потужності

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

5. Коефіцієнт корисної дії

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

Як відомо з електротехніки в трифазній системі активна складова фазної напруги дорівнює

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

де M_{12}, M_{13} – відповідно коефіцієнти взаємодуктивності між першою та другою і першою та третьою фазами;

R – активний опір першої фази.

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

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

При магнітній несиметрії взаємодуктивність між крайньою і середньою фазою більша, ніж взаємодуктивність між крайніми фазами. Особливо це характерно для електродів, які розташовані в одну лінію. При цьому маємо:

- для першої фази $M_{12} - M_{13} > 0$

- для другої фази $M_{21} - M_{23} = 0$

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

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

При симетричних напругах на пічному трансформаторі струми у фазах несиметричні: в першій фазі струм менший («мертва» фаза), а в третій найбільший («дика» фаза). Збільшення потужності на одній фазі печі не компенсує знижену продуктивність у електрода «мертвої» фази. Це знижує техніко-економічні показники печі. Це явище названо явищем переносу потужності із однієї фази в іншу.

2.8.8. Оптимальний електричний режим розплавлення. Добова продуктивність і питома витрата електроенергії. Важлива задача періоду плавлення полягає в тому, щоб за найкоротший строк розплавити всю шихту і нагріти метал до заданої температури. Після цього можна приступати до процесу розливу металу.

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

При рівнянні приросту цих величин приймається оптимальна величина струму, тобто

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

де T_p – час розплавлення;

ω – питома витрата електроенергії.

Зцією метою розрахуємо і побудуємо графіки залежностей $\omega = f(I)$ та $T_p = f(I)$:

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

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

де $P_{д}$ – потужність на дузі при значенні струму, який розглядається;

$\Delta P_{тепл}$ – середня потужність теплових втрат за час плавки;

$P_{д.макс}$ – максимальна потужність, яка виділяється на дузі для відповідної ступені напруги;

$\Delta P_{ел}$ – потужність електричних втрат для значення струму, який розглядається.

Залежність питомого часу плавлення T_p % і питомої витрати електроенергії на 1 тону придатного металу у відносних одиницях в функції струму представлені на рис. 2.8.

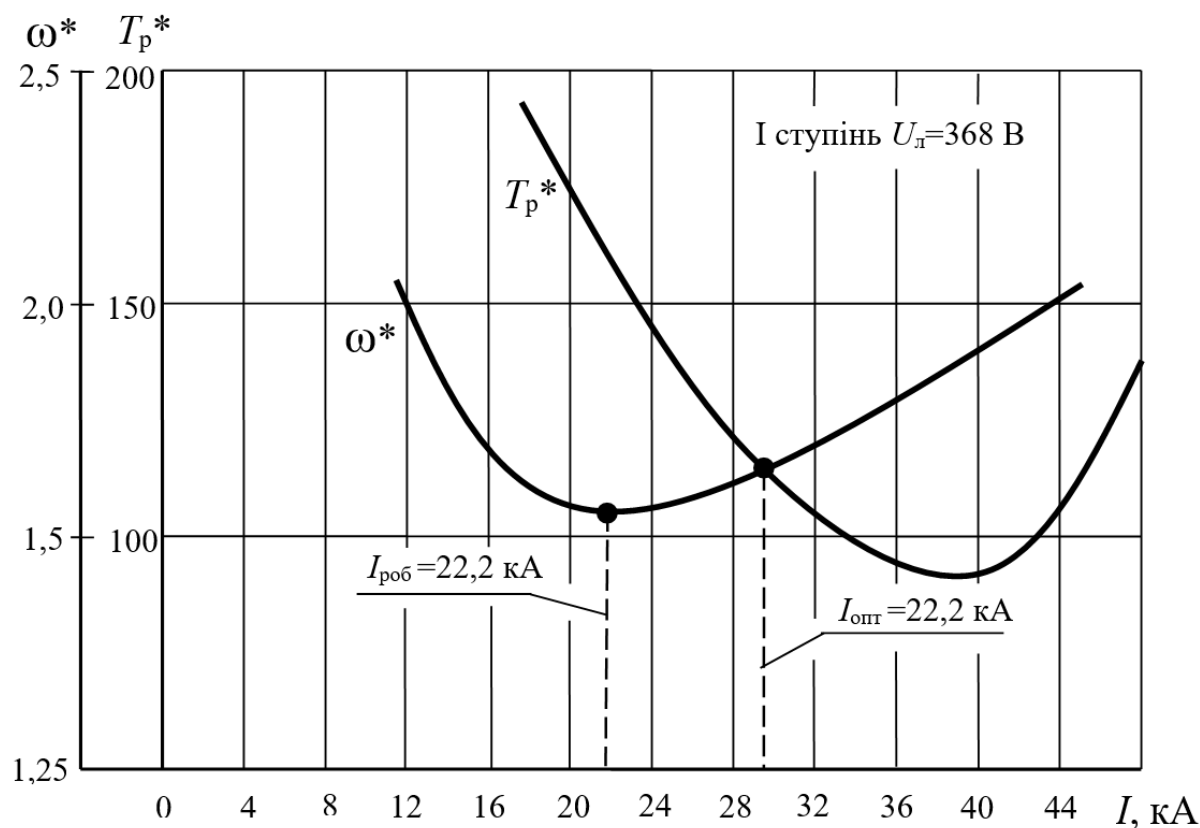


Рис 2.8. Залежність T_p^* і ω^* від струму для печі ДСП-80

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

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

де ω – оптимальна питома витрата на розплавлення 1 т металу, кВт·год/т;

g – ємність печі, т;

S – потужність трансформатора, кВА;

$t_{\text{пл.раф}}$ – час розплавлення і рафінування, год.;

$t_{\text{пр}}$ – час простою. год.

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

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

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

$\omega_{\text{ном}}$ – питома витрата при номінальному завантаженні;

$t_{\text{пр}}$ – час простою на протязі доби.

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

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

2.8.9. Методика побудови норм питомої витрати електроенергії на виплавку електросталі. Для встановлення обґрунтованої норми питомої витрати енергії необхідно розглянути процес плавлення по окремим періодам:

- а) період розплавлення твердої завалки;
- б) окислювальний період;
- в) відновлювальний період.

В кожний із цих періодів витрати енергії складаються із:

- а) корисної витрати енергії;
- б) покриття теплових втрат;
- в) покриття електричних втрат.

Витрату електричної енергії за кожен період можна записати в наступному вигляді:

$$S_{\text{тр}} \cos \varphi T = \omega_{\text{к}} g + P_{\text{т}}(T + t) + P_{\text{е}} T, \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

де $S_{\text{тр}}$ – середня потужність, яка споживається на протязі кожного періоду від трансформатора, кВА;

$\cos \varphi$ – середньозважений коефіцієнт потужності установки за даний період;

T – час знаходження печі під струмом за даний період, год.;

t – час простоїв печі без струму за даний період, год.;

$P_{\text{т}}$ – потужність теплових втрат печі за даний період, кВт;

$P_{\text{е}}$ – потужність електричних втрат пічної установки за даний період, кВт;

$\omega_{\text{к}}$ – теоретична витрата енергії на розплавлення і нагрів ванни, флюсів і добавок, т.п. корисна питома витрата, кВт·год/т;

g – вага садки, т.

Питома витрата електроенергії визначатиметься виразом:

$$\omega = \omega_{\text{т}} + \frac{S_{\text{тр}}}{g}(T + t) + \frac{P_{\text{е}}}{g} T, \text{ кВт}\cdot\text{год/т}$$

Приймаючи теплоємність твердої сталі 0,167 ккал/кг, рідкої сталі 0,213 ккал/кг, шлаку 0,275-0,278 ккал/кг, руди 0,440 ккал/кг, скриту теплоту плавлення сталі 68 ккал/кг, шлаку і руди 50 ккал/кг, можна підрахувати корисну (теоретичну) витрату енергії для кожного періоду

$$\omega_{\text{п.розп}} = 340^* + 5,4g_{\text{шл}} + 6,7g_{\text{р}}, \text{ кВт}\cdot\text{год/т}$$

де 340 кВт·год/т – теоретична витрата енергії на розплавлення сталі.

$$\omega_{\text{п.окис}} = 247(t_{\text{окис}} - t_{\text{пл}})10^{-3} + 5,4g_{\text{шл}} + 6,7g_{\text{р}}, \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{т}$$

$$\omega_{\text{п.відно}} = 247(t_{\text{відн}} - t_{\text{окис}})10^{-3} + 5,4g_{\text{шл}} + 6,7g_{\text{р}}, \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{т}$$

де $t_{\text{пл}}$ – температура плавлення металу, °С;

$t_{\text{окис}}$ – температура металу в окислювальний період, °С;

$t_{\text{відн}}$ – температура металу в відновлювальний період, °С;

$g_{\text{шл}}$ – відношення ваги шлаку до ваги металу, %;

$g_{\text{р}}$ – відношення ваги руди, яка присаджена в даний період, до ваги металу, %.

На всю плавку питома корисна витрата енергії складе:

$$\omega_{\text{п}} = 340^* + 247(t_{\text{відн}} - t_{\text{пл}})10^{-3} + 5,4G_{\text{шл}} + 6,7G_{\text{р}}, \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{т}$$

де $G_{\text{шл}}$, $G_{\text{р}}$ – відношення ваги шлаку і ваги руди до ваги металу за весь період плавки, %.

Потужність електричних втрат

$$P_{\text{е}} = 3I_2^2 R_2 10^{-3}, \text{ кВт}$$

де I_2 – середньозважений струм за даний період у вторинному колі трансформатора, А;

R_2 – приведений до вторинної сторони активний опір однієї фази, Ом.

Зазвичай загальні електричні втрати складають від 8 до 14 % від повної потужності, яка споживається, тобто в середньому 11 % і залежать від часу знаходження печі під струмом.

Питома витрата енергії на компенсацію теплових втрат залежить від потужності теплових втрат і повного часу циклу:

$$\omega_T = \frac{P_T}{g}(T + t), \text{ кВт}\cdot\text{год/т}$$

Якщо відомі $\cos \varphi$ і електричний ККД η_e , то

$$S_{\text{тр}} \cos \varphi \eta_e T = PT = \omega_{\text{п}} g + P_T(T + t), \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

звідки:

$$T = \frac{\omega_{\text{п}} g + P_T t}{P - P_T},$$

де P – потужність, яка введена в піч, тобто потужність на дугах, кВт.

Вводячи відносні величини $\frac{P}{g} = b$ і $\frac{P_T}{g} = c$ отримаємо:

$$T = \frac{\omega_{\text{п}} g + P_T t}{P - P_T} = \frac{\omega_{\text{п}} + ct}{b - c}, \text{ год.}$$

Таким чином, знаючи ці відносні величини, можна визначить тривалість окремих періодів плавки.

Питомі витрати електроенергії на компенсацію теплових втрат рівні:

$$\omega_T = \frac{P_T}{g}(T + t) = c \left(\frac{\omega_{\text{п}} + ct}{b - c} + t \right) = c \left(\frac{\omega_{\text{п}} + bt}{b - c} \right), \text{ кВт}\cdot\text{год/т}$$

Підсумовуючи усі часткові значення, отримаємо для повної питомої витрати за плавку, кВт·год/т:

$$\begin{aligned} \omega_{\text{п}} = & 340^* + 247(t_{\text{відн}} - t_{\text{пл}})10^{-3} + 5,4G_{\text{шл}} + 6,7G_{\text{р}} + \\ & + c \left(\frac{\omega_{\text{п}} + bt}{b - c} \right) + \left(\frac{\omega_{\text{п}} + ct}{b - c} \right) \frac{3I_2^2 R_2}{g} 10^{-3} \end{aligned}$$

Вводячи значення питомої потужності електричних втрат за даний період, тобто

$$\frac{3I_2^2 R_2}{g} 10^{-3} = d$$

отримаємо:

$$\omega = \omega_n + \frac{1}{b-c} [c(\omega_n + bt) + d(\omega_n + ct)], \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{т}$$

Більш точні результати можна отримати, якщо всі значення, які входять в останню формулу, відносити до окремих періодів плавки, а потім сумувати питомі витрати за два або три періоди, на які розбивається плавка.

Якщо необхідно визначити питому витрату одразу за всю плавку (з меншою точністю), то величини b , c і d необхідно брати середньозважені за весь цикл плавки.

Приклади розрахунку норм питомих витрат електроенергії на виплавку сталі.

Вихідні дані:

1. Ємність печі – 30 т.
2. Середньозважений $\cos \varphi = 0,85$.
3. Номінальна потужність трансформатора 7500 кВА.
4. Електричний режим роботи печі (по діючим інструкціям заводу):

Період	Потужність, кВт	Тривалість, год.
Розплавлення	5000	0,16
	6800-7500	2,38
	5000	1,0
Кипіння	5000	1,0
	3000	0,75
Рафінування	5000	0,25
	3000	0,25
	1800	0,33
	1500	0,40
	1000-1500	0,67

5. Простої:

Операції	Тривалість, год.
Заправка	0,33
Завалка	0,60
Перепуск електродів	0,17
Скачування шлаку	0,20
Випуск металу	0,20

6. Середня потужність теплових втрат

Період	Потужність, кВт
Розплавлення	780
Окислення	900
Відновлення	900

7. Середня потужність електричних втрат

Період	Потужність, кВт
Розплавлення	540
Окислення	360
Відновлення	240

8. Кількість шлакоутворюючих у % від ваги металу

Період	%
Розплавлення	3
Окислення	5
Відновлення	5

9. Кількість руди у % від ваги металу

Період	%
Розплавлення	1
Окислення	2

10. Температура в період:

Період	$T, ^\circ\text{C}$
Розплавлення	1450
Окислення	1600
Відновлення	1600

Приклад 1. На основі цих даних визначимо питому витрату електроенергії за кожний окремий період і за всю плавку в цілому.

1. Період розплавлення.

