

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) _____ ННІТІ ім. акад. І.С. Гулого _____

Кафедра _____ Електропостачання і енергоменеджменту _____

«До захисту в ЕК»

«До захисту допущено»

Директор інституту

Завідувач кафедри

_____ **Сергій БЛАЖЕНКО**

_____ **Сергій БАЛЮТА**

(підпис)

(прізвище та ініціали)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« ____ » лютого 2023 р.

« ____ » лютого 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми «Електротехнічні системи електроспоживання»

на тему: «Регулювання напруги в цехових мережах промислових об'єктів для забезпечення енергоефективних режимів роботи»

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ЗЕЛ-2-5М

_____ **Загика Олександр Володимирович**

(прізвище, ім'я, та по батькові повністю)

(підпис)

Керівник Балюта Сергій Миколайович

(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

(підпис)

Рецензент Бондар Володимир Іванович

(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

(підпис)

Я як здобувач Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач _____

(підпис)

Київ – 2023 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) Навчально - науковий інженерно - технічний інститут ім. акад. І. С. Гулого

Кафедра Електропостачання та енергоменеджменту

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання»
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач

кафедри ЕПЕМ

/Сергій БАЛЮТА/

“ ” листопада 2022 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Загики Олександра Володимировича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Регулювання напруги в цехових мережах промислових об'єктів для забезпечення енергоефективних режимів

керівник роботи Балюта Сергій Миколайович., д.т.н., проф.

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від “ 11 ” листопада 2022 року № 810-кс

2. Строк подання здобувачем роботи 02 лютого 2023 року

3. Вихідні дані до роботи матеріали переддипломної практики

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Науково-технічні проблеми регулювання напруги у системах електропостачання промислових підприємств 2. Дослідження процесу споживання активної та реактивної потужності у системах електропостачання промислових підприємств у залежності від напруги. 3. Розробка алгоритму оптимального регулювання напруги у системі електропостачання промислового підприємства.

5. Перелік графічного матеріалу

Графічно-презентаційна частина в середовищі PowerPoint – 25 слайдів.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання

02 листопада 2022 р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання на магістерську роботу	02.11.2022	
2	Огляд літературних джерел, аналіз методів регулювання напруги СЕП промислових підприємств, формулювання напрямків дослідження	03.11.22-05.11.22	
3	Науково-технічні проблеми регулювання напруги у системах електропостачання промислових підприємств	19.11.22-08.12.22	
4	Розділ 2. Дослідження процесу споживання активної та реактивної потужності у системах електропостачання промислових підприємств у залежності від напруги.	09.12.22-05.01.23	
5	Розділ 3. Розробка алгоритму оптимального регулювання напруги у системі електропостачання промислового підприємства	06.01.23-11.01.23	
6	Формулювання рекомендацій та висновків	12.01.23-19.01.23	
7	Оформлення пояснювальної записки	20.01.23-24.01.23	
8	Оформлення графічної частини роботи (презентації)	25.01.23-30.01.23	
9	Подання готової роботи для перевірки на плагіат	02.02.2023	

Здобувач

_____ (підпис)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Загика О.В.

_____ (прізвище та ініціали)

Балюта С.М.

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Загика О.В.

Регулювання напруги в цехових мережах промислових об'єктів для забезпечення енергоефективних режимів роботи.

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Національний Університет Харчових Технологій

Київ - 2023

Кваліфікаційна робота: 116 с.; 49 рис.; 8 табл.; 55 джерел.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження енергоефективності регулювання напруги в системі електропостачання промислового підприємства та розробка алгоритму регулювання напруги з використанням дискретних та безперервних джерел реактивної потужності, РПН трансформаторів ГПП та ПБЗ цехових трансформаторів.

Досліджені статичні характеристики навантаження асинхронних за напругою з урахуванням конструктивних особливостей, характеристик механічного навантаження та струмів намагнічування. Розроблено метод визначення статичних характеристик навантаження за напругою на рівні цехового трансформатора та на рівні.

Дослідження проводилися з використанням пакету MATLAB.

Обґрунтований вибір метод розрахунку режимів цехових і розподільних електричних мереж промислового підприємства з урахуванням статичних характеристик навантаження за напруги і дії регуляторів напруги, а також метод оптимізації.

Запропонований алгоритм керування джерелами реактивної потужності та регуляторами напруги з урахуванням статичних характеристик навантаження для забезпечення енергоефективних режимів роботи цехових та розподільних електричних мереж промислового підприємства.

Ключові слова: цехові електричні мережі, оптимізація режимів, регулятори напруги, компенсація реактивної потужності, комп'ютерна імітаційна модель системи електропостачання промислового підприємства.

ANNOTATION

Zahyka O.V.

Voltage regulation in the workshop networks of industrial facilities to ensure energy-efficient operation modes.

141 "Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics"

National University of Food Technologies

Kyiv - 2023

Qualification work: 116 p.; 49 figs.; 8 tables; 55 sources.

The purpose of the qualification work is to study the energy efficiency of voltage regulation in the power supply system of an industrial enterprise and to develop an algorithm for voltage regulation using discrete and continuous sources of reactive power, on-load tap-changers of GIS transformers and shop transformers.

The static characteristics of asynchronous voltage loads are investigated, taking into account design features, mechanical load characteristics, and magnetization currents. A method for determining the static characteristics of the load by voltage at the level of the workshop transformer and at the level of the plant.

The studies were carried out using the MATLAB package.

The choice of the method for calculating the modes of the workshop and distribution electrical networks of an industrial enterprise, taking into account the static characteristics of the load by voltage and the action of voltage regulators, as well as the optimization method, is substantiated.

An algorithm for controlling reactive power sources and voltage regulators with regard to static load characteristics is proposed to ensure energy-efficient modes of operation of the workshop and distribution electrical networks of an industrial enterprise.

