

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва та транспорту
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“__” _____2022 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:
«Мінімізація втрат активної потужності в мережах 0,4
кВ промислових підприємств зміною рівня напруги
Minimization of active powerlosses in 0.4 kV networks of
industrial enterprises by changing the voltage level»

Виконав здобувач вищої освіти
ІІ курсу магістратури, групи ЕНМ-21М
ОПП «Енергетичний менеджмент»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Костянтин ГУРІН
«__» _____2022 р.

Керівник роботи
к.т.н, доцент
_____Олександр СІРІКОВ
«__» _____2022 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва та транспорту

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна (освітньо-наукова) програма

Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ Петро ПЛЕСКОВ

«_____» _____ 2022 р.

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

_____ Гуріну Костянтину Васильовичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Мінімізація втрат активної потужності в мережах 0,4 кВ промислових підприємств зміною рівня напруги

Minimization of active power losses in 0.4 kV networks of industrial enterprises by changing the voltage level

2. Керівник роботи Сіріков Олександр Іванович, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання роботи до захисту 01.12.2022 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Метою роботи є підвищення економічності експлуатації цехових електричних мереж промислових підприємств шляхом зміни рівня напруги в системі електропостачання. Завдання роботи: вплив відхилення напруги на роботу промислових електроспоживачів; математичні моделі елементів системи електропостачання промислового підприємства; дослідження впливу рівня напруги в цехових електричних мережах на втрати потужності в її елементах; розрахунок економічної ефективності впровадження оптимального режиму по напрузі в цеховій електричній мережі промислового підприємства; охорона праці.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>14.10.22</i>	
2	<i>Вплив відхилення напруги на роботу промислових електроспоживачів</i>	<i>21.10.22</i>	
3	<i>Математичні моделі елементів системи електропостачання промислового підприємства</i>	<i>04.11.22</i>	
4	<i>Дослідження впливу рівня напруги в цехових електричних мережах на втрати потужності в її елементах</i>	<i>18.11.22</i>	
5	<i>Розрахунок економічної ефективності впровадження оптимального режиму по напрузі в цеховій електричній мережі промислового підприємства</i>	<i>25.11.22</i>	
6	<i>Охорона праці</i>	<i>28.11.22</i>	
7	<i>Висновки</i>	<i>29.11.22</i>	
8	<i>Література</i>	<i>30.11.22</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2022 р.

Підпис керівника

_____ Сіріков О.І.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2022 р.

Підпис здобувача

_____ Гурін К.В.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Гурін К.В. Мінімізація втрат активної потужності в мережах 0,4 кВ промислових підприємств зміною рівня напруги.

Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійна програма «Енергетичний менеджмент», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2022.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення економічності експлуатації цехових електричних мереж промислових підприємств шляхом зміни рівня напруги в системі електропостачання.

Проаналізований вплив зміни напруги живлення на роботу електроприймачів та технологічних установок, який показав, що бажана напруга живлення, для асинхронних електродвигунів при якій втрати будуть меншими, суттєво залежить від коефіцієнта завантаження робочого агрегату. Так, при коефіцієнті завантаження асинхронного двигуна менше 0,5 бажано тримати напругу живлення менше від номінальної, а при завантаженні 0,75 вище номінальної. Але в будь-якому випадку для вибору оптимального значення напруги живлення потрібно приводити розрахунок втрат потужності в електродвигуні та живлячій його мережі.

На основі проведених досліджень сформована цільова функція задачі вибору рівня напруги у цеховій електричній мережі, в якій поєднаний розрахунок втрат активної потужності в системі електропостачання з розрахунком втрат в електродвигунах.

Розроблена методика дозволяє за заданими значеннями коефіцієнтів завантаження електродвигунів та параметрами електричної мережі визначити відгалуження, що відповідатиме мінімуму сукупних втрат активної потужності.

Ключові слова: втрати активної потужності, асинхронний двигун, цехова електрична мережа, рівень напруги.

Gurin K.V. Minimization of active power losses in 0.4 kV networks of industrial enterprises by changing the voltage level.

Qualification work for the second (master's) level of higher education in specialty 141 «Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics», educational and professional program «Energy management», Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2022.

The purpose of the qualification work is to increase the cost-effectiveness of operation of shop electrical networks of industrial enterprises by changing the voltage level in the power supply system.

The analyzed effect of changing the supply voltage on the operation of electrical receivers and technological installations, which showed that the desired supply voltage for asynchronous electric motors, at which the losses will be smaller, significantly depends on the load factor of the working unit. So, when the load factor of an asynchronous motor is less than 0.5, it is desirable to keep the supply voltage less than the nominal, and when the load is 0.75, it is higher than the nominal. But in any case, to choose the optimal value of the supply voltage, it is necessary to calculate the power losses in the electric motor and its power supply network.

On the basis of the conducted research, the target function of the task of choosing the voltage level in the workshop electrical network was formed, in which the calculation of active power losses in the power supply system is combined with the calculation of losses in electric motors.

The developed technique allows, based on the given values of the load coefficients of electric motors and the parameters of the electric network, to determine the branch that will correspond to the minimum total loss of active power.

Key words: losses of active power, asynchronous motor, workshop electrical network, voltage level.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ НА РОБОТУ ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАЧІВ	10
1.1 Постановка задачі	10
1.2 Вплив відхилення напруги на роботу електродвигунів.....	14
1.3 Вплив відхилення напруги на роботу електротермічних установок.....	22
1.4 Вплив відхилення напруги на роботу системи електролізу	26
1.5 Вплив відхилення напруги на роботу зварювальних установок	28
1.6 Вплив відхилення напруги на роботу освітлювальних пристроїв	29
1.7 Статичні характеристики навантажень по напрузі	30
1.8 Висновки.....	37
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА.....	39
2.1 Різновиди схем заміщення асинхронної машини.....	39
2.2 Математична модель кабельної лінії	53
2.3 Математична модель трансформатора	54
2.4 Синтез математичних моделей елементів.....	56
2.5 Формування задачі оптимізації	59
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РІВНЯ НАПРУГИ В ЦЕХОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ НА ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ В ЇЇ ЕЛЕМЕНТАХ ..	61
3.1 Дослідження параметрів асинхронного двигуна в залежності від напруги на затискачах і його коефіцієнта завантаження	61
3.2 Дослідження втрат в системі «лінія електропередачі – асинхронний двигун».....	67

3.3 Приклад вибору напруги прольоту цеху за мінімумом втрат активної потужності	72
РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ ПО НАПРУЗІ В ЦЕХОВІЙ ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА.....	88
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ	93
5.1 Заходи забезпечення електробезпеки	93
5.2 Режими роботи нейтралі в низьковольтних електричних мережах	93
5.3 Системи захисту персоналу в електроустановках напругою до 1 кВ	95
5.3.1. Захисне заземлення.....	95
5.3.2 Захисне занулення	96
5.3.3 Нагляд та перевірка мережі заземлення	97
5.4 Розрахунок контуру заземлення цехової ТП.	98
ВИСНОВКИ.....	100
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	101

ВСТУП

Живлення кожного електроспоживача повинно здійснюватись при оптимальному значенні напруги, що забезпечує його найкращі техніко-економічні показники. Оптимальна напруга залежить від типу споживачів енергії та від умов їх роботи, при чому оптимальне значення може відрізнятись від номінального. Відхилення напруги може по різному впливати на техніко-економічні показники виробничих агрегатів. Проблема підтримки напруги має дуже важливе значення, зниження напруги на 10% різко впливає на роботу електротермічних установок, електродвигунів ливарних, механічних та інших цехів, також впливає на продуктивність механізмів та роботу електронних автоматичних приладів. До великого збитку приводить підвищення напруги більше ніж 5% від номінального в освітлювальних установках (швидкий вихід з ладу).

Актуальність роботи. Електричні двигуни залишаються головними споживачами електроенергії на промислових підприємствах. Тому, підвищення ефективності та економічності роботи електричних двигунів є важливою задачею, яка стоїть на етапі проектування та експлуатації. Якщо, на етапі проектування опираючись на певні навантажувальні характеристики електродвигуна, можливо звести до мінімуму втрати в ньому, то на етапі експлуатації підвищити ефективність можливо лише шляхом забезпечення проектних значень таких параметрів, як напруга живлення і коефіцієнт завантаження. Однією з головних причин збільшення витрат електричної енергії та зменшення ефективності роботи цехових електричних мереж є зміна навантаження, як нижче так і вище проектної, що може бути викликане, як особливостями технологічного процесу так і вимушеною зміною продуктивності підприємства в цілому. В таких випадках підвищити ефективність роботи можливо лише шляхом зміни напруги живлення, залишаючи її в допустимих межах. Зміна напруги, в свою чергу призведе до зміни витрат в системі електропостачання, що вимагатиме сукупного розгляду витрат електроенергії в споживачах і системі електропостачання, як єдиному цілому. Отже, вибір рівня напруги цехової мережі є оптимізаційною задачею, якій і присвячена дана робота.

Мета роботи і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення економічності експлуатації цехових електричних мереж шляхом зміни рівня напруги в системі електропостачання. Вказана мета досягається вибором такого значення напруги живлення при якій буде мінімум втрат активної потужності в системі «споживач – система електропостачання».

Для досягнення вказаної мети потрібно розв'язати наступні задачі:

- дослідити вплив зміни напруги живлення на технічні характеристики споживачів електричної енергії;
- поєднати розрахунок втрат активної потужності в системі електропостачання з розрахунком втрат в споживачах;
- сформулювати цільову функцію задачі оптимізації за мінімумом втрат активної потужності;
- створити методику вибору оптимального рівня напруги в цеховій мережі.

Об'єкт дослідження. Втрати активної потужності в цехових електричних мережах та споживачах.

Предмет дослідження. Вплив рівня напруги на втрати активної потужності в системі «споживач – система електропостачання».

Методи досліджень базуються на використанні: математичного моделювання роботи електроспоживачів та цехової електричної мережі промислового підприємства, здійснюючи аналіз втрат електричної потужності в них, при зміні напруги живлення.

Основні наукові та практичні результати, їх значення.

1. Розглянута сукупна система «споживач – система електропостачання», що дозволило підвищити ефективність роботи цехового обладнання шляхом вибору рівня напруги в системі електропостачання за мінімумом сукупних втрат активної потужності.

2. Запропонована методика вибору оптимального рівня напруги в цеховій мережі, яка може бути використана, як енергозберігаючий захід в системі енергетичного менеджменту підприємства.

РОЗДІЛ 1

ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ НА РОБОТУ ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАЧІВ

1.1 Постановка задачі

Розглядається одна з властивостей електропостачання - вплив на його ефективність відхилень напруги. Під ефективністю електропостачання в даному випадку розуміється витрата первинного ресурсу для випуску заданої кількості кінцевих продуктів. Первинними ресурсами тут є вироблення електроенергії або витрата палива на електростанціях, а також витрата матеріалів для передачі електроенергії і забезпечення її якісних показників у електроприймачів.

Загальним фактором при аналізі впливу відхилень напруги на ефективність виробництва кінцевого продукту є залежність споживання активної та реактивної потужностей електроприймачами і отже втрат електричної енергії в електромережах від рівня напруги.

Найбільш поширеним способом регулювання напруги в мережах нашої країни є централізоване регулювання. Його ефективність характеризується не тільки ступенем підтримки відхилень напруги в допустимих межах, але також і витратою електроенергії. Відхилення напруги на шинах центру живлення розподільних електромереж визначає рівні напруги великої сукупності різних електроприймачів. Ці електроприймачі можуть відрізнятися за допустимим відхиленням напруги і тим більше за оптимальними відхиленням напруги в результаті їх індивідуальних властивостей і режиму роботи. Може скластися ситуація, коли для оптимального протікання технологічного процесу одного з підприємств даного району буде потрібно підвищена напруга на шинах центру живлення, при цьому всі інші електроприймачі будуть споживати більшу кількість електроенергії. Вимоги технології першого електроприймача можуть бути задоволені, якщо забезпечити необхідне йому відхилення напруги за допомогою місцевих засобів регулювання напруги, а в інших електричних мережах, тобто в центрі живлення, підтримувати більш низький рівень напруги,

що задовольняє інших електроприймачів і знижує витрату електроенергії. Якщо економія електроенергії в останньому варіанті окупає витрати на місцеві засоби регулювання, то, отже, цей варіант більш кращий. Таким чином, в економічну характеристику відхилення напруги в центрі живлення розподільних мереж повинні включатися витрати на відпуск електроенергії від шин електростанцій, що залежать від відхилення напруги на шипах центру живлення, і витрати на місцеві засоби регулювання для окремих електроприймачів. Обмеженнями в даному випадку є межі відхилення напруги, регламентовані ГОСТ 13109-97. У такій постановці завдання регулювання напруги охоплює економічну характеристику всього ланцюжка електропостачання – від шин генератора електростанцій до електроприймачів – в умовах існуючих електричних мереж.

Реалізація такої постановки завдання вимагає значного обсягу додаткової інформації про режими електропостачання, про технологічні процеси, про їх економічні характеристики, пов'язаних з відхиленнями напруги, про оперативні схемах електричних мереж і можливості засобів регулювання напруги. Реалізація оптимального рішення в такій постановці можлива тільки при наявності достатньої кількості регулюючих пристроїв в центрі живлення і на місцях, а також при досить розвинених електромережах та інформаційному забезпеченні. В даний час в електричних мережах енергосистем, промислових, сільськогосподарських та комунальних підприємств є велика кількість регульованих під навантаженням трансформаторів, конденсаторних батарей, тиристорних обмежувачів напруги, є регульовані статичні джерела реактивної потужності і регульовані синхронні двигуни і т. д.

Розроблено і здано в експлуатацію системи автоматизованого управління режимами розподільних електричних мереж, є автоматизовані системи управління на великих промислових підприємствах. Все це створює об'єктивні умови для раціонального управління режимом електропостачання. У той же час найчастіше в силу відомчого підходу і недостатнього інформаційного забезпечення ці засоби використовуються нерационально.

Відомі факти, коли автоматичні регулятори трансформаторів і конденсаторних батарей не діють, а автоматизовані системи управління використовуються в основному для вибору місць розрізів в розподільних мережах, працюють епізодично - від випадку до випадку. Нерідкі випадки, коли відхилення напруги в години максимальних навантажень значно нижче допустимих, а в години мінімальних навантажень перевищують допустимі відхилення напруги і в той же час регулюючі засоби працюють в режимі стабілізації або зовсім не використовуються. У цих випадках погана якість напруги не тільки позначається на якості продукції, що випускається, на терміни служби електрообладнання, але також тягне за собою підвищену витрату електроенергії. Це обумовлено тим, що в години максимальних навантажень і низьких напруг проявляється ефект пристосовності споживачів, що виражається в зміні коефіцієнта трансформації розподільних трансформаторів або збільшення виробничих потужностей. У години мінімальних навантажень наслідки цього пристосування усуваються, і при високій напрузі значно зростає споживання електроенергії.

В умовах неоднорідних навантажень широко поширене явище стабілізації напруги, при якому через підтримання необхідного рівня напруги в якийсь нетривалий період часу підтримується висока напруга весь інший час. Поширеним випадком є регулювання напруги в центрі живлення, викликане прагненням тільки забезпечити вимоги ГОСТ 13109-97 на затискачах електроприймачів. Це зрозуміло, краще, чим вище перераховані випадки. Реалізація такого режиму у всіх розподільних електромережах дала б значний економічний ефект. У той же час при цьому в ряді режимів, особливо в години найменших навантажень, напруга на затискачах електроприймачів близька до верхньої допустимої межі – вище оптимального рівня. Однак при наявності більш докладної інформації про режими споживання і режими напруги в навантажувальних вузлах регулювання може бути більш виборчим в години зниження навантажень, що дало б додаткову економію електроенергії при дотриманні і навіть поліпшенні якості електроенергії. Для реалізації такого

регулювання напруги необхідно мати оперативну інформацію про режими роботи мереж. Така інформація може бути отримана за допомогою досить точного моделювання режимів електричних мереж при існуючих схемах електропостачання. Це може бути забезпечено в тому випадку, якщо автоматизована система диспетчерського управління режимом розподільних мереж дозволяє оперативно змінювати вихідні дані для розрахунків режимів. При наявності досить оперативного зв'язку між підприємствами електричних мереж і центральним обчислювальним центром енергосистеми, при розвиненому автоматизованому банку даних і моделях режиму електромережі, закладених в ЕОМ обчислювального центру, перерахунок режиму для формулювання нових вимог до регуляторів напруги може бути здійснений протягом декількох годин.

При наявності досить докладної і оперативно змінної інформації про режими промислових вузлів з'являється додаткова можливість оптимізації режиму регулювання конденсаторних батарей. Зрозуміло, в цьому випадку завдання компенсації реактивної потужності розглядаються у взаємозв'язку з регулюванням напруги і з економічними характеристиками мережі електропостачання. Реалізація оптимального регулювання конденсаторних батарей у споживачів здійснюється в цьому випадку через систему договорів між електропостачальною організацією і споживачем.

Певною мірою режими роботи розподільчих електричних мереж пов'язані з режимом роботи живлячих електричних мереж навіть в тому випадку, якщо вони розділені регулюючими трансформаторами. Вимоги до регулювання напруги на шинах нижчої напруги центру живлення висувають певні вимоги до відхилення напруги на боці вищої напруги. Останнє пов'язано з завданням розподілу реактивної потужності і регулювання напруги в живильних мережах. Таким чином, ця задача також не може розглядатися у відриві від вимог розподільчої мережі. В даний час управління режимом напруги і реактивної потужності в живильних мережах повинно вирішуватися за допомогою керуючих ЕОМ, встановлених в обчислювальних центрах енергосистем і об'єднань.

1.2 Вплив відхилення напруги на роботу електродвигунів

Найбільш розповсюдженими приймачами електроенергії в промисловості є асинхронні двигуни (АД), які використовуються для привода самих різноманітних механізмів. Момент обертання і ковзання АД залежать від напруги на затискачах. При понижений напрузі пуск двигунів ускладнюється, зменшується частота обертання, що знижує продуктивність механізму, збільшується струм в двигуні (при постійній потужності, що споживається), що скорочує термін експлуатації ізоляції.

При зменшенні напруги на 10% обертаючий момент, який набирає двигун, зменшується пропорційно квадрату напруги, тобто на 19%; ковзання збільшується на 27,5%, що помітно знижує число обертів електродвигунів і виконуючих механізмів; струм ротора збільшується на 14%. Струм статора, при роботі з напругою на 10% меншою від номінальної, збільшується приблизно на 10%. Зменшення обертаючого моменту на 19% погіршує умови пуску та самозапуску.

При негативних відхиленнях напруги термін служби ізоляції скорочується і визначається рівнянням

$$T_c = \left[\frac{T_{\text{ном}}}{47(\Delta U)^2 - 7,55\Delta U + 1} \right] m^2.$$

При роботі з напругою на 10% більшою від номінальної, струм статора зменшується приблизно на 10%, обертаючий момент збільшується на 21%, ковзання зменшується на 20%, а струм ротора на 18%. Звідси видно, що зниження напруги нижче номінальної складає більш важкі умови роботи електродвигунів, ніж підвищення напруги.

При додатних відхиленнях напруги термін служби ізоляції T_c в порівнянні зі значенням $T_{\text{ном}}$ при номінальних значеннях напруги і навантаженнях змінюється обернено пропорційно квадрату коефіцієнта завантаження m :

$$T_c = T_{\text{ном}}/m^2.$$

Очевидно, при $m < 1$ теплової знос ізоляції зменшується.

Якщо відхилення напруги знаходяться в нормованих межах, вважають $T_{\text{ном}} \approx T_c$.

Наявність відхилення напруги живлення АД змінює значення активних втрат та реактивної потужності, що споживається. Це, в свою чергу, призводить до зміни його робочих економічних показників. В порівнянні з режимом живлення номінальною напругою приведені витрати змінюються на величину [11]

$$\Delta Z_a = k\delta(\Delta Q_{\text{ном}}) + \beta[\delta P_{\Delta\pi} + \delta(\Delta P_{\text{ном}})] + Y_{\Delta\pi} + Y_{\text{и}}, \quad (1.1)$$

де $\delta(\Delta P_{\text{ном}})$ і $\delta(\Delta Q_{\text{ном}})$ – збільшення активних втрат та споживаної реактивної потужності в порівнянні з режимом роботи при номінальній напрузі;

$\delta P_{\Delta\pi}$ і $Y_{\Delta\pi}$ – збільшення споживання активної потужності та збитки, пов'язаних зі зміною частоти обертання асинхронного двигуна;

β – вартість однієї кВт·год електричної енергії;

$Y_{\text{и}}$ – додаткові витрати, обумовлені зміною терміну служби ізоляції;

k – питома вартість одного квар.

У випадку зміни напруги U мережі активна потужність на валу двигуна залишається практично не змінною, змінюються лише втрати активної потужності в двигуні на деяку величину δP , яка може бути додатньою або від'ємною в залежності від зміни напруги, типу двигуна і його коефіцієнту завантаження k_z . В загальному випадку для трифазних асинхронних двигунів зміна активної потужності $P_{\text{ов}}$, що споживається ними, визначається за наступним виразом [2]:

$$P_{\text{ов}} = k_z P_{\text{ном}} + \Delta P_{\text{ном}} + \delta P = k_z P_{\text{ном}} + \Delta P_{\text{ном}} (1 + k_n) \quad (1.2)$$

де $\Delta P_{\text{ном}}$ – втрати активної потужності в двигуні при номінальній напрузі на його затискачах;

k_n – коефіцієнт пропорційності, дорівнює відношенню додаткових втрат активної потужності в двигуні δP до величини $\Delta P_{\text{ном}}$.

Величина додаткових втрат δP , що викликані зміною напруги мережі суттєво залежить від коефіцієнта завантаження двигуна k_3 . На рис. 1.1 наведені залежності зміни втрат активної потужності в асинхронних двигунах серії А і АО напругою 380 В від зміни напруги живлення у межах $\pm 10\%$ від номінальної [2]. Ці залежності побудовані для двигунів потужністю 1–100 кВт, та мають синхронну частоту обертання 1000-3000 об/хв. Також на рис. 1.1 нанесені криві зміни середніх значень δP для коефіцієнтів завантаження $k_3=1$; 0,75 і 0,5. Аналогічний характер залежності зміни додаткових втрат наведений на рис. 1.2 з [11].

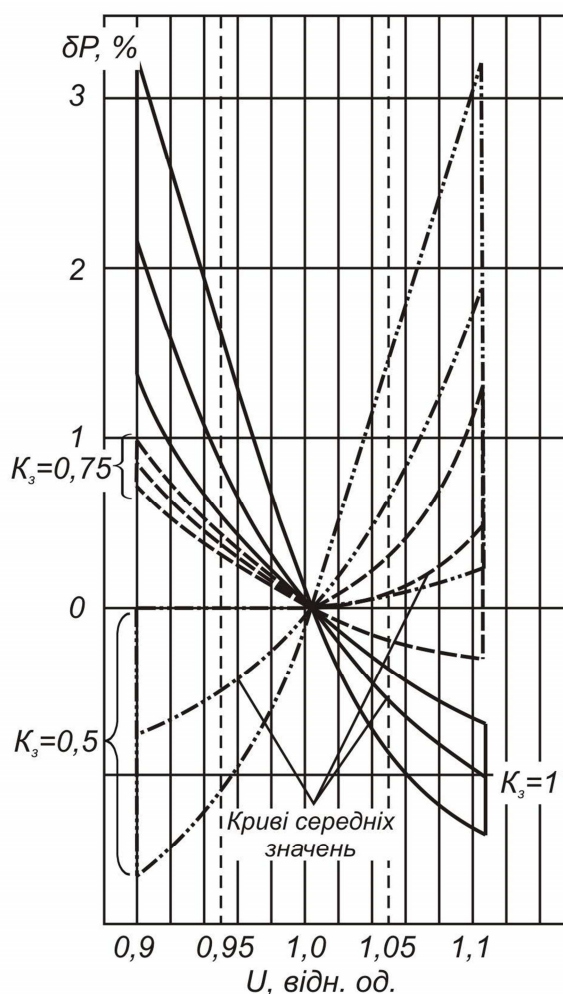


Рис. 1.1. Зміна втрат активної потужності δP в асинхронних двигунах 380 В серій А і АО в залежності від зміни напруги при різних значеннях коефіцієнта завантаження k_3 [2]

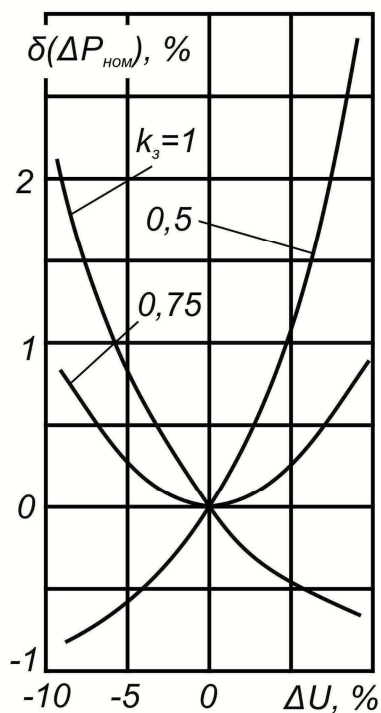


Рис. 1.2. Залежність втрат активної потужності в АД від відхилення напруги при різних коефіцієнтах завантаження k_3

З кривих рис. 1.1 та 1.2 видно, що при змінах напруги, що найбільш часто зустрічаються на практиці в межах $\pm 5\%$ від номінальної абсолютна зміна втрат активної потужності відносно не велика (не більше $0,03 \Delta P_{ном}$). В той же час вона порівняна з втратами в елементах мережі, а в деяких випадках перевищує їх.

Вплив складових в функції ΔZ_a (1.1) на її значення є суперечливим, адже для електричних мереж з переважно асинхронним навантаженням не можна одразу вказати оптимальний рівень напруги без проведення розрахунків. Якщо на продуктивність механізмів не впливає рівень напруги, рекомендується тримати номінальну напругу на шинах електродвигунів при повному завантаженні, а при завантаженні 50-75% - менше номінального значення. Ці рекомендації поширюються на двигуни нерегульованих поточно-транспортних систем, рольгангів прокатних цехів, верстатного устаткування та ін., що підключаються, до електричних мереж з батареями конденсаторів з поперечно-ємнісною компенсацією. На насосних станціях та енергетичних цехах, що обладнаних АД, зміна напруги впливає на продуктивність агрегатів. В такому разі доцільно

забезпечувати номінальну напругу при середніх та малих навантаженнях електродвигунів, та підвищену, аж до максимально допустимої межі, при номінальному навантаженні.

Аналіз кривих рис. 1.1 та 1.2 дозволяє зробити наступні висновки:

- при коефіцієнтах завантаження двигунів робочих агрегатів близьких до 1 краще тримати напругу в мережі близькою до верхньої допустимої межі;
- при коефіцієнті завантаження близькому до 0,5 краще тримати напругу в мережі близькою до нижньої допустимої межі;
- при коефіцієнті завантаження близькому до 0,75 бажано тримати напругу близькою до номінальної, але можливі випадки коли при такому коефіцієнті завантаження бажано буде тримати напругу ближчу до верхньої межі.

Частота обертання асинхронних двигунів змінюється в залежності від підведеної напруги. В ряді випадків при використанні асинхронних двигунів, наприклад в установках поточних ліній, зміна напруги в допустимих межах може суттєво вплинути на продуктивність технологічного процесу. Проілюструємо це на прикладах.

Експериментальні дослідження, проведені на прокатних автоматах металургійного заводу, показали, що середня хвилинна продуктивність цих автоматів при нарузі на затискачах 1,05 від номінальної складає 0,275 кг, а при 0,9 – 0,236 кг [1]. Результати експерименту, проведеного в прядильному і ткацькому цехах бавовняного комбінату, показали, що при зниженні напруги на 5% від номінальної продуктивність автоматичного ткацького станка АТПР-120-5 знижується на 1-1,1%, пневматичного ткацького станка на 0,5%, прядильної машини-76-5М на 0,3% [1]. Підвищення напруги на затискачах асинхронних двигунів указаних механізмів викликає підвищення їх продуктивності. Але це збільшення менше ніж зниження продуктивності при від'ємних відхиленнях напруги. Враховуючи, що як правило, збільшення прикладеної напруги призводить до підвищення продуктивності, а зменшення до її зниження і не завжди вплив на продуктивність є значним, доцільніше буде оцінювати вплив напруги не на продуктивність, а на питому витрату електроенергії. Адже

зниження продуктивності не завжди може означати зниження питомої витрати електроенергії на випуск продукції і відповідно на ефективність її використання. Так, наприклад, зниження напруги на шинах цехової ТП для цеху сульфїту натрію заводу по виробництву мінеральних добрив шляхом переключення ПБЗ трансформатора з III положення до I призвело до зниження питомої витрати електроенергії з 157,9 до 127,5 кВт·год/т, що складає 23,8% [3]. Отримане зниження питомої витрати електроенергії пояснюється тим, що при підтриманні на шинах 0,4 кВ цехових ТП напруги близької до номінальної, напруга на затискачах електродвигунів склала нижче номінальної на 2,5-5,5%. Основними електроприймачами цеху сульфїту натрію є асинхронні двигуни малої потужності, яких в цеху встановлено 251 шт. Завантаження двигунів по активній потужності коливається і знаходиться в межах 0,4-0,7 від номінальної. Зниження напруги на затискачах електродвигунів призвело до підвищення $\cos\phi$ і до зниження втрат потужності в них, що вплинуло на зниження питомої витрати електроенергії цехом в цілому.