Корисна питома витрата енергії

$$\omega_{\text{п.розп}} = 340 + 5,4g_{\text{шл}} + 6,7g_{\text{р}} = 340 + 5,4 \cdot 3,0 + 6,7 \cdot 1,0 = 363, \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{т}$$

Середньозважена активна потужність, яка віддається трансформатором в період розплавлення

$$P_{\text{тр}} = \frac{5000 \cdot 0,16 + 7150 \cdot 2,38 + 5000 \cdot 1,0}{3,54} = 6400 \text{ кВт}$$

Середньозважена потужність печі дорівнює:

$$P = P_{\text{тр}} - P_{\text{е}} = 6400 - 540 = 5860 \text{ кВт}$$

Питома потужність печі:

$$b = \frac{P}{g} = \frac{5860}{30} = 195 \text{ кВт} / \text{т}$$

Питома потужність теплових втрат:

$$c = \frac{P_{\text{т}}}{g} = \frac{780}{30} = 26 \text{ кВт} / \text{т}$$

Питома потужність електричних втрат:

$$d = \frac{P_{\text{е}}}{g} = \frac{540}{30} = 18 \text{ кВт} / \text{т}$$

Тривалість простоїв, віднесена до періоду розплавлення:

$$t = 0,33 + 0,60 + 0,17 = 1,1 \text{ год.}$$

Питома витрата електроенергії за період розплавлення, кВт·год/т:

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_{\text{п}} + \frac{1}{b-c} [c(\omega_{\text{п}} + bt) + d(\omega_{\text{п}} + ct)] = \\ &= 363 + \frac{1}{195-26} [26(363 + 195 \cdot 1,1) + 18(363 + 26 \cdot 1,1)] = 494 \end{aligned}$$

2. Період окислення

Корисна питома витрата електроенергії, кВт·год/т:

$$\begin{aligned} \omega_{\text{п.окис}} &= 247(t_{\text{окис}} - t_{\text{пл}})10^{-3} + 5,4g_{\text{шл}} + 6,7g_{\text{р}} = \\ &= 247(1600 - 1450)10^{-3} + 5,4 \cdot 5,0 + 6,7 \cdot 2,0 = 78 \end{aligned}$$

Середньозважена активна потужність, яка віддається трансформатором в цей період:

$$P_{\text{тр}} = \frac{5000 \cdot 1,0 + 3000 \cdot 0,75}{1,75} = 4140 \text{ кВт}$$

Середньозважена потужність печі дорівнює:

$$P = P_{\text{тр}} - P_{\text{е}} = 4140 - 360 = 3780 \text{ кВт}$$

Питома потужність печі:

$$b = \frac{P}{g} = \frac{3780}{30} = 126 \text{ кВт/т}$$

Питома потужність теплових втрат:

$$c = \frac{P_T}{g} = \frac{900}{30} = 30 \text{ кВт/т}$$

Питома потужність електричних втрат:

$$d = \frac{P_e}{g} = \frac{360}{30} = 12 \text{ кВт/т}$$

Простій в період окислення $t = 0,2$ год.

Питома витрата електроенергії за період окислення, кВт·год/т:

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_n + \frac{1}{b-c} [c(\omega_n + bt) + d(\omega_n + ct)] = \\ &= 78 + \frac{1}{126-30} [30(78 + 126 \cdot 0,2) + 12(78 + 30 \cdot 0,2)] = 121 \end{aligned}$$

Якщо в період розплавлення і окислення руда не присаджувалась, а в піч вводився газоподібний кисень, то замість витрат енергії на руду необхідно врахувати витрату електроенергії на отримання кисню.

3. Період відновлення.

Покладаючи, що метал в окислювальний період вже нагрітий до 1600 °С під час відновлення необхідно лише підтримувати цю температуру і розплавити необхідну кількість розкислювачів, легуючих та шлакоутворюючих добавок.

Припустимо, що в піч необхідно ввести на 1 т металічної ванни складові:

№ з/п	Матеріал	Кількість, кг	Теплоємність, ккал/кг·°С	Питома теплота плавлення, ккал/кг
1	Феросиліцію 75 %	5,0	0,178	68
2	Феромарганцю	2,0	0,162	64,8
3	Ферохрому	22,0	0,135	69,5
4	Шлакоутворюючі	50,0	—	—

Тоді корисна витрата електроенергії в цей період складає, кВт·год/т:

$$\omega_{\text{п.відн}} = \frac{5[(1600 - 20)0,178 + 68] + 2[(1600 - 20)0,162 + 64,8]}{860} + \frac{22[(1600 - 400)0,135 + 69,5]}{860} + 5,4 \cdot 5 = 36$$

Середньозважена активна потужність, яка віддається трансформатором в цей період дорівнює:

$$P_{\text{тр}} = \frac{5000 \cdot 0,25 + 3000 \cdot 0,25 + 1800 \cdot 0,33 + 1500 \cdot 0,4 + 1250 \cdot 0,67}{1,9} = 2100 \text{ кВт}$$

Середньозважена потужність печі дорівнює:

$$P = P_{\text{тр}} - P_{\text{е}} = 2100 - 240 = 1860 \text{ кВт}$$

Питома потужність печі:

$$b = \frac{P}{g} = \frac{1860}{30} = 62 \text{ кВт/т}$$

Питома потужність теплових втрат:

$$c = \frac{P_m}{g} = \frac{900}{30} = 30 \text{ кВт/т}$$

Питома потужність електричних втрат:

$$d = \frac{P_{\text{е}}}{g} = \frac{240}{30} = 8 \text{ кВт/т}$$

Тривалість простою, віднесена до періоду відновлення складе $t = 0,2$ год.
 Питома витрата електроенергії за період відновлення дорівнюватиме, кВт·год/т:

$$\begin{aligned}\omega_{\text{відн}} &= \omega_n + \frac{1}{b-c} [c(\omega_n + bt) + d(\omega_n + ct)] = \\ &= 36 + \frac{1}{62-30} [30(36 + 62 \cdot 0,2) + 8(36 + 30 \cdot 0,2)] = 92\end{aligned}$$

4. Повна питома витрата електроенергії.

Повна питома витрата електроенергії на всю плавку дорівнює сумі окремих складових за періоди, тобто

$$\sum \omega = 484 + 121 + 92 = 707 \text{ кВт·год/т}$$

Це і є питома витрата енергії на 1 т рідкої сталі в ковші (ванні).

На 1 т рідкої сталі питома витрата при 1 % браку по металу

$$\omega_{\text{р.с}} = \frac{707}{0,99} = 714 \text{ кВт·год/т}$$

Якщо вихід придатних злитків по цеху для даної марки сталі та існуючих умов розливки дорівнює, припустимо, 96 % від ваги рідкого металу, то питома витрата електроенергії на 1 т придатних злитків складе

$$\omega_{\text{сл}} = \frac{714}{0,96} = 744 \text{ кВт·год/т}$$

Такою повинна бути технологічна питома витрата електроенергії при заданих умовах.

Якщо поставити задачу дати середньорічну норму питомої витрати енергії, то необхідно врахувати ще ряд факторів. Якщо прийняти, що піч має на

рік 5 % гарячих простоїв, що термін роботи стін і склепіння складає 40-48 плавок, а середня тривалість однієї плавки (циклу) дорівнює 8 год., то в нормі питомої витрати необхідно врахувати:

- а) додаткові втрати за час 5 % гарячих простоїв;
- б) витрату енергії на акумулювання тепла футерівкою печі на протязі кожної «першої» плавки після ремонту.

Потужність тепловтрат печі рівна 900 кВт; добова продуктивність печі

$$P_{\text{ч}} = \frac{30}{8,0} = 3,75, \text{ т/год.}$$

Тоді додаткові витрати енергії за час 5 % гарячих простоїв печі будуть дорівнювати:

$$\omega_{\text{пр}} = \frac{900 \cdot 5}{100 \cdot 3,75} = 12 \text{ кВт} \cdot \text{год/т}$$

Згідно каталожних даних вага футерівки 30 т печі становить 85 т. Прийmemo для простоти розрахунків середню температуру кладки печі 860 °С, тоді визначимо акумульоване кладкою тепло в кВт·год:

$$Q_{\text{ак}} = \frac{85000 \cdot 0,24 \cdot 860}{860} = 20400 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Заміна бокових стін повинна проводитися 1 раз на 12-14 днів, або приблизно 30 раз на рік.

Тоді додаткова питома витрата енергії на компенсацію втрат тепла акумульованого кладкою печі за час ремонту футерівки на протязі року рівне:

$$\omega_{\text{ак}} = \frac{20400 \cdot 30}{30000} = 20 \text{ кВт} \cdot \text{год/т}$$

де 30000 т – річна продуктивність печі в тонах рідкого металу.

Отже, норма питомої витрати електроенергії для даних умов буде рівна:

$$\omega = 744 + 12 + 20 = 776 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{т}$$

Якщо кількість плавок методом переплавлення планується для даної установки біля 30 % від кількості всіх плавок на рік, то, знаючи, що при плавках методом переплавлення питома витрата електроенергії на 10-12 % менше, ніж при плавках з повним окисленням (для яких і була розрахована вище наведена норма), середня річна норма питомої витрати електроенергії на одиницю годних злитків буде дорівнювати:

$$\omega_{\text{н}} = 776(1 - 0,03) = 753 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{т}$$

Загальний ККД електропічної установки за періоди:

Період	ККД
Розплавлення	73,5 %
Окислення	64,5 %
Відновлення	39,5 %
За повний цикл плавки	67,5 %

Приклад 2. Всі вихідні дані ті ж що і в **Прикладі 1**. Необхідно визначити питому витрату електроенергії відразу на всю плавку в цілому.

Корисна питома витрата енергії визначається за виразом, кВт·год/т:

$$\omega_{\text{к}} = 363 + 78 + 36 = 477$$

або

$$\begin{aligned} \omega_{\text{п}} &= 340 + 247(t_{\text{відн}} - t_{\text{пл}})10^{-3} + 5,4g_{\text{шл}} + 6,7g_{\text{р}} + 9,0 = \\ &= 340 + 247(1600 - 1450)10^{-3} + 5,4 \cdot 13 + 6,7 \cdot 3 + 9,0 = 477 \end{aligned}$$

Середньозважена активна потужність, яка віддається трансформатором на протязі всієї плавки, кВт:

$$P_{\text{тр}} = \frac{5000 \cdot 0,16 + 6800 \cdot 1,8 + 7150 \cdot 0,6 + 5000 \cdot 1 + 3000 \cdot 0,75}{7,21} + \frac{5000 \cdot 0,25 + 3000 \cdot 0,25 + 1800 \cdot 0,33 + 1500 \cdot 0,4 + 1250 \cdot 0,66}{7,21} = 4624 \text{ кВт}$$

Середньозважена потужність електричних втрат на протязі плавки, дорівнює:

$$P_{\text{е}} = \frac{540 \cdot 3,56 + 360 \cdot 1,75 + 240 \cdot 1,9}{7,21} = 360 \text{ кВт}$$

Середньозважена потужність печі дорівнює:

$$P = P_{\text{тр}} - P_{\text{е}} = 4624 - 360 = 4264 \text{ кВт}$$

Середньозважена потужність теплових втрат:

$$P_{\text{т}} = \frac{780 \cdot 3,56 + 900 \cdot 1,75 + 900 \cdot 1,9}{7,21} = 840 \text{ кВт}$$

Питома потужність печі:

$$b = \frac{P}{g} = \frac{4264}{30} = 142 \text{ кВт/т}$$

Питома потужність теплових втрат:

$$c = \frac{P_{\text{т}}}{g} = \frac{840}{30} = 28 \text{ кВт/т}$$

Питома потужність електричних втрат:

$$d = \frac{P_e}{g} = \frac{360}{30} = 12 \text{ кВт/т}$$

Тривалість простоїв на протязі всієї плавки:

$$t = 0,33 + 0,60 + 0,17 + 0,20 + 0,20 = 1,5 \text{ год.}$$

Повна питома витрата електроенергії на всю плавку повинна дорівнювати, кВт·год/т:

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_n + \frac{1}{b-c} [c(\omega_n + bt) + d(\omega_n + ct)] = \\ &= 477 + \frac{1}{142 - 28} [28(477 + 142 \cdot 1,5) + 12(477 + 28 \cdot 1,5)] = 701 \end{aligned}$$

На 1 тону годних злитків питома витрата енергії складе:

$$\omega_{\text{сл}} = \frac{701}{0,99 \cdot 0,96} = 738 \text{ кВт·год/т}$$

Як видно, різниця в питомій витраті енергії при розрахунку за другим методом складає на $744 - 738 = 6$ кВт·год/т, або на 0,8 % менша, ніж в *прикладі 1*. Незначне відхилення свідчить, що цим методом можна також користуватися. Питома корисна витрата енергії в обох випадках буде однаковою (477 кВт·год/т), а розходження виникло за рахунок менш точного визначення втрат в другому випадку.

Враховуючи всі додаткові міркування і розрахунки, приведені в кінці *прикладу 1*, середньорічна норма питомої витрати електроенергії на 1 т годних злитків буде дорівнювати:

$$\omega_{\text{н}} = (738 + 12 + 20)(1 - 0,03) = 747 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{т}$$

Приклад 3. Якщо необхідно швидко визначити питому витрату, але при цьому не заданий точний електричний режим, то можна користуватися для приблизних розрахунків основними або каталожними даними пічної установки.

Нехай піч ємністю 30 т має трансформатор потужністю 7500 кВа і $\cos\varphi = 0,85$. Приймаємо коефіцієнт використання потужності трансформатора рівним 0,8.

Тоді активна потужність, яка віддається трансформатором, дорівнює:

$$P_{\text{тр}} = 7500 \cdot 0,85 \cdot 0,8 = 5100 \text{ кВт}$$

Якщо електричний ККД установки $\eta_{\text{е}} = 0,9$, потужність електричних втрат дорівнює 10 %, тобто

$$P_{\text{е}} = 5100 \cdot 0,1 = 510 \text{ кВт}$$

З відніманням електричних втрат потужність печі дорівнює:

$$P = P_{\text{тр}} - P_{\text{е}} = 5100 - 510 = 4590 \text{ кВт}$$

При термічному ККД печі $\eta_{\text{т}} = 0,8$, тобто коли потужність теплових втрат дорівнює 20 %, потужність теплових втрат складає:

$$P_{\text{т}} = 4590 \cdot 0,2 = 918 \text{ кВт}$$

Питомі величини будуть відповідно дорівнювати:

$$b = \frac{P}{g} = \frac{4590}{30} = 153 \text{ кВт/т}$$

$$c = \frac{P_{\Gamma}}{g} = \frac{918}{30} = 30,6 \text{ кВт/т}$$

$$d = \frac{P_{\epsilon}}{g} = \frac{510}{30} = 17 \text{ кВт/т}$$

При тій же величині $t = 1,5$ год питома витрата енергії буде дорівнювати:

$$\omega = 477 + \frac{1}{153 - 30,6} [30,6(477 + 153 \cdot 1,5) + 17(477 + 30,6 \cdot 1,5)] = 727 \text{ кВт·год/т}$$

Різниця в порівнянні з *прикладом 1* (707 кВт·год/т) складає 20 кВт·год/т, тобто біля 3 %, що для приблизних розрахунків допустимо.