Keywords: workshop electrical networks, optimization of modes, voltage regulators, reactive power compensation, computer simulation model of the power supply system of an industrial enterprise.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ПРОБЛЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ.....	11
1.1 Огляд досліджень у галузі управління режимом напруги в системах електропостачання.....	11
1.2. Завдання регулювання напруги в системах електропостачання промислових підприємств.....	16
1.3. Аналіз зміни рівня напруги та споживання електричної енергії в системах електропостачання промислових підприємств.....	20
1.4. Алгоритм регулювання напруги в СЕП промислового підприємства.....	26
1.5. Особливості використання технічних засобів регулювання напруги на промислових підприємствах.....	27
1.6. Вплив відхилення напруги від номінального рівня на режим споживання промислового підприємства.....	35
1.7. Висновки.....	42
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СПОЖИВАННЯ АКТИВНОЇ І РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ У ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД НАПРУГИ.....	43
2.1. Дослідження статичних характеристик та регулюючих ефектів навантаження за напругою асинхронних двигунів.....	43
2.2. Дослідження еквівалентних статичних характеристик навантаження за напругою для ділянок системи електропостачання....	54
2.3. Визначення узагальнених статичних характеристик СЕП промислового підприємства.....	66
2.4. Висновки за розділом 2.....	77

3.	РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ У СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА.....	78
3.1.	Формулювання цільової функції оптимізації рівня напруги за критерієм мінімуму втрат активної потужності.....	78
3.2.	Алгоритм визначення оптимального рівня напруги.....	81
3.3.	Розробка алгоритмічного забезпечення автоматичного блоку регулювання УРПН.....	97
3.4.	Реалізація оптимального регулювання напруги в СЕП промислового підприємства з використанням SCADA-систем.....	105
3.5.	Висновки по розділу 3.....	108
	ВИСНОВКИ.....	109
	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	111
	ДОДАТОК А.....	116

ВСТУП

Актуальність теми дослідження.

При виробництві промислової продукції, а також при видобутку, транспортуванні та переробці корисних копалин (наприклад вугілля) витрати на електроенергію можуть досягати до 25%, що зумовлює необхідність розробки заходів щодо зниження втрат електроенергії. Їх реалізація має забезпечити зниження електроенергетичної складовою собівартості вугілля та підвищити його конкурентоспроможність на ринку. Існує велика кількість способів зниження втрат електроенергії у системі електропостачання (СЕР) промислових. Одним із найбільш ефективних способів є оптимальне регулювання напруги. Критерієм ефективності такого регулювання є мінімізація втрат електроенергії за умови дотримання нормативних відхилень напруги на затискачі електроприймачів. Існуюча концепція регулювання напруги в СЕР промислових підприємств базується на регулюванні напруги на шинах головної низької підстанції (ГПП) та управлінні потоками реактивної потужності. Внаслідок непов'язаного використання засобів регулювання напруги дана концепція не дозволяє забезпечити оптимальний рівень напруги у всіх точках мережі та мінімізувати втрати електроенергії. Наукові дослідження проведені О.С. Яндульським, П.О.Черненком, П.Д. Лежнюком та ін. показали, що для реалізації ефективного керування режимом напруги необхідно враховувати статичні характеристики споживачів електричної енергії за напругою. У зв'язку з вищесказаним, розробка алгоритму оптимального регулювання напруги з урахуванням статичних характеристик споживачів електричної енергії є актуальним науково-технічним завданням, вирішення якого може знизити рівень втрат електроенергії та підвищити енергоефективність СЕР промислових об'єктів.

Ступінь розробленості теми дослідження. Проблемою створення систем оптимального регулювання напруги у СЕР промислових підприємств та розподільчих мережах, у тому числі питаннями визначення статичних характеристик та регулюючих ефектів навантаження за напругою, займалися

О.С. Яндульський, П.О.Черненко, П.Д. Лежнюк, С.М. Балюта, Л.О. Копилова, J.-F. Canard, R. Caire, G. Rami, O. Richardot та ін. Незважаючи на значний обсяг проведених досліджень, розроблені системи регулювання напруги не адаптовані для застосування в СЕП промислових підприємств і не дозволяють взаємопов'язано задіяти всі наявні засоби регулювання напруги (СМ, БСК, трансформатори з УРПН та ін.) зниження втрат електроенергії. Однією з причин відсутності подібних систем регулювання у СЕП промислових підприємств є відсутність уточнених статичних характеристик та регулюючих ефектів навантаження за напругою для електродвигунів сучасного технологічного та промислового обладнання, а також шахтного обладнання. При цьому шахтні електродвигуни мають більш важкі умови роботи та пуску порівняно з електродвигунами загальнопромислового виконання. Отже, раніше отримані статичні характеристики навантаження по напрузі двигунів загальнопромислового виконання не можуть бути використані для опису шахтних електродвигунів.

Мета роботи полягає у підвищенні енергоефективності системи електрозабезпечення промислових підприємств (СЕПП) при оптимальному регулюванні напруги в СЕПП.

Ідея роботи полягає у розробці алгоритму регулювання напруги, що забезпечує зниження рівня втрат активної енергії за рахунок ефективного використання пристроїв регулювання напруги з урахуванням статичних характеристик навантаження електроприймачів за напругою.

Основні завдання дослідження:

1. Дослідити перспективи та особливості використання засобів регулювання напруги у СЕПП.

2. Розробити алгоритм визначення статичних характеристик навантаження асинхронних двигунів (АД) за напругою та за його допомогою оцінити вплив параметрів шахтних АД на споживання активної та реактивної потужності при зміні рівня напруги.

3. Виконати аналіз впливу параметрів пасивних елементів СЕПП на втрати активної та реактивної потужності за зміни рівня напруги.

4. Розробити алгоритм оптимізації рівня напруги у СЕПП.

Наукова новизна роботи:

1. Розроблено алгоритм визначення коефіцієнтів полінома статичних характеристик навантаження АД за напругою, що відрізняється від існуючих використанням Т-подібної схеми заміщення АД з одночасним урахуванням кривих намагнічування та механічних характеристик навантаження.

2. Уточнено статичні характеристики та регулюючі ефекти навантаження АД за напругою.

3. Отримано залежність відносної зміни втрат активної та реактивної потужності в пасивних елементах СЕПП від напруги при зміні їх завантаження та параметрів.

4. Запропоновано алгоритм оптимального регулювання напруги в СЕПП за критерієм мінімуму втрат активної потужності, який відрізняється від відомих алгоритмів можливістю оптимізації дискретних та недискретних параметрів пристроїв регулювання напруги з урахуванням статичних характеристик навантаження за напругою.

1. НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ПРОБЛЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

1.1. Огляд досліджень у галузі управління режимом напруги в системах електропостачання

На рівні системоутворюючої мережі проблеми пов'язані з регулюванням напруги завжди займали центральну позицію. Їх рішення присвячені роботи багатьох вітчизняних учених: А.К. Шидловського, Ю.І. Тугая, П.Д. Лежнюка, П.О. Черненко, Г.Г. Півняка, А.В. Праховника та ін. Проте проблема регулювання напруги в розподільчих мережах стала торкатися зовсім недавно. Пов'язано це з тим, що розподільні мережі 6-10 кВ (у тому числі системи електропостачання (СЕС) промислових підприємств) технічно оснащені гірше, ніж системоутворюючі мережі. З точки зору класичної концепції функціонування розподільчих мереж, немає необхідності в оснащенні всієї СЕС телевимірювання та телемеханіки для забезпечення напруги у всіх точках мережі в межах допустимих значень. Інформації про зміну навантаження та топології мережі достатньо для того, щоб передбачати вихід напруги за допустимі діапазони та вжити заходів.