Слід також відзначити, що для кранових електродвигунів вплив відхилень напруги від номінальної змістовно відрізняється від двигунів загального призначення. В сучасних кранових синхронних двигунах величина намагнічуючого струму складає 55 - 65% і номінальний коефіцієнт 0,7 - 0,75. В зв'язку з цим, при підвищенні напруги, має місце (при збереженні номінальної потужності) збільшення намагнічуючого струму, трохи більшому, ніж зменшення струму ротора. В результаті збільшується струм статора і загальні втрати, за рахунок втрат в обмотці сталі статора.

Ковзання кранового двигуна середньої потужності при номінальному навантаженні зазвичай не перебільшує 5%.

При зниженні напруги на 20%, швидкість обертання зменшується лише трохи більше, ніж на 3%, що не впливає на продуктивність механізму. Це відноситься до роботи двигунів на природній характеристиці, з невеликим ковзанням. При введенні регульованого опору в ланцюг ротора, залежність швидкості обертання двигуна від напруги більш значиме. Однак, при регулюванні

швидкості обертання вручну, впливом зниження напруги можна знехтувати.

При виборі двигунів по обертаючому моменту, відхилення напруги може бути допущене в межах 15%, враховуючи, що кратність обертаючого моменту по відношенню до тривало допустимого у кранових двигунах більше 6, в той же час, коли у двигунів загального призначення, ця величина рідко буває більше 2.

При зниженні напруги на 15% втрати в двигуні при номінальному навантаженні не збільшуються, в той час, як при підвищенні напруги більше 110% номінальної, втрати і нагрів двигуна збільшуються. Це пояснюється тим, що сумарні втрати в обмотках двигуна складають із навантажувальних втрат, обернено пропорційних квадрату напруг, і втрат, пропорційних квадрату струму холостого ходу рис.1.3.

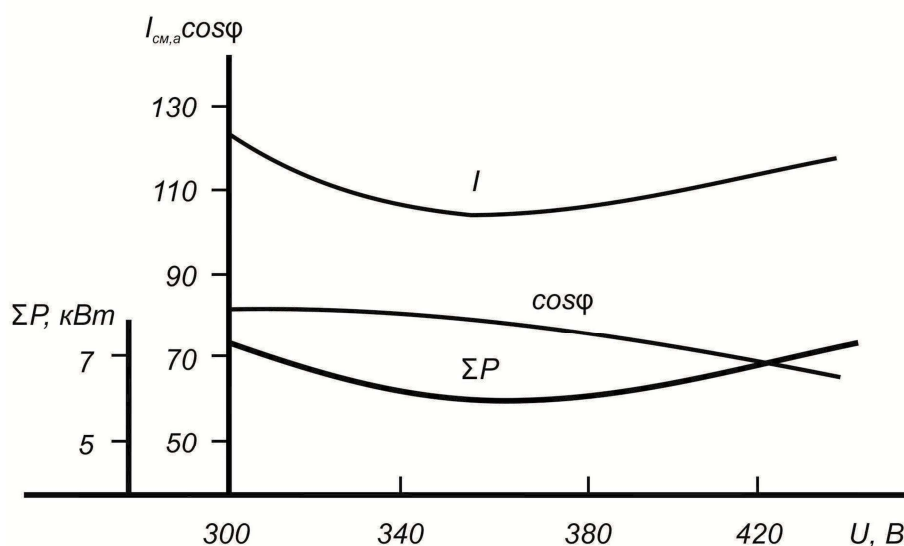


Рис. 1.3. Залежність струму статора, втрат і $\cos \phi$ від величини прикладеної напруги для кранового електродвигуна

На практиці вважають, що для АД серії А потужністю 20-100 кВт в діапазоні допустимих відхилень напруги зміна напруги на 1% тягне за собою зміну споживаної реактивної потужності на 3%. Збільшення споживаної реактивної потужності з ростом напруги пояснюється підвищенням витратою її на намагнічування стали машин.

Характерні графіки зміни споживаної реактивної потужності $\delta(\Delta Q_{\text{ном}})$ представлені на рис. 1.4.

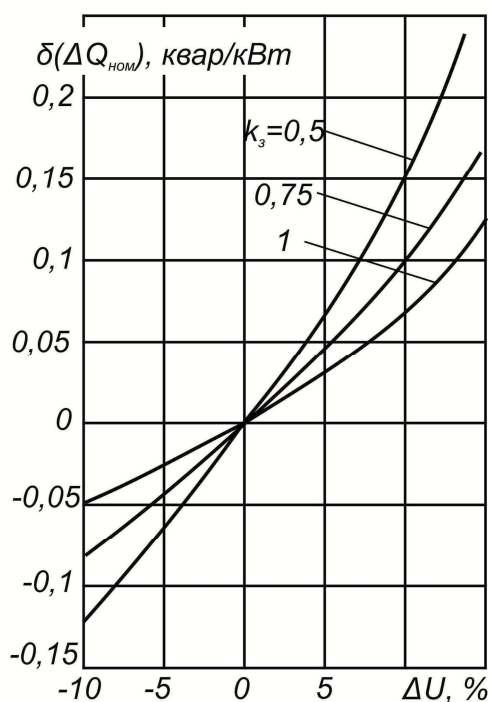


Рис. 1.4. Залежність зміни реактивної потужності, споживаної АД, від відхилення напруги при різних коефіцієнтах завантаження k_3

Характер графіків зміни частоти обертання електродвигунів в залежності від відхилення напруги аналогічний наведеним на рис. 1.4. Ця аналогія пояснюється тим, що при позитивних або негативних відхиленнях напруги посилюється або послаблюється електромагнітний зв'язок між полями статора та ротора, що спричиняє зменшення або збільшення ковзання та, відповідно, збільшення або зменшення частоти обертання ротору. Для механізмів з вентиляторним моментом опору, що пропорційний квадрату частоти обертання, ця зміна частоти призведе до зміни продуктивності.

Розглянемо вплив відхилення напруги на режими роботи синхронних двигунів. Максимальний момент СД в схемах з вентильними та електромашинними збудниками на постійному струмі збудження змінюється пропорційно напрузі живлення; це відповідно викликає зміну запасу статичної стійкості СД.

Втрати активної потужності в СД збільшуються зі зростанням напруги в мережі і завантаження СД по реактивній потужності. Для їх оцінки можливо використати вираз

$$\Delta P = D_1 \left(\frac{Q}{Q_{\text{ном}}} \right) + D_2 \left(\frac{Q}{Q_{\text{ном}}} \right)^2 \quad (1.3)$$

де Q і $Q_{\text{ном}}$ – реактивна потужність, що генерується і її номінальне значення.

Постійні коефіцієнти D_1 і D_2 визначаються технічними параметрами конкретної машини.

Найбільше відхилення напруги, при максимально можливому навантаженні лінії, повинно бути обмежено 15%, що визначається, в основному, не двигуном, а апаратурою управління.

По діючим стандартам електродвигуни високої напруги виготовляються на напругу 3,6 і 10 кВ $\pm 10\%$. В ряді випадків на великих заводах, при наявності синхронних двигунів рівні напруги на шинах цехових підстанцій складають 6,3 - 6,6 кВ, що може призвести до підвищення допустимого відхилення напруги для електродвигунів високої напруги.

При живленні від цехових підстанцій значної кількості потужних двигунів, в електричній мережі виникають часто настільки великі втрати напруги, що робочі і пускові характеристики електродвигунів викривляються, знижуються величини їх моментів і знижуються продуктивність машин.

1.3 Вплив відхилення напруги на роботу електротермічних установок

Електродугові сталеливарні, руднотермічні, індукційні плавильні та печі опору, а також різні електронагрівальні установки широко використовуються в технологічних процесах різних галузей промисловості. В них, як правило, відхилення напруги від номінальної призводять до зниження продуктивності їх [11]. Так, наприклад, в печах опору при відпалі заготовок при зниженні напруги живлення технологічний процес починає тривати довше; а при 10% зниженні напруги проводити процес відпалу стає неможливо. Затягнення процесу спричиняє підвищення витрати електричної енергії, збільшення тривалості технологічних циклів, а отже до збільшення собівартості продукції.

Зменшення продуктивності електротермічних установок при відхиленні напруги можна побачити на графіку залежності продуктивності Π та питомої витрати електричної енергії $W_{\text{пит}}$ від напруги $U_{\text{пол,ф}}$, що побудована для дугової феросплавної печі потужністю 16500 кВт А (рис. 1.5).

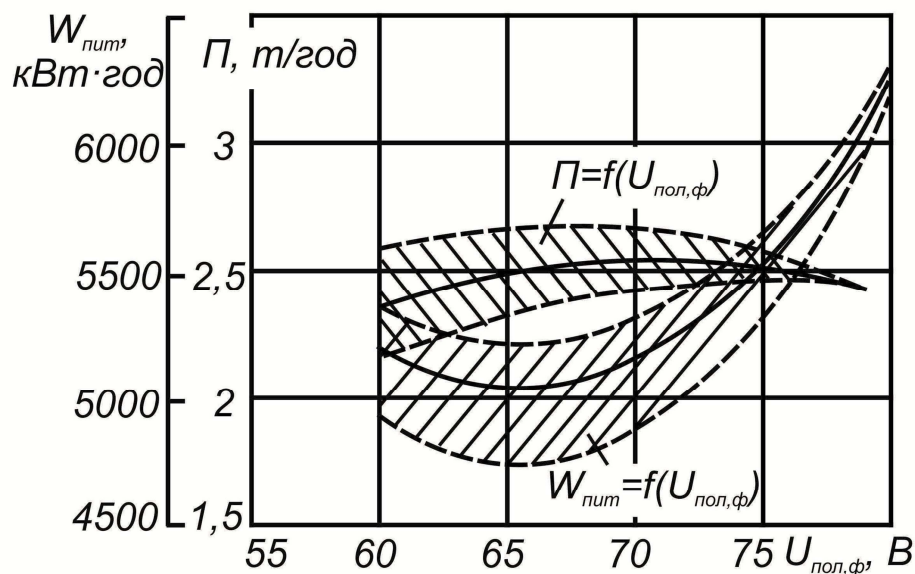


Рис. 1.5. Графік залежності продуктивності та питомої витрати електроенергії від напруги

Як видно з рис. 1.5, мінімальне значення питомої витрати електроенергії $W_{\text{пит}}$ спостерігається при напрузі 65 В, а максимальної продуктивності – при напрузі 70 В. Відхилення напруги в будь-який бік викликає зниження продуктивності установки Π_y та збільшення витрати електроенергії.

Продуктивність електротермічних установок Π_y в багатьох випадках має квадратичну залежність від рівня напруги:

$$\Pi_y = k \cdot U^2,$$

де k – коефіцієнт, що залежить від параметрів електрообладнання та продукції, що випускається і деяких особливостей технології.

Відхилення напруги істотно позначаються на роботі електродугових сталеливарних печей. Зв'язок між продуктивністю печі Π і відхиленням напруги ΔU для періоду розплавлення представляється у вигляді

$$P = P_{\text{ном}}(1 + 2\Delta U),$$

де $P_{\text{ном}}$ – продуктивність печі при номінальній напрузі.

Так, для печі ДСП-100 зниження напруги на 5% в період розплавлення скрапу призвело до зниження продуктивності на 10% і збільшення періоду розплавлення на 16 хв.

Потужність трансформаторів сучасних дугових печей досягає 44 МВА (на 200 т). При вмиканні і роботі потужних електропечей виникають значні (1,5-2 кратні) поштовхи струмів, особливо в перші періоди процесу плавлення твердої шихти. Поштовхи, що викликаються цими коливання напруги значно перевищують допустимі.

Дослідження роботи дугових печей показують, що чим крупніша і менш згущена шихта, тим коливання напруги в мережі сильніші і частіші. Максимальні коливання напруги мають місце перші 15-30 хв. роботи печі, поступово зменшуються після 2 годин роботи і до кінця плавки зникають. Ці коливання проходять з частотою від 0,5 - 2 Гц при амплітуді 1/6 - 1/4 і 3 - 7 Гц при амплітуді 1/10 - 1/8 величини спаду напруги при номінальному навантаженні печі.

Відповідно до правил установки електроспоживачів (ПУЕ), проводиться перевірка коливань напруги, викликаних роботою дугових печей з таким розрахунком, щоб не перебільшувала 5% для трифазних печей і 2,5% для однофазних.

В результаті досліджень були виявлені наступні, викликані роботою печі, небажані явища. Несиметричний режим горіння дуг печі - викликає появу значних струмів зворотної послідовності. Ці струми досягають величини 25% від значення робочого струму печі і могли б впливати на нагрів електричних машин, підключених близько з піччю. На симетрію системи змістовного впливу вони не чинять.

При роботі потужних печей в мережі виникають коливання напруги, які впливають на лампи розжарювання. Найбільш небажаними є коливання з

частотою близько 10 пер/сек. При цій частоті поріг чуттєвості людського ока до коливань знижується до 0,3-0,5% від номінальної напруги. Наявність допустимих коливань напруги, викликаних піччю, можна визначити за діаграмою рис 1.6, знаючи потужність пічного трансформатора і повний опір між даною точкою системи і її центром.

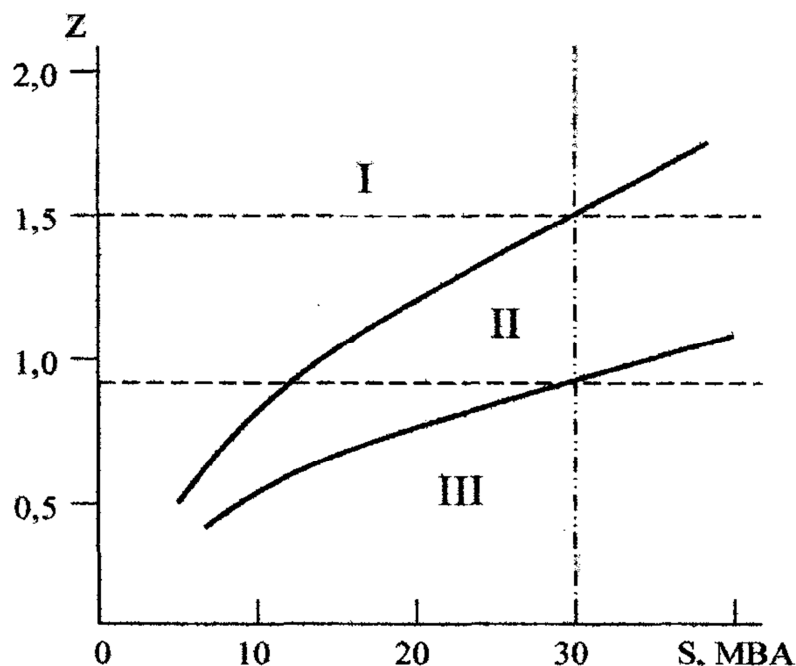


Рис. 1.6. Коливання напруги, викликані електропіччю в залежності від потужності пічного трансформатора S і повного опору від даної точки до центра системи Z (у відносних одиницях) (I – зона небажаних коливань; II – прикордонна зона; III – зона безпечних коливань)

Також слід відмітити, що зниження напруги призводить до недовикористання потужності, погіршення температурного режиму, подовження технологічного процесу і перевикористання електроенергії.

Для зменшення коливань напруги в мережах рекомендується проводити рівномірне завантаження печей. Живлення дугових печей здійснюється, по можливості, від окремих ліній.

В електропічних установках при зниженні напруги, яку підводять, виникає зниження продуктивності печі, збільшується час плавки, а при значному зниженні напруги, плавка взагалі неможлива. Коливання напруги в мережі впливає на

величину струму, що відповідає мінімуму витрат енергії на плавку. Регулятори, які підтримують стабільність струму ($I=\text{const}$), чи стабільність відношення напруги і струму печі ($I/U=\text{const}$) не в змозі автоматично підтримувати режим мінімуму витрати енергії при коливаннях напруги мережі.

При відхиленні напруги мережі від номінальної, відхилення у величині потужності, яка підводиться до печі, залежить від вибору регулюючої величини. Зміна напруги мережі на протязі доби в межах 5 - 10% і більше від номінального значення, призводить до зміни електричного режиму автоматизованої печі при незмінному задаванні регулятора. Для отримання найбільшої продуктивності електропечі і найменших приведених витрат енергії при звичайних коливаннях напруги мережі, можуть бути забезпечені лише при правильному виборі регулюючої величини.

Питання про вид вимірювального елемента регулятора, який встановлюється на потужних електропічних установках, повинні бути узгоджені з енергопостачальною системою, так як він визначає режим роботи при відхиленнях напруги в мережі від нормальної величини.

1.4 Вплив відхилення напруги на роботу системи електролізу

Під час електролізу алюмінію, магнію, хлору, при зниженні напруги зменшується оптимальна величина струму, при якій забезпечується найбільша продуктивність електролізних ламп; збільшується споживання електроенергії. При зниженні напруги на 10% продуктивність електролізних ванн для виробництва алюмінію знижується на 10%.

Номінальна напруга для всіх промислових електролізерів зазвичай не перевищує 4,5 В. Типова схема електролізу складається з 164 ванн; при цьому мінімальна напруга на серії складає близько 740 В, Для забезпечення потрібної технологією стабільності струму при виникненні „анодних ефектів”, викликаних підвищенням напруги, необхідно для компенсації відповідно підвищувати напругу на джерелі сталого струму. Максимальна напруга на серії може короткочасно досягати 800-820 В, а номінальна напруга перетворювача

приймається 850В.

Особлива вимога пред'являється до перетворювачів у відповідності з регулюванням напруги при електролізі алюмінію. Для нормальної роботи серії необхідно забезпечити плавне регулювання напруги в межах від мінімального до максимального значення (в розмірі до 10% від номінального), що забезпечується сітковим управлінням вентилів.

Ступінчате регулювання первинної напруги (8 ступенів) забезпечується в межах $\pm 10\%$ за допомогою вольтододаючого агрегату, який вмикається в розсічку нуля первинної обмотки 220 кВ понижуючого трансформатора, живлячого серію в цілому.

В умовах змінного навантаження перетворювальних підстанцій виникають значні коливання напруги, які доходять до 15%, що потребує, крім регулювання напруги на підстанціях, введення схем ємнісної комутації на випрямлячах. Принципи комутації через ємність дозволяють отримати на ртутних випрямлячах і інверторах випереджаючі кути зсуву фаз і збільшити генеруючи реактивну потужність при зростанні навантаження.

При сучасному виробництві для більшості випадків використовуються керовані вентильні перетворювачі.

Для керованих перетворювачів, що застосовують переважно в електротехнологічних процесах, використовують кремнієві діоди або тиристори з СІФУ. Для ряду технологічних процесів в кольоровій металургії (наприклад, електролізі) система автоматичного регулювання повинна забезпечити сталість випрямленого струму. Виконання цієї вимоги при відхиленнях напруги живлення призводить до зміни коефіцієнта потужності перетворювача λ :

$$\lambda = \gamma_n \cos \varphi_1,$$

де φ_1 – кут зсуву фази між першими гармоніками напруги та струму;

γ_n – коефіцієнт спотворення, що дорівнює відношенню діючого значення мережевого струму та першої гармоніки вентиляного перетворювача.

Для керованих вентильних перетворювачів в першому наближенні можна прийняти $\varphi_1 \approx \alpha$, де α – кут керування вентильного перетворювача.

При підвищенні напруги в мережі система авторегулювання струму забезпечує збільшення кута α . внаслідок чого коефіцієнт потужності вентильного перетворювача зменшується. Так, при підвищенні напруги на 5% значення λ знижується на 5-7%, і споживання реактивної потужності збільшується. Зниження напруги тягне за собою зростання значення λ при цьому дещо збільшується струм, що проходить через трансформатор вентильного перетворювача, і втрати в ньому, проте в цілому робота перетворювального агрегату стає більш економічною.

При регулюванні напруги вентильним перетворювачем за допомогою СІФК, а також спеціального автотрансформатора або регульованого під навантаженням трансформатора вентильного перетворювача економічні показники агрегату помітно покращуються. При підтримці сталості випрямленого струму вплив відхилення напруги на технологічний процес не виявляється.

В електролізних цехах з некерованими вентильними перетворювачами при відсутності регулювання напруги (хлорні станції целюлозно-паперових комбінатів, деякі хімічні підприємства) спостерігаються зниження продуктивності і підвищення витрати електроенергії.

1.5 Вплив відхилення напруги на роботу зварювальних установок

При одночасній роботі зварювальних установок короточасні зниження напруги на шинах 0,4 кВ досягають 25%, в основному за рахунок втрат напруги в трансформаторі цехової підстанції (10-12%) і шинопроводі, що живить двигуни і зварювальні апарати (8-10%). Зниження напруги на шинах 6-10 кВ складає 5%. Таке зниження погіршує якість зварювання, робить важчим пуск електродвигунів і утворює коливання освітлення.

Для раціонального режиму роботи дугових зварювальних агрегатів допустиме відхилення напруги від середнього значення не повинно перевищувати

$\pm 5\%$. Для зниження коливань напруги (до 7-8% у зварювальних агрегатів і до 1% на шинах знижувальної підстанції), найбільш виправдане впровадження в мережах, що живлять електрозварку, повздовжню ємнісну компенсацію. Заміна трансформатора головної підстанції і цехових трансформаторів в зоні дії зварювання трансформаторами більшої потужності обходиться значно дорожче, ніж повздовжня компенсація.

1.6 Вплив відхилення напруги на роботу освітлювальних пристроїв

Якість роботи освітлювальних приладів суттєво впливає на виробничий процес. Так, в окремих галузях виробництва, збільшення на 10% освітленості робочого місця призводить до збільшення продуктивності праці до 14%. Якість освітлення суттєво впливає на виконанні робіт, що пов'язані з використанням ручної праці, особливо при виконанні точних дій та операцій. Відповідно, недостатня освітленість призводить до підвищеної стомлюваності, зниження продуктивності праці, збільшення виробничого травматизму та браку.

Є відомим, що при підвищенні напруги скорочується термін служби світильників, наприклад, при $\Delta U = 10\%$ термін служби ламп зменшиться в 3 рази.

Для освітлювальних споживачів енергії допустиме відхилення напруги у найбільш віддаленого освітлювача не повинно перевищувати $\pm 5\%$ від номінальної напруги для жилих будівель і $-2,5\%$, $+5\%$ для виробничих будівель, загальних споруд та прожекторного зовнішнього освітлення. Слід відмітити, що при зниженні напруги на 2,5 % світловий потік ламп розжарення знижується на 9%, а при зниженні напруги на 5% - відповідно на 17,5%. Термін дії ламп при підвищенні напруги на 10% скорочується до 30 - 35% від номінального (300-350 год. замість 1000 год.). При зниженні напруги на 5% від номінальної люмінесцентні лампи перестають працювати стабільно. Активна потужність, спожита освітлювальним навантаженням, що складається з люмінесцентних ламп, при зниженні напруги на 10% зменшується на 10-15%, реактивна потужність також значно зменшується. Таким чином, освітлювальні установки дуже чутливі до відхилень напруги.

Вплив тривалих відхилень напруги може бути оцінено з економічної точки зору за терміном дії джерел світла. Відхилення напруги впливає на термін придатності ламп і освітленість. При $V = +10\%$ світловий потік збільшується на 40%, а термін придатності ламп скорочується майже в три рази і, навпаки, якщо $V = -10\%$ світловий потік зменшується в також на 40%, а термін придатності збільшується в 2 рази. Зниження освітленості впливає на продуктивність праці. Наприклад, при виробництві зварювальних робіт високої точності продуктивність праці із зміною освітленості на 1 лк змінюється на 0,007 - 0,012%.

Як відомо, при великій втраті напруги у трансформаторах, збільшується діапазон зміни рівня напруги у ламп на протязі доби. В результаті чого, при різкому зниженні силового навантаження близько розташовані лампи отримують підвищену напругу та швидше виходять з ладу. Одним із простих заходів по обмеженню коливань напруги на електролампах в робочому режимі, є відповідний розподіл навантажень по секціям шин підстанції.

1.7 Статичні характеристики навантажень по напрузі

Кожен електроприймач спроектований для роботи при номінальній напрузі і повинен забезпечувати нормальне функціонування при відхиленнях напруги від номінальної на задану величину. При зміні напруги в межах цього робочого діапазону можуть змінюватися значення вихідного параметра електроприймача, наприклад температура в електротермічної установки, освітленість у електроосвітлювальної установки, корисна потужність на валу електродвигуна і т. д. Одночасно зі зміною вихідних параметрів, а в ряді випадків навіть коли вихідні параметри не змінюються, зміна напруги призводить до зміни споживаної електроприймачем потужності.

Залежність споживаної потужності (навантаження) електроприймача від напруги називається статичною характеристикою навантаження по напрузі. Ця залежність в загальному випадку нелінійна. При малих відхиленнях напруги її часто представляють у вигляді лінійної залежності і характеризують величиною регулює ефекту навантаження. Регулюючим ефектом навантаження називають

зміну споживаної потужності електроприймача в процентах при зміні напруги на 1%. Наприклад, регулюючий ефект, рівний 2, означає, що при зміні напруги на 1% в ту ж сторону змінюється споживана потужність електроприймача на 2%. Регулюючий ефект, рівний - 0,5, означає, що при підвищенні напруги на 1% споживана потужність електроприймача зменшується на 0,5%.

Розглянемо статичні характеристики деяких найбільш поширених електроприймачів.

Освітлювання прилади. Регулюючий ефект у ламп розжарювання в області номінальної напруги дорівнює 1,6. Необхідно відзначити, що при зміні напруги змінюються освітленість, світловий потік і термін служби лампи. На кожен відсоток зниження напруги світловий потік зменшується приблизно на 3,6%. Термін служби збільшується приблизно на 13%.

Люмінесцентні лампи також змінюють своє споживання зі зміною напруги. Регулюючий ефект люмінесцентних ламп, включених по схемі з розщепленою фазою, дорівнює приблизно 1,9%, а ламп ДРЛ з пускорегулюючою апаратурою (ПРА) дорівнює 1,6%. Крім активної потужності лампи денного світла споживають і реактивну потужність, яка теж залежить від напруги. Так, зокрема, для люмінесцентних ламп регулюючий ефект реактивної потужності може бути оцінений величиною 1,5, для ламп ДРЛ з ПРА - величиною 4,5. Термін служби люмінесцентних ламп змінюється зі зміною напруги: на 1% зниження напруги термін служби в середньому збільшується на 2% [19].

Асинхронні двигуни. Вплив напруги на споживану потужність асинхронного двигуна проявляється більш складним чином. На рис. 1.7 приведена схема заміщення асинхронного двигуна [19]. Ця схема відображає опір статора і ротора двигуна, а також опір магнітного кола. Корисна потужність на валу двигуна визначається величиною $\frac{1-s_{ном}}{s_{ном}} r$. Як видно зі схеми заміщення, при зміні напруги змінюються струми в обмотках статора, ротора і намагнічуючий струм двигуна. При цьому втрати, викликані проходженням цих струмів по опорам схеми заміщення, по-різному змінюються в залежності від напруги.