2.9. Розробка заходів з економії електроенергії в індукційних печах

2.9.1. Загальні положення. Вихідними рівняннями для дослідження електромагнітних процесів при нагріві металічних тіл (без врахування струмів зміщення) є рівняння Максвелла:

$$\begin{cases} \text{rot}\mathbf{H} = \delta; \\ \text{div}\mathbf{H} = 0; \\ \text{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}; \\ \text{div}\mathbf{E} = 0, \end{cases}$$

де \mathbf{H} і \mathbf{E} – вектори напруженості магнітного і електричного поля відповідно;

\mathbf{B} – вектор магнітної індукції;

δ – густина струму провідності.

Глибина проникнення струму Δ_E при цьому дорівнює:

$$\Delta_E = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}},$$

де ρ – питомий опір, Ом·м;

μ_r – відносна магнітна проникність металу;

f – частота змінного струму, Гц.

Для всякого металічного тіла, яке розташоване в електромагнітному полі індуктора зі струмом I_1 та кількістю витків на одиницю довжини індуктора $\omega_{1,0}$, активна і реактивна складова потужності P_a і P_r будуть дорівнювати (кВт/м² і кВар/м² відповідно):

$$\begin{cases} P_a = (I_1 \omega_{1,0})^2 \sqrt{\rho \mu_r f} F_{\text{пл.ц}} \cdot 2 \cdot 10^{-6}; \\ P_r = (I_1 \omega_{1,0})^2 \sqrt{\rho \mu_r f} G_{\text{пл.ц}} \cdot 2 \cdot 10^{-6}, \end{cases}$$

де $F_{\text{пл.ц}}$ і $G_{\text{пл.ц}}$ – складні функції, які залежать від відносної товщини плоского тіла $2z / \Delta_E$ або від відносного радіусу циліндричного тіла $r_0 \sqrt{2} / \Delta_E$;

z – товщина плоского виробу, яке нагрівається;

r_0 – радіус циліндричної деталі.

Для напівобмеженого тіла (або плити з розміром $2z / \Delta_E \geq 3$) і для циліндру з $r_0 \sqrt{2} / \Delta_E \geq 10$ $F_{\text{пл.ц}}$ і $G_{\text{пл.ц}} = 1$, тобто $P_a = P_r$ коефіцієнт потужності складе:

$$\cos \varphi = \frac{P_a}{\sqrt{P_a^2 + P_r^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707.$$

Питомі погонні втрати потужності в циліндричному індукторі визначаються як і в циліндрі який нагрівається, але необхідно врахувати коефіцієнт заповнення провідниковим матеріалом індуктора $K_{з,и} = h_{вит,и} / \tau_{вит,и}$:

$$\begin{cases} P_{а,и} = (I_1 \omega_{1.0})^2 \frac{d_{и}}{K_{з,и}} \sqrt{\rho_{и} f} F_{и} \cdot 6,2 \cdot 10^{-6}; \\ P_{г,и} = (I_1 \omega_{1.0})^2 \frac{d_{и}}{K_{з,и}} \sqrt{\rho_{и} f} G_{и} \cdot 6,2 \cdot 10^{-6}, \end{cases}$$

де $h_{вит,и}$ – висота витка індуктора, м;

$\tau_{вит,и}$ – крок обмотки витків індуктора, м.

Електричний ККД системи «індуктор-садка» можна записати:

$$\eta_e = \frac{P_a}{P_a + P_{а,и}} = \frac{1}{1 + P_{а,и} / P_a}.$$

При великих частотах, коли $r_0 \sqrt{2} / \Delta_E \geq 7$ найбільше значення ККД $\eta_{е,найб}$ можна знайти за виразом:

$$\eta_{е,найб} = \frac{1}{1 + \frac{d_{и}}{d_0 K_{з,и}} \sqrt{\frac{\rho_{и} \mu_{r,и}}{\rho \mu_r}}}.$$

ККД та $\cos \phi$ зменшується при зростанні зазору між деталлю (садкою) та індуктором і зменшенням коефіцієнту заповнення індуктора $K_{з,и}$.

В реальних умовах роботи індукційних установок змінюється глибина проникнення струму та потужність, яка споживається тілом, що нагрівається, оскільки $\rho_{и}$ і μ_r змінюється в процесі нагріву. Для феромагнітних матеріалів при температурі 750 °С (точка Кюрі) відносна магнітна проникність μ_r від значення 100 падає до 1.

Для немагнітних матеріалів завжди $\mu_r = 1$.

Криві потужності, яка споживається, зняті дослідним шляхом в процесі нагріву металу не мають різкого стрибка, так як нагрів металу відбувається поступово від шару до шару з різними значеннями $\rho_{\text{и}}$ і μ_r .

Глибина проникнення Δ_E із збільшенням частоти зменшується в \sqrt{f} раз, а потужність P_a , яка поглинається, зростає в \sqrt{f} раз.

2.9.2. Економія електроенергії в індукційних установках. Економія електроенергії в індукційних установках реалізується перш за все шляхом правильного вибору всіх елементів установки на етапі її проектування. Електричний і тепловий розрахунок індукційних печей з осердям та індукційних печей без осердя докладно викладений в [5].

Необхідно звернути увагу на вибір частоти змінного струму, так як при визначених (зростаючих) її значеннях ККД вже практично не збільшується, а втрати електроенергії збільшуються.

Прийнявши в першому наближенні $F_{\text{и}} = 1$ залежності η_e для різних випадків індукційного нагріву виражаються в залежності від $d_{\text{м}} / \Delta_{\text{м}}$ (рис. 2.9).

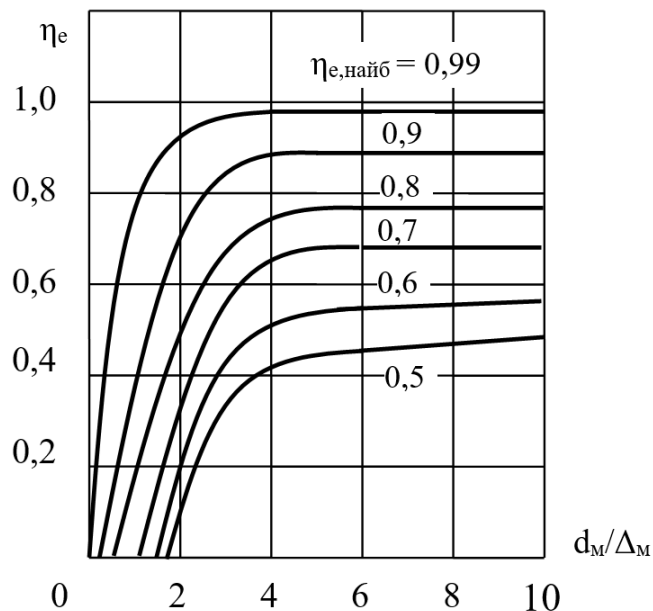


Рис 2.9. Залежність електричного ККД η_e від відношення товщини $d_{\text{м}}$ матеріалу, який нагрівається до глибини проникнення $\Delta_{\text{м}}$ при різних найбільших значеннях $\eta_{e,\text{найб}}$

Останні залежності на рис. 2.9 дозволяють стверджувати, що η_e досягає свого найбільшого значення $\eta_{e,\text{найб}}$ лише при $d_M / \Delta_M \rightarrow \infty$, що реально може бути тільки при частоті $f \rightarrow \infty$.

Виходячи із графіків на рис. 2.9 та з метою економії електроенергії, при виборі та обґрунтуванні частоти струму можна сформулювати умову:

$$d_M / \Delta_M \geq X,$$

і отримати формулу для визначення мінімально допустимої частоти струму:

$$f_{\min} = \frac{x^2 \rho}{\pi d_M^2 \mu},$$

Якщо в цій формулі ρ підставити в Ом·см, d_M в см і $\mu = 4\pi\mu_r$, то маємо:

$$f_{\min} = \frac{k\rho 10^8}{d_M \mu_r},$$

Тут коефіцієнт k необхідно вибирати в залежності від $\eta_{e,\text{найб}}$ та відношення $\eta_e / \eta_{e,\text{найб}}$, при якому бажано експлуатувати електромагнітну систему для індукційного нагріву. Його значення лежить в межах від 2 - 24 [4].

Вживши всі необхідні заходи для покращення конструкції індукційних установок, які забезпечують найкращі електроенергетичні характеристики η_e та $\cos\phi$, можна досягнути суттєвого скорочення питомих витрат електричної енергії. Не менші результати можна отримати і за допомогою скорочення теплових втрат за рахунок покращення теплоізоляції об'єктів, які нагріваються, однак ефективність цього заходу дуже обмежена внаслідок неможливості потовщення футерівки, адже це призводить до зменшення η_e і $\cos\phi$

високочастотних пристроїв. Внаслідок цього досягти зменшення теплових витрат можна лише шляхом покращення теплоізоляційних властивостей матеріалів та ведення раціональних режимів експлуатації.

Термічний ККД η_T визначається в загальному вигляді як відношення енергії, теоретично необхідної для виконання електротермічного процесу $W_{\text{теор}}$, до суми останньої з тепловими втратами W_T ,

$$\eta_T = \frac{W_{\text{теор}}}{W_{\text{теор}} + W_T} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha F \Delta t_{\text{п}} \tau}{c G \Delta t_{\text{м}}}}$$

де F – поверхня об'єктів які нагріваються;

α – коефіцієнт тепловіддачі;

$\Delta t_{\text{п}}$ – різниця температур між поверхнями, що віддають і поглинають тепло,

$c, G, \Delta t_{\text{м}}$ – середня теплоємність, вага та різниця між кінцевою і початковою температурою виробу, що нагрівається;

τ – час виконання електротермічного процесу.

Із розгляду останнього очевидно, що реальні шляхи збільшення η_T полягають в зменшенні величин $c, G, \Delta t_{\text{м}}$ і τ .

Вагомим методом значного збільшення η_T є зменшення поверхні F об'єктів, які нагріваються, з одночасним збільшенням їх об'єму V та ваги G .

Практика організації виробничих електротермічних процесів з використанням високочастотних печей малої ємності (до кількох кілограм) не є обґрунтованою та призводить до надмірної витрати електроенергії.

В якості прикладу на рис 2.10 показана усереднена залежність питомої витрати електроенергії ω при виплавці вуглецевих сталей у високочастотних печах без осердя від ваги садки G .

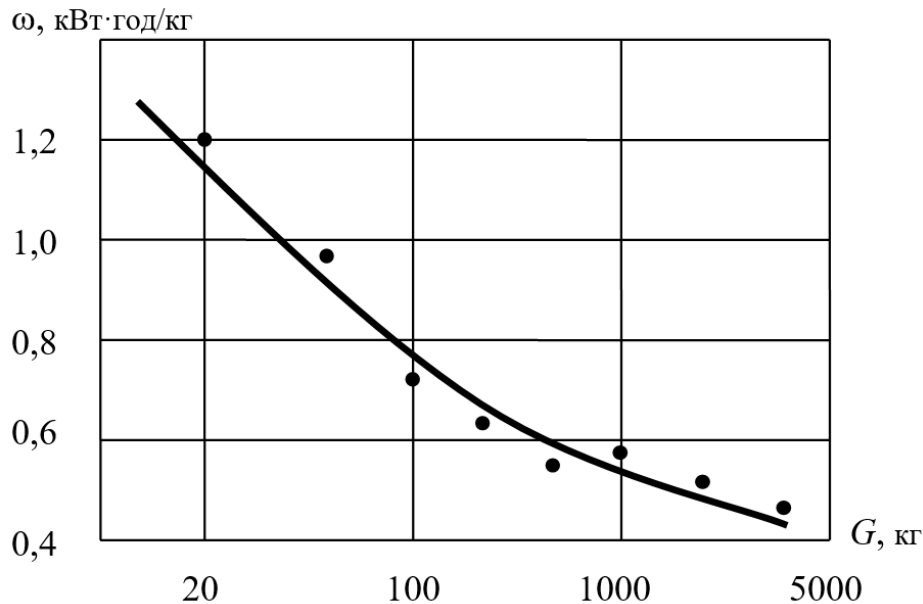


Рис. 2.10. Усереднена залежність питомої витрати електроенергії ω від ваги садки G індукційних височастотних печей при плавці сталей.

Невиправданим є значне поширення печей малої потужності з живленням від електронних генераторів при частотах 70-200 кГц. При великих напругах на печі та високих частотах скорочується термін служби набивних тиглів.

Збільшенням ємності печі досягається не тільки велика економія електроенергії, але і суттєво знижуються інші експлуатаційні витрати.

Враховуючи відносно погані теплоізоляційні якості височастотних пристроїв та можливості великої концентрації енергії при електронагріві різних матеріалів в змінних електромагнітних полях, найбільш дієвим засобом збільшення η_T є скорочення часу проведення електротермічних процесів τ .

Це виявляється можливим за рахунок збільшення питомих потужностей, віднесених до ваги G , об'єму V або поверхні F об'єктів, які нагріваються:

$$P_G = \frac{W}{G\tau} ; \quad P_F = \frac{W}{F\tau} ; \quad P_V = \frac{W}{V\tau}$$

В переважній більшості випадків прискорення процесів за рахунок збільшення питомих потужностей призводить не тільки до збільшення η_T , але і до більш сприятливих технологічних результатів.

У тих випадках, коли фізико-хімічні основи перешкоджають прискоренню технологічного процесу, час для його здійснення повинен бути вибраний мінімально можливим.

2.9.3. Конструктивний розрахунок індукційної печі без осердя. Нижче наведено приклад конструктивного розрахунку індукційної печі без осердя.