Однозначний напрямок перетоків у мережі дозволяє з високою точністю виконувати розрахунки рівня напруги, навіть не вдаючись до спеціальних програмних комплексів. Крім того, враховуючи наявність на головній знижувальній підстанції (ГПП) та трансформаторних підстанціях (ТП) пристроїв регулювання під навантаженням (УРПН) та перемикачів без збудження (ПБЗ) можливо забезпечити напругу в заданих межах при досить великому діапазоні коливання навантаження. Для цього використовуються пристрої автоматичного регулювання напруги трансформаторів (АРНТ) або ПБЗ пристрої ТП 6(10)/0,4 кВ. При цьому отримані режими роботи мережі в більшості випадків не відповідають оптимальним і пристрої регулювання напруги не завжди використовуються ефективним чином. В Україні під керівництвом професора С.М. Балюти запропоновано загальна структура інтелектуальної систем

керування електропостачанням та електроспоживанням промислового підприємства [1]. Вона включає традиційну генерацію та альтернативні відновлювані джерела енергії, які дозволяють недискретно регулювати рівень напруги та компенсації реактивної потужності. Отже, в системах, що розробляються регулювання напруги, необхідно враховувати їх можливе підключення.

Питання оптимізації рівня напруги за критерієм забезпечення нормативного рівня напруги у максимально можливого числа споживачів присвячена робота П.Г. Плешкова, [2]. У цій роботі запропоновано систему активно-адаптивного регулювання напруги, що забезпечує підтримку напруги в заданих межах з використанням пристроїв АРНТ. Однак така схема регулювання застосовна тільки в класичних розподільчих мережах, коли напрям перетікань потужності однозначний, і не використовуються засоби компенсації реактивної потужності. З іншого боку, у роботі не враховується критерій мінімуму втрат (споживання) активної потужності.

У роботі Яндульського О.С [3] запропоновано метод оптимального розподілу активної та реактивної потужності між генераторами власних станцій промислових підприємств, також розроблено метод оптимального регулювання напруги шляхом зміни положення УРПН силових трансформаторів. Однак у роботі не враховуються статичні характеристики навантаження по напрузі.

У рамках наукового-дослідження П.Д. Лежнюка [4] запропоновано вирішення задачі регулювання напруги в електроенергетичних системах на основі нечіткої логіки, а також обґрунтовано доцільність застосування методів нечітких обчислень у завданнях регулювання напруги електроенергетичних систем. Однак завдання регулювання напруги вирішується лише за критерієм забезпечення нормативного рівня напруги. У роботі [5] розроблено алгоритм та структуру комплексу технічних засобів управління коефіцієнтом трансформації силового трансформатора з використанням УРПН при груповому управлінні напругою в центрі живлення (ЦП) з урахуванням параметрів електроприймачів

та розподільчих ліній, що дозволяє здійснити мінімізацію втрат активної та реактивної потужності в реальний час. Проте запропонований алгоритм забезпечує регулювання лише коефіцієнта трансформації трансформаторів ГПП. Інші пристрої регулювання напруги не використовуються.

У роботі С.М. Балюти [6] розглядається питання застосування нечіткої логіки до роботи блоків автоматичного регулювання РПН (БАР РПН). З використанням фази-логічної системи управління здійснюється групове управління режимом напруги у відповідність до раціонального рівня напруги шляхом зміни коефіцієнта трансформації силового трансформатора. При цьому в мережі дотримуються вимог щодо якості електричної енергії. Було досягнуто зниження втрат активної потужності на 9-11% порівняно із системою зустрічного регулювання напруги.

У вищезгаданих роботах не враховується наявність недискретних джерел реактивної потужності, які можуть бути представлені у вигляді синхронних машин.

За кордоном існує багато робіт, присвячених питанню підвищення енергоефективності СЕП із недискретними джерелами реактивної потужності. Основними завданнями цих робіт є розробка систем керування пристроями регулювання напруги, які дозволяють забезпечити максимально ефективно використання малої генерації (у тому числі поновлюваних джерел енергії), а також підвищити енергоефективність СЕП.

В роботі J.-F. Canard [7] показано, що в присутності малої генерації регулювання напруги з використанням пристроїв АРНТ за принципами «стабілізація напруги» і «зустрічне регулювання» не може застосовуватися і вимагає суттєвого доопрацювання.

Raphael Caire у рамках своєї дисертації [8] запропонував використовувати малу генерацію для нормалізації рівня напруги у мережі. Для вирішення завдання оптимізації рівня напруги було запропоновано поєднання двох

алгоритмів: детермінованого та евристичного (генетичні алгоритми). Однак використання цих алгоритмів у реальному часі утруднене у зв'язку з їхньою низькою збіжністю. У роботі також було запропоновано метод оптимізації розміщення об'єктів малої енергетики.

У роботі G. Ramі [9] запропоновано оснастити об'єкти малої генерації активно-адаптивним регулятором, принцип якого будується на перемиканні між режимом регулювання P/Q у нормальному режимі, та P/U у режимі, близькому до граничного. Для оптимізації режиму за критерієм забезпечення нормативного рівня напруги у найбільшого можливого числа споживачів такого підходу цілком достатньо. Спочатку визначається якийсь «проміжний» діапазон напруги ($U_{\min} \text{ désiré}$ «Мінімальна бажана напруга» - $U_{\max} \text{ désiré}$ «максимальна бажане напруження»). Якщо напруга знаходиться у цих межах, то режим вважається нормальним. У разі виходу напруги за "проміжний" діапазон, режим вважається "критичним". "Проміжний" діапазон напруги визначається в залежності від режиму на базі алгоритму з використанням нечіткої логіки. Схема регулювання напруги за цією системою представлена на рисунках 1.1-1.2. Однак запропонований метод не ставить за мету виконання оптимізації режиму роботи мережі за критерієм мінімуму втрат (споживання) електроенергії в СЕП, що суттєво знижує його ефективність.