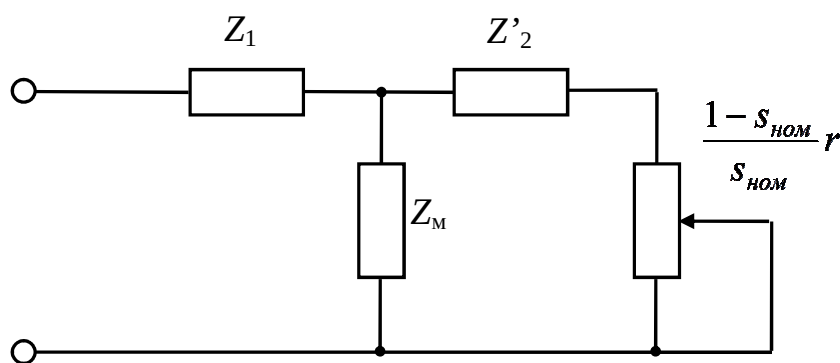


Рис. 1.7. Схема заміщення асинхронного двигуна

Так, втрати на намагнічування з ростом напруги зростають приблизно пропорційно квадрату напруги, що підводиться до двигуна:

$$\Delta P_{\mu} \equiv E_{\mu}^2. \quad (1.4)$$

Електричні втрати в опорах r_1 і r_2 залежать від зміни струму при зміні напруги. Якщо корисна потужність, що віддається двигуном, не змінюється зі зміною напруги, то втрати в опорах r_1 і r_2 змінюються приблизно обернено пропорційно квадрату напруги. У тому випадку, якщо зі зміною напруги змінюється корисна потужність на валу двигуна, залежність втрат відрізняється від квадратичної. Співвідношення втрат на намагнічування і електричних втрат в обмотках двигуна по-різному залежно від завантаження двигуна. При сильно завантаженому двигуні переважають втрати в обмотках статора і ротора. При слабо завантаженому двигуні зростає питома вага втрат на намагнічування. У зв'язку з цим зміна напруги по-різному впливає на втрати в двигуні в залежності від коефіцієнта його завантаження. При слабо завантажених двигунах при збільшенні напруги збільшуються сумарні втрати в двигуні. Двигуни, що працюють з коефіцієнтом завантаження, близьким до одиниці, з ростом напруги зменшують споживану потужність. Такі закономірності зміни втрат при зміні напруги характерні в основному для великих двигунів. Для дрібних двигунів ці залежності можуть бути іншими, так як у них частка втрат на намагнічування значно більше. Як приклад в табл. 1.1 наведені результати випробувань двигуна з

номінальною корисною потужністю 380 Вт, напругою 115 В і частотою обертання 1725 об / хв [11].

Таблиця 1.1. Вплив зміни напруги на характеристики електродвигуна потужністю 380 Вт

Напруга, В	Струм , А	Потужність, що підводиться		Частота обертів, об/хв	Потужність на валу, Вт	ККД
		Активна, Вт	Реактивна, вар			
126	9,30	655	972	1762	375,0	0,572
124	9,05	640	921	1760	375,0	0,583
122	9,90	627	881	1760	375,0	0,598
120	8,75	625	843	1760	375,0	0,600
118	8,65	620	810	1758	374,5	0,604
116	8,55	615	778	1755	374,0	0,008
114	8,50	615	748	1750	373,5	0,607
112	8,35	600	717	1750	373,5	0,622
110	8,30	600	688	1748	373,0	0,621

У табл. 1.1 наведені залежності значень струму, що підводяться активної і реактивної потужностей, частоти обертання, потужності на валу і коефіцієнта корисної дії від напруги, що підводиться.

Як видно з табл. 1.1, при зміні прикладеної напруги до двигуна на 15%, споживана активна потужність змінюється на 9%, а реактивна - на 40%, при цьому частота обертання двигуна і вихідна потужність на валу змінюються менш ніж на 1%. Це означає, що у цього двигуна регулюючий ефект активної потужності становить 0,6, а реактивної - 2,7, при цьому коефіцієнт завантаження двигуна близький до одиниці.

У табл. 1.2 наведені результати випробувань двох електродвигунів, які використовуються в побутових холодильниках.

З табл. 1.2 видно, що при зміні напруги, що підводиться до двигуна А, на 13% споживана потужність змінюється нелінійно і в усьому діапазоні на 40%, а в діапазоні зміни напруги на 10% споживана потужність також змінюється в межах 10%. Аналогічні випробування вітчизняного двигуна холодильника типу

«Апшерон» (двигун Б) показали, що при зміні напруги в межах 10% споживана потужність двигуна змінюється на 7%. Регулюючий ефект реактивної потужності у електродвигуна більше, ніж регулюючий ефект активної потужності. Так, для двигуна А перший становить 1,85, а для двигуна Б – 4,78.

Таблиця 1.2. Вплив напруги на споживану потужність електродвигунів побутових холодильників

Напруга, В	Струм, А	cosφ	Навантаження	
			Активне, Вт	Реактивне, вар
Двигун А				
110	2,10	0,66	151,5	174,4
115	2,13	0,63	154,8	191,2
117	2,15	0,62	155,6	196,8
118,5	2,17	0,61	158,7	203,1
120	2,20	0,63	166,1	205,2
124	2,58	0,67	214,1	237,7
Двигун Б				
200	0,68	0,81	110	79,6
210	0,73	0,75	115	101,4
220	0,79	0,72	120	115,6
230	0,85	0,63	123	151,6
240	0,93	0,59	133	182

Зміна споживаної потужності двигунів, наведена в табл. 1.1 і 1.2, викликана зміною не тільки втрат в самому двигуні, але і потужності, що розвивається двигуном на валу.

Зміна напруги, що підводиться до двигунів, робить також вплив на механічні характеристики двигуна.

На рис. 1.8 наведені механічні характеристики двигуна при двох рівнях напруги: U_1 і U_2 . Як відомо, механічна характеристика двигуна представляє собою залежність моменту M , що розвивається двигуном, від ковзання. На рис. 1.8 нанесена залежність від ковзання моменту опору привідного механізму. Точка перетину характеристики моменту опору і моменту, що розвивається двигуном, є робочою точкою двигуна. При напрузі U_1 двигун має характеристику M_1 і ця характеристика перетинається з характеристикою моменту опору в точці А.

Цьому робочому режиму відповідають момент M'_1 і ковзання s_1 . При зниженні напруги механічна характеристика двигуна змінюється на залежність M_2 . Як відомо, зниження напруги, що підводиться до двигуна на 1%, викликає зменшення максимального крутного моменту двигуна приблизно на 2% (квадратична залежність моменту від напруги). При переході на характеристики M_2 робочої точкою стає точка B з новим значенням робочого моменту M'_2 і робочого ковзання s_2 . При зниженні напруги ковзання збільшується і, отже, зменшується частота обертання ротора двигуна. Якби коефіцієнт завантаження був менше (характеристика моменту опору 2), ковзання як у вихідному режимі, так і в зміненому була б менше, ніж в першому випадку, і зміна ковзання була б також менше.

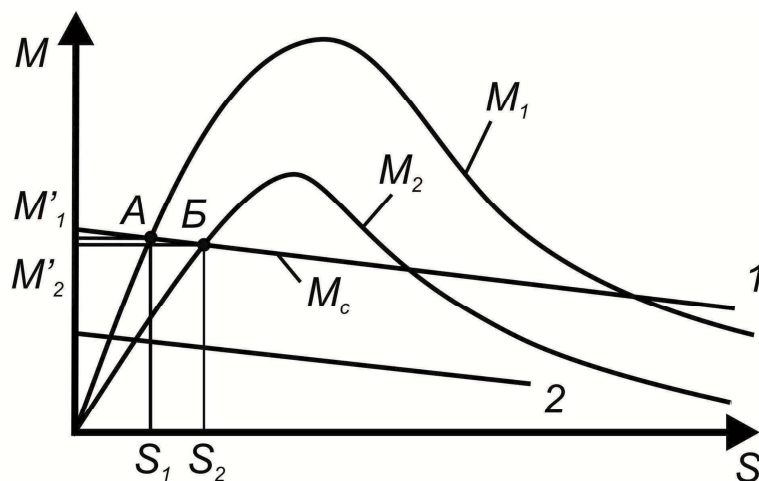


Рис. 1.8. Механічні характеристики асинхронного двигуна

Залежність частоти обертання ротора двигуна від напруги можна відобразити такою формулою:

$$n = n_c \left(1 - k_3 \frac{U_{\text{ном}}^2}{U^2} s_{\text{ном}} \right) \quad (1.5)$$

де n_c – синхронна частота обертання;

k_3 – коефіцієнт завантаження двигуна;

$U_{\text{ном}}$, $s_{\text{ном}}$ – номінальні значення напруги і ковзання відповідно.

Як видно з формули (1.5), при малому коефіцієнті завантаження частота обертання ротора двигуна більше номінальної частоти обертання при номінальному навантаженні двигуна.

Потужність, що розвивається двигуном на валу, пропорційна частоті обертання двигуна і моменту:

$$P \equiv M \cdot n. \quad (1.6)$$

Отже, зміна двигуном потужності, що розвивається при зміні напруги залежить від того, як при цьому змінюються частота обертання двигуна і момент опору. Розглянемо три випадки зміни моменту опору, що відповідають різним видам механізмів і приводу.

1) Момент опору не залежить від частоти обертання ротора двигуна ($M = \text{const}$). В цьому випадку потужність, що розвивається двигуном на валу пропорційна частоті обертання:

$$P \equiv n. \quad (1.7)$$

2) Момент опору пропорційна частоті обертання. У цьому випадку потужність, що розвивається двигуном на валу, пропорційна квадрату частоти обертання:

$$P \equiv n^2. \quad (1.8)$$

3) Момент опору пропорційний квадрату частоти. Тоді потужність, що розвивається на валу пропорційна кубу частоти:

$$P \equiv n^3. \quad (1.9)$$

Для трифазних двигунів, що працюють в мережі 380 В, регулюючий ефект частоти, обертання ротора по напрузі змінюється в залежності від типу двигуна і

коефіцієнта його завантаження від значення 0,02 до значення 0,15. Отже, регулюючий ефект корисної потужності, що розвивається двигуном на валу по напрузі, в такому випадку може становити від 0,02 до 0,45. Великі значення відповідають квадратичної залежності моменту опору від частоти обертання, менші постійності моменту опору і залежать від виду механізму, що приводиться двигуном. Насправді моментно-швидкісні характеристики приводного механізму набагато складніше [19]. Наведені вище приклади носять ілюстративний характер.

Загальний регулюючий ефект активної потужності асинхронного двигуна по напрузі складається з залежностей втрат в двигуні від зміни напруги і корисної потужності на валу двигуна від напруги. Його величина змінюється від слабо негативних значень до значення, близьких до одиниці.

Регулюючий ефект реактивної потужності асинхронного двигуна по напрузі також залежить від номінальної потужності двигуна і його завантаження. Ця величина змінюється в більш широких межах, ніж регулюючий ефект активної потужності. Для двигунів потужністю 20-100 кВт регулюючий ефект реактивної потужності по напрузі може бути прийнятий рівним 3, для двигунів меншої потужності рівним 5-7 [19].

Інші електроприймачі. Вплив напруги на споживану потужність електротермічних установок характеризується регулюючим ефектом активного навантаження, рівним 2. Значна залежність від напруги навантаження випрямлячів і інверторів. Регулюючий ефект цих установок може приймати значення від 1 до 5 в залежності від типу установки [19]. Регулюючий ефект електролізу становить від 0,5 до 2. Значення регулюючого ефекту цих установок пов'язані з режимом їх роботи і типом установки.

1.8 Висновки

Виходячи з усього вище наведеного можна зробити висновок, що для того, щоб робота всіх промислових електроспоживачів, а саме: електродвигунів, електрозварювальних та термічних установок, виробництво електролізу, було безперебійним та продуктивним, що є одним із найголовніших техніко-

економічних показників потрібне широке використання регулювання напруги в різних місцях та на різних рівнях напруги.

Визначення коефіцієнтів завантаження двигунів робочих агрегатів, доцільної напруги мережі, отримання фактичних питомих норм витрати електроенергії при різних межах допустимого відхилення напруги повинно входити в задачі енергодосліджень.

Для визначення оптимальної напруги цехової мережі необхідно вирішити наступні задачі:

- дослідити вплив зміни напруги живлення електродвигуна на його технічні характеристики з допомогою математичних моделей;
- поєднати розрахунок втрат активної потужності в системі електропостачання з розрахунком втрат в електродвигунах;
- сформулювати цільову функцію задачі оптимізації;
- створити методику вибору оптимального рівня напруги в цеховій мережі.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

2.1 Різновиди схем заміщення асинхронної машини

T-подібній схемі заміщення відповідає схема заміщення рис. 2.1. Опором ланцюгу, що намагнічує, є головний індуктивний опір первинної обмотки, і по цьому ланцюгу протікає струм, що намагнічує

$$I_m = I_1 + I'_2. \quad (2.1)$$

Напруга на затискачах 1 і 2 ланцюги, що намагнічують $U_{12} = E_1 = E'_2$

Схема заміщення рис. 2.1 не враховує магнітних втрат в осердях машини.

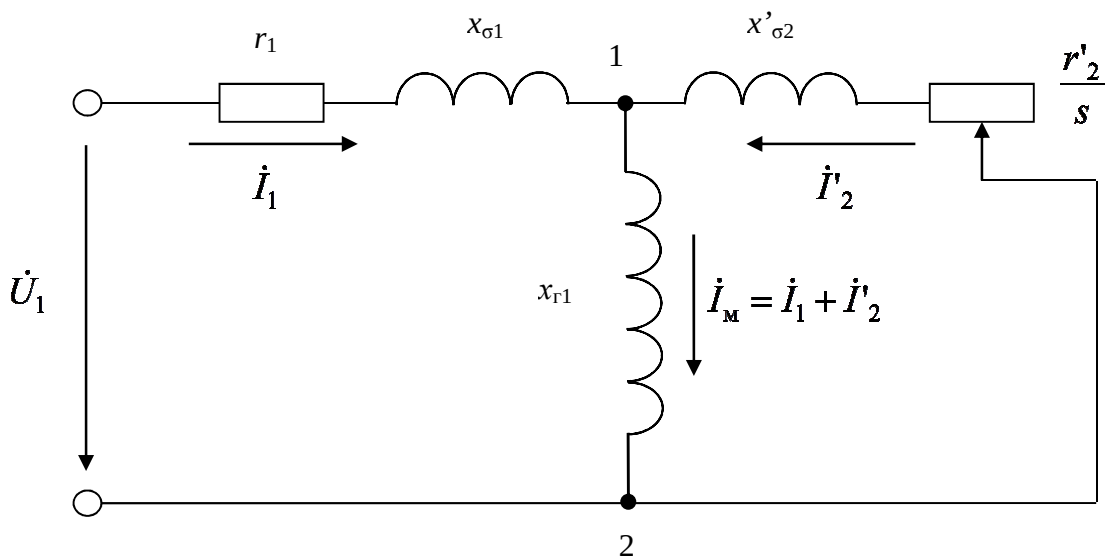


Рис. 2.1. Т-подібна схема заміщення асинхронної машини без врахування магнітних втрат

Втрати в осерді статора (первинному ланцюгу) можуть бути враховані при $f_1 = \text{const}$, шляхом включення на затискачі 1 і 2 схеми рис. 2.1 паралельно опору

$x_{Г1}$ активного опору $r_{МГ}$ такої величини, що втрати в ньому будуть рівні магнітним втратам в осерді статора на одну фазу: $\frac{E_1^2}{r_{МГ}} = \frac{p_{МГ1}}{m_1}$ звідки

$$r_{МГ} = \frac{m_1 E_1^2}{p_{МГ1}}. \quad (2.2)$$

Величину $r_{МГ}$ можна знайти, якщо з дослідних або розрахункових даних відомі втрати в осерді статора $p_{МГ1}$ при певному E_1 або певному магнітному потоці. Зазвичай $r_{МГ} \gg x_{Г1}$.

Паралельно включені опори $r_{МГ}$ і $x_{Г1}$ можна об'єднати в один загальний опір намагнічуючого ланцюга

$$Z_M = \frac{r_{МГ} \cdot jx_{Г1}}{r_{МГ} + jx_{Г1}} = \frac{r_{МГ} \cdot jx_{МГ}^2}{r_{МГ}^2 + jx_{Г1}^2} + j \frac{r_{МГ}^2 \cdot jx_{МГ}}{r_{МГ}^2 + jx_{Г1}^2} \quad (2.3)$$

або

$$Z_M = r_M + jx_M \quad (2.4)$$

причому $r_M \ll x_M$. В результаті замість схеми рис. 2.1 отримаємо схему рис. 2.2а, яка в дещо іншому вигляді представлена на рис. 2.2б. При цьому

$$Z_1 = r_1 + jx_{\sigma 1} \quad Z_2' = r_2' + jx_{\sigma 2}' \quad (2.5)$$

і виділений додатковий опір

$$r_{Д2}' = \frac{1-s}{s} \cdot r_2'. \quad (2.6)$$

відповідне механічній потужності, що розвивається на роторі машини. Схема рис. 2.2б аналогічна схемі заміщення трансформатора, до вторинних затискачів якої підключено опір навантаження $r_{Д2}'$.

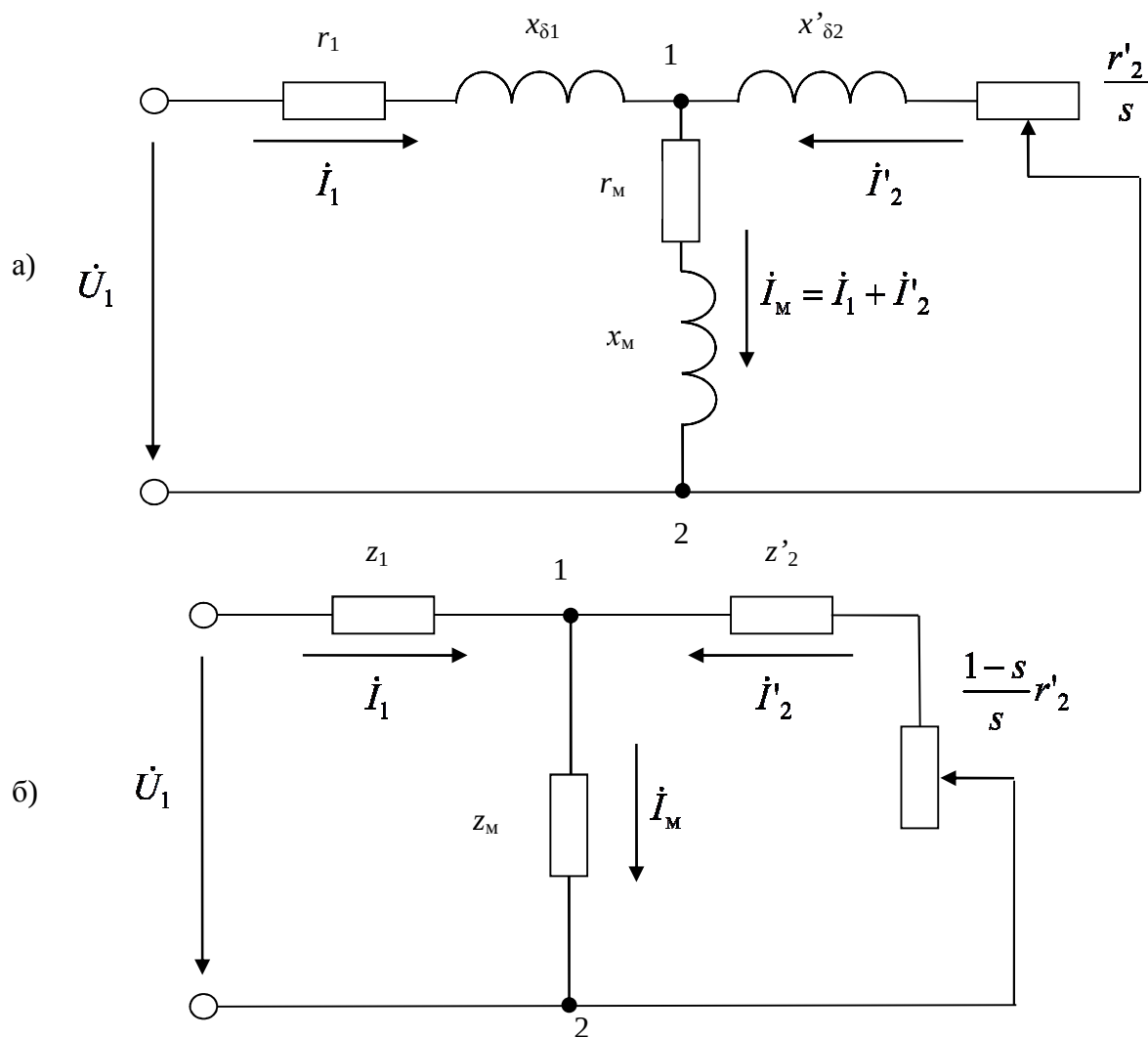


Рис. 2.2. Т-подібні схеми заміщення асинхронної машини з урахуванням магнітних втрат

Струм схем, що намагнічує, рис. 2.2 містить, окрім реактивної складової I_{mr} , також активну складову I_{ma} , відповідну магнітним втратам в статорі:

$$I_m = I_1 + I'_2 = I_{ma} + I_{mr} \quad (2.7)$$

Безпосередній облік магнітних втрат в осерді ротора (вторинному ланцюгу) в схемі заміщення складний, оскільки частота перемагнічування цього осердя $f_2 = sf_1$ при зміні s змінюється, внаслідок чого вказані втрати при $f_1 = const$ не пропорційні $E_1^2 \sim \Phi^2$. В нормальних робочих режимах машини ($0 < s \leq 0,05$) унаслідок малої частоти перемагнічування ці втрати взагалі незначні і їх можна не враховувати. Якщо ж облік цих втрат все ж таки необхідний, то слід мати на увазі,

що вони покриваються за рахунок механічної потужності.

Параметри схеми заміщення у відносних одиницях для нормальних асинхронних машин потужністю в декілька кіловат і вище знаходяться в слідуючих межах: $x_{m*}=2\div 4$; $r_{m*} = 0,08\div 0,35$; $r_{1*}\approx r_{2*}=0,01\div 0,07$; $x_{\sigma 1*}\approx x_{\sigma 2*} = 0,08\div 0,13$.

Із збільшенням номінальної потужності ККД машини збільшується, а відносні величини втрат зменшуються, відповідно чому зменшуються також відносні величини активних опорів. Величина x_{m*} зменшується із збільшенням числа полюсів машини, оскільки при цьому зменшується відношення τ/δ .

З приведених даних видно, що опір ланцюгу схеми заміщення асинхронних машин, що намагнічує, значно менший, ніж у трансформаторів. Це пояснюється наявністю в магнітному ланцюзі асинхронних машин повітряного зазору між статором і ротором. Струм, що у зв'язку з цим намагнічує, і струм холостого ходу асинхронних машин значно вищі ($I_{m*}= 0,25\div 0,50$), ніж у трансформаторів.

З схем заміщення рис. 2.2 можна зробити висновок, що при збільшенні I_1 , тобто при збільшенні навантаження машини, величини $E_1 \sim \Phi$ при $U = \text{const}$ зменшуватимуться. Проте в межах нормальних робочих навантажень зміна потоку машини невелика і складає лише декілька відсотків.

Г-подібна схема заміщення. Схеми заміщення, зображені на рис. 2.3, добре відображають реальні фізичні процеси що відбуваються в машині, оскільки за відсутності скосу пазів напруга ланцюга, що намагнічує, і струм, що намагнічує, відповідають реальному потоку основної гармоніки поля. Проте для дослідження деяких питань ці схеми дещо незручні, оскільки їх ланцюги розгалужені і напруга на затискачах паралельного ланцюга U_{12} при $U_1 = \text{const}$ непостійна. Зручнішою в цьому відношенні є схема заміщення, в якій затискачі паралельного ланцюга винесені на первинні затискачі, під напругу U_1 . З розгляду рис. 2.2 і рівнянь видно, що в подібній схемі опір, відповідний на рис. 2.2 опору $Z_1 = r_1 + j x_{\sigma 1}$ повинен бути рівний нулю. Для досягнення цієї рівності необхідно провести відповідне перетворення рівнянь напруги машини.

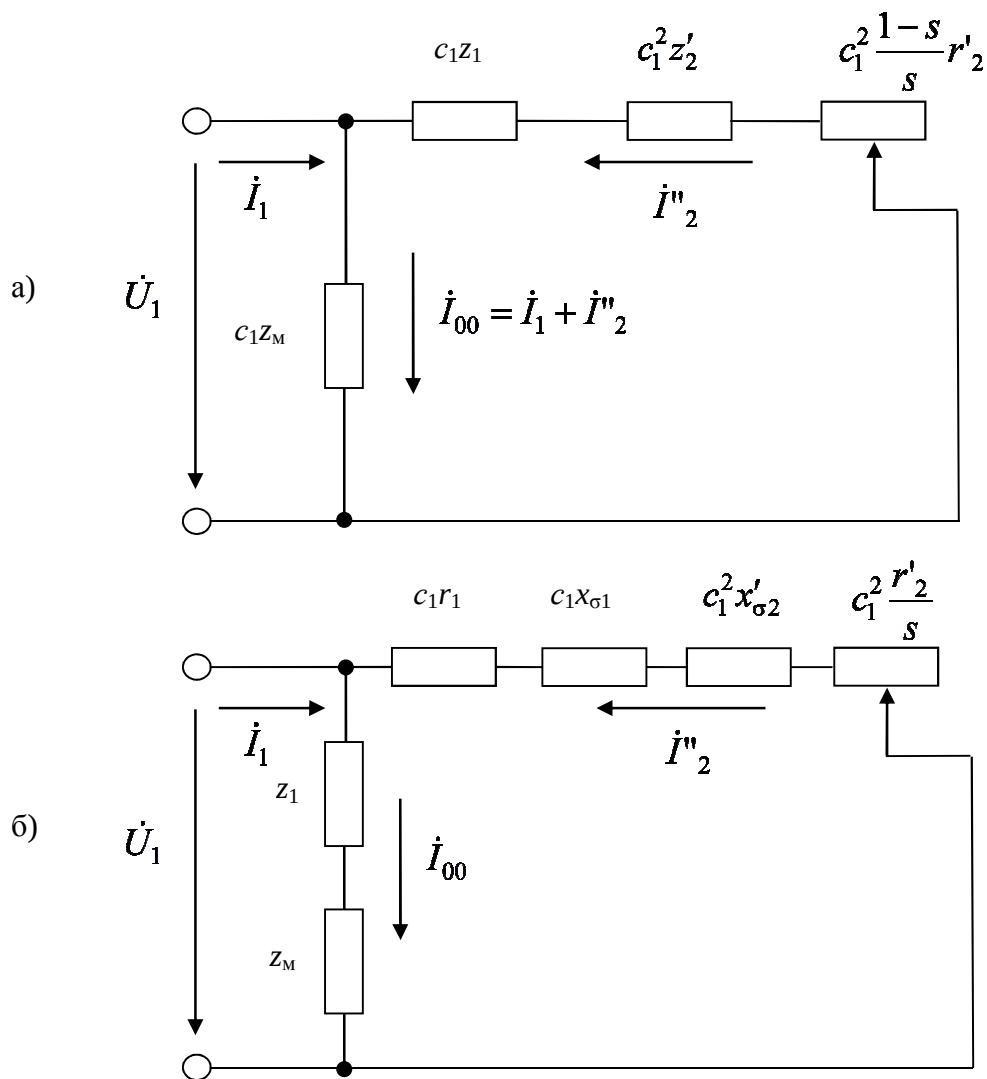


Рис. 2.3. Г-подібні схеми заміщення асинхронної машини

Складемо за правилом контурних струмів рівняння напруги схеми рис. 2.2б:

$$U_1 = Z_1 I_1 + Z_M (I_1 + I_2') \quad (2.8)$$

$$0 = Z_2' I_2' + \frac{1-s}{s} r_2' I_2' + Z_M (I_1 + I_2') \quad (2.9)$$

Для перетворення рівнянь (2.8) і (2.9) перейдемо в них від змінної I_2' до нової змінної I_2'' за рівністю:

$$I_2' = C_1 I_2'' \quad (2.10)$$

де C_1 - деяке, невизначене поки комплексне число. Цю операцію можна розглядати як нове приведення вторинного ланцюга, причому C_1 є коефіцієнтом приведення, а I_2'' - новим приведеним струмом.