1. Завдання

Розрахувати індукційну піч без осердя для плавки якісної сталі (без рафінування).

1. Продуктивність печі при трьохзмінній роботі $N_{\text{доб}} = 8$ т за добу.
2. Тривалість плавки $T_1 = 1$ год.
3. Тривалість розливу та завантаження $T_2 = 10$ хв. = 0,17 год.
4. Шихта – сталевий лом розміром від 3 до 10 см.

За таблицями та графіками знаходимо наступні параметри сталі. Питомий опір: $\rho_{20} = 10^{-5}$ Ом·см; $\rho_C = 1,1 \cdot 10^{-4}$ Ом·см; $\rho_{\text{розл}} = 1,3 \cdot 10^{-4}$ Ом·см.

Теплоємність при температурі розливу $c \cong 340$ ккал/кг.

Питома вага розплавленої сталі $\gamma_{\text{пит}} = 7,2$ г/см³.

2. Визначення геометричних розмірів тигля.

Кількість плавок за добу

$$n_{\text{доб}} = \frac{24}{T_1 + T_2} = \frac{24}{1 + 0,17} = 20,5 \approx 20 \text{ плавок.}$$

Корисна ємність тигля

$$G_T = \frac{N_{\text{доб}}}{n_{\text{доб}}} = \frac{8}{20} = 0,4 \text{ т.}$$

Корисний об'єм тигля

$$V_{\text{т}} = \frac{G_{\text{т}} \cdot 10^6}{\gamma_{\text{пит}}} = \frac{0,4 \cdot 10^6}{7,2} = 5,56 \cdot 10^4 \text{ см}^3.$$

Відношення $A = d_0 / h$ для печей ємністю до 500 кг зазвичай приймається біля 2/3, тому середній діаметр тигля

$$d_0 = \sqrt[3]{\frac{4AV_{\text{т}}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \frac{2}{3} \cdot 5,56 \cdot 10^4}{\pi}} = 36,1 \approx 36 \text{ см.}$$

Корисна висота тигля

$$h = \frac{d_0}{A} = \frac{36}{2/3} = 54 \text{ см.}$$

Середня товщина футерівки $\Delta_{\text{ф}}$, є сумою середньої товщини стінок тигля $\Delta_{\text{т}}$ і товщини азбестового циліндра 5 мм для печей ємністю до 500 кг

$$\Delta_{\text{ф}} = \frac{d_0}{4} \div \frac{d_0}{6};$$

Приймемо:

$$\Delta_{\text{ф}} = \frac{d_0}{6} \Rightarrow \Delta_{\text{ф}} = \frac{36}{6} = 6 \text{ см.}$$

Внутрішній діаметр індуктора

$$D_{\text{в}} = d_0 + 2\Delta_{\text{ф}} = 36 + 2 \cdot 6 = 48 \text{ см.}$$

Зовнішній діаметр тигля

$$D_T = D_B - 2 \cdot 0,5 = 48 - 1 = 47 \text{ см.}$$

Висота індуктора h_i обирається в межах $(1,1-1,3)h$. Прийmemo $h_i = 1,2h = 1,2 \cdot 54 = 64,8 \approx 65$ см.

На рис. 2.11 зображений у розрізі тигель та індуктор.

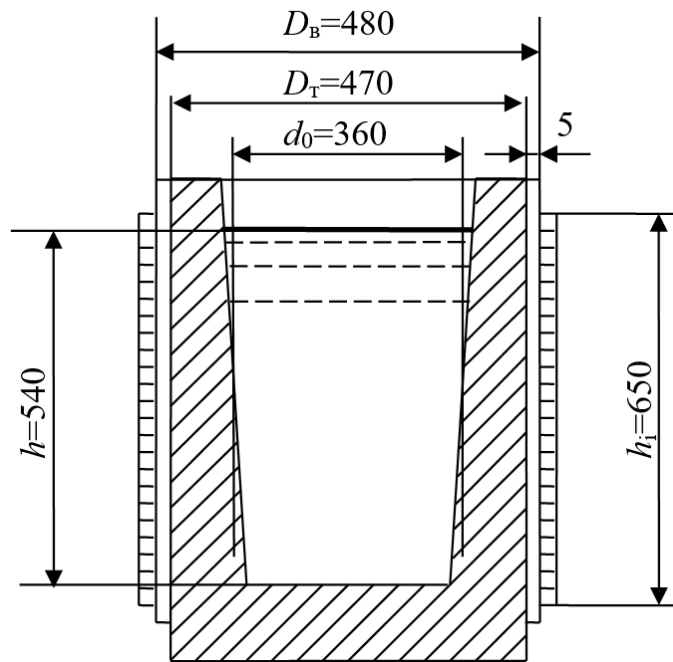


Рис. 2.11. Поздовжній переріз тигля

3. Визначення активної потужності печі:

$$P_{ca} = \frac{N_{доб} c_i}{20,65 \eta_T} \cdot \frac{T_1 + T_2}{T_1} \text{ кВт.}$$

Прийнявши тепловий К.К.Д. $\eta_T = 0,8$, отримаємо

$$P_{ca} = \frac{8 \cdot 340}{20,65 \cdot 0,8} \cdot \frac{1 + 0,17}{1} = 192,5 \approx 193 \text{ кВт.}$$

4. Вибір перетворювача частоти

Мінімальну частоту струму в індукторі орієнтовно визначимо за формулою

$$f_{\text{мін}} \geq 2,5 \cdot 10^9 \frac{\rho}{\mu_r d_0^2} \text{ (Гц)}$$

Параметри ρ і μ_r візьмемо для точки Кюрі після втрат магнітних властивостей

$$\rho_c = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}; \quad \mu_r = 1,0;$$

$$f_{\text{мін}} \geq 2,5 \cdot 10^9 \cdot \frac{1,1 \cdot 10^{-4}}{1,0 \cdot 36^2} = 211 \text{ Гц.}$$

Для холодної шихти, коли $d_0 = 10$ см (середні лінійні розміри окремих шматків шихти), $\rho_{20} = 10^{-5}$ Ом·см; $\mu_r = 100$:

$$f_{\text{мін}} \geq 2,5 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-5}}{100 \cdot 10^2} \approx 2,5 \text{ Гц.}$$

Якщо в момент втрати магнітних властивостей шматки шихти не зварилися в суцільний циліндр, то

$$\rho_c = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}; \quad \mu_r = 1,0 \text{ і } d_0 = 10 \text{ см і}$$

$$f_{\text{мін}} \geq 2,5 \cdot 10^9 \frac{1,1 \cdot 10^{-4}}{1,0 \cdot 10^2} \approx 2500 \text{ Гц.}$$

Зварювання шматків шихти в суцільний циліндр відбувається вище точки Кюрі, тому мінімальну частоту слід вважати $f_{\text{мін}} \geq 2500$ Гц.

Активна потужність перетворювача:

$$P_{\text{пр}} = 1,3P_{\text{ca}} = 1,3 \cdot 193 = 251 \text{ кВт.}$$

5. Електричний розрахунок печі

Питомі ампер-витки в індукторі визначаються за формулою:

$$(I\omega_{1,0}) = \frac{1}{k_s} \sqrt{\frac{P_{\text{ca}} \cdot 10^{11}}{8,75d_0^2 h \mu_r f \Psi_a}} \text{ а/см.}$$

В останньому виразі поки не відомі Ψ_a і $k_s = \frac{h_i}{h} \left(\frac{M'}{L_2} \right)$. Визначимо

аргумент функції Ψ_a , тобто $\frac{r_0 \sqrt{2}}{\Delta_\epsilon}$; $r_0 = \frac{d_0}{2} = 18 \text{ см.}$

Глибина проникнення:

$$\Delta_\epsilon = 5,03 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} = 5,03 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{1,1 \cdot 10^{-4}}{1,0 \cdot 2500}} = 1,057 \text{ см;}$$

$$\frac{r_0 \sqrt{2}}{\Delta_\epsilon} = \frac{18\sqrt{2}}{1,057} = 24,1.$$

При аргументі $\frac{r_0 \sqrt{2}}{\Delta_\epsilon} \geq 10$ функції Ψ_a і Ψ_r майже дорівнюють оберненій

величині аргументу

$$\Psi_a \approx \Psi_r \approx \frac{\Delta_\epsilon}{r_0 \sqrt{2}};$$

В нашому випадку:

$$\Psi_a \approx \Psi_r \approx \frac{1}{24,1} = 0,0415.$$

Коефіцієнт k_s знаходиться за формулою

$$k_s = \frac{\pi^2}{2} \left(\frac{d'}{h} \right) \frac{h_i}{h} \frac{M_0}{L_0}$$

де $d' = d_0 - \Delta_\epsilon$ – середній «електричний» діаметр садки; $d' = 36 - 1 = 35$ см.

Для знаходження M_0 та L_0 обчислимо величини $\frac{d'}{h}$, $\frac{h}{d'}$, $\frac{\Delta_\epsilon}{d'}$ і $\frac{D_B}{h_i}$:

$$\frac{d'}{h} = \frac{35}{54} = 0,648; \quad \frac{h}{d'} = \frac{1}{0,648} = 1,545; \quad \frac{h_i}{h} = 1,2; \quad \frac{\Delta_\epsilon}{d'} = \frac{1,06}{35} = 0,030; \quad \frac{D_B}{h_i} = \frac{48}{65} = 0,738$$

За графіками визначаємо:

$$\left(\frac{h_i}{h} M_0 \right) = f \left(\frac{D_B}{h_i}; \frac{h_i}{h} \right) = f(0,738; 1,2) = 1,46.$$

За графіками визначаємо:

$$L_0 = f \left(\frac{h}{d'}; \frac{\Delta_\epsilon}{d'} \right) = f(1,545; 0,030) = 4,8.$$

Тоді

$$k_s = \frac{\pi^2}{2} 0,648 \frac{1,46}{4,8} = 0,974.$$

Визначимо питомі ампер-витки в індукторі

$$(I\omega_{1,0}) = \frac{1}{0,974} \sqrt{\frac{193 \cdot 10^{11}}{8,75 \cdot 36^2 \cdot 54 \cdot 1,0 \cdot 2500 \cdot 0,0415}} = 566 \text{ а/см.}$$

Реактивна потужність в металі та зазорі

$$P_r = 6,20 \cdot 10^{-11} (I\omega_{1,0})^2 d_0^2 h f \left[\left(\frac{D_B}{d_0} \right)^2 - 1 + \sqrt{2} \mu_r \Psi_r \right] k_s^2 = 6,20 \cdot 10^{-11} \cdot 566^2 \times \\ \times 36^2 \cdot 54 \cdot 2500 \left[\left(\frac{48}{36} \right)^2 - 1 + \sqrt{2} \cdot 1,0 \cdot 0,0415 \Psi_r \right] 0,974^2 = 2745 \text{ квар}$$

Активні та реактивні втрати в індукторі

$$P_{вта} = 6,20 \cdot 10^{-7} (I\omega_{1,0})^2 \frac{D_B}{k_{3,i}} h_i \sqrt{\rho_i} f F_{вщп} \text{ (кВт)}$$

Прийнявши попередньо величину коефіцієнта заповнення орієнтовно $k_{3,i} = 0,8$ та величину функції $F_{вщп} = 1,0$, отримаємо:

$$P_{вта} = 6,20 \cdot 10^{-7} 566^2 \frac{48 \cdot 65}{0,8} \sqrt{2 \cdot 10^{-6} \cdot 2500} \cdot 1,0 = 54,6 \text{ кВт}$$

$$|P_{вта}| = |P_{втр}| = 54,6 \text{ квар.}$$

Загальна активна потужність

$$P_{0a} = P_{ca} + P_{вта} = 193 + 54,6 = 247,6 \text{ кВт.}$$

Загальна реактивна потужність

$$P_{0r} = P_r + P_{\text{втр}} = 2745 + 54,6 \approx 2800 \text{ кВар.}$$

Повна потужність системи індуктор – садка

$$P_0 = \sqrt{P_{0a}^2 + P_{0r}^2} = \sqrt{247,6^2 + 2800^2} = 2810 \text{ кВА}$$

Струм в індукторі:

$$I = \frac{P_0 \cdot 10^3}{U_i}$$

Прийmemo напругу на індукторі в перший період $U_i = 1500 \text{ В}$, тоді струм в індукторі

$$I = \frac{2810 \cdot 10^3}{1500} = 1875 \text{ А}$$

Після зміни параметрів шихти і втрати магнітних властивостей перетворювач перемикається до частини витків індуктора, напруга на індукторі зросте до 2000 В , тоді струм в індукторі буде рівний

$$I = \frac{2810 \cdot 10^3}{2000} = 1405 \text{ А}$$

Питома кількість витків (на 1 см довжини індуктора) для цього випадку

$$\omega_{1,0} = \frac{(I\omega_{1,0})}{I} = \frac{566}{1405} = 0,403 \text{ витків/см}$$

Повна кількість витків:

$$\omega_i = \omega_{1,0} h_i = 0,403 \cdot 65 = 26 \text{ витків}$$

Кількість витків, до яких приєднується перетворювач під час другого періоду плавки:

$$\omega_{\text{жив}} = \omega_i \frac{U_1}{U_2} = 26 \frac{1500}{2000} = 19 \text{ витків}$$

Для більш точної підгонки напруги генератора до напруги на індукторі передбачаються додаткові виводи від 18, 20, 21 і 22 витків (рис. 2.12).