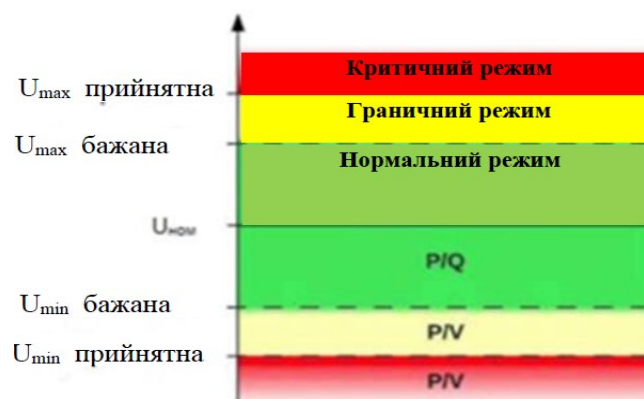


Рисунок 1.1 – Регулювання напруги. Пороги регулювання



Рисунок 1.2 – Загальна схема активно-адаптивного регулювання, запропонована G. Ramі

Olivier Richardot у своїй дисертації [10] запропонував схему координованого регулювання напруги з використанням децентралізованої генерації (D-RCT). Принцип регулювання напруги у цій системі полягає у регулюванні реактивної потужності. Це регулювання детерміновано алгоритмом оптимізації, цілі якого полягають у наступному:

- підтримка напруги в «пілотних» вузлах. Основне завдання при регулюванні за цією системою – визначити «пілотні» вузли, в яких напруга має підтримуватись у певних межах. У роботі запропоновано алгоритм мінімізації кількості "пілотних" вузлів;

- управління реактивною потужністю. У роботі запропоновано методика зниження відхилення генерованої реактивної потужності між об'єктами розподіленої генерації;

- підтримка напруги на затискачах об'єктів малої генерації. Однак у рамках промислового підприємства застосування методу з «пілотними» вузлами у системоутворюючій мережі неможливе через відсутність впливу промислових підприємств на Системного оператора чи енергопостачальну організацію. До завдань Системного оператора не входить вирішення проблеми оптимізації

режиму промислових підприємств, а енергопостачальній організації зниження втрат (споживання) активної потужності споживачів не вигідне. Схема системи D-RCT представлена на рис. 1.3.



Рис. 1.3 – Схема регулювання D-RCT

Розглянуті в зарубіжних роботах системи регулювання відповідають концепції VVC (Volt VAr Control «Контроль напруги, реактивної потужності»), що передбачає використання існуючих у мережі засобів регулювання напруги та реактивної потужності з метою зниження втрат електроенергії та забезпечення нормативного рівня напруги. В даний час ця концепція є найбільш ефективною для реалізації оптимального регулювання напруги у СЕП [11]. Слід зазначити, що у розглянутих роботах немає системи регулювання, яка дозволяє врахувати наявність не дискретних джерел реактивної потужності (синхронних машин), батарей статичних конденсаторів (БСК), трансформаторів з УРПН та використовувати їх одночасно для регулювання напруги з метою зниження втрат (споживання) активної енергії.

1.2. Завдання регулювання напруги в системах електропостачання промислових підприємств

У магістерській роботі як об'єкт дослідження розглядається електротехнічний комплекс промислових підприємства (наприкладі вугільних шахт), які є одними з основних споживачів електричної енергії. Електротехнічний комплекс промислових підприємств (вугільних шахт) містить

у своєму складі головну понижувальну підстанцію (ГПП), розподільні пункти (РП) та розподільні електричні мережі 6-10 кВ, цехові трансформаторні підстанції ЦТП. Від ЦТП через цехову електричну мережу відбувається живлення технологічного обладнання з використанням силових пунктів, шинопроводів, силових шаф. На шахтах до складу електротехнічних комплексів окрім ЦТП входять пересувні підземні дільничні підстанції (ПУПП), до яких приєднане технологічне обладнання.

Технологічне обладнання комплексу вугільних шахт поділяється на очисне та прохідницьке обладнання, обладнання загальної та місцевої вентиляції, обладнання шахтного транспорту та поверхневого технологічного комплексу; стаціонарне обладнання. ЦТП або ПУПП приєднані до ГПП через розподільні електричні мережі підприємства напругою 6-10 кВ. Розподільні лінії електротехнічного комплексу є радіально-магістральними, характеризуються значною протяжністю та розгалуженістю.

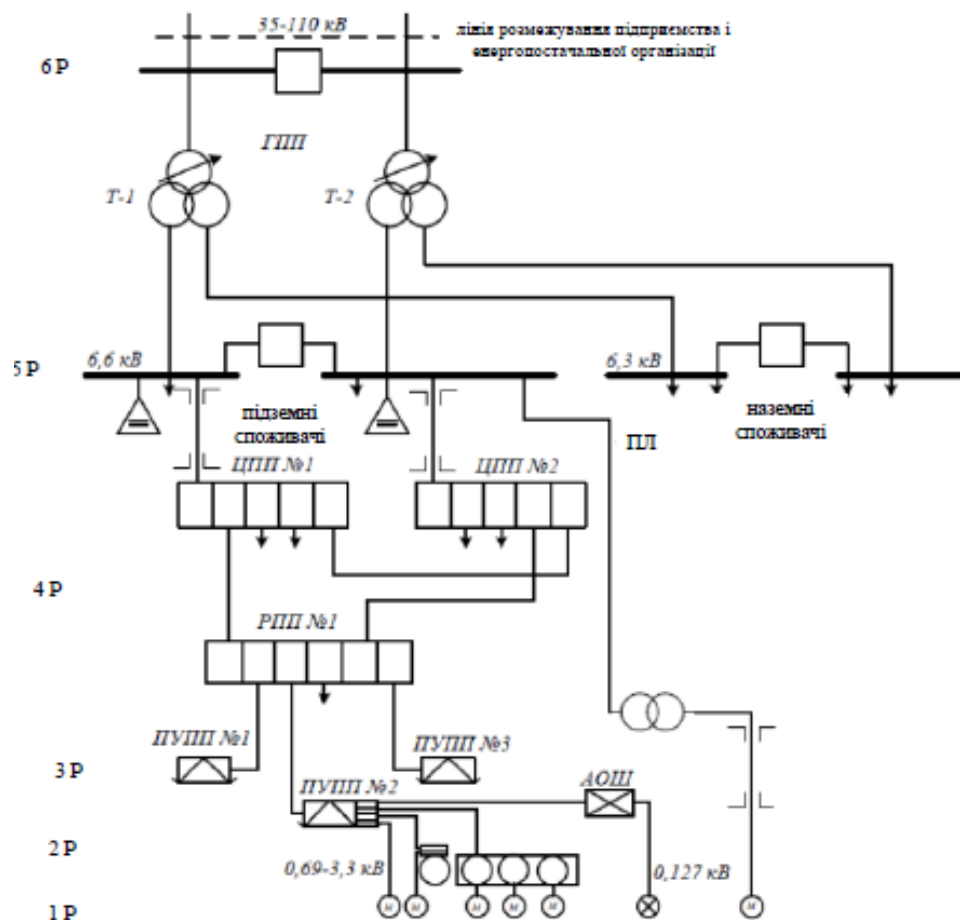


Рис. 1.4 – Структура СЕП вугільної шахти

Відповідно до ієрархічної схеми електропостачання [12] система електропостачання (СЕП) вугільної шахти включає кілька рівнів (рис. 1.4):