Підставимо I_2' із (2.10) в (2.8) і додамо і віднімемо в правій частині член $C_1 Z_M I_1$. Тоді отримаємо:

$$U_1 = Z_1 I_1 + Z_M I_1 - C_1 Z_M I_1 + C_1 Z_M (I_1 + I_2'') \quad (2.11)$$

Очевидно, що останній член (2.11) відповідає намагнічуючому, або паралельному, ланцюзі нової схеми заміщення. На підставі викладеного для отримання Г-подібної схеми заміщення у виразі (2.11) необхідно покласти: $Z_1 I_1 + Z_M I_1 - C_1 Z_M I_1 = 0$ звідки знаходимо, що

$$C_1 = 1 + \frac{Z_1}{Z_M} \quad (2.12)$$

Замість (2.11) тепер маємо:

$$U_1 = C_1 Z_M (I_1 + I_2'') \quad (2.13)$$

Для отримання у виразі (2.9) члена, відповідного паралельному ланцюгу нової схеми і ідентичного з правою частиною (2.13), необхідно помножити (2.9) на C_1 , а також додати і відняти в правій частині (2.9) член $C_1 Z_M I_2''$, замінивши одночасно I_2' по формулі (2.10). При цьому множення на C_1 можна розглядати як нове додаткове приведення вторинної напруги. В результаті отримаємо:

$$0 = C_1^2 Z_2' I_2'' + C_1^2 \frac{1-s}{s} r_2' I_2'' + C_1 (C_1 - 1) Z_M I_2'' + C_1 Z_M (I_1 + I_2''). \quad \text{Враховуючи, що,}$$

згідно рівності (2.12), $C_1 - 1 = \frac{Z_1}{Z_M}$, останнє рівняння запишемо в наступному вигляді:

$$0 = C_1^2 Z_2' I_2'' + C_1^2 \frac{1-s}{s} r_2' I_2'' + C_1 Z_1 I_2'' + C_1 Z_M (I_1 + I_2'') \quad (2.14)$$

Перетвореним рівнянням напруги (2.13) і (2.14), як неважко побачити, відповідає Г-подібна схема заміщення рис. 2.3а. Ця схема в дещо іншому вигляді представлена також на рис. 2.3б.

При цьому враховано, що відповідно до рівності (2.12) $C_1 Z_M = Z_1 + Z_M$ і введене позначення

$$I_{00} = I_1 + I_2'' \quad (2.15)$$

Струмом I_{00} є первинний струм ідеального холостого ходу асинхронної машини, коли її ротор обертається з синхронною швидкістю ($s = 0$).

Для цього режиму опір схем заміщення $\frac{1-s}{s} r_2' = \infty$, $\frac{r_2'}{s} = \infty$, внаслідок чого в цих схемах $I_2' = I_2'' = 0$ і через намагнічуючий ланцюг, протікає струм

$$I_{00} = [I_1]_{s=0} = \frac{U_1}{Z_1 + Z_M} \quad (2.16)$$

Оскільки опір $Z_1 + Z_M$ від ковзання s не залежить, то при $U_1 = \text{const}$ і $f_1 = \text{const}$ також $I_{00} = \text{const}$.

При $s=0$ потік статора обертається синхронно з ротором, унаслідок чого, природно, $I_2=0$ і машина не розвиває моменту, що обертає. Тому асинхронний двигун міг би досягти синхронної швидкості ($s=0$) на холостому ході, без навантаження на валу, тільки в ідеальному випадку, коли механічні втрати,

магнітні втрати в роторі і додаткові втрати, обумовлені зубчастістю ротора, були б рівні нулю і руху ротора не перешкоджав би опір. Тому здійснити цей режим можна тільки шляхом прикладення до валу стороннього, або зовнішнього, рухового моменту, що обертає.

При реальному холостому ході асинхронного двигуна ковзання, хоча і вельми мале (долі відсотка), але все таки відмінно від нуля.

У схемах заміщення рис. 2.3 опорів $C_1 r_1$ і $C_1^2 r_2'$ вже не є чисто активними, як і опори $C_1 x_{\sigma 1}$ і $C_1^2 x_{\sigma 2}'$ не є чисто індуктивними.

Аналіз коефіцієнта C_1 . Відповідно до виразів (2.4) і (2.5) C_1 з (2.12) можна представити в наступному вигляді:

$$C_1 = 1 + \frac{r_1 + jx_{\sigma 1}}{r_M + jx_M} = 1 + \frac{r_1 r_M + x_{\sigma 1} x_M}{r_M^2 + x_M^2} - j \frac{r_1 x_M - x_{\sigma 1} r_M}{r_M^2 + x_M^2} \quad (2.17)$$

Уявна частина C_1 від'ємна, оскільки зазвичай $r_1 x_M > x_{\sigma 1} r_M$. Величину C_1 можна представити також в показовому вигляді:

$$C_1 = c_1 e^{-j\gamma} \quad (2.18)$$

причому її аргумент γ , згідно виразу (2.17), рівний

$$\gamma = \arctg \frac{r_1 x_M - x_{\sigma 1} r_M}{r_M^2 + x_M^2 + r_1 r_M + x_{\sigma 1} x_M} \approx \arctg \frac{r_1 x_M - x_{\sigma 1} r_M}{x_M (x_M + x_{\sigma 1})} \quad (2.19)$$

Оскільки уявна частина C_1 зазвичай від'ємна, то і її аргумент теж від'ємний, у зв'язку з чим в показнику (2.18) введений мінус. Тоді величина γ позитивна. У машинах потужністю 8-10 кВт і вище $\gamma < 1^\circ$. У машинах середньої і великої потужності тому можна вважати, що $\gamma \approx 0$ і C_1 є дійсним числом. Відзначимо, що, як це видно з виразу (2.19), наявність магнітних втрат ($r_M > 0$) викликає зменшення кута γ .

У зв'язку з малим значенням γ уявна частина коефіцієнта C_1 мала, і тому його модуль

$$c_1 = 1 + \frac{r_1 r_M + x_{\sigma 1} x_M}{r_M^2 + x_M^2} \approx 1 + \frac{r_1 r_M + x_{\sigma 1} x_M}{x_M^2} \approx 1 + \frac{x_{\sigma 1}}{x_M} \quad (2.20)$$

Останні дві рівності в (2.20) є більш грубішими наближеннями. У нормальних асинхронних машинах потужністю вище за декілька кіловат c_1 відносно мало відрізняється від одиниці і зазвичай $C_1 \approx 1,02 \div 1,06$. Як приклад вкажемо, що у асинхронного двигуна потужністю $P_H = 15$ кВт параметри схеми заміщення у відносних одиницях рівні: $x_{M*} = 4,07$; $r_{M*} = 0,258$; $r_{1*} = 0,042$; $x_{\sigma 1*} = 0,107$; $r_{2*} = 0,027$; $x_{\sigma 2*} = 0,108$. При цьому відповідно до приведених формул $C_1 = 1,027$ і $\gamma = 0^\circ 29'$.

Величина C_1 має просту фізичну інтерпретацію.

Згідно схемам заміщення рис. 2.2 і 2.3, при ідеальному холостому ході $U_1 = Z_1 I_{00} + Z_M I_{00}$; $-E = Z_M I_{00}$. Тому $\frac{U_1}{-E_1} = 1 + \frac{z_1}{z_M} = C_1$; $c_1 = \frac{U_1}{E_1}$; $\gamma = \angle(U_1 - E_1)$.

Таким чином, модуль C_1 рівний відношенню первинної напруги U_1 до первинної е. р. с. E_1 при ідеальному холостому ході, а аргумент C_1 – куту між векторами U_1 і $-E_1$ рис. 2.4.

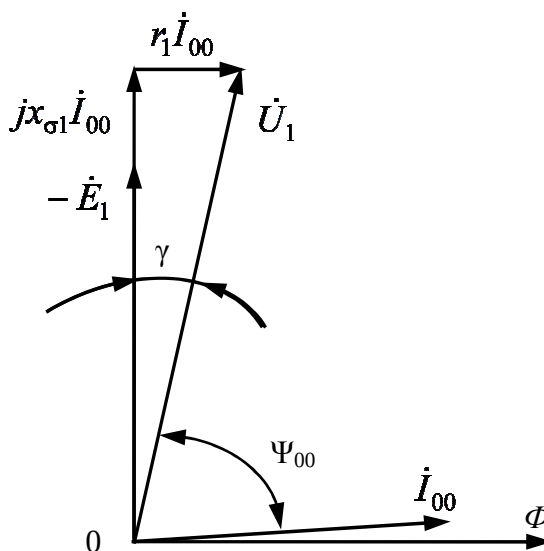


Рис. 2.4. Векторна діаграма асинхронної машини при ідеальному х.х. ($s = 0$)

Схема заміщення асинхронного двигуна, що використовується для математичної моделі і подальшого розрахунку.

Вихідні дані для розрахунку: $P_{2\text{ном}}$, $U_{\text{ф}}$, $\cos\varphi_{\text{ном}}$, $\eta_{\text{ном}}$, $s_{\text{ном}}$, $M_{\text{мах}^*}$, X_{μ} , R'_1 , X'_1 , R''_2 , X''_2 , n_1 – вибираємо з [4] в залежності від марки встановленого двигуна. Схема заміщення асинхронного двигуна по якій здійснюється розрахунок представлена на рис. 2.5.

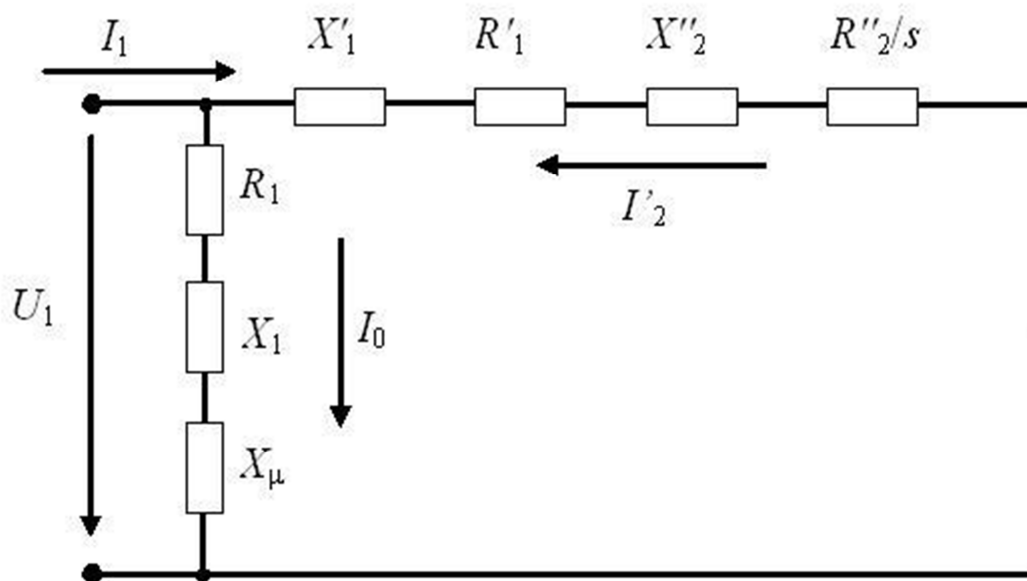


Рис. 2.5. Схема заміщення асинхронного двигуна

Опори X_1 і R_1 можуть бути обчислені по наступних формулах:

$$X_1 \approx \frac{2 \cdot X'_1 \cdot X_{\mu}}{X_{\mu} + \sqrt{X_{\mu}^2 + 4 \cdot X'_1 \cdot X_{\mu}}}, \quad (2.21)$$

$$R_1 = R'_1 \cdot \frac{X_1}{X'_1} \quad (2.22)$$

де X_{μ} – індуктивний опір магнітного кола двигуна;

R'_1 , X'_1 – активний та індуктивний опори статора відповідно;

R''_2 , X''_2 – активний та індуктивний опори ротора відповідно, приведені до кола статора.

Значення параметрів схеми заміщення приведені у іменованих одиницях:

$$X = \frac{x \cdot I_{1\text{ном.}}}{U_{1\phi}} \quad (2.23)$$

$$R = \frac{r \cdot I_{1\text{ном.}\phi}}{U_{1\phi}} \quad (2.24)$$

де X, R – опори, Ом;

x, r – опори, в.о;

$I_{\text{ном.}\phi}$ – номінальний фазний струм статора А;

U_{ϕ} – номінальна фазна напруга, В.

Номінальний фазний струм статора визначається за формулою:

$$I_{1\text{ном.}} = \frac{P_{2\text{нно}}}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \eta_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}} \quad (2.25)$$

Розглянемо залежності η і $\cos \varphi_1$ від напруги живлячої мережі при різних навантаженнях [5].

Згідно схеми заміщення рис. 2.5.

$$\cos \varphi_1 = \frac{I_{1a}}{\sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}} = \frac{I_0 \cdot \cos \varphi_0 + I_2' \cdot \cos \varphi_2}{\sqrt{(I_0 \cdot \cos \varphi_0 + I_2' \cdot \cos \varphi_2)^2 + (I_0 \cdot \sin \varphi_0 + I_2' \cdot \sin \varphi_2)^2}} \quad (2.26)$$

Виражаючи значення струму I_2' згідно схеми заміщення асинхронного двигуна, нехтуючи активними втратами при холостому ході ($\sin \varphi_0=1$) і приймаючи відносні значення моментів M_* і $M_{\text{max}*}$:

$$M_* = \frac{M}{M_{ном}} = \frac{\frac{s_{ном}}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s_{ном}}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} \quad (2.27)$$

$$M_{max*} = \frac{M_{max}}{M_{ном}} = \frac{\frac{s_{ном}}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s_{ном}}}{2} \quad (2.28)$$

отримаємо:

$$\cos \varphi_1 = \frac{I'_{2ном} \cdot \frac{M_*}{k_U}}{\sqrt{\left(I_{0ном} \cdot k_U + I'_{2ном} \cdot \frac{M_*^2}{(2 \cdot M_{max*} \cdot k_U^3)} \right)^2 + \left(I'_{2ном} \cdot \frac{M_*}{k_U} \right)^2}} \quad (2.29)$$

де $I_{0ном}$ і $I'_{2ном}$ – значення струму вітки намагнічування $-I_0 = \frac{U_1}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_\mu)^2}}$ і

струму навантажувальної гілки $-I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1' + C_1 \cdot \frac{r_2''}{s} \right)^2 + (x_1' + C_1 \cdot x_2'')^2}},$

де $C_1 = 1 + \frac{x_1'}{x_\mu}$, при номінальному режимі роботи двигуна;

$k_U = U_1/U_{1ном}$ – коефіцієнт регулювання напруги;

M_{max*} – дані з довідника [4].

При роботі двигуна із зменшеним навантаженням і зниженій напрузі магнітні втрати зменшуються пропорційно квадрату напруги, електричні втрати – пропорційно квадрату струму статора, знижується струм, що намагнічує, а частота обертання помітно не зменшується. Тому

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\Sigma \Delta P}{P_2}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1 - s_{ном}}{P_{2ном} \cdot M_*} \right) \cdot \left[\frac{\Delta P_{м.ном} \cdot k_U^4 + \Delta P_{ел.ном} \cdot M_*^2 + \Delta P_{мех.ном} \cdot \left(\frac{k_U^2 - s_{ном}}{1 - s_{ном}} \right)}{k_U^2 - s_{ном} \cdot M_*} \right]} \quad (2.30)$$

де $s_{ном}$ – ковзання у номінальному режимі[4];

$P_{2ном}$ – потужність на валу двигуна у номінальному режимі з [1];

M_* – коефіцієнт завантаження двигуна, що визначається за результатами енергетичного аудиту на підприємстві;

$\Delta P_{м.ном}$ – втрати потужності магнітного ланцюга двигуна при номінальному режимі його роботи;

$\Delta P_{ел.ном}$ – втрати потужності в обмотках статора та ротора двигуна при номінальному режимі його роботи;

$\Delta P_{мех.ном}$ – механічні втрати потужності у номінальному режимі.

Розрахунок втрат потужності проводиться за наступними формулами:

$$\Delta P_{м.ном} = P_{1ном} - \Delta P_{ел1ном} - P_{ем.ном} \quad (2.31)$$

де $P_{1ном}$ – номінальна потужність, яку двигун споживає з електричної мережі. Визначається за формулою $P_{1ном} = U_{1ном} \cdot I_{1ном} \cdot \cos \varphi_{ном}$ – значення $I_{1ном}$ з формули (2.25), інші складові вибираємо з довідника [4];

$\Delta P_{ел1.ном}$ – втрати потужності в обмотці статора при номінальному режимі. Визначається за формулою $\Delta P_{ел.ном1} = m_1 \cdot I_{1ном}^2 \cdot R_1$ – де m_1 є числом фаз статора значення $I_{1ном}$ з формули (2.25), інші складові вибираємо з [4];

$P_{ем.ном}$ – номінальна електромагнітна потужність АД, визначається за формулою $P_{ем.ном} = M_{ном} \cdot \omega_1$ – значення $\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60}$ – синхронна кутова

швидкість вала двигуна [6]; $M_{\text{ном}} = 9550 \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}}$ – номінальний електромагнітний момент; $n_{\text{ном}} = n_1 \cdot (1 - s_{\text{ном}})$ – номінальна частота обертання ротора [7].

$$\Delta P_{\text{ел.ном}} = \Delta P_{\text{ел.ном1}} + \Delta P_{\text{ел.ном2}} = m_1 \cdot I_{1\text{ном}}^2 \cdot R_1 + m_1 \cdot I_{2\text{ном}}'^2 \cdot R_2' \quad (2.32)$$

де $\Delta P_{\text{ел1.ном}}$ – втрати потужності в обмотці статора при номінальному режимі;

$\Delta P_{\text{ел2.ном}}$ – втрати потужності в обмотці ротора при номінальному режимі.

$$\Delta P_{\text{мех.ном}} = \Delta P_m = \frac{M_{\text{ном}} - \frac{P_{2\text{ном}}}{\omega_{2\text{ном}}}}{\omega_{2\text{ном}}} \approx 0 \quad (2.33)$$

За значенням $\cos \varphi_1$ – (2.29) та η – (2.30), при певному значенні коефіцієнта завантаження M_* і коефіцієнті регулювання напруги k_U , заходимо активну потужність, що споживає двигун з мережі під час роботи:

$$P_1 = \frac{P_{2\text{ном}} \cdot M_*}{\eta} \quad (2.34)$$

Повна потужність на затискачах двигуна визначається за формулою:

$$S_1 = \frac{P_1}{\cos \varphi_1} \quad (2.35)$$

Реактивну складову спожитої потужності визначаємо за наступною формулою:

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2} \quad (2.36)$$

Втрати в двигуні в залежності від його коефіцієнта завантаження:

$$\Delta P_{\partial\partial} = P_H \cdot K_3 \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \quad (2.37)$$

2.2 Математична модель кабельної лінії

Вихідні дані для розрахунку: $r_{0\text{кл}}$, $x_{0\text{кл}}$ – вибираємо з [2] в залежності від марки кабельної лінії (шинопроводу), P_1 , Q_1 , S_1 . Схема заміщення кабельної лінії (шинопроводу) по якій здійснюється розрахунок представлена на рис. 2.6.



Рис. 2.6. Схема заміщення кабельної лінії (шинопроводу)

Опори $X_{\text{кл}}$ і $R_{\text{кл}}$ можуть бути обчислені по наступних формулах [9]:

$$R_{\text{кл}} = r_{0\text{кл}} \cdot l_{\text{кл}}, \quad (2.38)$$

$$X_{\text{кл}} = x_{0\text{кл}} \cdot l_{\text{кл}} \quad (2.39)$$

де $r_{0\text{кл}}$ – активний опір кабельної лінії (шинопроводу), Ом/км;

$x_{0\text{кл}}$ – реактивний опір кабельної лінії (шинопроводу), Ом/км;

$l_{\text{кл}}$ – довжина кабельної лінії (шинопроводу), км.

Втрати потужності в кабельній лінії (шинопроводі) обчислюємо за такими формулами:

$$\Delta P_{\text{кл}} = \frac{P_{\text{кл}}^2 + Q_{\text{кл}}^2}{U_{\text{н.кл}}^2} \cdot R_{\text{кл}}, \quad (2.40)$$

$$\Delta Q_{\text{кл}} = \frac{P_{\text{кл}}^2 + Q_{\text{кл}}^2}{U_{\text{н.кл}}^2} \cdot X_{\text{кл}}, \quad (2.41)$$

де $P_{\text{кл}}$ – активна потужність у початковій точці розрахунку $P_{\text{кл}} = P_1$;

$Q_{\text{кл}}$ – реактивна потужність у початковій точці розрахунку $Q_{\text{кл}} = Q_1$;

$X_{\text{кл}}, R_{\text{кл}}$ – активний та індуктивний опори кабельної лінії (шинопроводу);

$U_{\text{н.кл}}$ – номінальна напруга кабельної лінії (шинопроводу).

Значення потужності у кінцевій точці розрахунку обчислюються:

$$S_2 = S_1 + \Delta P_{\text{кл}} - j \cdot \Delta Q_{\text{кл}} = P_1 - j \cdot \Delta Q_1 + \Delta P_{\text{кл}} - j \cdot \Delta Q_{\text{кл}} = P_2 - j \cdot Q_2 \quad (2.42)$$

2.3 Математична модель трансформатора

Для двообмоткових трансформаторів в залежності від того, якій мережі вони належать, приймають такі схеми заміщення:

1) в місцевих – послідовно з'єднані активне $r_{\text{т}}$ та індуктивне $x_{\text{т}}$ опори, що враховують відповідно активні втрати на нагрів обмоток і втрати індуктивної потужності, зумовлені потоком розсіювання. Втратами в сталі і струмом холостого ходу трансформатора нехтують;

2) в районних електричних мережах – Г-подібна схема (рис. 2.7). Від схеми заміщення, прийнятої в місцевих мережах, відрізняється тим, що з боку живлення приєднані активна провідність $g_{\text{т}}$, обумовлена втратами потужності в сталі трансформатора на перемагнічування (гістерезис), вихрові струми і магнітострикція (вібрацію листів магнітопроводу), а також реактивна провідність $b_{\text{т}}$, обумовлена втрати реактивної потужності на створення основного магнітного потоку.

Параметри схеми заміщення двообмоткового трансформатора визначаються за формулами:

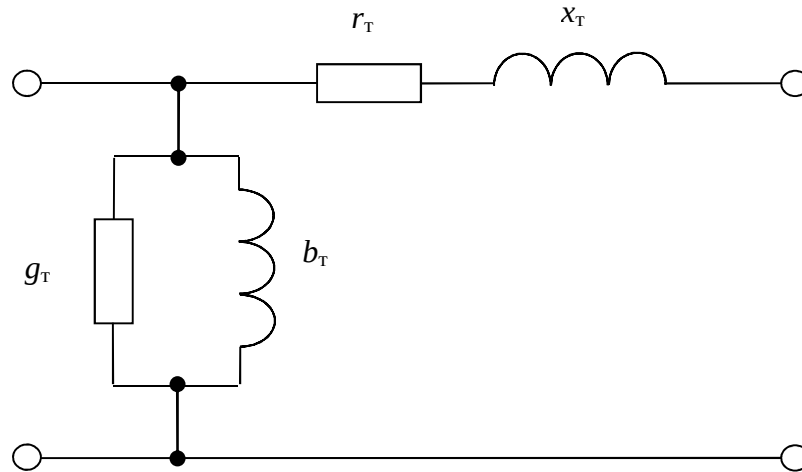


Рис. 2.7. Г-подібна схема заміщення двохобмоткового трансформатора

$$r_T = \frac{U_{\text{НОМ}}^2 \Delta P_{\text{к.з.}}}{S_{\text{НОМ}}^2} \quad (2.43)$$

$$X_T = \frac{U_{\text{НОМ}}^2 u_{\text{к.з.}} \%}{100 S_{\text{НОМ}}} \quad (2.44)$$

$$b_T = \frac{S_{\text{НОМ}} I_{\text{х.х.}} \%}{100 U_{\text{НОМ}}^2} \quad (2.45)$$

$$g_T = \frac{\Delta P_{\text{х.х.}}}{U_{\text{НОМ}}^2} \quad (2.46)$$

де $U_{\text{НОМ}}$, $S_{\text{НОМ}}$ – номінальні напруга (обмотки високої напруги) і потужність трансформатора;

$\Delta P_{\text{к.з.}}$ – втрати короткого замикання;

$u_{\text{к.з.}}$ – напруга короткого замикання (%);

$I_{\text{х.х.}}$ – струм холостого ходу (%);

$\Delta P_{\text{х.х.}}$ – втрати холостого ходу.

Всі ці параметри є каталожними даними.

На практиці шунтуючі провідність можна замінити потужністю втрат холостого ходу

$$S_{\text{xx}} = P_{\text{xx}} + jQ_{\text{xx}} \quad (2.47)$$

де

$$Q_{x.x.} = \frac{S_{\text{ном}} I_{x.x.} \%}{100} \quad (2.48)$$

Трьохобмоткові трансформатори в розрахунках усталених режимів представляють схемою у вигляді трипроменевою зірки з реактивної провідністю, включеної за Г-подібною схемою з боку променя обмотки, підключеної до джерела живлення.

2.4 Синтез математичних моделей елементів

Для проведення розрахунків і можливості визначення значення загальних втрат в системі «система електропередачі – асинхронний двигун», об'єднуємо попередні математичні моделі в єдине ціле. Отриманий результат приведений на рис. 2.8.

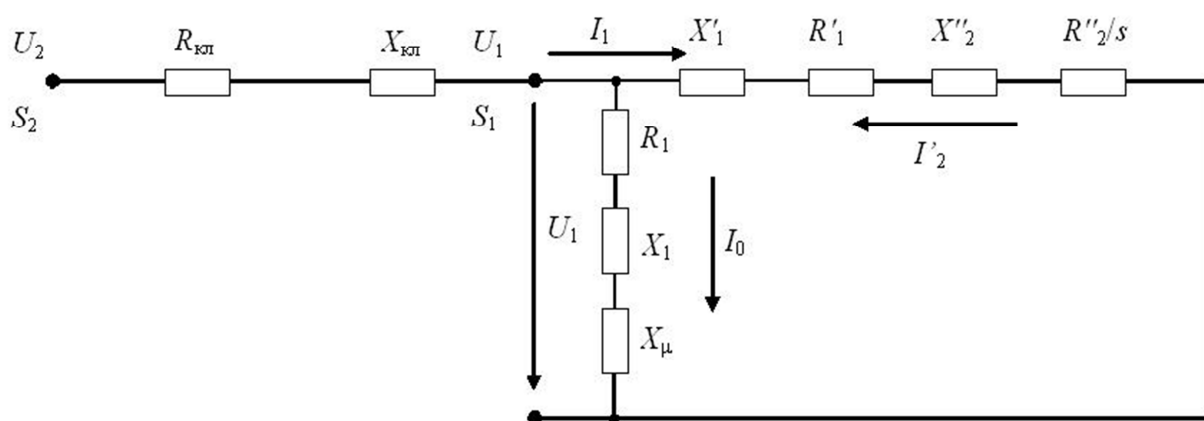


Рис. 2.8. Схема заміщення системи «система електропередачі – асинхронний двигун»

Внаслідок того, що напруга на затискачах двигуна не дорівнює напрузі на шинах цехових підстанцій через спад у живлячій мережі, маємо типовий варіант ітераційного розрахунку.

Всі параметри розраховуємо за наведеними вище формулами. На першій ітерації приймаємо номінальне значення напруги на затискачах двигуна для розрахунку його параметрів, зокрема, потужності, яку він споживає з мережі, а

також потужності яка в ньому втрачається під час роботи. Приймаючи спожиту машиною потужність за ту, що знаходиться вкінці лінії, знаходимо втрати в кабельній лінії. Для знаходження потужності, яка передається, сумуємо потужність в кінці лінії і втрати в ній.

Далі проводимо розрахунок по напрузі.

Відхилення напруги на затискачах споживачів знаходиться за формулою [10]:

$$V = V_{\text{цж}} - \sum_{j=1}^n \Delta U_j + \sum_{i=1}^m \delta U_i, \% \quad (2.49)$$

де $V_{\text{цж}}$ – відхилення напруги на шинах центру живлення, %, приймають, що $V_{\text{цж}} = \pm 5\%$, якщо виконується умова зустрічного регулювання напруги;

$\sum_{j=1}^n \Delta U_j$ – сума втрат напруги по складовим елементам мережі, %;

$\sum_{i=1}^m \delta U_i$ – сума додатків напруги завдяки підключенню батарей конденсаторів та коефіцієнтам трансформації ТП, %.

– для шинопроводів, повітряних та кабельних ліній:

$$\Delta U_{\text{л}} = \frac{P_{\text{л}} \cdot R + Q_{\text{л}} \cdot X}{10 \cdot U^2}, \% \quad (2.50)$$

$$\Delta U_{\text{л}} = \frac{(r_0 + x_0 \cdot \text{tg}\varphi) \cdot P \cdot l}{10 \cdot U^2}, \% \quad (2.51)$$

де $P_{\text{л}}, Q_{\text{л}}$ – активні та реактивні потужності, що проходять по лінії, кВт, квар;

X, R – активний і реактивний опір елементів мережі, Ом;

U – напруга в точці підключення, кВ;

r_0, x_0 – питомий індуктивний та активний опір ліній або шинопроводів, Ом/км;

$\text{tg}\varphi = P/Q$ – коефіцієнт потужності електричного навантаження лінії;

l – довжина лінії або шинопроводу, км.