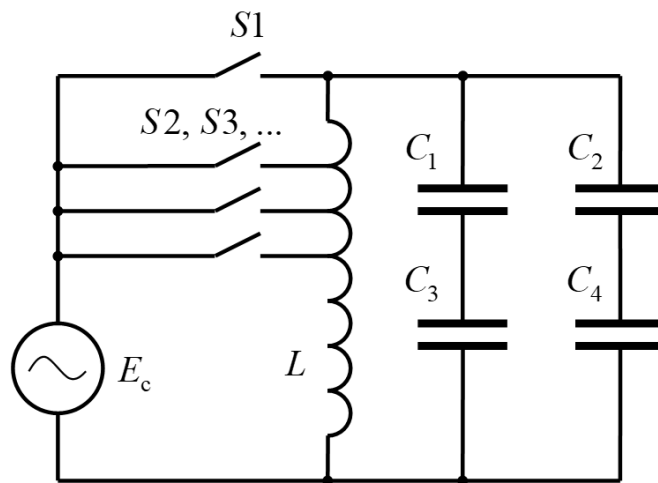


Рис. 2.12. Схема підключення індуктора

Крок витка:

$$\tau = \frac{h_i}{\omega_i} = \frac{65}{26} = 2,5 \text{ см}$$

Ізоляційний проміжок між витками визначимо задавшись напругою на 1 мм зазору 20 В/мм

$$\Delta_{i3} = \frac{U_1}{20\omega_i} = \frac{2000}{20 \cdot 26} = 3,85 \text{ мм.}$$

Прийmemo $\Delta_{i3} = 4 \text{ мм.}$ Тоді $h_B = \tau - \Delta_{i3} = 25 - 4 = 21 \text{ мм,}$ і дійсний коефіцієнт заповнення $k_{3,i} = \frac{h_B}{\tau} = \frac{21}{25} = 0,84$ (попередньо задавались $k_{3,i} = 0,8$).

Товщина стінки трубки знаходиться із умови мінімуму втрат $\Delta_{тр} \geq 1,3\Delta_\epsilon$ для міді при $\theta = 50^\circ\text{C,}$ $\rho = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ і $f = 2500 \text{ Гц}$

$$\Delta_\epsilon = 5,03 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 5,03 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-6}}{2500}} = 0,142 \text{ см;}$$

$$\Delta_{тр} \geq 1,3 \cdot 0,142 = 0,182 \text{ см}$$

Тому для індуктора вибираємо мідну трубку діаметром 20/16 мм з товщиною стінки 2 мм.

Середня густина струму в перерізі трубки

$$\delta_{cp} = \frac{I}{\frac{\pi}{4}(d_{зов}^2 - d_{вн}^2)} = \frac{1875}{\frac{\pi}{4}(20^2 - 16^2)} = 15 \text{ А/мм}^2$$

Електричний ККД печі

$$\eta_{ел} = \frac{1}{1 + \frac{P_{втa}}{P_{ca}}} = \frac{1}{1 + \frac{54,6}{193}} = 0,779$$

Для порівняння визначимо величину максимального електричного К.К.Д.

$$\eta_{\text{ел.макс}} = \frac{1}{1 + \frac{D_{\text{в}}}{d_0 k_s^2 k_{3,i}} \sqrt{\frac{\rho_i}{\rho \mu_r}}} = \frac{1}{1 + \frac{48}{36 \cdot 0,974^2 \cdot 0,83} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-6}}{1,1 \cdot 10^{-4} \cdot 1,0}}} \approx 0,814$$

Як видно значення $\eta_{\text{ел.макс}}$ достатньо близьке до дійсної величини $\eta_{\text{ел}} = 0,779$.

Природній $\cos \varphi$ печі

$$\cos \varphi = \frac{P_{0a}}{P_0} = \frac{247,6}{2810} = 0,0877$$

Ємність конденсаторної батареї

$$C = \frac{P_{0r} \cdot 10^9}{2\pi f U_{\text{к}}^2} = \frac{2800 \cdot 10^9}{2\pi \cdot 2500 \cdot 1000^2} = 178,4 \text{ мкФ}$$

6. Енергетичний баланс.

а) Електричні втрати в індукторі вже були визначені – $P_{\text{вта}} = 54,6$ кВт.

б) втрати в струмопроводі прийmemo рівним 4,5 % активної потужності, припускаючи з'єднання печі та струмопроводу гнучким кабелем:

$$P_{\text{всп}} = 0,045 P_{0a} = 0,045 \cdot 247,6 = 11,1 \text{ кВт}$$

в) втрати в конденсаторній батареї:

$$P_{\text{вк}} = 0,0025 P_r = 0,0025 \cdot 2800 = 7,0 \text{ кВт}$$

г) теплові втрати печі:

$$P_{\text{вт}} = (1,4 \div 1,5)P_{\text{вт1}} \approx 1,45 \cdot 9,93 = 14,4 \text{ кВт},$$

де $P_{\text{вт1}} = 9,93$ кВт – знайдено вище.

д) активна потужність яка відбирається від перетворювача:

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{са}} + P_{\text{вта}} + P_{\text{втк}} + P_{\text{всп}} = 193 + 54,6 + 7,0 + 11,1 = 265,7 \text{ кВт}.$$

2.10 Розробка заходів з економії електроенергії в компресорних установках

Використання стисненого повітря як енергоносія знайшло широке використання в промисловості, а для його отримання витрачається значна кількість електроенергії. Особливо велика витрата стисненого повітря у вугільній, нафтовій промисловості, чорній металургії та машинобудуванні.

Часто прямі втрати стисненого повітря (витік в мережах, невиробничі витрати, невпорядкованість повітряного господарства або незадовільна його експлуатація) сягають 20-25 %, а в окремих випадках складають половину виробництва стисненого повітря на підприємстві.

Скорочення витрати електроенергії, яка необхідна для забезпечення підприємства стисненим повітрям, можливо за наступними напрямками:

- покращення роботи компресорів в результаті регулюванні подачі при коливаннях витрати стисненого повітря;
- автоматизація відкриття клапанів для всмоктування повітря;
- відключення зайвих компресорів при зниженні витрати стисненого повітря;
- зниження номінального робочого тиску компресорної установки;

- впровадження в поршневих компресорах прямоточних клапанів; здійснення резонансного наддуву поршневих компресорів;
- підігрів стисненого повітря перед пневмоприймачами;
- заміна компресорів старих конструкцій на нові з вищим ККД;
- систематичний контроль за витоками стисненого повітря на окремих ділянках, систематичне усунення нещільностей в сальниках, трубопроводах, з'єднувальній та запірній арматурі;
- відключення окремих ділянок або всієї мережі стисненого повітря в неробочий час;
- заміна, там де доцільно, стисненого повітря іншими енергоносіями;
- заміна пневмоінструмента на електроінструмент тощо.

2.10.1. Визначення потужності, яка споживається компресорами.

Потужність відцентрових та осьових компресорів визначається виразом, кВт,

$$P_{\text{роб.маш}} = k \frac{C_T C_P (T_H - T_{\text{вс}}) + Q_T}{0,24 \eta_M},$$

де k – коефіцієнт, що враховує втрати тепла в навколишнє середовище ($k = 1,01 \div 1,02$ для великих осьових компресорів, $k = 1,08 \div 1,1$ для невеликих відцентрових машин);

C_T – фактична витрата повітря, яке проходить через компресор, із врахуванням витоку через нещільності, кг/с;

$$C_T = \gamma V \frac{293}{273 + t_b} p,$$

де C_P – теплоємність повітря при постійному тиску та при різних значеннях температури t визначається за табл. 2.24;

T_H – температура повітря в напірному патрубку компресора, К;

$T_{\text{вс}}$ – температура повітря на всмоктуванні компресора, К;

Q_T – кількість тепла, відданого охолоджуючій воді (при наявності охолодження у компресора), визначається за формулою, ккал/с,

$$Q_T = c_B (t''_B - t'_B),$$

тут c_B – витрата води для охолодження, м³/с;

t''_B, t'_B – температура води для охолодження до та після холодильника, °С;

η_M – механічний ККД компресора (можна прийняти рівним 0,97-0,98);

γ – густина повітря, рівна 1,293 кг/м³ (при 0 °С і 760 мм рт. ст.);

V – показники витратоміру, м³/с;

t_B – температура повітря, °С;

p – абсолютний тиск повітря в місці заміру, кгс/см².

Таблиця 2.24 Теплоємність повітря

$p,$ кгс/см ²	$t_1, \text{°C}$			
	18	38	58	124
1	0,241	0,241	0,241	0,241
10	0,247	0,245	0,244	0,243
15	0,25	0,248	0,247	0,244
30	0,261	0,257	0,254	0,247
70	0,285	0,278	0,271	0,258
100	0,302	0,292	0,281	0,264
150	0,323	0,309	0,265	0,27
200	0,347	0,326	0,309	0,283

Потужність поршневих компресорів, кВт,

$$P_{\text{роб.маш}} = \frac{P_{\text{інд}}}{\eta_{\text{мех}}},$$

де $\eta_{\text{мех}}$ – механічний ККД компресора;

$$P_{\text{інд}} = P_{\text{ном}} (1 + \Delta C_{\text{інд}});$$

$$P_{\text{ном}} = 1,639 P_{\text{BC}} V_h \lambda_{\text{vlag}} \frac{k}{k-1} \left(\varepsilon^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)$$

де $\Delta C_{\text{інд}}$ – коефіцієнт втрат індикаторної потужності для повітря;

P_{BC} – тиск повітря на вході в ступень, кгс/см²;

V_h – хвилиний робочий об'єм, м³/хв:

$$V_h = f h n,$$

де f – робоча площа поршня, м²;

h – хід поршня, м;

n – частота обертання компресора, об/хв.;

$$\lambda_{\text{vlag}} = 1 - a \left(\varepsilon^{\frac{1}{k}} - 1 \right)$$

де a – відносне значення мертвого простору, в долях;

k – показник адіабати повітря, що стискається, $k = 1,4$;

$\varepsilon = P_{\text{нагн}} / P_{\text{BC}}$ – ступінь стиснення;

$P_{\text{нагн}}$ і P_{BC} – тиск повітря відповідно після та перед компресором, кгс/см².

Для різних типів компресорів значення $\eta_{\text{мех}}$ що наведено в табл. 2.25.

Таблиця 2.25. Значення $\eta_{\text{мех}}$ для різних типів компресорів

№ з/п	Тип компресора	$\eta_{\text{мех}}$
1	Середні та великі компресори вертикального і кутового типу у виконанні крейцкопфа (від 10 м ³ /хв. і вище)	0,9-0,95
2	Горизонтальні багатосходинкові	0,88-0,93
3	Малі без крейцкопфа (до 10 м ³ /хв.)	0,8-0,85

Менше значення $\eta_{\text{мех}}$ відноситься до меншої подачі компресора, більше – до більшої.

Тиск нагнітання 1-ї ступені компресора:

$$P_{\text{нагн}} = P_{\text{BC2}} = \sqrt[n]{P_{\text{нагн}}}$$

де P_{BC2} – тиск всмоктування 2-ї ступені компресора кгс/см²;

$P_{\text{нагн}}$ – тиск нагнітання компресора кгс/см²;

n – кількість ступеней компресора.

Визначення коефіцієнта втрат індикаторної потужності від тиску всмоктування P_{BC} та ступеня стиснення ε (рис. 2.13).

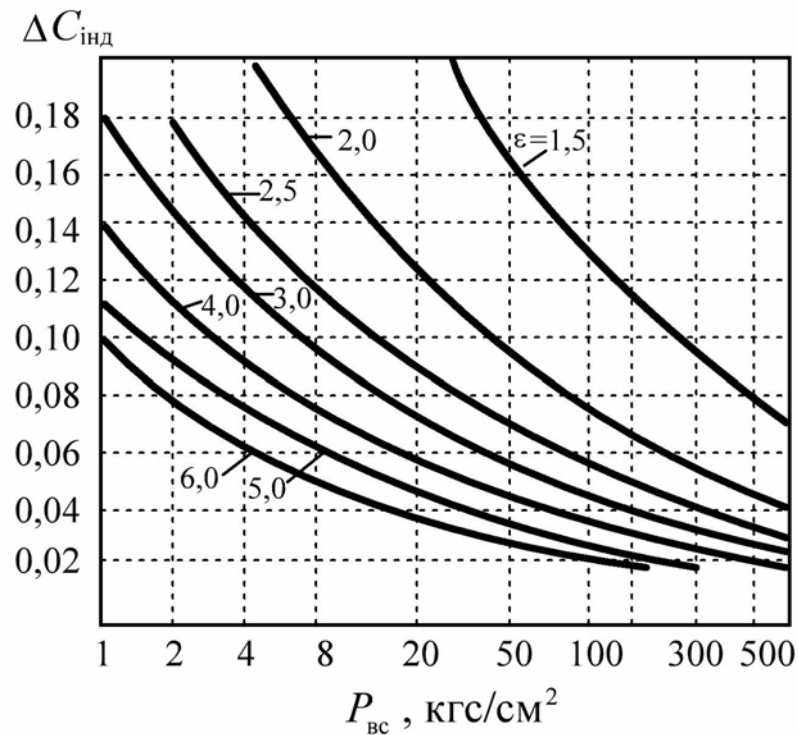


Рис 2.13. Залежність коефіцієнта втрат індикаторної потужності від тиску всмоктування компресора

2.10.2. Зниження номінального робочого тиску компресорної установки. Як правило, всі споживачі отримують стиснене повітрям із

загальної повітряної мережі підприємства. Однак для роботи багатьох технологічних процесів необхідні різні тиски повітря.

Споживання стисненого повітря з тиском вище необхідного призводить до невиробничої витрати електроенергії, яка витрачається на стиснення повітря.

Зниження тиску у споживачів стисненого повітря може бути здійснене з допомогою редуктора, інжектора, дроселювання та регуляторів тиску. Найбільш ефективно використання регуляторів тиску.

Втрати енергії при використанні стисненого повітря при тиску вище номінального визначаються, кВт·год/рік,

$$\Delta E = \frac{1,1(P_1 - P_2)60Qt}{367200\eta_m\eta_e\eta_{пр}\eta_{мех}\eta_i}$$

де P_1, P_2 – робота стиснення 1 м³ свіжого повітря, кгм/м³, в залежності від тиску визначається за характеристикою компресора;

Q – подача компресора, м³/хв;

t – час роботи компресора на рік, год.;

η_m, η_e і $\eta_{пр}$ – ККД електромережі, електродвигуна та передачі (0,8-0,99);

$\eta_{мех} = 0,85-0,95$ – механічний ККД компресора;

η_i – індикаторний ККД;

1,1 – коефіцієнт, що враховує додаткові витрати електроенергії внаслідок зношення компресорної.

2.10.3. Впровадження прямоточних клапанів в поршневих компресорах. В недалекому минулому більшість компресорів випускались з кільцевими або дисковими клапанами. Ці клапани мали значні недоліки:

а) прохідні отвори були недостатні, що викликало значні опори проходженню повітря, в результаті знижувалась подача компресора та збільшувались питомі витрати енергії;

б) довговічність цих клапанів не перевищувала 3000 год. роботи, в той час як строк служби прямоточних клапанів складає 8000 год.