- перший рівень (1Р) - окремі електроприймачі: очисні комбайни, вибійні конвеєри, перевантажувачі, дробарки, насосні станції лави, стрічковий конвеєр конвеєрного штреку, освітлювальні установки та ін.

- другий рівень (2Р) – силові розподільні пункти, магнітні станції, магнітні пускачі;

- третій рівень (3Р) – шини низької напруги ЦТП або ПУПП;

– четвертий рівень (4Р) – шини високої напруги ЦТП, ПУПП або РП і розподільні підземні пунктів (РПП);

п'ятий рівень (5Р) – шини НН ГПП;

шостий рівень (6УР) - межа розділу балансової належності між вугільною шахтою та енергопостачальною організацією.

Регулювання напруги на вищевказаних рівнях СЕП промислового підприємства і вугільної шахти проводиться з метою вирішення наступних завдань:

- забезпечення нормативного рівня напруги. Для нормальної роботи будь-якого електротехнічного пристрою важливо забезпечити необхідний рівень напруги на затискачі електроприймачів. Наразі вимоги до якості електричної енергії встановлюються ДСТУ EN 50160-2014. Згідно з цим стандартом, позитивні та негативні відхилення напруги в точці передачі електричної енергії (на рівні 6УР) не повинні перевищувати 10 % номінального або узгодженого значення напруги. Енергопостачальна організація відповідає тільки за рівень напруги в точці передачі електроенергії. Тому в СЕП промислового підприємства мають бути забезпечені умови, за яких відхилення напруги на затискачах електроприймачів не перевищують допустимих значень за умови дотримання нормативних вимог до рівня напруги у точці передачі електричної енергії. При цьому допустимі значення напруги на затискачах електродвигунів

нормуються ГОСТ 13109-97, який виділяє дві допустимі зони роботи електродвигуна: зона А ($\pm 5\%$ номінальної напруги), зона Б ($\pm 10\%$ номінальної напруги);

- забезпечення мінімуму втрат (споживання) електроенергії в мережі промислового підприємства (шахти). Вирішення цього завдання передбачає управління напругою в СЕП таким чином, щоб під час виконання завдання забезпечення нормативного рівня напруги знизити рівень споживання (втрат) активної потужності на межі розділу з енергопостачальною організацією і цим забезпечити зниження витрат за придбання електроенергії.

Як показують теоретичні та практичні дослідження, проведені в Європі, США та інших країнах [13-15] у середньому, при зниженні напруги на 1% середнє зниження споживання електроенергії склало 0,76% для промислових підприємств. При цьому зниження напруги на 10% призводить до зменшення споживання електроенергії на 10-30% і практично не впливає на технологічний процес, якщо напруга у найбільш віддалених електроприймачів в період максимуму навантаження не нижче мінімально допустимої. Аналогічні результати інших підприємств і регіонів викладено в [15-16]. Значний вплив напруги на рівень споживання електроенергії багато в чому викликано наявністю протяжних розподільних мереж та значної кількості недовантажених трансформаторів та асинхронних двигунів [17]. Структура електротехнічного комплексу, склад навантажень та характерні особливості технологічного процесу промислового підприємства формують особливі вимоги до завдань забезпечення нормативного рівня напруги та мінімуму втрат (споживання) електроенергії у розподільній і цеховій мережі підприємства. Невиконання завдання забезпечення нормативного рівня напруги спричиняє відхилення показників якості електроенергії від допустимих значень та створює несприятливі умови експлуатації, що може призвести до порушення електропостачання та, як наслідок, суттєвих економічних збитків. Невиконання завдання забезпечення мінімуму втрат (споживання) електроенергії призводить до існування в СЕП неоптимальних та неекономічних режимів, зростання

споживання електроенергії та, як наслідок, зростання електроенергетичної складової собівартості виробленої продукції.

Для оцінки ступеня виконання завдань регулювання потрібно провести аналіз зміни рівня напруги та роботи пристроїв регулювання напруги у СЕП промислового підприємства і вугільної шахти.

1.3. Аналіз зміни рівня напруги та споживання електричної енергії в системах електропостачання промислових підприємств

Як об'єкт дослідження обрано СЕП вугільної шахти ДВАТ Шахта «Червоноградська». Схема зовнішнього електропостачання шахти, включає ПЛ 35 кВ, підключені до ПС 110 кВ, яка отримує живлення від транзитних ПЛ 110 кВ. Схема зовнішнього електропостачання шахти ДВАТ Шахта «Червоноградська» представлена на рис. 1.5.