В електричних мережах з значною протяжністю, сума втрат напруг є значною. Тому, необхідне обов'язкове регулювання напруги, що може здійснюватися зміною коефіцієнту трансформації трансформаторів, наприклад, регулювання під навантаженням або переключення без збудження трансформатора. В трансформаторах з переключенням без збудження кожний з вибраного та встановленого на перемикачі відгалуження відповідає одному з можливих коефіцієнтів трансформації. В трансформаторах з переключенням без збудження коефіцієнт трансформації змінюється сходинково через 2,5% в межах $\pm 5\%$.

Додаток напруги створюваний трансформатором, визначається за виразом:

$$\delta U_m = \left[\frac{U_{н2} \cdot U_{1н..м}}{U_{відн} \cdot U_{2н..м}} - 1 \right] \cdot 100\% \quad (2.52)$$

де $U_{1н..м}$, $U_{2н..м}$ – номінальні напруги мереж, до яких підключені первинна та вторинна обмотка трансформатора, кВ.

Додатки напруги також можуть створювати компенсуючі пристрої реактивної потужності. Додаток напруги за рахунок підключення БСК:

$$\delta U_{БК} = \frac{X_c \cdot Q_{БК}}{10 \cdot U^2}, \% \quad (2.53)$$

де X_c – опір мережі від джерела живлення до точки приєднання БСК у режимі роботи, що розглядається, Ом;

U – напруга у місці приєднання БСК, кВ;

$Q_{БК}$ – потужність батарей конденсаторів, квар.

Як контрольні точки для розрахунків відхилення напруги приймаються найближчі та найвіддаленіші електроприймачі цеху.

За знайденим за формулою (2.52) відхиленням напруги на затискачах електроприймача знаходиться коефіцієнт регулювання напруги k_U , який використовується для перерахунку потужностей, що споживаються двигуном P_1 і Q_1 . Потім розрахунок повторюється, доки k_U або U_2 не буде змінюватися на затискачах двигуна до певного заданого значення нев'язки.

2.5 Формування задачі оптимізації

Основним завданням оптимізації в даному випадку є мінімізувати сумарні втрати в цеховій мережі при заданих межах регулювання напруги:

$$\Sigma \Delta P \rightarrow \min, \quad (2.54)$$

$$0,95 \cdot U_{\text{ном}} \leq U_i \leq 1,05 \cdot U_{\text{ном}}. \quad (2.55)$$

Сумарні втрати визначаються за формулою:

$$\Sigma \Delta P = \Sigma \Delta P_{\text{дв}} + \Sigma \Delta P_{\text{мер}} + \Delta P_{\text{тр}}. \quad (2.56)$$

де $\Sigma \Delta P_{\text{мер}}$ – сумарні втрати активної потужності в цеховій мережі, визначаються за (2.40);

$\Sigma \Delta P_{\text{дв}}$ – сумарні втрати в двигунах

$$\Sigma \Delta P_{\text{дв}} = \Sigma K_3 \cdot P_{2\text{ном}} \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right). \quad (2.57)$$

де η – ККД двигуна при певній напрузі живлення, знаходиться за (2.30);

K_3 – коефіцієнт завантаження двигуна дорівнює M_* ;

$P_{2\text{ном}}$ – з довідника [4],

$\Delta P_{\text{тр}}$ – втрати в трансформаторі, знаходяться за (2.30) підстановкою опору з (2.43).

Регулювання напруги в цеховій електричній мережі, як правило, здійснюється переключенням відпайок трансформатора з ПБЗ, яке має п'ять відгалужень ($\pm 5\%$ з кроком $2,5\%$). Отже, при виборі оптимального рівня напруги існує лише 5 варіантів можливих значень напруги центру живлення. Така невелика кількість можливих варіантів дозволяє при пошуку мінімуму функції (2.54) скористатися методом повного перебору. При цьому, здійснюючи розрахунок потрібно враховувати умову (2.55) для кожного i -го електроприймача і у випадку, якщо умова (2.55) не виконується, то такий варіант із можливих слід виключити.

Пошук мінімуму функції (2.54) здійснюється в наступній послідовності:

1. За значеннями коефіцієнтів завантаження робочих двигунів визначається споживана потужність двигунами з мережі P_{1i} та Q_{1i} . При цьому вважається на першій ітерації, що напруга на затискачах двигуна дорівнює номінальній.
2. Проводиться розрахунок електричної мережі по потужності.
3. Проводиться розрахунок електричної мережі по напрузі. При цьому за напругу центру живлення береться напруга, яка відповідає крайній (найменшій або найбільшій) відпайці трансформатора.
4. За значеннями напруги у вузлах U_i визначаються нові значення споживаної потужності двигунами з мережі P_{1i} та Q_{1i} .
5. Розрахунок по п. 3 і 4 повторюється поки зміна напруги у вузлах або споживаної потужності стане менше за деяку наперед задану нев'язку.
6. Визначаються втрати активної потужності в двигунах, електричній мережі та трансформаторі. Розраховується значення цільової функції за (2.56).
7. Змінюється відпайка трансформатора центру живлення та розрахунок по п. 3-6 повторюється. Таким чином перебираються усі відпайки трансформатора.
8. Перевіряються значення відхилення напруги на затискачах електроприймачів. Якщо умова (2.55) не виконується варіант з даним відгалуженням відкидається.
9. Серед варіантів які залишились після п. 8 вибирається той який має найменше значення цільової функції.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РІВНЯ НАПРУГИ В ЦЕХОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ НА ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ В ЇЇ ЕЛЕМЕНТАХ

3.1 Дослідження параметрів асинхронного двигуна в залежності від напруги на затискачах і його коефіцієнта завантаження

Для практичного проведення розрахунку використано схему заміщення для двигуна зображену на рис. 2.5, а також формули з (2.21) по (2.37).

Приклад розрахунку параметрів двигуна серії 4А марки 160S2УЗ :

Вихідні дані для розрахунку:

- Коефіцієнт регулювання напруги $k_U=0,95; 0,975; 1; 1,025; 1,05$.
- Коефіцієнт завантаження двигуна $k_z=M^*=0,4; 0,41...1,25$.
- Номінальна потужність на валу $P_{2\text{ном}}=15000$ Вт;
- Номінальна фазна напруга $U_\phi=220$ В;
- Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{\text{ном}}=0,91$;
- Номінальний коефіцієнт корисної дії $\eta_{\text{ном}}=0,88$;
- Номінальне значення ковзання $s_{\text{ном}}=0,021$;
- Значення кратності пускового моменту $M_{\text{мах}}^*=2,2$ в.о.;
- Індуктивний опір магнітного кола $X_\mu=4,0$ в.о.;
- Активний та індуктивний опори статора відповідно - $R'_1=0,052$ в.о., $X'_1=0,092$ в.о.;
- Активний та індуктивний опори ротора відповідно, приведені до кола статора - $R''_2=0,022$ в.о, $X''_2=0,12$ в.о.;
- Частота обертання поля статора - $n_1=3000$ об/хв.

Номінальний фазний струм статора визначається за виразом (2.25):

$$I_{1\text{ном.}} = \frac{P_{2\text{нно}}}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \eta_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}} = \frac{15000}{3 \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,91} = 28,381 \text{ А.}$$

Опори X_1 і R_1 обчислені за наступними формулами (2.21) і (2.22):

$$X_1 \approx \frac{2 \cdot X_1' \cdot X_\mu}{X_\mu + \sqrt{X_\mu^2 + 4 \cdot X_1' \cdot X_\mu}} = \frac{2 \cdot 0,092 \cdot 4,0}{4,0 + \sqrt{4,0^2 + 4 \cdot 0,092 \cdot 4,0}} = 0,09 \text{ в.о.}$$

$$R_1 = \frac{R_1' \cdot X_1}{X_1'} = \frac{0,052 \cdot 0,09}{0,092} = 0,051 \text{ в.о.}$$

Значення опорів схеми заміщення приведені до іменованих одиниць за формулами (2.23) та (2.24):

$$X_1 = \frac{x_1 \cdot I_{1\text{ном.}}}{U_{1\phi}} = \frac{0,09 \cdot 28,381}{220} = 0,697 \text{ Ом;}$$

$$X_1' = \frac{x_1' \cdot I_{1\text{ном.}}}{U_{1\phi}} = \frac{0,092 \cdot 28,381}{220} = 0,713 \text{ Ом;}$$

$$X_2'' = \frac{x_2'' \cdot I_{1\text{ном.}}}{U_{1\phi}} = \frac{0,12 \cdot 28,381}{220} = 0,93 \text{ Ом;}$$

$$X_\mu = \frac{x_\mu \cdot I_{1\text{ном.}}}{U_{1\phi}} = \frac{4,0 \cdot 28,381}{220} = 31,007 \text{ Ом;}$$

$$R_1 = \frac{r_1 \cdot I_{1\text{ном.}\phi}}{U_{1\phi}} = \frac{0,051 \cdot 28,381}{220} = 0,394 \text{ Ом;}$$

$$R_1' = \frac{r_1' \cdot I_{1\text{ном.}\phi}}{U_{1\phi}} = \frac{0,052 \cdot 28,381}{220} = 0,403 \text{ Ом;}$$

$$R_2'' = \frac{r_2'' \cdot I_{1\text{ном.}\phi}}{U_{1\phi}} = \frac{0,022 \cdot 28,381}{220} = 0,171 \text{ Ом.}$$

Обчислюємо значення коефіцієнту C_1 :

$$C_1 = 1 + \frac{x_1'}{x_\mu} = 1 + \frac{0,713}{31,007} = 1,023.$$

Значення струму вітки намагнічування:

$$I_0 = \frac{U_1}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_\mu)^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,394^2 + (0,697 + 31,007)^2}} = 6,939 \text{ А.}$$

Значення струму навантажувальної гілки :

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1' + C_1 \cdot \frac{r_2''}{s}\right)^2 + (x_1' + C_1 \cdot x_2'')^2}} =$$

$$= \frac{220}{\sqrt{\left(0,403 + 1,023 \cdot \frac{0,171}{0,021}\right)^2 + (0,713 + 1,023 \cdot 0,93)^2}} = 24,807 \text{ A}$$

$$\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3000}{60} = 314 \text{ рад/с} - \text{синхронна кутова швидкість вала двигуна}$$

$$n_{\text{ном}} = n_1 \cdot (1 - s_{\text{ном}}) = 3000 \cdot (1 - 0,021) = 2937 \text{ об/хв} - \text{номінальна частота обертання ротора}$$

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9,55 \cdot \frac{15000}{2937} = 48,774 - \text{номінальний електромагнітний момент}$$

$$P_{1\text{ном}} = U_{1\text{ном}} \cdot I_{1\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}} = 220 \cdot 28,381 \cdot 0,91 = 17045 \text{ Вт} - \text{номінальна потужність, яку двигун споживає з електричної мережі.}$$

$$\Delta P_{\text{ел.ном1}} = m_1 \cdot I_{1\text{ном}}^2 \cdot R_1' = 3 \cdot 28,381^2 \cdot 0,403 = 744,181 \text{ Вт} - \text{втрати потужності в обмотці статора при номінальному режимі.}$$

$$P_{\text{ем.ном}} = M_{\text{ном}} \cdot \omega_1 = 48,774 \cdot 314 = 15320 \text{ Вт} - \text{номінальна електромагнітна потужність АД.}$$

Втрати потужності магнітного ланцюга двигуна при номінальному режимі його роботи визначаються за формулою (2.31):

$$\Delta P_{\text{м.ном}} = P_{1\text{ном}} - \Delta P_{\text{ел1ном}} - P_{\text{ем.ном}} = 17045 - 744,181 - 15320 = 986,156 \text{ Вт.}$$

Втрати потужності в обмотках статора та ротора двигуна при номінальному режимі його роботи визначаються за формулою (2.32):

$$\Delta P_{\text{ел.ном}} = \Delta P_{\text{ел.ном1}} + \Delta P_{\text{ел.ном2}} = m_1 \cdot I_{1\text{ном}}^2 \cdot R_1' + m_1 \cdot I_{1\text{ном}}^2 \cdot R_2'' =$$

$$= 3 \cdot 28,381^2 \cdot 0,403 + 3 \cdot 28,381^2 \cdot 0,171 = 1059 \text{ Вт.}$$

Механічні втрати потужності у номінальному режимі визначаються за формулою (2.33):

$$\Delta P_{\text{мех.ном}} = \Delta P_m = \frac{M_{\text{ном}} - \frac{P_{2\text{ном}}}{\omega_{2\text{ном}}}}{\omega_{2\text{ном}}} = \frac{48,774 - \frac{15000}{314}}{6,594} \approx 0 \text{ Вт.}$$

Коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна в залежності від напруги на затискачах і його завантаження обчислюється за формулою (2.30):

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{1 - s_{ном}}{P_{2ном} \cdot M_*} \right) \cdot \left[\frac{\Delta P_{м.ном} \cdot k_U^4 + \Delta P_{ел.ном} \cdot M_*^2 + \Delta P_{мех.ном} \cdot \left(\frac{k_U^2 - s_{ном}}{1 - s_{ном}} \right)}{k_U^2 - s_{ном} \cdot M_*} \right]}$$

Оскільки ККД АД залежить одночасно від прикладеної напруги і коефіцієнта завантаження, графік залежності являє собою поверхню наведену на рис. 3.1.

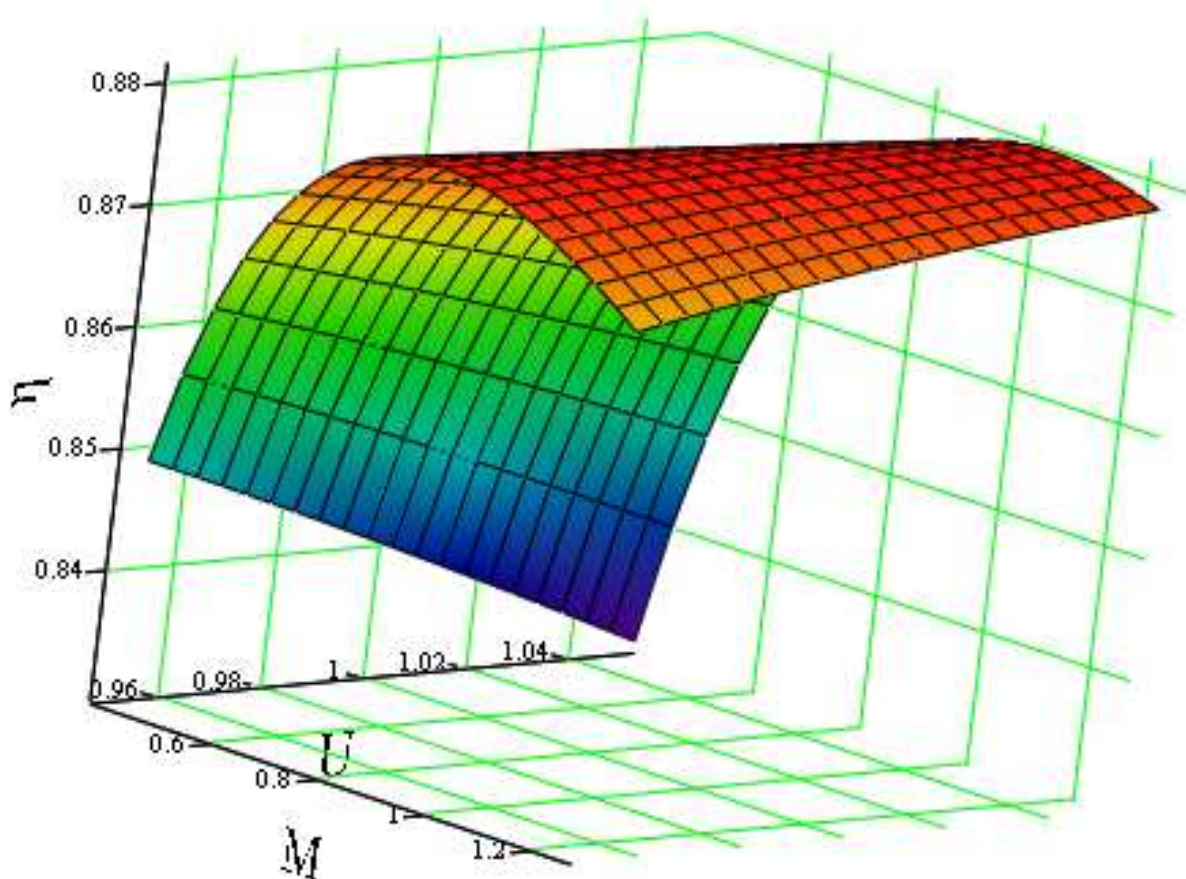


Рис. 3.1. Залежність ККД від напруги на затискачах і коефіцієнту завантаження асинхронного двигуна

Аналіз поверхні рис. 3.1 дозволяє зробити наступні висновки:

– при коефіцієнтах завантаження двигуна близьких до 1 краще тримати напругу в мережі близькою до верхньої допустимої межі, оскільки в цьому випадку ККД буде значно вищим ніж при номінальній напрузі;

– при коефіцієнті завантаження до 0,5 краще тримати напругу в мережі близькою до нижньої допустимої межі, так як в цьому випадку ККД буде максимальним;

– при коефіцієнті завантаження близькому до 0,75 бажано тримати напругу, що приблизно дорівнює номінальній.

Коефіцієнт потужності асинхронного двигуна в залежності від напруги на затискачах і його завантаження обчислюється за (2.29):

$$\cos \varphi_1 = \frac{I'_{2ном} \cdot M_* / k_U}{\sqrt{\left(I_{0ном} \cdot k_U + I'_{2ном} \cdot \frac{M_*^2}{2 \cdot M_{max*} \cdot k_U^3} \right)^2 + \left(I'_{2ном} \cdot \frac{M_*}{k_U} \right)^2}}.$$

Оскільки коефіцієнт потужності АД залежить одночасно від прикладеної напруги і коефіцієнта завантаження, графік залежності являє собою поверхню наведену на рис. 3.2.

Аналіз поверхні рис. 3.2 дозволяє зробити наступні висновки:

– при коефіцієнтах завантаження двигуна близьких до 1 краще тримати напругу в мережі близькою до верхньої допустимої межі, оскільки в цьому випадку $\cos \varphi_1$ буде значно вищим ніж при номінальній напрузі;

– при коефіцієнті завантаження до 0,5 краще тримати напругу в мережі близькою до нижньої допустимої межі, так як в цьому випадку $\cos \varphi_1$ буде мати максимальне значення;

– при коефіцієнті завантаження близькому до 0,75 бажано тримати напругу, що приблизно дорівнює номінальній.

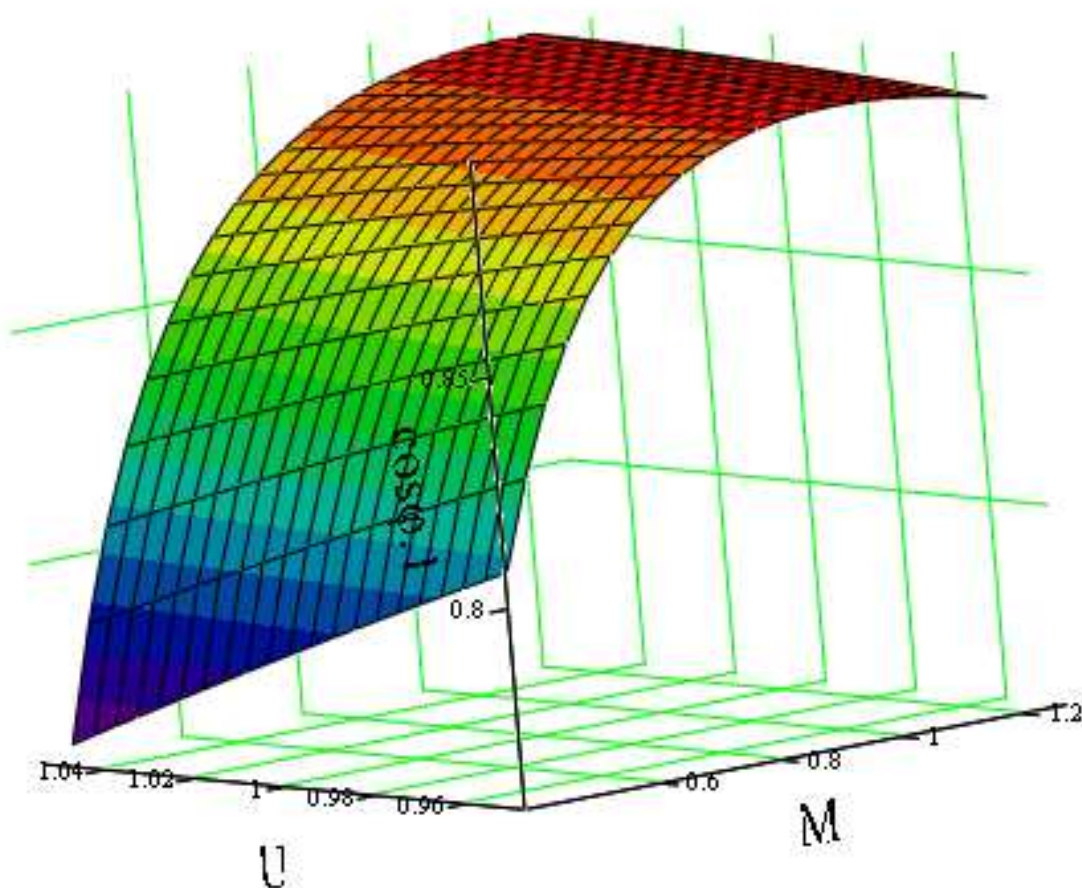


Рис. 3.2. Залежність $\cos\varphi_1$ від напруги на затискачах і коефіцієнту завантаження асинхронного двигуна

Оскільки втрати активної потужності асинхронного двигуна залежать одночасно від прикладеної напруги і коефіцієнта завантаження, графік залежності являє собою поверхню наведену на рис. 3.3.

Аналіз поверхні рис. 3.3 дозволяє зробити наступні висновки:

- при коефіцієнтах завантаження двигуна близьких до 1 краще тримати напругу в мережі близькою до верхньої допустимої межі, оскільки в цьому випадку втрати будуть значно меншими ніж при номінальній напрузі;
- при коефіцієнті завантаження до 0,5 краще тримати напругу в мережі близькою до нижньої допустимої межі, так як в цьому випадку сукупні втрати будуть мінімальними;
- при коефіцієнті завантаження близькому до 0,75 бажано тримати напругу, що приблизно дорівнює номінальній.

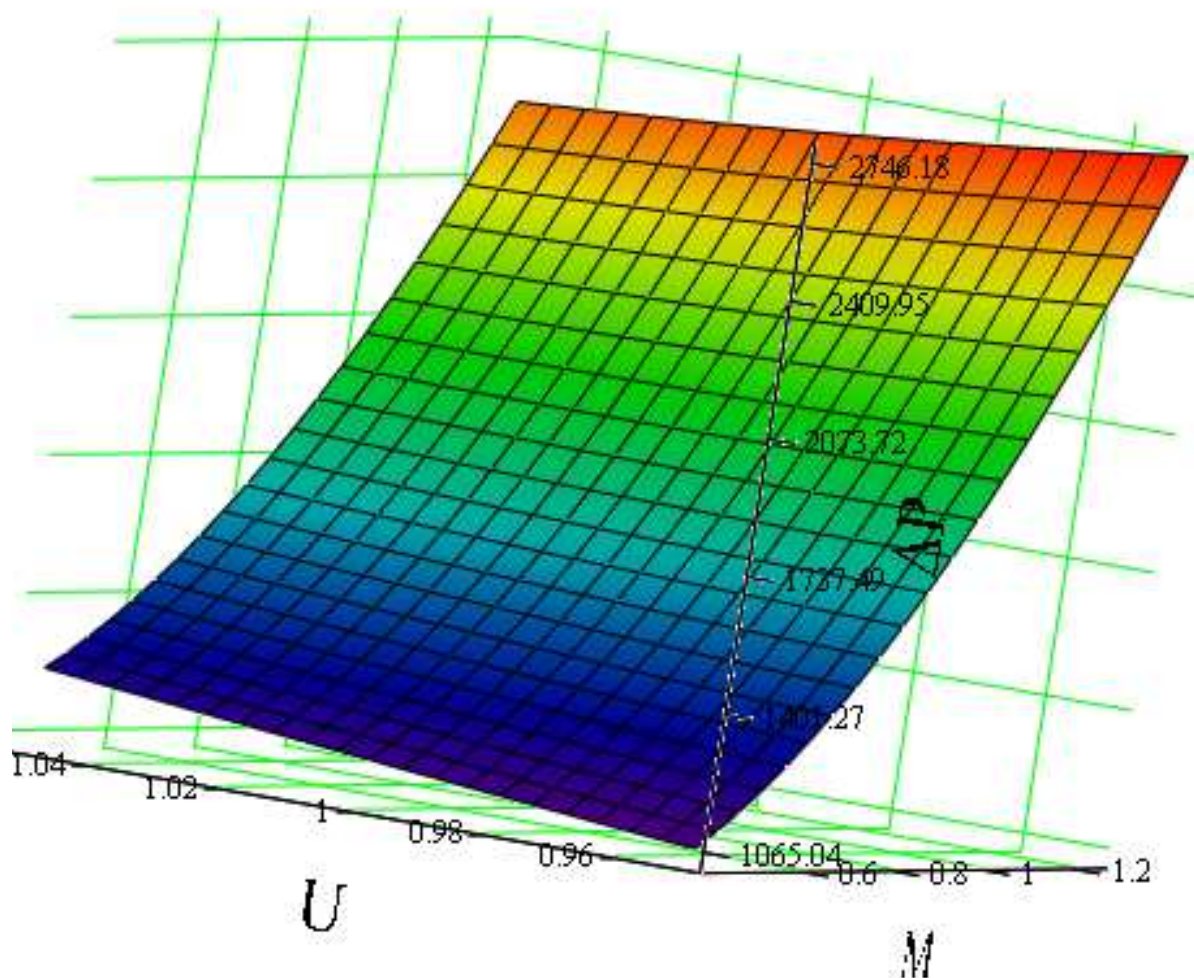


Рис. 3.3. Графік залежності активних втрат в АД від напруги на затискачах і коефіцієнту завантаження

3.2 Дослідження втрат в системі «лінія електропередачі – асинхронний двигун»

Для практичного проведення розрахунку використано схему заміщення рис. 2.8, а також формули (2.21)–(2.53).

Приклад розрахунку параметрів для системи «лінія електропередачі – асинхронний двигун», яка складається з двигуна серії 4А марки 160S2Y3 і кабельної лінії ААШв – 4×35 довжиною 3м :

Вихідні дані для розрахунку:

- Довжина кабельної лінії 3м;
- Значення опорів кабельної лінії $r_0=0,894$ мОм/м; $x_0=0,088$ мОм/м;
- Коефіцієнт регулювання напруги $k_U=1$.
- Коефіцієнт завантаження двигуна $k_3=M_*=0,7$.

- Номінальна потужність на валу- $P_{2\text{НОМ}}=15000$ Вт;
- Номінальна фазна напруга - $U_{\phi}=220$ В;
- Коефіцієнт потужності - $\cos\varphi_{\text{НОМ}}=0,91$;
- Номінальний коефіцієнт корисної дії - $\eta_{\text{НОМ}}=0,88$;
- Номінальне значення ковзання - $s_{\text{НОМ}}=0,021$;
- Значення кратності пускового моменту - $M_{\text{max}}^*=2,2$ в.о.;
- Індуктивний опір магнітного кола - $X_{\mu}=4,0$ в.о.;
- Активний та індуктивний опори статора відповідно - $R'_1=0,052$ в.о., $X'_1=0,092$ в.о.;
- Активний та індуктивний опори ротора відповідно, приведені до кола статора - $R''_2=0,022$ в.о, $X''_2=0,12$ в.о.;
- Частота обертання поля статора - $n_1=3000$ об/хв.