Багаторічні випробовування і накопичений досвід експлуатації показав, що при встановленні прямоточних клапанів замість кільцевих (пластинчатих) питома витрата електроенергії на виробництво стисненого повітря знижується в середньому на 13-15 %.

Річна нераціональна витрата електроенергії компресорної внаслідок використання кільцевих клапанів замість прямоточних визначається, кВт·год:

$$\Delta E = 0,15 P_k t,$$

де P_k – потужність, яка споживається компресором із електромережі, кВт,

$$P_k = \frac{\sqrt{3}UI \cos \varphi}{1000},$$

де U – напруга мережі, В;

I – фактичний струм електродвигуна компресора, А;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності електродвигуна компресора;

t – час роботи компресора на рік, год.

2.10.4. Резонансний наддув поршневих компресорів. В системі всмоктування компресора виникають коливання повітря внаслідок того, що повітря, яке всмоктується в циліндр, прямує за поршнем, швидкість якого при кожному ході змінюється від нуля до максимуму і від максимуму до нуля. Роль резонатора виконує ємність трубопроводу, яка володіє власною частотою коливання.

При збігу або кратності частоти коливання повітряного стовпа з власною частотою трубопроводу всмоктування настає резонанс, при якому виникають стоячі хвилі тиску, збільшуючи тиск повітря у клапанів в кінці ходу всмоктування, завдяки чому заповнення циліндру і подача компресора збільшується.

Для досягнення резонансу частіш усього використовують систему ємність - трубопровід - ємність вторинна - вторинний трубопровід (рис 2.14).

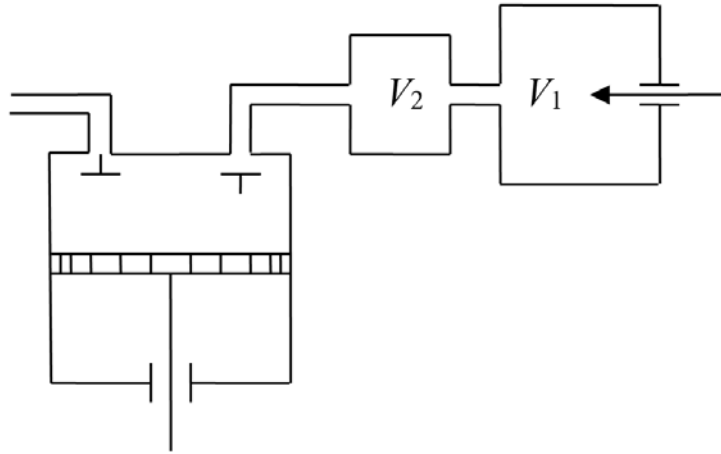


Рис 2.14. Схема резонансного наддуву поршневих компресорів

Вміст ємності визначається шляхом замірів питомої витрати електроенергії на виробництво стисненого повітря при зміні об'єму спочатку V_2 , а потім великого V_1 резонаторів. Оптимальне значення об'ємів малого та великого резонаторів визначається дослідним шляхом.

Як показує практика, використання резонансного наддуву поршневих компресорів скорочує питомі витрати електроенергії.

2.10.5. Підігрів стисненого повітря перед пневмоприймачами. Одним з ефективних заходів з економії електроенергії при використанні стисненого повітря є теплоізоляція повітропроводу, яка дозволяє подати стиснуте повітря з підвищеною температурою. При цьому зменшується витрата повітря і, відповідно, втрати електроенергії.

Економія електроенергії в цьому випадку визначається виразом, кВт·год,

$$\Delta E = 0,22Q\Delta t^\circ \omega t$$

де Q – витрата стисненого повітря, м³/хв.;

Δt – різниця температури до установки теплоізоляції повітропроводу та після (в середньому на рік), °С;

ω – питома витрата електроенергії на виробництво 1 м³ стисненого повітря, кВт·год/м³;

t – кількість годин роботи компресорної установки на рік, год.

2.10.6. Заміна компресорів старих конструкцій на нові з вищим ККД.

Використання компресорів досконалих конструкцій замість застарілих дає значну економію електроенергії, тис. кВт·год на рік,

$$\Delta E = \frac{(P_1 - P_2)t}{10^3}$$

де t – час роботи компресора, год. на рік;

P_1 – потужність електродвигуна компресора старої конструкції, кВт;

P_2 – потужність електродвигуна компресора нової конструкції, кВт.

2.10.7. Витік стисненого повітря, технічної води, кисню, інших рідин і газів, через поганий стан трубопроводів, з'єднувальної і запірної арматури.

Втрати будь-якого енергоносія при трубопровідному транспорті визначаються наступними способами:

Наявності витратомірів на початку і в кінці розподільчої мережі

$$\Delta C = C_{\text{п}} - C_{\text{к}}$$

де $C_{\text{п}}$ і $C_{\text{к}}$ – витрата енергоносія за звітний період відповідно на початку і в кінці ділянки.

Втрати енергоносія множаться на значення норми витрати електроенергії для даної установки.

Відключення окремих ділянок. На початку магістралі встановлюється витратомір і відключаються всі споживачі. Прилад при цьому показує витік ΔC (кг/год, м³/хв і т. п.). Потім вимірюється витрата всіх працюючих споживачів.

Значення витоку y %:

$$\Delta q = \frac{\Delta C}{C} 100\% .$$

Вимірювання падіння тиску в розподільчій мережі. На початку мережі встановлюють витратомір, манометр і термометр.

1-й спосіб:

$$\Delta m = \frac{V_0 60}{R \tau} \left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2} \right) \frac{\Delta p_1}{\Delta p_{\text{ср}}}$$

де V_0 – внутрішній об’єм відключеної магістралі;

R – газова постійна енергоносія (для повітря $R = 29,3$ кгс/(кг·град));

τ – час, на протязі якого проводилось випробовування, хв.;

p_1, T_1 – початковий тиск, кгс/м², і температура, К, в відключеній мережі;

p_2, T_2 – те ж через проміжок часу, рівний τ ;

$$\Delta p_{\text{ср}} = \frac{p_1 + p_2}{2} - p_0; \quad \Delta p_1 = p_1 - p_0.$$

Витік визначається за виразом:

$$\Delta q = \frac{\Delta m}{\rho_0 V} 100\%$$

де ρ_0 – густина повітря, кг/м³;

V – годинна витрата повітря в магістралі при підключених споживачах.

2-й спосіб. Падіння тиску в мережі при відключених споживачах вимірюється кожні 15-30 с на протязі випробування.

Втрати енергоносія перераховується на втрати електроенергії: втрати енергоносія множаться на величину питомої норми витрати електроенергії, яка встановлена для даної компресорної установки.

2.10.8. Скорочення витоків стисненого повітря. Витоки стисненого повітря відбуваються головним чином в трьохходових кранах і через отвори в шлангах та залежать від тиску в мережі, діаметру отворів.

Втрати електроенергії на витік стисненого повітря орієнтовно визначаються, кВт·год,

$$\Delta E = \alpha n \omega t$$

де α – коефіцієнт витрати повітря через нещільності арматури та шлангів, м³/хв (рис. 2.15);

n – кількість точок, де необхідно встановити витік стисненого повітря;

t – час, на протязі якого повітропровід знаходився під тиском, год.;

ω – питома витрата електроенергії на виробництво 1 м³ стисненого повітря, кВт·год.

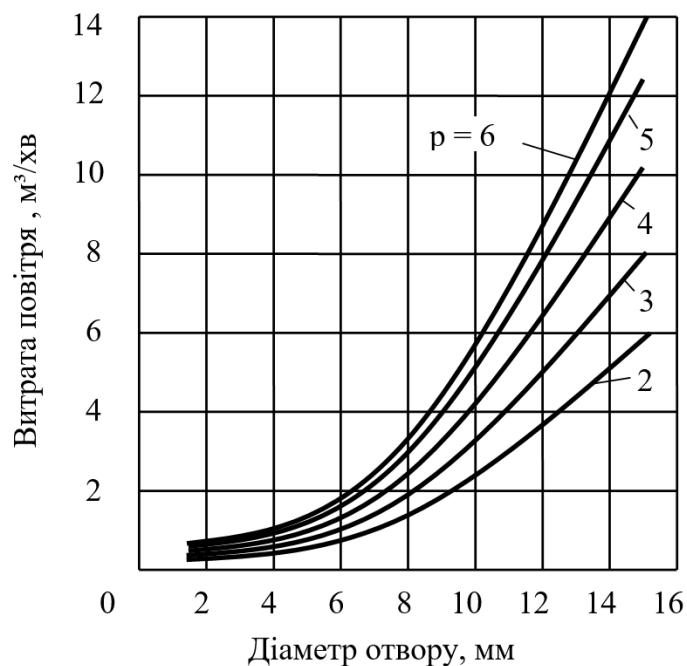


Рис. 2.15. Витрата повітря через нещільності в арматурі та шлангах

2.10.9. Заміна стисненого повітря іншими енергоносіями.

Використання стисненого повітря для роботи приводів різних механізмів зазвичай супроводжується втратами його внаслідок зношення ущільнюючих манжет і запірних кранів. Крім того, влітку волога стисненого повітря викликає корозію пневматичних пристроїв, що сприяє збільшенню витоків.

В теперішній час на багатьох підприємствах пневматика замінюється електроприводом в таких процесах, як вибивка опок в ливарних цехах, очищення лиття, механічна обробка виробів ручним інструментом, подача землі із роздавальних бункерів, підйом води із артезіанських свердловин, клепальні роботи, заміна пневмоінструмента на електроінструмент і ін.

Вибивка опок в ливарному цеху. Вибивна решітка з механічним приводом робить коливальні рухи, які створюються з допомогою валу з ексцентрично насадженими роликівими підшипниками, на які впирається решітка. При обертанні валу решітка коливається з частотою, рівною частоті обертання валу. Вал приводиться в рух електродвигуном. Продуктивність решітки з електродвигуном значно більша продуктивності решітки з пневматичним приводом, а питома витрата електроенергії за вибивку в 15-20 раз зменшується.

Очищення лиття після вибивки проводиться піскодувних апаратом. Цей спосіб потребує великої кількості стисненого повітря (200-300 м³/год) і потужної вентиляції для відсмоктування пилу із камери.

На багатьох підприємствах в теперішній час замість піскодувних установок використовуються дрободувні. При цьому потужність електродвигунів на дрободувній установці не перевищує 10 кВт, а витрата електроенергії в 4 рази менша, ніж при піскодувному очищенні.

2.10.10. Заміна пневмоінструмента електроінструментом.

Пневматичний ручний інструмент використовується для свердлильних, шліфувальних, клепальних та інших робіт. Коефіцієнт корисної дії ручного пневмоінструмента досить низький, внаслідок чого доцільно і економічно замінити пневмоінструмент електроінструментами. В середньому економія електроенергії при цьому складе 7-10 %.

Значний економічний ефект забезпечується впровадженням електровідбійних молотків в шахтах взамін пневматичних. Електровідбійні молотки мають ККД біля 0,6 замість 0,11 у пневматичних, витрата електроенергії при цьому скорочується в 10 раз.

Велику економію електроенергії (в 2-3 рази) на розбірних бункерах дає заміна пневматичних вібраторів електричними.

2.10.11. Заміна стисненого повітря вентиляторним дуттям. Нерідко використання стисненого повітря неекономічне і пов'язане з великими втратами електроенергії. Коли за умовами виробництва доцільна заміна стисненого повітря вентиляторним дуттям, отримується значний економічний ефект.

Значення ККД електричної установки з вентиляторним пристроєм можна визначити за формулою,

$$\eta_{e.e} = \eta_{m.v} \eta_{tr} \eta_{e.m.n} \eta_{e.v.}$$

де $\eta_{m.v}$ – ККД мережі високої напруги (0,9-0,95);

η_{tr} – ККД трансформатора (0,85-0,9);

$\eta_{e.m.n}$ – ККД мережі низької напруги (0,95);

$\eta_{e.v.}$ – ККД електродвигуна і вентилятора (0,7-0,8).

Значення ККД передачі стисненого повітря орієнтовно визначається за формулою

$$\eta_{п.е} = \eta_{кc} \eta_{c} \eta_{п}$$

де $\eta_{кc}$ – ККД компресорної установки (0,6-0,7);

η_{c} – ККД розподільчої мережі стисненого повітря (0,65);

$\eta_{п}$ – ККД споживача стисненого повітря (0,2-0,3).

В середньому на виробництво 1000 м³ стисненого повітря необхідно біля 100-120 кВт·год, а при старих компресорах і до 160 кВт·год.

2.11 Розробка заходів з економії електроенергії у вентиляційних установках

2.11.1. Загальні положення. Витрата електроенергії вентиляційними установками в деяких виробництвах значна.

Скорочення витрат електроенергії у вентиляційних установках забезпечують наступні заходи:

- заміна старих вентиляторів новими, більш економічними;
- впровадження економічних способів регулювання продуктивності вентиляторів;
- блокування вентиляторів теплових завіс з пристроями відкривання і закривання воріт;
- відключення вентиляційних установок під час обідніх перерв, перезмін;
- усунення експлуатаційних дефектів і відхилень від проекту;
- впровадження автоматичного керування вентиляційними установками.

Витрата електроенергії на привід вентиляторів визначається дослідним шляхом по встановленій потужності двигунів, кВт·год на рік,

$$E_{\text{вент}} = \sum_1^n k_n P_{\text{вст}} \tau$$

де n – кількість вентиляційних установок на підприємстві;

$P_{\text{вст}}$ – встановлена потужності електродвигуна (за паспортними даними);

τ – тривалість роботи вентилятора на протязі року, год.;

k_n – коефіцієнт використання вентиляторів (табл. 2.26):

Таблиця 2.26. Значення коефіцієнта використання k_n для різних типів вентиляційних установок

№ з/п	Електроприймачі	k_n
1	Вентилятори	0,6-0,8
2	Вентилятори високого тиску	0,75
3	Вентилятори дробівки	0,4-0,5
4	Газодувки	0,5-0,6

2.11.2. Заміна вентиляторів старих типів на сучасні. Заміна вентиляторів старих типів з низьким ККД вентиляторами нового типу дає наступну економію електроенергії, кВт·год:

$$\Delta E = \frac{hQ(\eta_2 - \eta_1)t}{102\eta_1\eta_2\eta_e\eta_m}$$

де η_1 і η_2 – ККД вентиляторів який замінюємо т установлюємо відповідно;
 η_e і η_c – ККД електродвигуна і мережі відповідно.