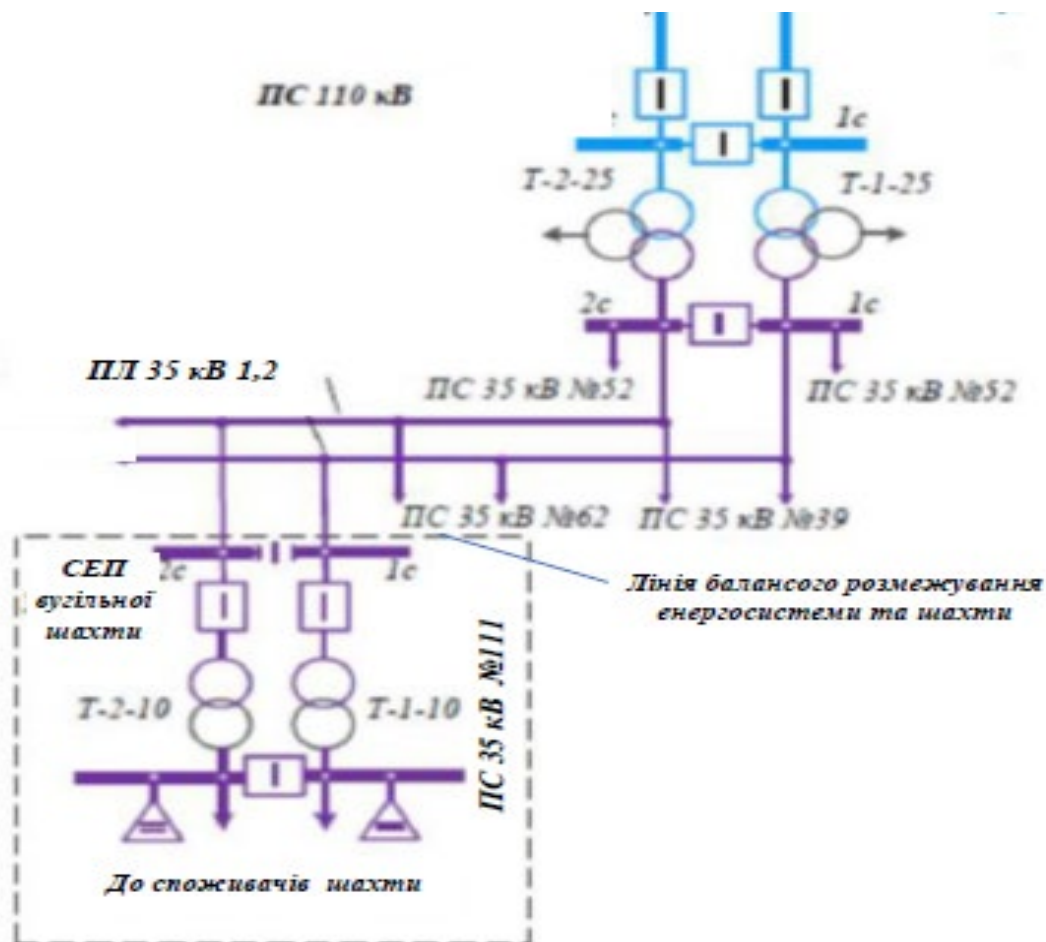


Рис. 1.5 – Схема зовнішнього електропостачання шахти ДВАТ Шахта «Червоноградська»

Схема внутрішнього електропостачання (рисунок 1.6) обмежена вводами пересувних дільничних підземних підстанцій (ПУПП), які отримують живлення від РПП №110 та РПП №112.

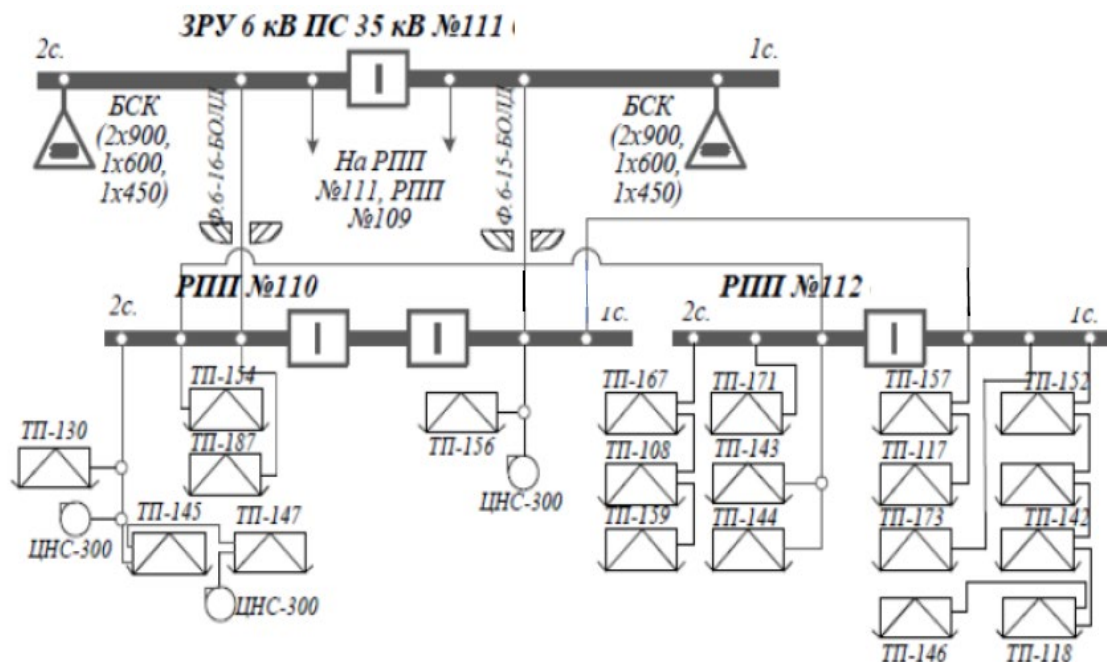


Рис. 1.6 – Схема внутрішнього електропостачання шахти ДВАТ Шахта «Червоноградська»

Для дослідження використовувалися дані телевимірювань про струмові навантаження, напругу, рівні споживання активної і реактивної потужності в СЕП 6 кВ і в мережі живлення 35-110 кВ. На рис. 1.7 наведено графіки середньогодинних електричних навантажень ПС 35 кВ №111, які були отримані в період зимового та літнього контрольних вимірювань електроенергії.

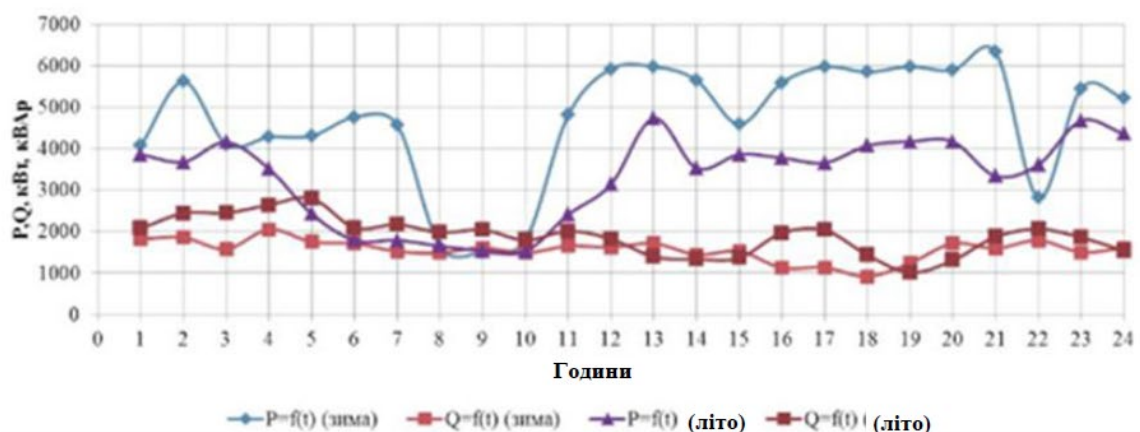


Рис. 1.7 – Графік електричних навантажень ПС 35 кВ №111

Рис.1.7 показує, що графіки електричних навантажень у літній та зимовий період мають схожий характер. Оскільки шахта функціонує цілодобово (4 робочі зміни) на графіку можна спостерігати локальні мінімуми навантаження 3-00,