Номінальний фазний струм статора визначається за виразом (2.25):

$$I_{1\text{НОМ.}} = \frac{P_{2\text{НОМ}}}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \eta_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}}} = \frac{15000}{3 \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,91} = 28,381 \text{ А.}$$

Опори X_1 і R_1 обчислені за наступними формулами (3.22) і (3.23):

$$X_1 \approx \frac{2 \cdot X'_1 \cdot X_{\mu}}{X_{\mu} + \sqrt{X_{\mu}^2 + 4 \cdot X'_1 \cdot X_{\mu}}} = \frac{2 \cdot 0,092 \cdot 4,0}{4,0 + \sqrt{4,0^2 + 4 \cdot 0,092 \cdot 4,0}} = 0,09 \text{ в.о.}$$

$$R_1 = \frac{R'_1 \cdot X_1}{X'_1} = \frac{0,052 \cdot 0,09}{0,092} = 0,051 \text{ в.о.}$$

Значення опорів схеми заміщення приведені до іменованих одиниць за формулами (2.23) та (2.24):

$$X_1 = \frac{x_1 \cdot I_{1\text{НОМ.}}}{U_{1\phi}} = \frac{0,09 \cdot 28,381}{220} = 0,697 \text{ Ом;}$$

$$X'_1 = \frac{x'_1 \cdot I_{1\text{НОМ.}}}{U_{1\phi}} = \frac{0,092 \cdot 28,381}{220} = 0,713 \text{ Ом;}$$

$$X''_2 = \frac{x''_2 \cdot I_{1\text{НОМ.}}}{U_{1\phi}} = \frac{0,12 \cdot 28,381}{220} = 0,93 \text{ Ом;}$$

$$X_{\mu} = \frac{x_{\mu} \cdot I_{1\text{НОМ.}}}{U_{1\phi}} = \frac{4,0 \cdot 28,381}{220} = 31,007 \text{ Ом;}$$

$$R_1 = r_1 \cdot I_{\text{ном.ф}} / U_{1\phi} = \frac{0,051 \cdot 28,381}{220} = 0,394 \text{ Ом};$$

$$R'_1 = r'_1 \cdot I_{\text{ном.ф}} / U_{1\phi} = \frac{0,052 \cdot 28,381}{220} = 0,403 \text{ Ом};$$

$$R''_2 = r''_2 \cdot I_{\text{ном.ф}} / U_{1\phi} = \frac{0,022 \cdot 28,381}{220} = 0,171 \text{ Ом}.$$

Обчислюємо значення коефіцієнту C_1 :

$$C_1 = 1 + \frac{x'_1}{x_\mu} = 1 + \frac{0,713}{31,007} = 1,023.$$

Значення струму вітки намагнічування:

$$I_0 = \frac{U_1}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_\mu)^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,394^2 + (0,697 + 31,007)^2}} = 6,939 \text{ А}.$$

Значення струму навантажувальної гілки :

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r'_1 + C_1 \cdot \frac{r''_2}{s}\right)^2 + (x'_1 + C_1 \cdot x''_2)^2}} =$$

$$= \frac{220}{\sqrt{\left(0,403 + 1,023 \cdot \frac{0,171}{0,021}\right)^2 + (0,713 + 1,023 \cdot 0,93)^2}} = 24,807 \text{ А}.$$

$$\omega_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3000}{60} = 314 \text{ рад/с} - \text{синхронна кутова швидкість вала двигуна}$$

$$n_{\text{ном}} = n_1 \cdot (1 - s_{\text{ном}}) = 3000 \cdot (1 - 0,021) = 2937 \text{ об/хв} - \text{номінальна частота обертання ротора}$$

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9,55 \cdot \frac{15000}{2937} = 48,774 - \text{номінальний електромагнітний момент}$$

$$P_{1\text{ном}} = U_{1\text{ном}} \cdot I_{1\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}} = 220 \cdot 28,381 \cdot 0,91 = 17045 \text{ Вт} - \text{номінальна потужність, яку двигун споживає з електричної мережі.}$$

$$\Delta P_{\text{ел.ном1}} = m_1 \cdot I_{1\text{ном}}^2 \cdot R'_1 = 3 \cdot 28,381^2 \cdot 0,403 = 744,181 \text{ Вт} - \text{втрати потужності в обмотці статора при номінальному режимі.}$$

$P_{\text{ем.ном}} = M_{\text{ном}} \cdot \omega_1 = 48.774 \cdot 314 = 15320$ Вт – номінальна електромагнітна потужність АД.

Втрати потужності магнітного ланцюга двигуна при номінальному режимі його роботи визначаються за формулою (2.31):

$$\Delta P_{\text{м.ном}} = P_{1\text{ном}} - \Delta P_{\text{ел1ном}} - P_{\text{ем.ном}} = 17045 - 744,181 - 15320 = 986,156 \text{ Вт.}$$

Втрати потужності в обмотках статора та ротора двигуна при номінальному режимі його роботи визначаються за формулою (2.32):

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{ел.ном}} &= \Delta P_{\text{ел.ном1}} + \Delta P_{\text{ел.ном2}} = m_1 \cdot I_{1\text{ном}}^2 \cdot R_1' + m_1 \cdot I_{1\text{ном}}^2 \cdot R_2'' = \\ &= 3 \cdot 28,381^2 \cdot 0,403 + 3 \cdot 28,381^2 \cdot 0,171 = 1059 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Механічні втрати потужності у номінальному режимі визначаються за формулою (2.33):

$$\Delta P_{\text{мех.ном}} = \Delta P_m = \frac{M_{\text{ном}} - P_{2\text{ном}} / \omega_{2\text{ном}}}{\omega_{2\text{ном}}} = \frac{48,774 - 15000 / 314}{6,594} \approx 0 \text{ Вт.}$$

Опори $X_{\text{кл}}$ і $R_{\text{кл}}$ обчислені за формулами (2.38) (2.39):

$$R_{\text{кл}} = r_{0\text{кк}} \cdot l_{\text{кл}} = 0,894 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 0,002682 \text{ Ом;}$$

$$X_{\text{кл}} = x_{0\text{кк}} \cdot l_{\text{кл}} = 0,088 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 0,000495 \text{ Ом.}$$

Далі розрахунок є ітераційним і здійснюється в програмі Mathcad 14, фрагмент якої показаний на рис. 3.4.

```

ΔP := for i ∈ 1..15
    U2i-1 ← Unom if U20 = 0
    a ← U2i-1
    kui ←  $\frac{U2_{i-1}}{U_{nom}}$ 
    η1i ←  $\frac{1}{1 + \left( \frac{1-s}{P_{nom} \cdot M_x} \right) \cdot \left[ \frac{\Delta P_{m.nom} \cdot (ku_i)^4 + \Delta P_{el.nom} \cdot M_x^2 + \Delta P_{mex.nom} \cdot \left[ \frac{(ku_i)^2 - s \cdot M_x}{1-s} \right]}{(ku_i)^2 - s \cdot M_x} \right]}$ 
    cos φ1i ←  $\frac{I'_1 \cdot \frac{M_x}{ku_i}}{\sqrt{\left[ I_0 \cdot ku_i + \frac{I'_1 \cdot M_x^2}{2 \cdot M_{x,max} \cdot (ku_i)^3} \right]^2 + \left( \frac{I'_1 \cdot M_x}{ku_i} \right)^2}}$ 
    ΔPdi ←  $M_x \cdot P_{nom} \cdot \left( \frac{1}{\eta1_i} - 1 \right)$ 
    P1i ←  $\frac{P_{nom} \cdot M_x}{\eta1_i}$ 
    Q1i ←  $P1_i \cdot \tan(\arccos(\cos \phi1_i))$ 
    ΔPkli ←  $\left[ \frac{(P1_i)^2 + (Q1_i)^2}{(U2_{i-1})^2} \right] \cdot R_{kl}$ 
    ΔQkli ←  $\left[ \frac{(P1_i)^2 + (Q1_i)^2}{(U2_{i-1})^2} \right] \cdot X_{kl}$ 
    P'1i ←  $P1_i + \Delta Pkl_i$ 
    Q'1i ←  $Q1_i + \Delta Qkl_i$ 
    ΔUkli ←  $\frac{P'1_i \cdot R_{kl} + Q'1_i \cdot X_{kl}}{U_1}$ 
    δUkli ←  $\frac{P'1_i \cdot X_{kl} - Q'1_i \cdot R_{kl}}{U_1}$ 
    U2i ←  $U_1 - \left| \Delta Ukl_i - j \cdot \delta Ukl_i \right|$ 
    ΔPi ← ΔPdi + ΔPkli
    ΔPi
break if (a - U2i) = 0.001
ΔP ← U2i-1

```

ΔP = 219.832

Рис. 3.4. Програма для проведення ітераційного розрахунку системи «лінія електропередачі – асинхронний двигун»

3.3 Приклад вибору напруги прольоту цеху за мінімумом втрат активної потужності

Прольот цеху який обрано для розрахунку зображений на рис. 3.5.

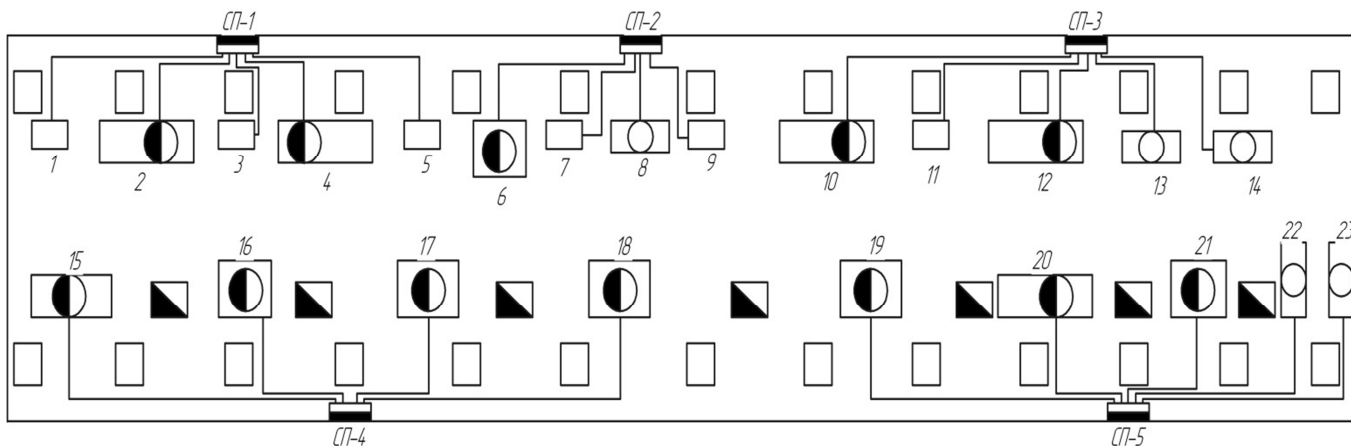


Рис. 3.5. Генплан прольоту цеху для розрахунку вибору напруги за мінімумом втрат активної потужності

Для прольоту цеху, що розглядається складена схема заміщення цехової електричної мережі, яка приведена на рис. 3.6.

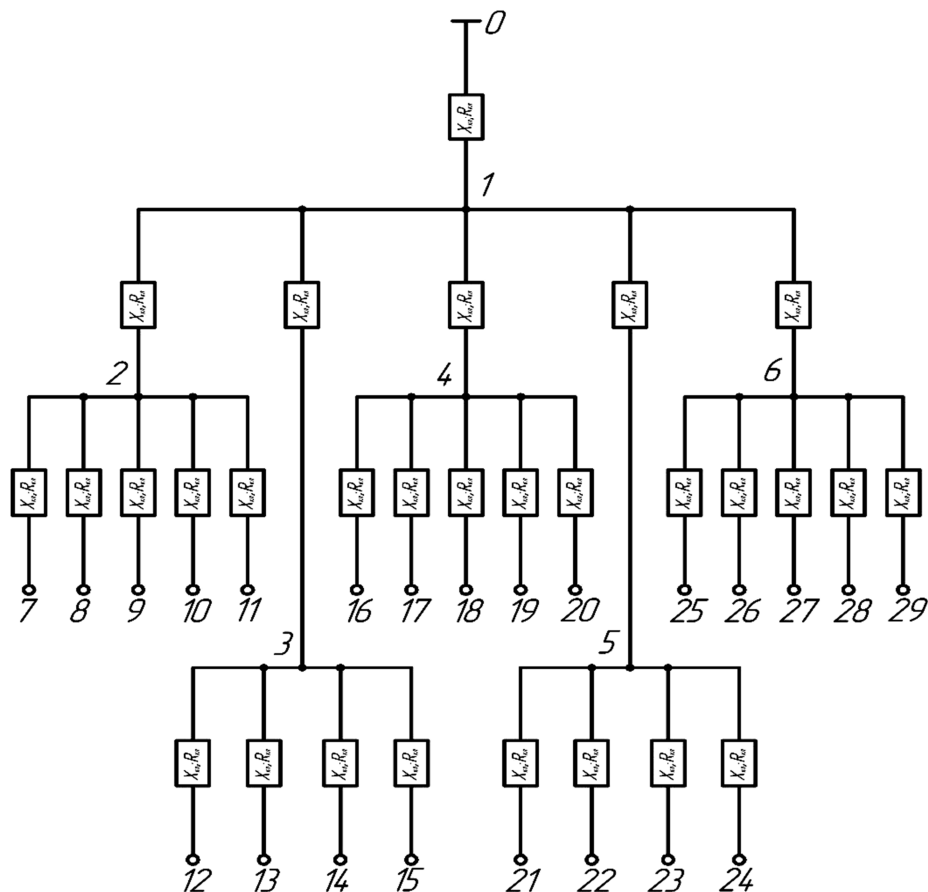


Рис. 3.6. Схема заміщення цехової електричної мережі прольоту цеху

Розрахунки проводилися в програмі Microsoft Office Excel. Всі вихідні дані зведені в табл. 3.1.

Результати розрахунку параметрів двигунів приведені в табл. 3.2.

Розрахунок проведений згідно методики, що була описана в пункті 2.4. Під час його проведення виявилось, що вже на третій ітерації нев'язка відповідає заданій точності 0,001.

Вибір оптимальної відпайки трансформатора з ПБЗ відбувається шляхом порівняння сукупних втрат і вибору мінімального значення, враховуючи, що напруга на затискачах споживачів, тобто асинхронних двигунів не буде виходити за межі $\pm 5\%$ від номінальної.

Результати розрахунку цехової мережі по потужності з визначенням сумарних втрат при кожному значенні відпайки трансформатора наведені в табл. 3.3–3.7.

Результати розрахунку прольоту цеху по напрузі, визначення нев'язки і значення напруги на затискачах споживачів наведені в табл. 3.8–3.12.

З табл. 3.3-3.7 можна зробити висновок, що оптимальною для даного прольоту цеху є відпайка $+ 2,5\%$.

Таблиця 3.1. Вихідні дані для розрахунку цеху

Уном В	Rkl Ом	Xkl Ом	Pn Вт	cosφп	ηп	sn	M*max В.О.	Xμ В.О.	R`1 В.О.	X`1 В.О.	R``2 В.О.	X``2 В.О.	Kz В.О.	n1 об/хв	m1	L кл, м	r0, мОм/м	x0, мОм/м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
220	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
220	0,0078	0,00462	0	0	0	0	0	0	0,00	0	0	0	0	0	0	60	0,13	0,077
220	0,00395	0,000972	110000	0,9	0,93	0,02	2	4,9	0,02	0,12	0,02	0,16	0,5	1500	3	12	0,329	0,081
220	0,01872	0,000594	22000	0,9	0,9	0,02	2,3	4	0,04	0,08	0,02	0,12	0,5	1500	3	6	3,12	0,099
220	0,00099	0,000243	110000	0,9	0,93	0,02	2	4,9	0,02	0,12	0,02	0,16	0,5	1500	3	3	0,329	0,081
220	0,0156	0,000495	22000	0,9	0,9	0,02	2,3	4	0,04	0,08	0,02	0,12	0,5	1500	3	5	3,12	0,099
220	0,00296	0,000729	110000	0,9	0,93	0,02	2	4,9	0,02	0,12	0,02	0,16	0,5	1500	3	9	0,329	0,081
220	0,00874	0,003318	0	0	0	0	0	0	0,00	0	0	0	0	0	0	42	0,208	0,079
220	0,01755	0,000608	30000	0,89	0,91	0,02	2,3	3,9	0,03	0,1	0,02	0,12	0,5	1500	3	9	1,95	0,0675
220	0,00132	0,000324	110000	0,9	0,93	0,02	2	4,9	0,02	0,12	0,02	0,16	0,5	1500	3	4	0,329	0,081
220	0,00624	0,000198	7500	0,86	0,88	0,03	3	3	0,05	0,09	0,03	0,13	1	1500	3	2	3,12	0,099
220	0,00083	0,000316	160000	0,91	0,94	0,01	2,2	4,6	0,02	0,11	0,02	0,15	0,5	1500	3	4	0,208	0,079
220	0,00374	0,001422	0	0	0	0	0	0	0,00	0	0	0	0	0	0	18	0,208	0,079
220	0,01073	0,001056	45000	0,9	0,92	0,02	2,5	4,6	0,03	0,08	0,02	0,14	0,5	1500	3	12	0,894	0,088
220	0,0023	0,000567	110000	0,9	0,93	0,02	2	4,9	0,02	0,12	0,02	0,16	0,5	1500	3	7	0,329	0,081
220	0,00268	0,000264	45000	0,9	0,92	0,02	2,5	4,6	0,03	0,08	0,02	0,14	0,5	1500	3	3	0,894	0,088
220	0,0156	0,000495	110000	0,9	0,93	0,02	2	4,9	0,02	0,12	0,02	0,16	0,5	1500	3	5	3,12	0,099
220	0,02184	0,000693	110000	0,9	0,93	0,02	2	4,9	0,02	0,12	0,02	0,16	0,5	1500	3	7	3,12	0,099
220	0,0295	0,004039	0	0	0	0	0	0	0,00	0	0	0	0	0	0	66	0,447	0,0612
220	0,04992	0,001584	22000	0,9	0,9	0,02	2,3	4	0,04	0,08	0,02	0,12	0,5	1500	3	16	3,12	0,099
220	0,0156	0,00076	30000	0,89	0,91	0,02	2,3	3,9	0,03	0,1	0,02	0,12	0,5	1500	3	8	1,95	0,095
220	0,00715	0,000704	45000	0,9	0,92	0,02	2,5	4,6	0,03	0,08	0,02	0,14	0,5	1500	3	8	0,894	0,088
220	0,0143	0,001408	45000	0,9	0,92	0,02	2,5	4,6	0,03	0,08	0,02	0,14	0,5	1500	3	16	0,894	0,088
220	0,015	0,00204	0	0	0	0	0	0	0,00	0	0	0	0	0	0	24	0,625	0,085
220	0,02925	0,001425	30000	0,89	0,91	0,02	2,3	3,9	0,03	0,1	0,02	0,12	0,5	1500	3	15	1,95	0,095
220	0,00626	0,000616	45000	0,9	0,92	0,02	2,5	4,6	0,03	0,08	0,02	0,14	0,5	1500	3	7	0,894	0,088
220	0,0156	0,000495	22000	0,9	0,9	0,02	2,3	4	0,04	0,08	0,02	0,12	0,5	1500	3	5	3,12	0,099
220	0,02808	0,000891	7500	0,86	0,88	0,03	3	3	0,05	0,09	0,03	0,13	1	1500	3	9	3,12	0,099
220	0,04368	0,001386	7500	0,86	0,88	0,03	3	3	0,05	0,09	0,03	0,13	1	1500	3	14	3,12	0,099

Таблиця 3.2. Результати розрахунку параметрів двигунів

№ АД на схемі	$I_{ном}, A$	I'_1, A	I_0, A	$X_1,$ В.О.	$R_1,$ В.О.	$X_\mu, Ом$	$X_1,$ Ом	$R_1,$ Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9
7	200,20	218,69	39,89	0,1191	0,0225	5,3846	0,1309	0,0247
8	41,15	36,41	10,09	0,0785	0,0402	21,3840	0,4195	0,2150
9	200,20	218,69	39,89	0,1191	0,0225	5,3846	0,1309	0,0247
10	41,15	36,41	10,09	0,0785	0,0402	21,3840	0,4195	0,2150
11	200,20	218,69	39,89	0,1191	0,0225	5,3846	0,1309	0,0247
12	56,12	54,53	14,05	0,0957	0,0332	15,2877	0,3750	0,1301
16	200,20	218,69	39,89	0,1191	0,0225	5,3846	0,1309	0,0247
14	15,10	12,20	4,90	0,0827	0,0467	43,7052	1,2051	0,6805
15	284,92	221,35	60,56	0,1046	0,0176	3,5519	0,0808	0,0136
16	82,35	72,37	17,59	0,0806	0,0334	12,2897	0,2153	0,0893
17	200,20	218,69	39,89	0,1191	0,0225	5,3846	0,1309	0,0247
18	82,35	72,37	17,59	0,0806	0,0334	12,2897	0,2153	0,0893
19	200,20	218,69	39,89	0,1191	0,0225	5,3846	0,1309	0,0247
20	200,20	218,69	39,89	0,1191	0,0225	5,3846	0,1309	0,0247
21	41,15	36,41	10,09	0,0785	0,0402	21,3840	0,4195	0,2150
22	56,12	54,53	14,05	0,0957	0,0332	15,2877	0,3750	0,1301
23	82,35	72,37	17,59	0,0806	0,0334	12,2897	0,2153	0,0893
24	82,35	72,37	17,59	0,0806	0,0334	12,2897	0,2153	0,0893
25	56,12	54,53	14,05	0,0957	0,0332	15,2877	0,3750	0,1301
26	82,35	72,37	17,59	0,0806	0,0334	12,2897	0,2153	0,0893
27	41,15	36,41	10,09	0,0785	0,0402	21,3840	0,4195	0,2150
28	15,10	12,20	4,90	0,0827	0,0467	43,7052	1,2051	0,6805
29	15,10	12,20	4,90	0,0827	0,0467	43,7052	1,2051	0,6805

Продовження табл. 3.2.

№ АД на схемі	R'_1 , Ом	X'_1 , Ом	R''_2 , Ом	X''_2 , Ом	C_1	ω_1	$n_{\text{ном}}$	$M_{\text{ном}}$	$P_{1\text{ном}}$, Вт
1	10	11	12	13	14	15	16	17	18
7	0,03	0,1341	0,0209	0,1758	1,025	157	1465,50	716,82	118918,9
8	0,22	0,4277	0,1123	0,6415	1,020	157	1470,00	142,93	24444,4
9	0,03	0,1341	0,0209	0,1758	1,025	157	1465,50	716,82	118918,9
10	0,22	0,4277	0,1123	0,6415	1,020	157	1470,00	142,93	24444,4
11	0,03	0,1341	0,0209	0,1758	1,025	157	1465,50	716,82	118918,9
12	0,13	0,3842	0,0706	0,4704	1,025	157	1471,50	194,70	32967,0
16	0,03	0,1341	0,0209	0,1758	1,025	157	1465,50	716,82	118918,9
14	0,70	1,2383	0,4808	1,8939	1,028	157	1456,50	49,18	8571,4
15	0,01	0,0826	0,0131	0,1158	1,023	157	1479,00	1033,13	171123,0
16	0,09	0,2191	0,0454	0,3740	1,018	157	1476,00	291,16	48913,0
17	0,03	0,1341	0,0209	0,1758	1,025	157	1465,50	716,82	118918,9
18	0,09	0,2191	0,0454	0,3740	1,018	157	1476,00	291,16	48913,0
19	0,03	0,1341	0,0209	0,1758	1,025	157	1465,50	716,82	118918,9
20	0,03	0,1341	0,0209	0,1758	1,025	157	1465,50	716,82	118918,9
21	0,22	0,4277	0,1123	0,6415	1,020	157	1470,00	142,93	24444,4
22	0,13	0,3842	0,0706	0,4704	1,025	157	1471,50	194,70	32967,0
23	0,09	0,2191	0,0454	0,3740	1,018	157	1476,00	291,16	48913,0
24	0,09	0,2191	0,0454	0,3740	1,018	157	1476,00	291,16	48913,0
25	0,13	0,3842	0,0706	0,4704	1,025	157	1471,50	194,70	32967,0
26	0,09	0,2191	0,0454	0,3740	1,018	157	1476,00	291,16	48913,0
27	0,22	0,4277	0,1123	0,6415	1,020	157	1470,00	142,93	24444,4
28	0,70	1,2383	0,4808	1,8939	1,028	157	1456,50	49,18	8571,4
29	0,70	1,2383	0,4808	1,8939	1,028	157	1456,50	49,18	8571,4

Продовження табл. 3.2.

№ АД на схемі	$\Delta P_{\text{ел1ном}}, \text{Вт}$	$P_{\text{ем.ном}}, \text{Вт}$	$\Delta P_{\text{мвт.ном}}, \text{Вт}$	$\Delta P_{\text{сл.ном}}, \text{Вт}$	$\Delta P_{\text{ел2ном}}, \text{Вт}$	$\Delta P_{\text{мск.ном}}, \text{Вт}$
1	19	20	21	22	23	24
7	3626,2	112540,8	2752,0	6156,2	2530	0
8	871,7	22439,3	1133,5	1311,7	440	0
9	3626,2	112540,8	2752,0	6156,2	2530	0
10	871,7	22439,3	1133,5	1311,7	440	0
11	3626,2	112540,8	2752,0	6156,2	2530	0
12	1189,0	30567,8	1210,2	1759,0	570	0
16	3626,2	112540,8	2752,0	6156,2	2530	0
14	312,3	7720,6	538,5	529,8	217,5	0
15	2043,0	162201,5	6878,5	4283,0	2240	0
16	1427,3	45711,9	1773,8	2147,3	720	0
17	3626,2	112540,8	2752,0	6156,2	2530	0
18	1427,3	45711,9	1773,8	2147,3	720	0
19	3626,2	112540,8	2752,0	6156,2	2530	0
20	3626,2	112540,8	2752,0	6156,2	2530	0
21	871,7	22439,3	1133,5	1311,7	440	0
22	1189,0	30567,8	1210,2	1759,0	570	0
23	1427,3	45711,9	1773,8	2147,3	720	0
24	1427,3	45711,9	1773,8	2147,3	720	0
25	1189,0	30567,8	1210,2	1759,0	570	0
26	1427,3	45711,9	1773,8	2147,3	720	0
27	871,7	22439,3	1133,5	1311,7	440	0
28	312,3	7720,6	538,5	529,8	217,5	0
29	312,3	7720,6	538,5	529,8	217,5	0

Номер вузла	η_1	$\cos\varphi_1$	$\Delta P_{дв}, \text{ ВТ}$	$P_{1дв}, \text{ ВТ}$	$Q_{1дв}, \text{ Вap}$	$\Delta P_{кл}, \text{ ВТ}$	$\Delta Q_{кл}, \text{ Вap}$	$P'_{\text{в} \text{уз}}, \text{ ВТ}$	$Q'_{\text{в} \text{уз}}, \text{ Вap}$	k_u
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
29	0,87	0,966	1089,56	8589,56	2297,22	85,11	2,70	8674,7	2299,92	0,9159
28	0,87	0,881	1088,13	8588,13	4606,13	65,28	2,07	8653,4	4608,20	0,9189
27	0,89	0,858	1335,66	12335,66	7370,77	78,67	2,50	12414,3	7373,27	0,9200
26	0,91	0,884	2122,88	24622,88	13053,15	118,50	11,66	24741,4	13064,82	0,9208
25	0,91	0,873	1524,70	16524,70	9252,04	260,07	12,67	16784,8	9264,71	0,9131
6	0	0	0	0	0	0	0	71268,6	36610,92	0
1	0	0	0	0	0	2329,19	316,77	73597,8	36927,69	0
24	0,92	0,892	2060,29	24560,29	12466,73	287,37	28,287	24847,7	12495,02	0,8835
23	0,92	0,891	2066,97	24566,97	12531,27	142,64	14,040	24709,6	12545,31	0,8878
22	0,91	0,879	1499,66	16499,66	8956,4	144,79	7,054	16644,4	8963,46	0,8860
21	0,90	0,870	1289,34	12289,34	6978,57	267,74	8,496	12557,1	6987,07	0,8774
5	0	0	0	0	0	0	0	78758,8	40990,85	0
1	0	0	0	0	0	6039,42	826,87	84798,2	41817,72	0
20	0,93	0,912	4090,66	59090,66	26526,09	2352,28	74,64	61442,9	26600,73	0,8971
19	0,93	0,911	4096,19	59096,19	26694,33	1651,45	52,40	60747,6	26746,74	0,9060
18	0,91	0,882	2132,23	24632,23	13137,99	50,40	4,96	24682,6	13142,95	0,9258
17	0,93	0,909	4112,05	59112,05	27064,04	235,63	58,01	59347,7	27122,05	0,9240
16	0,91	0,883	2123,53	24623,53	13059,04	203,00	19,98	24826,5	13079,03	0,9211
4	0	0	0	0	0	0	0	231047,4	106691,49	0
1	0	0	0	0	0	5826,80	2213,06	236874,2	108904,55	0
15	0,92	0,862	6921,27	86921,27	51131,60	212,68	80,78	87134,0	51212,38	0,9070
14	0,87	0,882	1093,66	8593,66	4580,79	14,85	0,47	8608,5	4581,26	0,9077
13	0,93	0,911	4096,93	59145,45	26736,40	139,34	34,31	59284,8	26770,71	0,9070
12	0,91	0,875	1514,05	16514,05	9129,70	158,73	5,49	16672,8	9135,19	0,9022
3	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	171700,0	91699,54	0
1	0	0	0	0	0	8282,69	3145,83	179982,7	94845,37	0
11	0,93	0,912	4091,94	59091,94	26568,77	317,70	78,22	59409,6	26646,99	0,8994
10	0,89	0,864	1312,05	12312,05	7174,11	80,97	2,57	12393,0	7176,68	0,8994
9	0,93	0,912	4093,80	59093,80	26626,33	105,26	25,92	59199,1	26652,25	0,9025
8	0,89	0,864	1311,07	12311,07	7165,77	97,29	3,09	12408,4	7168,86	0,8985
7	0,93	0,914	4085,23	59085,23	26285,69	437,48	107,71	59522,7	26393,40	0,8835
2	0	0	0,00	0	0	0	0	202932,8	94038,17	0
1	0	0	0,00	0	0	9874,58	5848,79	212807,4	99886,96	0
0	0	0	0,00	0	0	0	0	788060,3	382382,30	0
$\Sigma \Delta P$			59151,86			39859,92				
Загалом			99011,78							