Характеристики деяких вентиляційних установок приведені в табл. 2.27.

Таблиця 2.27 Характеристики вентиляційних установок

№ з/п	Тип вентилятору	ККД	h , мм вод. ст.	Q , м ³ /хв
1	ВМ-200	0,52	155-50	100-215
2	ВМ-1	0,61	108-115	115-172
3	ВЧПУ-100	0,52	140-30	30-180
4	СВМ-4			
5	Одна секція	0,74	85-40	70-110
6	Дві секції	0,7	170-60	110-140
7	СВМ-5	0,7	130-60	80-200
8	СВМ-6	0,7	200	200-370

2.11.3. Впровадження економічних способів регулювання подачі вентиляторів. Значне скорочення витрат електроенергії вентиляторам забезпечують наступні заходи.

1. Використання багатошвидкісних електродвигунів замість регулювання шиберами в напірній лінії вентиляційної установки. Економія енергії при цьому складає 20-30 %.

2. Регулювання подачі повітродувок шиберами на всмоктуванні замість регулювання на нагнітанні дає економію електроенергії до 15 %.

3. Регулювання витяжної вентиляції шиберами на робочих місцях замість регулюванні на нагнітанні.

4. Регулювання подачі димососу з допомогою циліндричних апаратів направлення проти дросельного дає економію електроенергії до 25 %.

2.11.4. Блокування вентиляторів теплових завіс з пристроями відкривання і закривання воріт. Для скорочення витрат електроенергії на

привід вентиляторів теплових завіс в більшості випадків пропонується блокувати механізм теплової завіси з пристроєм відкривання і закривання воріт.

Коли ворота відчиняються, автоматично вмикається тепла завіса, а при закриванні воріт завіса відключається.

Коли робочі місця знаходяться близько до воріт, необхідно встановлювати на теплові завіси двошвидкісні електродвигуни, які автоматично вмикаються на вищу швидкість при відкриванні воріт і перемикаються на низьку швидкість при закритих воротах. При цьому потужність електродвигуна при роботі з меншою швидкістю в 2 рази менша, ніж при роботі на вищій швидкості.

Звичайно, тепла завіса працює на зниженій швидкості вентилятора (60-70 % загальної кількості годин роботи). Якщо прийняти опалювальний сезон тривалістю 4000 год/рік і потужність електродвигуна 10 кВт, то електродвигун повинен працювати з половинною потужністю 5 кВт 2400 год. Економія електроенергії при цьому $\Delta E = 5 \cdot 1600 = 8000$ кВт·год.

Відключення вентиляційних установок під час обідніх перерв і перезмін дає нерідко економію електроенергії до 20 %.

2.11.5. Покращення роботи вентиляторів. Втрати електроенергії у вентиляторній установці можна знизити за рахунок зміни частоти обертання валу, кута установки лопаток на робочому колесі, повороту лопаток направляючого апарату і ін.

Економія електроенергії при цьому, кВт·год,

$$\Delta E = \frac{(h_1 Q_1 \eta_1 - h_2 Q_2 \eta_2) t}{102 \eta_1 \eta_2 \eta_e \eta_m \eta_{пр}}$$

де Q_1 і Q_2 – подача вентилятора до і після зміни режиму його роботи, яка визначається за суміщеними характеристиками вентилятора і вентиляційної мережі, м³/с;

h_1 і h_2 – тиск вентилятора до і після зміни режиму;

$\eta_e, \eta_{np}, \eta_c$ – ККД електродвигуна, передачі та електричної мережі, вказаними коефіцієнтами при переході на новий режим роботи вентилятора для практичних розрахунків можна знехтувати;

η_1 і η_2 – ККД вентилятора до і після зміни його режиму.

2.11.6. Усунення дефектів при експлуатації вентиляторних установок.

Нерідко під час монтажу, збиранні або ремонті вентиляторних установок допускається відхилення від проекту; ці дефекти приводять до нераціональної витрати електроенергії.

До них можна віднести:

- роботу осьового вентилятора з перевернутим колесом, при цьому знижується ККД вентилятора на 20-40 % і, відповідно, збільшується витрата електроенергії;

- збільшення зазору між робочим колесом і патрубком всмоктування у відцентрових вентиляторах (нормальний зазор має бути не більше 1,5 % довжини лопатки). Недотримання цих умов різко знижує ККД і збільшує витрату електроенергії. Наприклад, у осьового вентиляторів збільшення зазору до 3 % довжини лопатки знижує ККД на 5-10 %;

- зняття обтікача перед входом в робоче колесо знижує ККД на 10 %;

- скорочений дифузор або його відсутність у осьових вентиляторів знижує ККД на 6 %;

- неякісне виготовлення і монтаж відводів, трійників, колін, вм'ятин, погана штукатурка каналів і т. п. значно збільшує опір системи і, відповідно витрату енергії:

- нещільності у фланцевих з'єднаннях, негерметичність з'єднань повітроводів до вентиляторів та інші джерела підсмоктування викликають збільшення витрат електроенергії.

2.11.7. Впровадження автоматичного керування вентиляційними установками.

1. Пристрій блокування індивідуальних витяжних систем знижує витрату електроенергії на 25-30 %.

2. Пристрій блокування вентилятора повітряних завіс з механізмом відкривання може дати економію електроенергії до 70 %.

3. Пристрій автоматичного регулювання і керування вентиляційними установками в залежності від температури зовнішнього повітря дає економію електроенергії до 10-15 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електротехнічні системи електроспоживання : [навч. посіб.] / П. Г. Плешков, В. В. Зінзура, Н. Ю. Гарасьова [та ін.] ; за заг. ред. П. Г. Плешкова. - Кропивницький : ЦНТУ, 2021. – 208 с.

[Режим доступу: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/12509>].

2. Основи ефективного використання електричної енергії в системах електроспоживання промислових підприємств: навч. посіб. / [О. І. Соловей, В. П. Розен, П. Г. Плешков та ін.]; Кіровоград. нац. техн. ун-т. – Черкаси: Чабаненко Ю., 2015. – 316 с.

[Режим доступу: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/5881>].

3. Шкрабець, Ф. П. Основи електропостачання : навч. посіб. / Ф. П. Шкрабець, П. Г. Плешков. - Кіровоград : РВЛ КНТУ, 2010. - 408 с.

[Режим доступу: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/12462>].

4. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання : навч. посіб. / А. Ю. Орлович, П. Г. Плешков, О. А. Козловський [та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : Лисенко В.Ф., 2019. – 272 с.

[Режим доступу: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/10330>].

5. Енергозберігаючі режими електропостачання : метод. вказ. до викон. курс. проекту для здоб. вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спец. 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" / [уклад. : П. Г. Плешков, К. Г. Петрова] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. електротехн. систем та енергетичного менеджменту. - Кропивницький : ЦНТУ, 2020. – 77 с.

[Режим доступу: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/9672>].

6. ДСТУ-Н Б В.2.5-80-2015 Настанова з проектування систем електропостачання промислових підприємств. Київ, 2015. 83 с.

7. Методичні вказівки «САПР електропостачання» до виконання лабораторних робіт для студентів за напрямком 7.050301 «Електротехніка та електротехнології» з подальшим профілюванням на «Електротехнічні системи

електроспоживання» та «Енергетичний менеджмент» / Укл.: А.П. Свіридов, І.О. Переверзєв, В.В. Зінзура – Кіровоград: КНТУ, 2009 – 79 с.

8. Стандарт вищої освіти України для першого (бакалаврського) рівня галузі знань 14 – Електрична інженерія, спеціальності 141 –Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Затверджено та введено в дію наказом Міністерства освіти і науки України від 20.06.2019 р. № 867.

9. Методичні вказівки: загальні вимоги по оформленню та змісту бакалаврської роботи для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / [уклад. П.Г. Плєшков та ін.], Центральноукраїн. нац. техн. ун-т.- Кропивницький: ЦНТУ, 2020.– 62с.

10. Бібліографічний запис. Заголовок. Загальні вимоги та правила складання : ДСТУ ГОСТ 7.80:2007.

[Режим доступу: <http://www.docme.ru/doc/85267/dstu-gost-7.80-2007-bibliografichnij-zapis.-zagolovok>]

11. Перехідні процеси в системах електропостачання: Підручник для вузів./Г.Г.Півняк, В.М. Винославський, А.Я. Рибалко, Л.І. Несен/ За ред.Г.Г.Півняка – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2002.

12. Рудницький В.Г. Внутрішньозаводське електропостачання. Курсове проектування: Навчальний посібник. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2006. – 153 с.

13. [Правила улаштування електроустановок / Міненерговугілля України.](#) – Київ : 2017. – 617 с.

14. Наказ Міністерства енергетики України «Про затвердження Змін до Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії» № 764 від 30 листопада 2020 року.

ДОДАТКИ

Додаток А. Зразок титульного аркушу

Центральноукраїнський національний технічний університет
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

КУРСОВИЙ ПРОЕКТ

з предмету *«Ефективне використання електроенергії в системах енергоспоживання»*
на тему: *«Розробка ефективної системи енергоспоживання промислового підприємства»*

Здобувача освіти 1 курсу магістратури
групи ЕЕ-22М
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
освітньо-професійної програми
«Електротехнічні системи електроспоживання»
(або «Енергетичний менеджмент»)
Петренко П.П.

Керівник
професор., канд. техн. наук. Пleshков П.Г.

Національна шкала _____
Кількість балів: _____ Оцінка: ECTS _____

Члени комісії

_____ *Пleshков П.Г.*
(підпис)

_____ (П.І.Б. викладача)

_____ (П.І.Б. викладача)

м. Кропивницький – 20__ рік

Додаток Б. Зразок листа завдання

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра: *Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент*

Дисципліна: *Ефективне використання електроенергії в системах енергоспоживання*

Спеціальність: *141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

Курс ___ Група _____ Семестр ___

ЗАВДАННЯ

на курсовий проект (роботу) студента

Петренка Петра Петровича

(Прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи): *Розробка ефективної системи енергоспоживання промислового підприємства*

2. Строк здачі студентом закінченого проекту: 20 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи): $U_m = 10$ кВ, $N_{пр} = 11$ шт, $P_{пр} = 1,3$ МВт, $K_v = 0,45$, $\text{tg}\varphi_{пр} = 0,23$, $T_{\max} = 7900$ год, споживач – дугові сталеплавильні печі ДСП-0,5 потужністю 0,5 тони

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці): *Вступ. 1. Розрахунок електричних навантажень. 2. Вибір схеми системи електропостачання. 3. Вибір кількості та потужності силових трансформаторів. 4. Розрахунок струмів коротких замкнень в системі електропостачання. 5. Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ для високовольтної мережі. 6. Вибір електричних апаратів високої напруги. 7. Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб. 8. Вибір електричних схем підключення лічильників електроенергії та вибір трансформаторів струму та напруги. 9. Розробка заходів з економії електроенергії в електроустановках (згідно варіанту). Висновки*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1. Схема первинних з'єднань. 2. Ілюстрації до розділу 8.

6. Дата видачі завдання: 20 р.

Календарний план

№ n/n	Назва етапів курсового проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітки
1.	<i>Розрахунок електричних навантажень</i>	14.03	
2.	<i>Вибір схеми системи електропостачання.</i>	20.03	
3.	<i>Вибір кількості та потужності силових трансформаторів.</i>	25.03	
4.	<i>Розрахунок струмів коротких замкнень в системі електропостачання.</i>	02.04	
5.	<i>Вибір кабельних ліній напругою 10 кВ для високовольтної мережі.</i>	12.04	
6.	<i>Вибір електричних апаратів високої напруги.</i>	21.04	
7.	<i>Вибір потужності та схем живлення трансформаторів власних потреб.</i>	30.04	
8.	<i>Вибір електричних схем підключення лічильників електроенергії та вибір трансформаторів струму та напруги.</i>	03.05	
9.	<i>Розробка заходів з економії електроенергії в електроустановках (згідно варіанту)</i>	20.05	
10.	<i>Оформлення графічної частини, оформлення розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини курсового проекту</i>	25.05	
11.	<i>Захист курсового проекту</i>	30.05	

Студент _____
(Підпис)

Керівник _____
(Підпис)

“ ___ ” _____ 20__ р.