9-00, 15-00, 22-00. Вранці проводиться зупинка очисного обладнання (ремонтна зміна), що призводить до значного зниження рівня споживання. Споживання реактивної потужності з мережі залишається практично незмінним, що викликано наявністю пристроїв компенсації реактивної потужності на шинах 6 кВ ГПП, які забезпечують підтримку $\text{tg}\phi$, узгодженого з енергопостачальною організацією.

На рис.1.8 представлений графік зміни рівня напруги з дискретизацією 15 хвилин на день зимового та літнього контрольних вимірів.

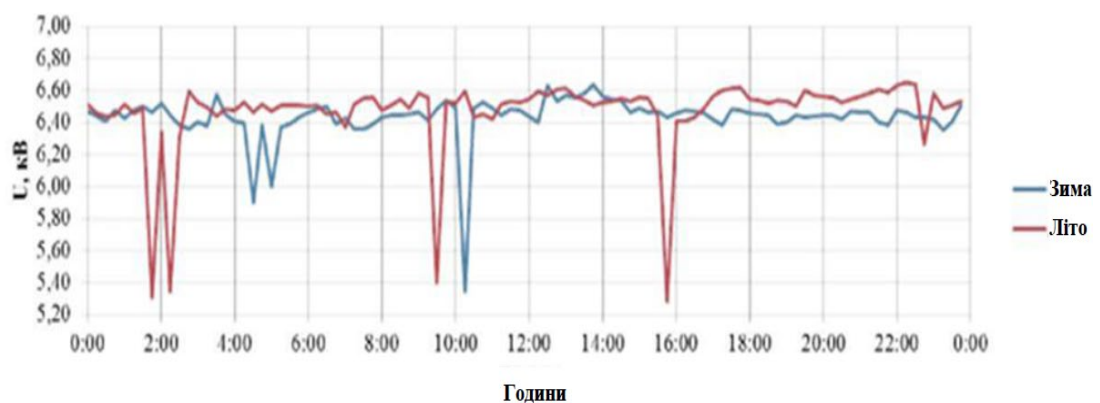


Рис. 1.8 – Графік зміни рівня напруги на секціях 6 кВ ПС №111

За видом графіків можна зробити висновок, що рівень напруги протягом доби коливається у одних межах у зимовий і літній період. Аналіз графіків зміни рівня напруги та споживання у СЕП виконувався з використанням методів математичної статистики на базі програмного комплексу STATISTICA 12 [18,19].

На першому етапі виконано аналіз процесу зміни рівня напруги на шинах 6-110 кВ. За результатами аналізу даних із використанням критерію Смирнова-Колмогорова встановлено, що напруга у вузлових точках мережі 6-110 кВ на 15-хвилинному інтервалі підпорядковується нормальному закону розподілу. Розподіл частот для напруг на стороні 6-35 кВ ПС 35 кВ №111 представлені на

рис. 1.9-1.10. Зазначимо, що у зазначені періоди були аварійні ситуації, і пов'язані з ними значні зниженням рівня напруги.

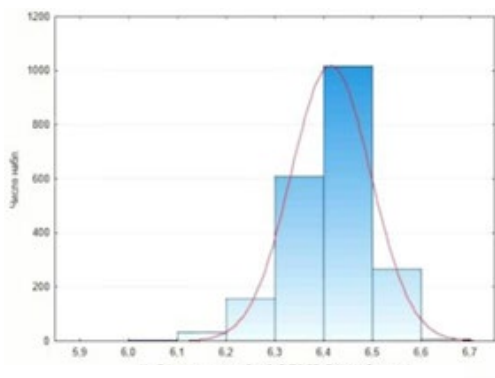


Рисунок 1.9 – Розподіл частоти напруги на 2 с. 6 кВ ПС 35 кВ №111

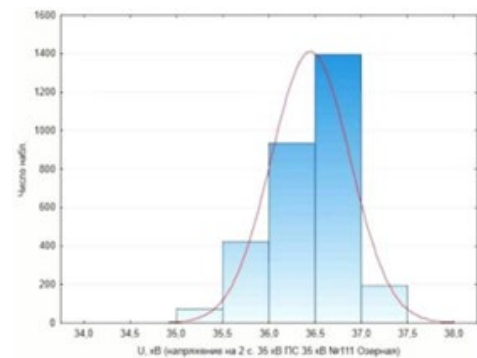


Рисунок 1.10 – Розподіл частот напруги на 2 с. 35 кВ ПС 35 кВ №111

Для нормального закону розподілу ймовірність того, що випадкова величина напруги відхилиться більш ніж на $3\sigma_U$ і не перевищує 0,25%. Результати статистичного аналізу зміни рівня напруги та струмового навантаження у мережі 6-110 кВ наведено у таблицях 1.1-1.2.

Таблиця 1.1 - Результати статистичного аналізу зміни рівня напруги СЕС вугільної шахти ДВАТ Шахта «Червоноградська» та мережі живлення 110 кВ

п/п	Найменування вузла	$U_{ср}$, кВ	σ_U , кВ	σ_U , %	Граничне фактичне відхилення напруги $\pm \Delta U/U_{ном}$, %
1	Шини 110 кВ ПС №111	112/113	1,219/1,55	$\pm 1,1/\pm 1,4$	-2,4 ÷ (+3,6)/ -2,2 ÷ (+3,7)
2	Шини 35 кВ ПС №111	36,2/37,1	0,4/0,51	$\pm 1,15/\pm 1,45$	-2,6 ÷ (+4,3)/ -2,8 ÷ (+4,1)
3	1 з.ш. 35 кВ ПС №111	37,92/37,21	0,43/0,581	$\pm 1,2/\pm 1,7$	-6,0 ÷ (+5,2)/ -5,7 ÷ (+4,8)
4	2 з.ш. 35 кВ ПС №111	36,45/35,9	0,43/0,476	$\pm 1,2/\pm 1,3$ 6	-5,8 ÷ (+4,5)/ -5,7 ÷ (+4,3)
5	1 з.ш. 6 кВ ПС №111	6,39/6,38	0,149/0,22	$\pm 2,36/\pm 3,5$	-16,9 ÷ (+6,2)/ -16,3 ÷ (+5,8)
6	2 з.ш. 35 кВ ПС №111	6,43/6,27	0,095/0,148	$\pm 1,5/\pm 2,4$	-15,7 ÷ (+5,6)/ -13,6 ÷ (+5,4)