Номер вузла	η_1	$\cos\varphi_1$	$\Delta P_{\text{дв}}, \text{Вт}$	$P_{\text{1дв}}, \text{Вт}$	$Q_{\text{1дв}}, \text{Вар}$	$\Delta P_{\text{кл}}, \text{Вт}$	$\Delta Q_{\text{кл}}, \text{Вар}$	$P'_{\text{ввз}}, \text{Вт}$	$Q'_{\text{ввз}}, \text{Вар}$	k_u
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
29	0,87	0,9677	1079,06	8579,06	2235,83	80,03	2,54	8659,09	2238,37	0,9417
28	0,87	0,8781	1078,11	8578,11	4675,03	62,07	1,97	8640,19	4677,00	0,9447
27	0,89	0,8510	1368,12	12368,12	7633,97	76,16	2,42	12444,29	7636,39	0,9451
26	0,91	0,8773	2172,65	24672,65	13499,40	114,22	11,24	24786,87	13510,64	0,9465
25	0,91	0,8660	1552,88	16552,88	9559,55	250,53	12,21	16803,41	9571,75	0,9390
6	0	0	0	0	0	0	0	71333,85	37634,15	0
1	0	0	0	0	0	2234,60	303,91	73568,45	37938,06	0
24	0,91	0,8860	2103,95	24603,95	12879,43	275,31	27,10	24879,26	12906,53	0,9102
23	0,91	0,8850	2111,41	24611,41	12948,21	136,76	13,46	24748,17	12961,67	0,9144
22	0,91	0,8727	1524,15	16524,15	9245,83	138,84	6,76	16662,99	9252,60	0,9126
21	0,89	0,8627	1317,44	12317,44	7219,46	257,31	8,16	12574,75	7227,63	0,9043
5	0	0	0	0	0	0	0	78865,17	42348,43	0
1	0	0	0	0	0	5791,30	792,90	84656,47	43141,33	0
20	0,93	0,91	4111,56	59111,56	27054,04	2236,32	70,96	61347,88	27125,00	0,9235
19	0,93	0,91	4121,19	59121,19	27243,42	1572,39	49,89	60693,58	27293,32	0,9321
18	0,91	0,88	2182,71	24682,71	13588,13	48,62	4,79	24731,32	13592,91	0,9514
17	0,93	0,91	4144,80	59144,80	27653,50	225,00	55,40	59369,81	27708,90	0,9496
16	0,91	0,88	2173,31	24673,31	13505,19	195,68	19,26	24868,99	13524,45	0,9468
4	0	0	0	0	0	0	0	231011,59	109244,57	0
1	0	0	0	0	0	5564,50	2113,44	236576,09	111358,01	0
15	0,92	0,8549	7173,18	87173,18	52894,72	205,53	78,06	87378,71	52972,78	0,9329
14	0,87	0,8795	1081,93	8581,93	4643,92	14,09	0,45	8596,02	4644,37	0,9337
13	0,93	0,9081	4122,21	59188,34	27292,97	132,81	32,70	59321,15	27325,67	0,9329
12	0,91	0,8688	1540,66	16540,66	9428,56	152,66	5,28	16693,32	9433,84	0,9283
3	0	0	0	0	0	0	0	171989,20	94376,66	0
1	0	0	0	0	0	7954,30	3021,11	179943,51	97397,76	0
11	0,93	0,9090	4113,80	59113,80	27099,69	302,24	74,41	59416,04	27174,10	0,9256
10	0,89	0,8569	1342,43	12342,43	7426,20	78,13	2,48	12420,56	7428,68	0,9256
9	0,93	0,9087	4117,08	59117,08	27164,71	100,19	24,67	59217,27	27189,38	0,9286
8	0,89	0,8571	1341,35	12341,35	7417,38	93,87	2,98	12435,22	7420,36	0,9247
7	0,93	0,9109	4099,26	59099,26	26775,19	415,08	102,19	59514,34	26877,39	0,9101
2	0	0	0	0	0	0	0	203003,43	96089,91	0
1	0	0	0	0	0	9408,00	5572,43	212411,43	101662,34	0

Номер вузла	η_1	$\cos\varphi_1$	$\Delta P_{\text{дв, ВТ}}$	$P_{\text{дв, ВТ}}$	$Q_{\text{дв, Вap}}$	$\Delta P_{\text{кл, ВТ}}$	$\Delta Q_{\text{кл, Вap}}$	$P'_{\text{вүз, ВТ}}$	$Q'_{\text{вүз, Вap}}$	k_u
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
29	0,87	0,9690	1072,22	8572,22	2183,87	75,49	2,40	8647,71	2186,27	0,9675
28	0,87	0,8744	1071,68	8571,68	4757,27	59,24	1,88	8630,92	4759,15	0,9704
27	0,89	0,8430	1403,64	12403,64	7915,65	73,99	2,35	12477,63	7918,00	0,9714
26	0,91	0,8705	2227,31	24727,31	13977,31	110,44	10,87	24837,75	13988,18	0,9721
25	0,90	0,8589	1584,88	16584,88	9890,34	242,17	11,80	16827,05	9902,13	0,9649
6	0	0	0	0	0	0	0	71421,05	38753,73	0
1	0	0	0	0	0	2150,92	292,52	73571,96	39046,26	0
24	0,91	0,8797	2153,24	24653,24	13326,83	264,73	26,06	24917,97	13352,89	0,9367
23	0,91	0,8787	2161,38	24661,38	13399,43	131,59	12,95	24792,97	13412,38	0,9409
22	0,91	0,8659	1552,94	16552,94	9560,22	133,64	6,51	16686,58	9566,73	0,9391
21	0,89	0,8553	1349,13	12349,13	7480,77	248,30	7,88	12597,42	7488,65	0,9310
5	0	0	0	0	0	0	0	78994,94	43820,66	0
1	0	0	0	0	0	5574,19	763,18	84569,13	44583,83	0
20	0,93	0,9058	4145,11	59145,11	27658,38	2132,98	67,68	61278,08	27726,06	0,9498
19	0,93	0,9047	4158,27	59158,27	27866,22	1501,77	47,65	60660,04	27913,88	0,9581
18	0,91	0,8692	2237,98	24737,98	14069,48	47,04	4,63	24785,02	14074,11	0,9769
17	0,93	0,9021	4188,60	59188,60	28311,80	215,47	53,05	59404,08	28364,85	0,9751
16	0,91	0,8705	2227,95	24727,95	13982,87	189,22	18,63	24917,18	14001,50	0,9724
4	0	0	0	0	0	0	0	231044,39	112080,39	0
1	0	0	0	0	0	5330,44	2024,54	236374,83	114104,93	0
15	0,91	0,8474	7439,17	87439,17	54787,84	199,29	75,69	87638,46	54863,53	0,9587
14	0,87	0,8760	1073,99	8573,99	4720,89	13,43	0,43	8587,41	4721,32	0,9595
13	0,93	0,9046	4159,37	59241,10	27921,59	126,96	31,26	59368,06	27952,85	0,9588
12	0,91	0,8619	1571,23	16571,23	9751,10	147,34	5,10	16718,57	9756,20	0,9542
3	0	0	0	0	0	0	0	172312,50	97293,90	0
1	0	0	0	0	0	7664,17	2910,91	179976,67	100204,81	0
11	0,93	0,9056	4148,02	59148,02	27705,32	288,45	71,02	59436,46	27776,34	0,9517
10	0,89	0,8492	1376,06	12376,06	7697,38	75,67	2,40	12451,73	7699,78	0,9516
9	0,93	0,9052	4152,53	59152,53	27776,92	95,66	23,55	59248,19	27800,47	0,9546
8	0,89	0,8494	1374,90	12374,90	7688,12	90,90	2,88	12465,80	7691,00	0,9508
7	0,93	0,9076	4126,68	59126,68	27344,30	395,17	97,29	59521,85	27441,59	0,9365
2	0	0	0	0	0	0	0	203124,04	98409,18	0
1	0	0	0	0	0	8992,85	5326,54	212116,90	103735,72	0
0	0	0	0	0	0	0	0	786609,49	401675,55	0
ΣΔP			60956,26			36571,49				
Загалом			97527,75							

Номер вузла	η_1	$\cos\varphi_1$	$\Delta P_{\text{дв}}, \text{ ВТ}$	$P_{1\text{дв}}, \text{ ВТ}$	$Q_{1\text{дв}}, \text{ Вар}$	$\Delta P_{\text{кл}}, \text{ ВТ}$	$\Delta Q_{\text{кл}}, \text{ Вар}$	$P'_{\text{вз}}, \text{ ВТ}$	$Q'_{\text{вз}}, \text{ Вар}$	k_u
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
29	0,88	0,9702	1068,69	8568,69	2140,36	71,40	2,27	8640,09	2142,62	0,9933
28	0,88	0,8702	1068,50	8568,50	4851,98	56,73	1,80	8625,22	4853,78	0,9960
27	0,88	0,8345	1442,03	12442,03	8215,31	72,11	2,29	12514,14	8217,59	0,9970
26	0,91	0,8634	2286,56	24786,56	14485,84	107,10	10,54	24893,67	14496,39	0,9977
25	0,90	0,8513	1620,45	16620,45	10243,55	234,84	11,44	16855,29	10254,99	0,9907
6	0	0	0	0	0	0	0	71528,41	39965,37	0
1	0	0	0	0	0	2076,87	282,45	73605,28	40247,83	0
24	0,91	0,8729	2207,73	24707,73	13807,29	255,43	25,14	24963,17	13832,43	0,9632
23	0,91	0,8719	2216,48	24716,48	13883,36	127,05	12,51	24843,53	13895,87	0,9672
22	0,90	0,8587	1585,67	16585,67	9898,37	129,10	6,29	16714,77	9904,66	0,9655
21	0,89	0,8473	1384,13	12384,13	7761,58	240,52	7,63	12624,65	7769,21	0,9576
5	0	0	0	0	0	0	0	79146,12	45402,17	0
1	0	0	0	0	0	5384,21	737,17	84530,33	46139,34	0
20	0,93	0,9020	4190,19	59190,19	28334,07	2040,62	64,75	61230,81	28398,82	0,9760
19	0,93	0,9007	4206,42	59206,42	28558,17	1438,52	45,65	60644,94	28603,82	0,9841
18	0,91	0,8620	2297,76	24797,76	14581,07	45,65	4,49	24843,41	14585,57	1,0024
17	0,93	0,8980	4242,62	59242,62	29035,20	206,90	50,94	59449,52	29086,14	1,0007
16	0,91	0,8633	2287,18	24787,18	14491,07	183,52	18,06	24970,70	14509,13	0,9980
4	0	0	0	0	0	0	0	231139,38	115183,47	0
1	0	0	0	0	0	5121,20	1945,07	236260,58	117128,54	0
15	0,91	0,8394	7718,59	87718,59	56806,48	193,86	73,63	87912,45	56880,11	0,9845
14	0,88	0,8720	1069,46	8569,46	4810,71	12,84	0,41	8582,29	4811,12	0,9853
13	0,93	0,9006	4207,42	59303,09	28617,97	121,71	29,97	59424,80	28647,94	0,9846
12	0,90	0,8545	1605,48	16605,48	10096,36	142,68	4,94	16748,15	10101,29	0,9801
3	0	0	0	0	0	0	0	172667,70	100440,46	0
1	0	0	0	0	0	7407,83	2813,55	180075,53	103254,01	0
11	0,93	0,9017	4193,52	59193,52	28380,76	276,11	67,98	59469,63	28448,74	0,9777
10	0,89	0,8410	1412,72	12412,72	7986,94	73,55	2,33	12486,27	7989,27	0,9776
9	0,93	0,9013	4199,11	59199,11	28458,23	91,61	22,55	59290,72	28480,79	0,9805
8	0,89	0,8412	1411,49	12411,49	7977,28	88,34	2,80	12499,83	7980,08	0,9768
7	0,93	0,9040	4166,24	59166,24	27987,21	377,43	92,92	59543,67	28080,14	0,9629
2	0	0	0	0	0	0	0	203290,14	100979,02	0
1	0	0	0	0	0	8622,57	5107,22	211912,71	106086,24	0
0	0	0	0	0	0	0	0	786384,42	412855,96	0
ΣΔP			62088,44			35200,3				
Загалом			97288,75							

Номер вузла	η_1	$\cos\varphi_1$	$\Delta P_{\text{дв}}, \text{ВТ}$	$P_{1\text{дв}}, \text{ВТ}$	$Q_{1\text{дв}}, \text{Вар}$	$\Delta P_{\text{кл}}, \text{ВТ}$	$\Delta Q_{\text{кл}}, \text{Вар}$	$P'_{\text{вuz}}, \text{ВТ}$	$Q'_{\text{вuz}}, \text{Вар}$	k_u
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
29	0,88	0,9711	1068,18	8568,18	2104,45	67,70	2,15	8635,88	2106,60	1,019
28	0,88	0,8655	1068,29	8568,29	4958,41	54,50	1,73	8622,79	4960,14	1,022
27	0,88	0,8256	1483,13	12483,13	8532,52	70,50	2,24	12553,64	8534,76	1,023
26	0,91	0,8558	2350,16	24850,16	15024,16	104,17	10,25	24954,33	15034,41	1,023
25	0,90	0,8433	1659,36	16659,36	10618,49	228,44	11,13	16887,80	10629,62	1,016
6	0	0	0	0	0	0	0	71654,44	41265,53	0
1	0	0	0	0	0	2011,37	273,55	73665,81	41539,08	0
24	0,91	0,8657	2267,08	24767,08	14319,47	247,28	24,34	25014,36	14343,81	0,990
23	0,91	0,8646	2276,35	24776,35	14398,75	123,06	12,11	24899,41	14410,86	0,993
22	0,90	0,8510	1622,06	16622,06	10259,30	125,14	6,10	16747,20	10265,39	0,992
21	0,89	0,8389	1422,22	12422,22	8061,16	233,83	7,42	12656,05	8068,58	0,984
5	0	0	0	0	0	0	0	79317,02	47088,64	0
1	0	0	0	0	0	5218,17	714,43	84535,18	47803,08	0
20	0,93	0,8977	4245,88	59245,88	29076,89	1957,91	62,13	61203,78	29139,02	1,002
19	0,93	0,8963	4264,78	59264,78	29315,44	1381,78	43,84	60646,57	29359,28	1,010
18	0,91	0,8544	2361,80	24861,80	15122,13	44,43	4,37	24906,24	15126,50	1,028
17	0,93	0,8934	4306,13	59306,13	29820,54	199,18	49,04	59505,31	29869,58	1,026
16	0,91	0,8557	2350,72	24850,72	15028,93	178,51	17,57	25029,24	15046,51	1,024
4	0	0	0	0	0	0	0	231291,13	118540,88	0
1	0	0	0	0	0	4933,91	1873,94	236225,04	120414,82	0
15	0,91	0,8309	8010,87	88010,87	58946,99	189,17	71,85	88200,04	59018,84	1,010
14	0,88	0,8675	1068,03	8568,03	4912,57	12,31	0,39	8580,35	4912,96	1,011
13	0,93	0,8963	4265,55	59373,75	29378,50	116,99	28,80	59490,74	29407,30	1,010
12	0,90	0,8466	1643,16	16643,16	10463,53	138,61	4,80	16781,76	10468,33	1,006
3	0,00	0	0	0	0	0	0	173052,89	103807,43	0
1	0	0	0	0	0	7181,55	2727,61	180234,45	106535,04	0
11	0,93	0,8975	4249,41	59249,41	29121,93	265,05	65,26	59514,47	29187,19	1,004
10	0,88	0,8323	1452,23	12452,23	8294,36	71,73	2,28	12523,96	8296,63	1,004
9	0,93	0,8970	4255,95	59255,95	29204,69	87,98	21,66	59343,93	29226,35	1,006
8	0,88	0,8326	1450,94	12450,94	8284,32	86,14	2,73	12537,07	8287,06	1,003
7	0,93	0,8999	4216,89	59216,89	28699,12	361,58	89,02	59578,47	28788,14	0,989
2	0	0	0	0	0	0	0	203497,90	103785,38	0
1	0	0	0	0	0	8291,71	4911,24	211789,61	108696,62	0

Таблиця 3.8. Результати розрахунку прольоту цеху по напрузі при відпайці трансформатора -5%.

Номер вузла	ΔU	δU	U	Нев'язка
1	2	3	4	5
1	0	0	209	0,00
2	10,1501	0,9763	198,852	0,000
7	4,48868	-0,233	194,364	0,000
8	1,18954	-0,638	197,664	0,000
9	0,3264	-2,332	198,54	0,000
10	0,9901	-0,532	197,863	0,000
11	0,98233	-0,179	197,87	0,000
1	0	0	209	0,000
3	9,02883	-1,107	199,974	0,000
12	1,49098	-0,751	198,485	0,000
13	0,43352	-0,08	199,541	0,000
14	0,27316	-0,134	199,701	0,000
15	0,44345	-0,075	199,531	0,000
1	0	0	209	0,000
4	4,9843	-0,339	204,016	0,000
16	1,37318	-0,559	202,644	0,000
17	0,74531	-0,141	203,271	0,000
18	0,34149	-0,141	203,675	0,000
19	4,70994	-1,898	199,315	0,000
20	6,66785	-2,639	197,366	0,000
1	0	0	209	0,000
5	12,7781	-4,264	196,268	0,000
21	3,25023	-1,676	193,025	0,000
22	1,35766	-0,648	194,912	0,000
23	0,94542	-0,369	195,323	0,000
24	1,90053	-0,366	194,368	0,000
1	0	0	209	0,000
6	5,64258	-1,932	203,367	0,000
25	2,47905	-1,215	200,891	0,000
26	0,80092	-0,327	202,566	0,000
27	0,97023	-0,535	202,397	0,000
28	1,21502	-0,598	202,152	0,000
29	1,87886	-0,435	201,488	0,000

Таблиця 3.9. Результати розрахунку прольоту цеху по напрузі при відпайці трансформатора -2,5%.

Номер вузла	ΔU	δU	U	Нев'язка
1	2	3	4	5
1	0	0	214,5	0,000
2	9,9137	0,8782	204,588	0,000
7	4,37394	-0,236	200,214	0,000
8	1,15938	-0,643	203,43	0,000
9	0,31798	-2,316	204,283	0,000
10	0,96505	-0,536	203,624	0,000
11	0,95676	-0,182	203,632	0,000
1	0	0	214,5	0,000
3	8,83521	-1,183	205,668	0,000
12	1,45233	-0,756	204,217	0,000
13	0,42262	-0,081	205,246	0,000
14	0,26528	-0,133	205,403	0,000
15	0,43487	-0,08	205,233	0,000
1	0	0	214,5	0,000
4	4,86756	-0,375	209,633	0,000
16	1,3408	-0,567	208,293	0,000
17	0,72717	-0,144	208,906	0,000
18	0,33353	-0,143	209,299	0,000
19	4,58101	-1,888	205,06	0,000
20	6,48103	-2,623	203,169	0,000
1	0	0	214,5	0,000
5	12,4559	-4,339	202,091	0,000
21	3,16284	-1,687	198,935	0,000
22	1,32106	-0,652	200,771	0,000
23	0,92099	-0,373	201,17	0,000
24	1,85088	-0,37	200,24	0,000
1	0	0	214,5	0,000
6	5,50546	-1,953	209,004	0,000
25	2,41689	-1,225	206,59	0,000
26	0,78199	-0,331	208,222	0,000
27	0,94693	-0,541	208,057	0,000
28	1,18076	-0,592	207,824	0,000
29	1,82452	-0,41	207,18	0,000

Таблиця 3.10. Результати розрахунку прольоту цеху по напрузі при відпайці трансформатора 0%.

Номер вузла	ΔU	δU	U	Нєв'язка
1	2	3	4	5
1	0	0	220	0
2	9,69896	0,7766	210,302	0,000
7	4,26808	-0,24	206,035	0,000
8	1,13136	-0,649	209,172	0,000
9	0,31019	-2,307	210,005	0,000
10	0,94178	-0,542	209,361	0,000
11	0,93313	-0,185	209,369	0,000
1	0	0	220	0,000
3	8,65798	-1,265	211,346	0,000
12	1,41634	-0,762	209,931	0,000
13	0,41252	-0,083	210,933	0,000
14	0,25797	-0,131	211,088	0,000
15	0,42704	-0,085	210,919	0,000
1	0	0	220	0
4	4,7602	-0,414	215,24	0,000
16	1,31062	-0,576	213,93	0,000
17	0,71032	-0,147	214,53	0,000
18	0,3261	-0,145	214,914	0,000
19	4,46066	-1,884	210,788	0,000
20	6,30703	-2,616	208,95	0,000
1	0	0	220	0
5	12,1593	-4,426	207,888	0,000
21	3,08207	-1,702	204,813	0,000
22	1,28714	-0,657	206,602	0,000
23	0,89838	-0,377	206,99	0,000
24	1,80495	-0,375	206,083	0,000
1	0	0	220	0
6	5,37834	-1,98	214,631	0,000
25	2,35894	-1,238	212,275	0,000
26	0,76434	-0,337	213,867	0,000
27	0,92517	-0,547	213,706	0,000
28	1,14893	-0,587	213,483	0,000
29	1,77403	-0,389	212,857	0,000

Таблиця 3.11. Результати розрахунку прольоту цеху по напрузі при відпайці трансформатора +2,5%.

Номер вузла	ΔU	δU	U	Нєв'язка
1	2	3	4	5
1	0	0	225,5	0,000
2	9,50349	0,6721	215,998	0,000
7	4,17014	-0,245	211,828	0,000
8	1,10528	-0,657	214,893	0,000
9	0,30297	-2,305	215,707	0,000
10	0,92011	-0,548	215,078	0,000
11	0,91125	-0,189	215,086	0,000
1	0	0	225,5	0,000
3	8,49551	-1,35	217,009	0,000
12	1,38274	-0,77	215,627	0,000
13	0,40314	-0,085	216,606	0,000
14	0,25117	-0,131	216,758	0,000
15	0,41988	-0,09	216,589	0,000
1	0	0	225,5	0,000
4	4,66127	-0,455	220,839	0,000
16	1,28241	-0,585	219,558	0,000
17	0,69464	-0,151	220,145	0,000
18	0,31915	-0,147	220,52	0,000
19	4,34805	-1,885	216,499	0,000
20	6,14457	-2,616	214,711	0,000
1	0	0	225,5	0,000
5	11,8855	-4,522	213,662	0,000
21	3,00722	-1,722	210,662	0,000
22	1,25562	-0,664	212,408	0,000
23	0,87738	-0,383	212,785	0,000
24	1,76236	-0,381	211,9	0,000
1	0	0	225,5	0,000
6	5,26024	-2,011	220,249	0,000
25	2,3048	-1,253	217,948	0,000
26	0,74786	-0,342	219,501	0,000
27	0,90483	-0,554	219,345	0,000
28	1,11928	-0,584	219,13	0,000
29	1,72699	-0,371	218,522	0,000

Таблиця 3.12. Результати розрахунку прольоту цеху по напрузі при відпайці трансформатора +5%.

Номер вузла	ΔU	δU	U	Нєв'язка
1	2	3	4	5
1	0	0	231	0,000
2	9,32527	0,5655	221,675	0,000
7	4,07934	-0,251	217,596	0,000
8	1,08093	-0,666	220,596	0,000
9	0,29626	-2,309	221,391	0,000
10	0,89988	-0,556	220,776	0,000
11	0,89094	-0,194	220,785	0,000
1	0	0	231	0,000
3	8,34637	-1,44	222,658	0,000
12	1,35131	-0,779	221,308	0,000
13	0,39441	-0,087	222,264	0,000
14	0,24483	-0,13	222,413	0,000
15	0,41333	-0,095	222,245	0,000
1	0	0	231	0,000
4	4,56994	-0,497	226,431	0,000
16	1,25603	-0,596	225,175	0,000
17	0,68002	-0,155	225,751	0,000
18	0,31264	-0,15	226,118	0,000
19	4,24244	-1,89	222,196	0,000
20	5,99249	-2,623	220,454	0,000
1	0	0	231	0,000
5	11,6322	-4,627	219,417	0,000
21	2,93766	-1,744	216,486	0,000
22	1,22624	-0,672	218,191	0,000
23	0,85785	-0,39	218,559	0,000
24	1,72276	-0,387	217,694	0,000
1	0	0	231	0,000
6	5,15033	-2,047	225,859	0,000
25	2,25413	-1,27	223,608	0,000
26	0,73243	-0,349	225,127	0,000
27	0,88578	-0,562	224,974	0,000
28	1,0916	-0,583	224,768	0,000
29	1,68306	-0,354	224,176	0,000

РОЗДІЛ 4

РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ ПО НАПРУЗІ В ЦЕХОВІЙ ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

Однією з головних причин збільшення втрат електричної енергії та зменшення ефективності роботи електричних машин є зменшення навантаження нижче проектного, що може бути викликане, як особливостями технологічного процесу так і вимушеним зменшенням продуктивності підприємства в цілому. Підвищити коефіцієнт завантаження або використовувати електричні двигуни меншої потужності в робочих машинах не завжди є можливим. Тому, в таких випадках підвищити ефективність роботи можливо лише шляхом зменшення напруги живлення, залишаючи її в допустимих межах. Зменшення напруги, в свою чергу призведе до збільшення втрат на передачу електроенергії в системі електропостачання, що вимагатиме сукупного розгляду втрат електроенергії в електродвигунах і системі електропостачання, як єдиному цілому.

Вибір оптимального рівня напруги цехової мережі дозволяє скоротити витрати на енергоресурси, зокрема на електроенергію, що в свою чергу знижує собівартість продукції, яка виготовляється. А це є однією з головних цілей кожного підприємства.

Розрахунок вартості річної економії електроенергії від вибору оптимальної відпайки на трансформаторі приведений нижче.

Оскільки сумарні втрати складаються з двох складових – постійної та змінної, то їх значення знаходимо за наступними формулами:

1. постійні втрати:
 - магнітні втрати в асинхронних двигунах:

$$\Delta P_{\text{маг}} = \Delta P_{\text{маг.ном}} \cdot k_U^2 \quad (4.1)$$

де $\Delta P_{\text{маг.ном}}$ – номінальне значення магнітних втрат двигуна; k_U – коефіцієнт регулювання напруги.

2. Змінні втрати:

- інші втрати в асинхронних двигунах:

$$\Delta P_{зм.дв} = \Delta P_{дв} - \Delta P_{маг} \quad (4.2)$$

- активні втрати в кабельних лініях:

$$\Delta P_{кл} = \frac{P_{кл}^2 + Q_{кл}^2}{U_{н.кл}^2} \cdot R_{кл} \quad (4.3)$$

Втрати активної енергії в мережі визначаємо за формулою:

$$\Delta W = \Delta P_{маг} \cdot T_{\epsilon} + \Delta P_{зм.дв} \cdot \tau + \Delta P_{кл} \cdot \tau \quad (4.4)$$

де T_{ϵ} – час включення двигуна $T_{\epsilon} = N_{роб} \cdot n \cdot 8$;

$$\tau - \text{час максимальних втрат } \tau = \left(0,124 + \frac{T_{\max}}{10000} \right)^2 \cdot 8760.$$

Оскільки за попередніми розрахунками було прийнято, що оптимальною відпайкою є +2,5%, то порівнювати будемо два варіанта: відпайку +2,5% і відпайку +5%. Частина розрахунку даного прольоту цеху виконана в програмі Microsoft Office Excel і результати приведені в табл. 4.1 та 4.2.

Зниження витрат за рахунок економії електроенергії:

$$E_p = W_{e.p} \cdot C_o = 6141,56 \cdot 5,43048 = 33966 \text{ грн.} \quad (4.5)$$

де: $W_{e.p}$ – річна економія електроенергії від оптимізації рівня напруги в мережі прольоту цеху; C_o – ціна однієї кВт·год електроенергії (для споживачів 2-го класу напруги становить 5430,48 грн./МВт·год).