Плещков П.Г.
(Прізвище, ім'я, по батькові)

Додаток В. Приклад виконання графічної частини

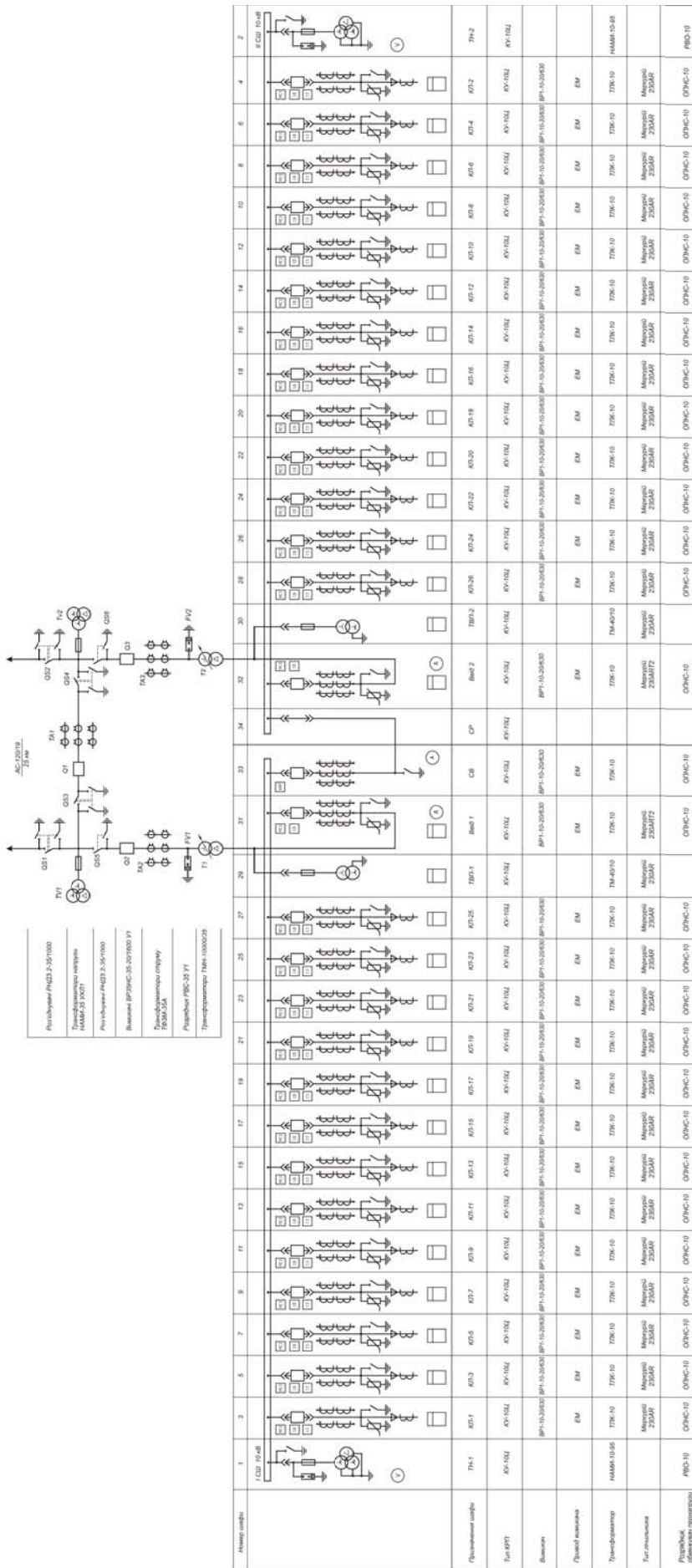


Рис. В.1. Схема первинних з'єднань

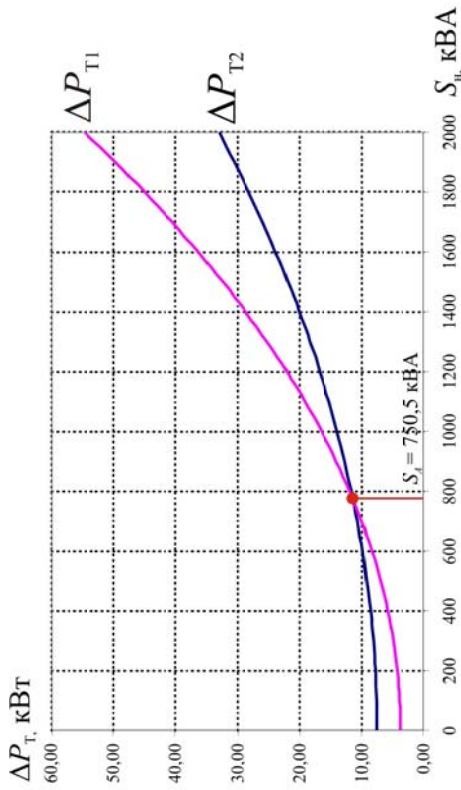
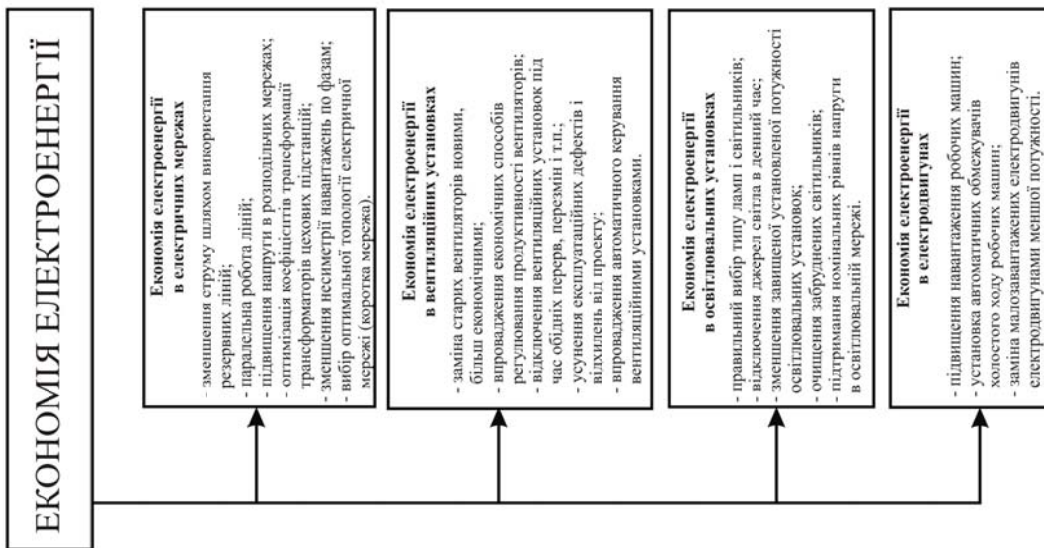


Рис. 1. Графіки залежності приведенних втрат потужності в трансформаторах TM-1000 від навантаження

ΔP_{T1} - при роботі одного трансформатора; ΔP_{T2} - при паралельній роботі двох трансформаторів

Річна втрата електроенергії:

$$\begin{aligned} \Delta W_{2тр} &= \sum_{i=1}^{24} \Delta P_{3р2тр} \cdot 147 + \sum_{i=1}^{24} \Delta P_{3ав2тр} \cdot 65 + \sum_{i=1}^{24} \Delta P_{1р2тр} \cdot 105 + \sum_{i=1}^{24} \Delta P_{1ав2тр} \cdot 48 = \\ &= 332,8 \cdot 147 + 221,19 \cdot 65 + 291,07 \cdot 105 + 210,39 \cdot 48 = 103970 \text{ кВт} \cdot \text{год} \\ \Delta W_{авт,рег} &= \sum_{i=1}^{24} \Delta P_{3равт,рег} \cdot 147 + \sum_{i=1}^{24} \Delta P_{3завт,рег} \cdot 65 + \sum_{i=1}^{24} \Delta P_{1рзавт,рег} \cdot 105 + \sum_{i=1}^{24} \Delta P_{1завт,рег} \cdot 48 = \\ &= 321,37 \cdot 147 + 168,78 \cdot 65 + 270,64 \cdot 105 + 147,27 \cdot 48 = 93698 \text{ кВт} \cdot \text{год} \end{aligned}$$

Річна економія електроенергії від впровадження автоматичного регулювання доцільного режиму роботи трансформаторної підстанції:

$$\Delta W = \Delta W_{2тр} - \Delta W_{авт,рег} = 103970 - 93698 = 10272 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Вартість зекономленої електроенергії

$$E = \Delta W C_0 = 10272 \cdot 1,9314 = 19859,5 \text{ грн.}$$

Рис. В.2. Ілюстрації розділу № 8

Додаток Г. Варіанти індивідуальних завдань

Таблиця Г.1 Варіанти індивідуальних завдань

№ вар.	U_{M2} , кВ	S_{K3} , МВА	$L_{пл}$, кМ	$P_{пр}$, МВт	$N_{пр}$, шт.	$tg\phi$	K_B	T_{max} , ГОД.	Тип спожив.	Q , м ³ /ГОД	P_{max} , бар
1	110	2900	15,5	1,3	11	0,23	0,45	7900	ДСП-0,5		
2	35	2300	13,3	0,9	8	0,16	0,41	7000	ДСП-0,5		
3	110	4200	10,1	1,5	8	0,17	0,88	4600	ДСП-1,5		
4	35	2900	12,7	1,6	8	0,14	0,61	7400	ДСП-1,5		
5	110	3400	3,1	0,7	8	0,21	0,49	4200	ДСП-3		
6	35	4900	12,4	1,8	8	0,12	0,62	6300	ДСП-3		
7	110	4100	11,8	0,7	8	0,19	0,44	3500	ДСП-5		
8	35	2300	15,6	0,9	12	0,28	0,63	6300	ДСП-5		
9	110	4200	3	1,8	12	0,1	0,65	4600	ДСП-10		
10	35	4700	6,6	1,7	12	0,23	0,52	3500	ДСП-10		
11	110	2800	17,9	1,6	6	0,21	0,54	5100	ДСП-40		
12	35	4400	14,7	0,3	8	0,15	0,64	5400	ДСП-40		
13	110	4400	16,4	0,5	12	0,23	0,55	7600	ДСП-80		
14	35	2500	8,4	0,8	6	0,1	0,45	7600	ДСП-80		
15	110	4400	15,3	0,5	7	0,23	0,86	4400	ДСП-120		

Продовження таблиці Г.1

№ вар.	$U_{\text{мр}}$ кВ	$S_{\text{кз}}$, МВА	$L_{\text{пл}}$, км	$P_{\text{пр}}$, МВт	$N_{\text{пр}}$, шт.	tgφ	$K_{\text{в}}$	T_{max} , год.	Тип спожив.	Q , м ³ /год	P_{max} , бар
16	35	2900	9,8	1,1	6	0,14	0,82	7300	ДСП-120		
17	110	4000	3,2	1,6	9	0,16	0,63	5200	ДСП-180		
18	35	4400	5,9	1,6	12	0,28	0,7	4500	ДСП-180		
19	110	2100	10,5	1,5	12	0,12	0,44	6900	ІЧТ-1		
20	35	3700	1,3	0,3	7	0,13	0,54	7000	ІЧТ-1		
21	110	3500	1,9	0,6	7	0,13	0,6	3600	ІЧТ-2,5		
22	35	4800	1,5	1,6	6	0,19	0,64	4100	ІЧТ-2,5		
23	110	4000	4	1,1	6	0,27	0,47	6200	ІЧТ-10		
24	35	3100	5,1	0,9	6	0,21	0,81	6300	ІЧТ-10		
25	110	2700	10,5	1,1	9	0,21	0,6	5300	ІЧТ-25		
26	35	4300	4,5	1,5	12	0,15	0,75	4300	ІЧТ-25		
27	110	3300	14,4	1	11	0,25	0,53	5900	ІЧКМ-2,5		
28	35	3600	15	0,4	10	0,23	0,89	5600	ІЧКМ-2,5		
29	110	4000	14	1,5	7	0,12	0,43	6800	ІЧКМ-6		
30	35	2000	8,2	0,9	7	0,2	0,52	6000	ІЧКМ-6		

Продовження таблиці Г.1

№ вар.	$U_{\text{мр}}$ кВ	$S_{\text{кз}}$, МВА	$L_{\text{пл}}$, км	$P_{\text{пр}}$, МВт	$N_{\text{пр}}$, шт.	tgφ	$K_{\text{в}}$	T_{max} , год.	Тип спожив.	Q , м ³ /год	P_{max} , бар
31	110	3100	4,2	0,5	8	0,3	0,64	4000	ІЧКМ-10		
32	35	2900	14,5	0,8	6	0,17	0,93	4800	ІЧКМ-10		
33	110	2700	12,1	1,7	12	0,19	0,72	7200	ІЧКМ-16		
34	35	3300	17,1	1,4	12	0,12	0,57	5200	ІЧКМ-16		
35	110	4300	10,5	0,3	11	0,24	0,48	5100	ІЧКМ-25		
36	35	3500	11,6	1,2	11	0,12	0,95	4600	ІЧКМ-25		
37	110	4000	16	1,4	9	0,22	0,92	6400	ІЧКМ-40		
38	35	3000	3,8	0,7	8	0,12	0,73	7900	ІЧКМ-40		
39	110	4500	2	1,3	7	0,13	0,42	6600	ІЧКМ-60		
40	35	2800	15,4	0,9	8	0,18	0,49	5400	ІЧКМ-60		
41	110	4400	2,1	1	6	0,21	0,77	7600	Вент., 15 кВт	20000	
42	35	3800	10,8	1,7	11	0,15	0,48	7400	Вент., 18,5 кВт	25000	
43	110	3000	12,5	0,8	10	0,29	0,7	6200	Вент., 22 кВт	30000	
44	35	3100	11,4	0,8	7	0,21	0,64	7900	Вент., 30 кВт	40000	
45	110	2700	10,4	1,8	11	0,3	0,8	7600	Вент., 37 кВт	50000	

Продовження таблиці Г.1

№ вар.	$U_{\text{мр}}$ кВ	$S_{\text{кз}}$, МВА	$L_{\text{пл}}$, км	$P_{\text{пр}}$, МВт	$N_{\text{пр}}$, шт.	tgφ	$K_{\text{в}}$	T_{max} , год.	Тип спожив.	Q , м ³ /год	P_{max} , бар
46	35	3200	7,7	1,7	7	0,25	0,6	4700	Вент., 45 кВт	60000	
47	110	3400	2,9	1,5	12	0,13	0,42	3900	Вент., 55 кВт	75000	
48	35	2600	13,3	1,6	9	0,17	0,71	7200	Вент., 75 кВт	100000	
49	110	2300	13	1	8	0,22	0,57	4900	Вент., 90 кВт	120000	
50	35	3200	6,1	1,3	8	0,15	0,85	6700	Вент., 110 кВт	150000	
51	110	4800	1,1	1,6	8	0,21	0,65	4500	Комп., 15 кВт		10
52	35	2700	1,6	0,6	9	0,19	0,8	7900	Комп., 18,5 кВт		8
53	110	4000	4,7	1,7	6	0,29	0,45	7800	Комп., 22 кВт		12
54	35	4900	4	1,2	6	0,1	0,7	6400	Комп., 30 кВт		10
55	110	3300	15,5	0,7	9	0,28	0,87	3600	Комп., 37 кВт		16
56	35	4100	9,6	1,5	8	0,18	0,55	3600	Комп., 45 кВт		13
57	110	2800	8,1	1,5	11	0,16	0,43	4600	Комп., 55 кВт		20
58	35	2300	6,8	1,2	11	0,17	0,52	4500	Комп., 75 кВт		16
59	110	2300	10,4	0,3	10	0,15	0,46	4800	Комп., 90 кВт		25
60	35	2400	6	1,1	11	0,12	0,49	6200	Комп., 110 кВт		20