Таблиця 4.1. Розрахунок прольоту цеху для економічного порівняння стандартної відпайки трансформатора +5%.

Номер вузла	$\Delta P_{\text{маг.ном}}, \text{Вт}$	$k_{\text{ц}}$	$\Delta P_{\text{маг}}, \text{Вт}$	$\Delta P_{\text{дв}}, \text{Вт}$	$\Delta P_{\text{зм.дв}}, \text{Вт}$	$\Delta P_{\text{кл}}, \text{Вт}$
1	2	3	4	5	6	7
29	538,5	1,019	580,57	1068,18	487,61	67,70
28	538,5	1,022	586,73	1068,29	481,57	54,50
27	1133,5	1,023	1239,54	1483,13	243,59	70,50
26	1713,8	1,023	1879,23	2350,16	470,93	104,17
25	1210,2	1,016	1291,58	1659,36	367,78	228,44
6	0	0	0	0	0,00	0,00
1	0	0	0	0	0,00	2011,37
24	1773,8	0,990	1700,64	2267,08	566,44	247,28
23	1773,8	0,993	1727,83	2276,35	548,53	123,06
22	1210,2	0,992	1170,92	1622,06	451,14	125,14
21	1133,5	0,984	1062,83	1422,22	359,39	233,83
5	0	0	0	0	0,00	0,00
1	0	0	0	0	0,00	5218,17
20	2752	1,002	2774,78	4245,88	1471,09	1957,91
19	2752	1,010	2863,56	4264,78	1401,23	1381,78
18	1773,8	1,028	1979,5	2361,80	382,30	44,43
17	2752	1,026	3051,23	4306,13	1254,90	199,18
16	1773,8	1,024	1946,7	2350,72	404,02	178,51
4	0	0	0	0	0,00	0,00
1	0	0	0	0	0,00	4933,91
15	6878,5	1,010	7163,75	8010,87	847,12	189,17
14	538,5	1,011	562,53	1068,03	505,50	12,31
13	2752	1,010	2867,1	4265,55	1398,45	116,99
12	1210,2	1,006	1239,27	1643,16	403,88	138,61
3	0	0	0	0	0,00	0,00
1	0	0	0	0	0,00	7181,55
11	2752	1,004	2791,56	4249,41	1457,86	265,05
10	1133,5	1,004	1149,62	1452,23	302,61	71,73
9	2752	1,006	2822,36	4255,95	1433,59	87,98
8	1133,5	1,003	1145,86	1450,94	305,08	86,14
7	2752	0,989	2633,79	4216,89	1583,11	361,58
2	0	0	0	0	0,00	0,00
1	0	0	0	0	0,00	8291,71
0	0	0	0	0	0,00	0
$\Sigma \Delta P$			46234,48		17132,73	33982,70

Таблиця 4.2. Розрахунок прольоту цеху для економічного порівняння оптимальної відпайки трансформатора +2,5%

Номер вузла	$\Delta P_{\text{маг.ном}}, \text{Вт}$	$k_{\text{ц}}$	$\Delta P_{\text{маг}}, \text{Вт}$	$\Delta P_{\text{дв}}, \text{Вт}$	$\Delta P_{\text{зм.дв}}, \text{Вт}$	$\Delta P_{\text{кл}}, \text{Вт}$
1	2	3	4	5	6	7
29	538,5	0,993	524,179	1068,18	544,00	71,3964
28	538,5	0,996	530,039	1068,29	538,25	56,7262
27	1133,5	0,997	1120,06	1483,13	363,07	72,1124
26	1713,8	0,998	1698,32	2350,16	651,83	107,105
25	1210,2	0,991	1165,68	1659,36	493,69	234,84
6	0	0	0	0	0,00	0
1	0	0	0	0	0,00	2076,87
24	1773,8	0,963	1526,69	2267,08	740,39	255,435
23	1773,8	0,967	1552,35	2276,35	724,00	127,048
22	1210,2	0,965	1051,62	1622,06	570,44	129,099
21	1133,5	0,958	952,989	1422,22	469,23	240,519
5	0	0	0	0	0,00	0
1	0	0	0	0	0,00	5384,21
20	2752	0,976	2496,74	4245,88	1749,14	2040,62
19	2752	0,984	2580,99	4264,78	1683,80	1438,52
18	1773,8	1,002	1790,64	2361,80	571,17	45,6525
17	2752	1,001	2759,25	4306,13	1546,88	206,9
16	1773,8	0,998	1759,58	2350,72	591,14	183,523
4	0	0	0	0	0,00	0
1	0	0	0	0	0,00	5121,2
15	6878,5	0,984	6461,84	8010,87	1549,03	193,864
14	538,5	0,985	507,458	1068,03	560,58	12,8366
13	2752	0,985	2586,1	4265,55	1679,45	121,712
12	1210,2	0,980	1116,84	1643,16	526,32	142,678
3	0	0	0	0	0,00	0
1	0	0	0	0	0,00	7407,83
11	2752	0,978	2514,33	4249,41	1735,09	276,112
10	1133,5	0,978	1035,45	1452,23	416,79	73,5506
9	2752	0,980	2543,46	4255,95	1712,49	91,6109
8	1133,5	0,977	1031,89	1450,94	419,04	88,3389
7	2752	0,963	2365,39	4216,89	1851,51	377,435
2	0	0	0	0	0,00	0
1	0	0	0	0	0,00	8622,57
0	0	0	0	0	0,00	0
ΣΔP			41674,9		21692,3	35206,3

$$W_{e.p} = \Delta W_{+5} - \Delta W_{opt} = 278158,72 - 272017,16 = 6141,56 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік} \quad (4.6)$$

де: ΔW_{+5} – річні втрати активної енергії прольоту цеху при відпайці +5%; W_{opt} – річні втрати активної енергії прольоту цеху при відпайці оптимальній (+2,5%).

$$\begin{aligned} \Delta W_{+5} &= \Delta P_{\text{маг}} T_B + \Delta P_{\text{зм.дв}} \cdot \tau + \Delta P_{\text{кл}} \cdot \tau = \\ &= (46234,5 \cdot 3840 + 17132,7 \cdot 1968,16 + 33982,7 \cdot 1968,16) \cdot 10^{-3} = \\ &= 278158,72 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{опт}} &= \Delta P_{\text{маг}} T_B + \Delta P_{\text{зм.дв}} \cdot \tau + \Delta P_{\text{кл}} \cdot \tau = \\ &= (41674,9 \cdot 3840 + 21692,3 \cdot 1968,16 + 35206,3 \cdot 1968,16) \cdot 10^{-3} = \\ &= 272017,16 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік}, \end{aligned}$$

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_{\text{max}}}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = \left(0,124 + \frac{3500}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 1968,16 \text{ год},$$

$$T_e = N_{\text{роб}} \cdot n \cdot 8 = 240 \cdot 2 \cdot 8 = 3840 \text{ год}.$$

Отже, економія електроенергії прольоту цеху від оптимізації рівня напруги в грошовому еквіваленті становить 33966 грн. в рік. Зважаючи, що таких прольотів в цеху декілька можна зробити висновок, що економічний ефект буде значно більшим. Для досягнення цього ефекту не потрібні додаткові капіталовкладення і витрати на амортизацію, отже раціональний вибір рівня напруги є економічно вигідним для підприємства, оскільки зекономлені кошти можна направити на подальший розвиток виробничої потужності.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Заходи забезпечення електробезпеки

Пошкодження ізоляції електроустановок може спричинити появу на металевих частинах, корпусах та інших (потенційно небезпечних) потенціалів, які є небезпечними для життя людини. Максимально допустимі значення напруг дотику та струмів крізь тіло людини в аварійних режимах виробничих електроустановок напругою до 1000 В з частотою 50 Гц та ізольованою або заземленою нейтраллю не мають перевищувати величин, які зазначені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1. Максимально допустимі значення напруг дотику та струмів крізь тіло людини в аварійному режимі

Нормована величина	Максимально допустиме значення (не більше) при тривалості впливу струму t , с										
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	>1
U, В	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	36
I, мА	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	6

Всі потенційно небезпечні частини електроустановок повинні бути заземлені або занулені. Згідно пункту 1.7.38 ПУЕ в чотирьох провідних мережах трифазного струму є обов'язковим глухе заземлення нейтралі, а пункт 1.7.34 ПУЕ в трифазних мережах до 1000 В з глухозаземленою нейтраллю переписує обов'язкове занулення. В електроустановках понад 1000 В з ізольованою нейтраллю (згідно пункту 1.7.41 ПУЕ) повинно бути виконане заземлення.

Отже, необхідно розробити:

- а) заземлення потенційно небезпечних частин напругою більше 1 кВ та для електричних мереж з глухим заземленням нейтралі трансформатора;
- б) занулення потенційно небезпечних частин з напругою до 1 кВ.

5.2 Режими роботи нейтралі в низьковольтних електричних мережах

Трифазні електричні мережі напругою до 1000 В можуть працювати з ізольованою нейтраллю (трьохпровідні) та глухозаземленою нейтраллю (чотирьохпровідні).

В кожному з цих режимів роботи нейтралі є свої переваги та недоліки.

Для внутрішньо цехового електропостачання найбільш поширеною є трифазна чотирьохпровідна електрична мережа з системою TN-C (рис. 5.1).

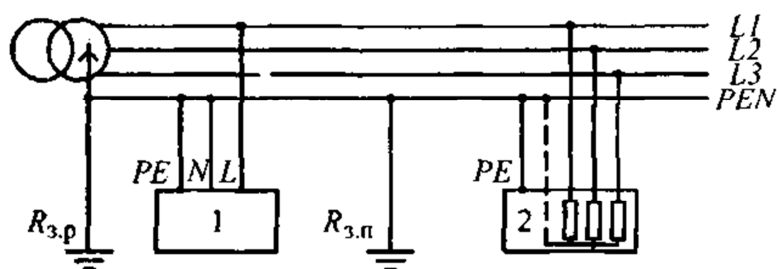


Рис. 5.1. Схема електричної мережі за системою TN-C:

1 – однофазний споживач електроенергії; 2 – трифазний споживач електроенергії;
 $R_{з.р}$ – опір робочого заземлення; $R_{з.п}$ – опір додаткових заземлювачів.

Співвідношення лінійних та фазних напруг в такій мережі складає 0,38/0,22 кВ. Це дозволяє живлення освітлювального та силового навантажень і однофазних електроприймачів здійснювати від спільних трансформаторів.

Трифазна п'ятипровідна електрична мережа напругою до 1000 В з системою TN-S та окремим робочим (N) і захисним (PE) провідником застосовується рідко.

Трифазна трьох провідна електрична мережа з ізольованою нейтраллю (рис. 5.2) з системою IT напругою $3 \times 0,66$ кВ найбільш доцільно використовувати при значній кількості електричних двигунів потужністю від 200 до 600 кВт, значних питомих електричних навантажень. В такому разі для живлення однофазних електроприймачів та електричного освітлення застосовуються трансформатори напругою 0,66/0,22 кВ.

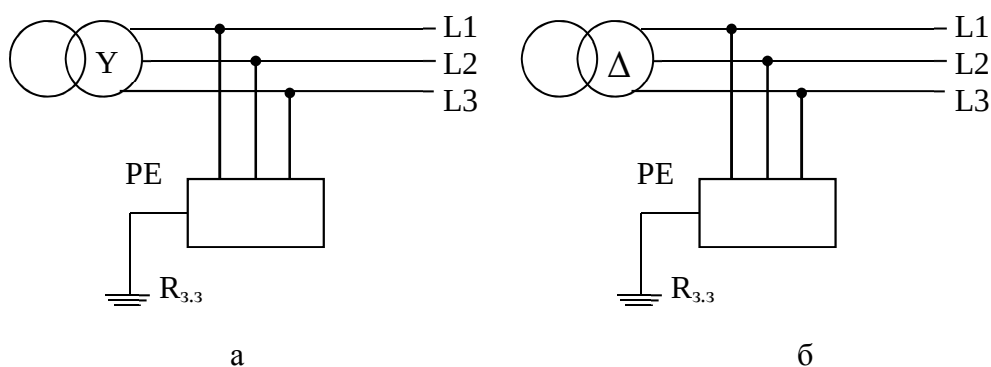


Рис. 5.2. Схеми трьохпровідної електричної мережі з системою IT:

а – живлення від обмотки, що з'єднана в "зірку"; б – живлення від обмотки, що з'єднана в "трикутник"; $R_{з.з}$ – опір захисного заземлення

5.3 Системи захисту персоналу в електроустановках напругою до 1 кВ

5.3.1. Захисне заземлення

Захисне заземлення використовується для зниження напруги дотику вразі замикання на корпус електроустановки до безпечних величин завдяки зменшенню потенціалу на заземленому обладнанні. Також захисне заземлення дозволяє вирівнювати потенціал шляхом підвищення потенціалів тих місць, на яких стоїть людина, до величин близьких до потенціалу заземлених частин обладнання.

Захисне заземлення використовується в трьохфазних трьохпровідних електричних мережах до 1000 В з ізольованою нейтраллю (660 В).

Для захисного заземлення корпуси електричних установок з'єднуються з заземлювачем крізь заземлюючі провідники.

Напруга заземлених частин обладнання відносно землі знаходиться, як падіння напруги на опорі R_3 пристрою заземлення. Напругу дотику можна визначити за:

$$U_{\text{дот}} = \alpha I_3 R_3, \quad (5.1)$$

де $\alpha < 1$ – коефіцієнт дотику, що враховує вирівнювання потенціалу, а також інші фактори, що сприяють зменшенню напруги дотику тіла людини при його контакті з заземленим обладнанням, так як в переважній більшості випадків напруга дотику менша напруги на цьому обладнанні; I_3 – струм замикання на землю.

В мережах з ізольованою нейтраллю струм замикання на землю на підприємствах з нормальним навколишнім середовищем < 10 А. Опір пристрою заземлення в мережах до 1000 В повинен бути не > 4 Ом. Отже, напруга дотику згідно (5.1) не перевищує 40 В, в той же час, при тривалому замиканні на елементах електрообладнання, значення напруги дотику ≈ 40 В не можна рахувати безпечним. З погляду електробезпеки для виробничих приміщень, висока ефективність захисного заземлення спостерігається лише тоді, коли в умовах експлуатації забезпечується великий опір ізоляції для всієї мережі, що призводить до значного обмеження величини струму в місці замикання.

5.3.2 Захисне занулення

Захисне занулення забезпечує безпеку персоналу у випадку замикання на конструктивних елементах шляхом швидкого (автоматичного) відключення пошкодженого обладнання рис. 5.3.

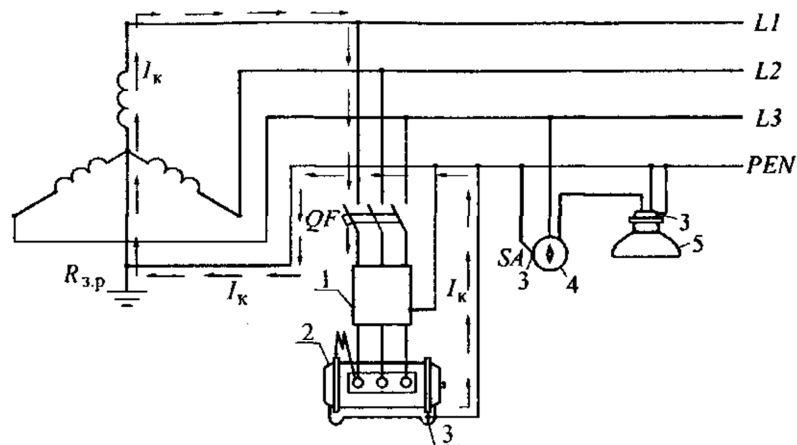


Рис. 5.3. Схема занулення електричної установки до 1000 В в мережах з глухим заземленням нейтралі:

1 – пускач; 2 – електричний двигун; 3 – кріплення заземлення; 4 – вимикач;
5 – освітлювальна установка

Захисне занулення використовується для трифазних чотирьохпровідних електричних мереж до 1000 В з глухим заземленням нейтралі (напруга 0,38/0,22 кВ).

При захисному зануленні корпуси електричного обладнання з'єднуються не з заземлювальним проводом, а з нульовим провідником, що перетворює замикання на корпус в однофазне коротке замкнення та приводить до спрацювання автомата чи запобіжника та швидкого відключення пошкодженого обладнання.

Захисне занулення також знижує потенціал на корпусі електричного обладнання відносно землі, що виникає у момент пошкодження ізоляції. Цьому також сприяє використання повторного заземлення нульового проводу. Значення напруги на корпусі електричного обладнання при замиканні залежить від співвідношення повних опорів фазного (Z_{ϕ}) та нульового (Z_n) провідників, а також від співвідношення між опорами заземлювача нейтралі ($R_{з.р}$) та опором повторних заземлювачів ($R_{з.п}$) та може бути визначений, як:

$$U_{\kappa} = \frac{U_{\phi}}{1 + \frac{Z_{\phi}}{Z_n}} \cdot \frac{R_{3.п}}{R_{3.р} + R_{3.п}}, \quad (5.2)$$

де U_{ϕ} – фазна напруга.

При відсутності повторних заземлювачі нульового проводу та реального можливого співвідношення між $Z_n \approx 2Z_{\phi}$ напруга на корпусі установки згідно з (5.2) дорівнюватиме $2/3U_{\phi}$, тобто складатиме 147 В при 220 В фазної напруги. Це є не безпечною величиною. Отже, безпека може бути забезпечена лише надійним та швидким відключенням пошкодженого обладнання за долі секунди.

5.3.3 Нагляд та перевірка мережі заземлення

В більшості випадків причиною ураження електричним струмом людей є порушення мережі заземлення: ослаблення болтових з'єднань, обриви проводів, погіршення контактів і т.п. Подібні пошкодження є джерелом підвищеної небезпеки. Вразі порушенні електричної ізоляції небезпечна напруга дотику з'явиться не лише на пошкодженному електрообладнанні, а також на всіх елементах конструкцій, що з'єднані з даним обладнанням. Також небезпечна напруга може з'явитися на обладнанні до місця обриву магістралі заземлення або нульового провідника. Для виключення подібної небезпеки необхідно здійснювати періодичний огляд стану елементів пристрою заземлення.

Отже, надійна робота занулення та пристроїв заземлення забезпечується не лише її виконанням відповідно до вимог ПУЕ, а також ще і правильною експлуатацією з виконанням усіх вимог ПТЕ.

Під час кожної перестановки електрообладнання, а також щорічно мережі захисного заземлення і занулення перевіряються на наявність ланцюга між елементами, що заземлені та заземлювачами.

В установках з захисним зануленням проводиться вимірювання повного опору петлі «фаза-нуль» Z_n в наступних випадках:

- періодично під час експлуатації;
- при прийманні в експлуатацію;
- після капітальних ремонтів або реконструкції.

5.4 Розрахунок контуру заземлення цехової ТП.

ТП 10/0,4 кВ на боці 0,4 кВ, як правило, мають глухозаземлену нейтраль. Схема з'єднання обмоток ТП – Δ/Y з нулем. Струм замикання на землю $I_3 = 27$ А. Для захисту електрообладнання застосовується заземлення. Ґрунт – чорнозем, що розташований в другому кліматичному районі.

Метою розрахунку є визначення кількості вертикальних заземлювачів та їх довжини, а також довжини з'єднувальної полоси (рис. 5.4).

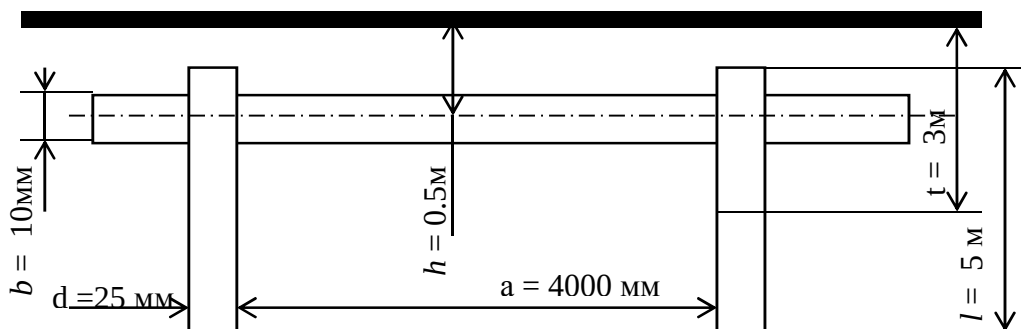


Рис. 5.4. Схема закладання контуру заземлення

Визначимо норму опору контуру заземлення R_3^H . Якщо заземлюючий пристрій одночасно використовується для мережі напругою 0,4 та 10 кВ:

$$R_3 \leq \frac{125}{I_3} = \frac{125}{27} = 4,63 \text{ Ом.}$$

Приймемо, що сумарна потужність електроприймачів > 100 кВА, в цьому випадку R_3 повин бути < 4 Ом (згідно ПУЕ). Отже, приймаємо $R_3 = 4$ Ом.

Розрахунковий питомий опір ґрунту, визначимо за формулою:

$$\rho_p = \rho_{\text{табл}} \cdot \psi = 220 \cdot 1,3 = 286 \text{ Ом}\cdot\text{м},$$

де $\rho_{\text{табл}}$ – табличне значення питомого опору (для чорнозему складає $\rho_{\text{табл}} = 220$ Ом·м з табл. 7.14 [5]); ψ – підвищуючий коефіцієнт, для стержньових заземлювачів обирається в межах $\psi = 1,2 \dots 1,4$.

Опір одного вертикального заземлювача визначимо за формулою:

$$\begin{aligned} R_o &= 0,366 \frac{\rho_{\text{розр}}}{l} \left(\lg \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right) = \\ &= 0,366 \frac{286}{5} \left(\lg \frac{2 \cdot 5}{2,5} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 3 + 5}{4 \cdot 3 - 5} \right) = 15,4 \text{ Ом;} \end{aligned}$$

де $l = 5$ м – довжина вертикального заземлювача; $d = 2,5$ см – його діаметр.

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

де h – глибина прокладки вертикальних полос (згідно з ПУЕ – $h = 0,5 \dots 0,8$ м).

Знаходимо орієнтовну кількість вертикальних заземлювачів:

$$n_o = \frac{R_e}{R_3^H \cdot \eta_o} = \frac{15,4}{4,054} = 6,9 \approx 7 \text{ шт.}$$

де η_o – коефіцієнт використання, при $a/l = 4/5 = 0,8$, за рис. 7.5 [5] $\eta_o = 0,54$, де відстань між електродами $a = 4$ м.

Довжина з'єднувальної горизонтальної полоси:

$$l_n = 1,05a \cdot n = 1,05 \cdot 4 \cdot 7 = 29,4 \text{ м.}$$

Опір горизонтальної полоси з врахуванням екранування:

$$R_n = 0,366 \frac{\rho_{розр}}{l_n \cdot \eta_n} \lg \frac{2l_n}{b \cdot n} = 0,366 \frac{286}{29,4 \cdot 0,51} \lg \frac{2 \cdot 29,5^2}{0,01 \cdot 7} = 28,38 \text{ Ом};$$

де η_n – коефіцієнт використання з'єднувальної полоси товщиною 5 мм та шириною $b = 10$ мм.

Опір вертикальних заземлювачів з врахуванням опору з'єднувальної полоси:

$$R_{mp} = \frac{R_n \cdot R_3^H}{R_n + R_3^H} = \frac{28,38 \cdot 4}{28,38 + 4} = 7,94 \text{ Ом.}$$

Отже, остаточна кількість заземлювачів:

$$n = \frac{R_o}{R_{mp} \cdot \eta_o} = \frac{15,4}{7,94 \cdot 0,59} = 3,6 \approx 4 \text{ шт.}$$

Проведемо перевірочний розрахунок опору заземлювача та порівняємо його значення з нормативним:

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_{mp}} + \frac{1}{R_n}} = \frac{1}{\frac{1}{7,94} + \frac{1}{28,38}} = 3,98 \text{ Ом.}$$

$$3,98 < 4 \text{ Ом.}$$

ВИСНОВКИ

При виборі схеми живлення необхідна розробка варіантів, які виключають взаємний негативний вплив споживачів один на одного або тих, які впливають найменше. Якщо схемні рішення не дають бажаного результату, то повинні передбачатись додаткові заходи і заходів підвищення якості електроенергії. Оцінку таких заходів потрібно здійснювати комплексно з урахуванням проектних рішень в області електропостачання, електрообладнання і технології, а доцільність проведення даних заходів повинна підтверджуватись техніко-економічними розрахунками.

В роботі здійснено теоретичне узагальнення й розв'язання актуальної науково – технічної задачі підвищення ефективності роботи електричних машин цехового обладнання шляхом вибору оптимального рівня напруги в системі електропостачання. Найбільш суттєві наукові і прикладні результати, висновки і рекомендації полягають у наступному:

1. Досліджений вплив зміни напруги живлення електродвигуна на його технічні характеристики, який показав, що бажана напруга живлення, при якій втрати в двигуні будуть меншими суттєво залежить від коефіцієнта завантаження двигуна робочого агрегату. Для вибору оптимального значення напруги живлення потрібно приводити розрахунок втрат потужності в електродвигуні та живлячій його мережі.

2. На основі проведених досліджень сформована цільова функція оптимізаційної задачі вибору рівня напруги у цеховій мережі, в якій поєднаний розрахунок втрат активної потужності в лініях електропередачі з розрахунком втрат в електродвигунах.

3. Розроблена методика пошуку мінімуму цільової функції, яка дозволяє розрахувати за заданими значеннями коефіцієнтів завантаження та параметрами електричної мережі і двигунів визначити відгалуження, що відповідатиме мінімуму цільової функції, тобто мінімуму сукупних втрат активної потужності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Федоров А. А. Электроснабжение промышленных предприятий.: Учебник для вузов. / А. А. Федоров, Э. М. Ристхейн. – М.: Энергия, 1981. – 360 с., ил.
2. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: В 2 т. Т. 1. Электроснабжение/ Под общ. ред. А. А. Федорова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 568 с., ил.
3. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б. И. Кудрин, В. В. Прокопчик. – Минск: "Вышэйшая школа", 1988.– 357 с.: ил.
4. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. — М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с., ил.
5. Радин В. И. и др. Электрические машины: Асинхронные машины: Учеб. для электромех. спец. вузов/Радин В. И., Брускин Д. Э., Зорохович А. Е.; Под ред. И. П. Копылова — М.: Высш. шк., 1988.—328 с: ил.
6. Справочник по электрическим машинам: В 2 т./ Под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. Т. 1.—М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с: ил.
7. Вольдек А. И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. Изд 2-е, перераб и доп. Л , «Энергия», 1974. – 840 с: ил.
8. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М.: Энергоатомиздат. 1984.
9. Ристхейн Э.М. Электроснабжение промышленных установок: Учеб. для вузов. – М.: Энегоатомздат, 1991. – 424 с.: ил.
10. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях – 4-е изд., переаб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
11. Жежеленко И.В. , Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях – 3-е изд., переаб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с., 74 ил.
12. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. - М.: Энергоатомиздат,Ю 1985. - (Экономия топлива и электроэнергии).

13. Мукосеев ЮЛ. Электроснабжение промышленных предприятий. - М., «Энергия», 1973. - 584 с.
14. Режимы электрических сетей и систем. Сборник научных трудов под редакцией кад. техн. наук, доцента В.М. Чебана и кад. техн. наук, доцента В.Я. Ольховского. Редакционно-издательский отдел НЭТИ, Новосибирск - 1974г.
15. Овчаренко А.С. и Рабинович МЛ. Техничко-економический эффект систем электроснабжения промышленных предприятий. К. - "Техніка", 1977.
16. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий: Проектирование и расчет / А.С. Овчаренко, М.Л. Рабинович, В.И. Мозырский, Д.Н. Розинский. - К: "Техніка", 1985.
17. Автоматизація контролю і управління якістю електроенергії: методичні вказівки для вивчення курсу „Автоматизація контролю і управління якістю електроенергії" для студентів V - VI курсів спеціальності 8.090603 „Електротехнічні системи електроспоживання"/ Укл.: канд. техн. наук, доц. П.Г. Плешков, канд. техн. наук, доц. А.Ю. Орлович, асистент О.А. Козловський. -Кіровоград: КДТУ, 2001 рік.
18. Маркушевич Н.С Регулирование напряжения и экономия электроэнергии. - М.: Энергоатомиздат, 1984.
19. Федоров А А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий: Учебник для вузов. - 4-е изд., перераб. и доп. - М,: Энергоатомиздат, 1984.
20. Солдаткина Л.А. Электрические сети и системы: Учебник для вузов. -М.: "Энергия". 1978.