Таблиця 1.2 - Результати статистичного аналізу зміни струмового навантаження вугільної шахти ДВАТ Шахта «Червоноградська»

№ п/п	Найменування вузла	$I_{\text{ср}}, \text{ A}$	$\sigma_I, \text{ A}$	$\sigma_I, \%$	$I_{\text{макс}}, \text{ A}$
1	Струмове навантаження 1 з.ш. 6 кВ ПС №111	129,3/257,83	60,1/123,3	±46,4/±47,8	581,5/658,4
2	Струмове навантаження 2 з.ш. 6 кВ ПС №111	158,2/198,97	57,8/77,44	±36,5/±39,1	814,1/823,4

Дані, що представлені в таблиць 1.1-1.2, дозволяють зробити такі висновки:

1. Стандартне відхилення напруги збільшується в міру наближення до електроприймачів із різко змінним навантаженням. При цьому стандартне відхилення напруги на 1 с. 6 кВ ПС №111 більше ніж на 2 с.ш. 6 кВ ПС №111. Це пов'язано з тим, що через 1 с. 6 кВ ПС №111 отримує живлення очисний комплекс 7LS20 потужністю 715 кВт, а через 2 с. 6 кВ ПС №111 отримує живлення очисний комплекс меншої потужності (4LS20 – 445 кВт). У зв'язку з цим, стандартне відхилення струмового навантаження 1 с. 6 кВ ПС №111 більша за стандартне відхилення струмового навантаження на 2 с.ш. 6 кВ ПС №111.

2. Рівень напруги в СЕП вугільної шахти змінюється у певних межах, при цьому діапазон одиночних відхилень напруги може досягати $-16,9 \div (+6,2)\%$. Це пов'язано з періодичними пусками та реверсами рухового навантаження вугільної шахти.

3. Реалізація зустрічного регулювання напруги ПС 110 кВ буде неефективною, оскільки нормальні відхилення напруги на шинах 35-110 кВ ПС 110 кВ не перевищують величини кроку ступеня регулювання УРПН Т-1(2)-25 ПС №111- 1,78%. Аналіз кореляції рівня напруги та рівня навантаження, прикладеної до відповідних вузлів, представлений у вигляді діаграм розсіювання. Діаграми розсіювання для значень навантаження ПС 110 кВ №111 та напруги на шинах 110 кВ ПС №111, а також для навантаження ПС 35 кВ №111 та напруги на шинах 6 кВ представлені на рис. 1.11-1.12.

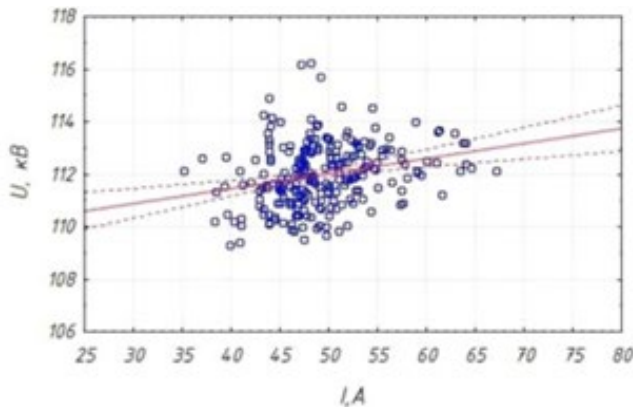


Рис. 1.11 – Діаграма розсіювання напруги на шинах 110 кВ ПС №111 та навантаження ПС №111

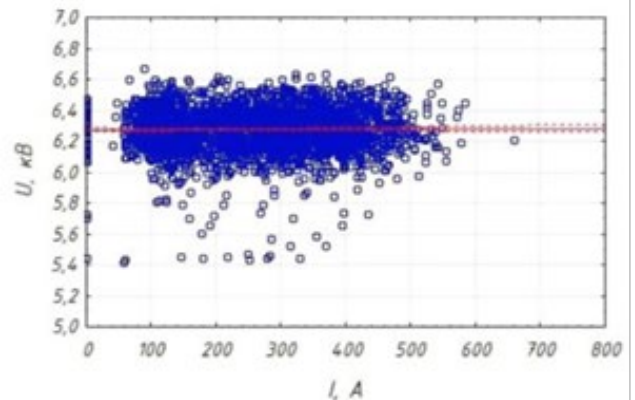


Рис. 1.12 – Діаграма розсіювання для напруги на шинах 6 кВ та навантаження ПС №111

Результати аналізу показують, що між рівнем напруги та навантаження ПС 110 кВ є слабкий кореляційний зв'язок (коефіцієнт детермінації $R^2=0,292$). Кореляційний зв'язок між рівнем напруги на шинах 6 кВ ПС №111 та навантаженням практично відсутня (коефіцієнт детермінації $R^2=0,012$), що свідчить про відсутність зустрічного регулювання, т.к. зустрічне регулювання передбачає збільшення рівня напруги зі збільшенням величини струмового навантаження [25]. Іншими словами, у СЕП вугільної шахти не виконується регулювання напруги в залежності від величини навантаження. У цьому параметри пристроїв регулювання залишаються незмінними. У зв'язку з цим виникає необхідність оптимального використання пристроїв регулювання напруги, що знаходяться в зоні відповідальності вугільної шахти. Відзначимо, що нормальне відхилення напруги на шинах 6 кВ ГПП досягає $\pm 3,5\% U_{ном}$, отже, можливо здійснювати регулювання напруги, використовуючи 4 ступені регулювання УРПН (при діапазоні регулювання $\pm 9 \times 1,78\%$).

Проведений аналіз післяаварійних режимів, пов'язаних із відключеннями у системоутворюючій мережі показує, що з урахуванням даних таблиці 1.1 зниження напруги в СЕП може досягати 20-25% [26]. При цьому можливе порушення роботи рухового навантаження вугільної шахти, у тому числі зупинка об'єктів життєзабезпечення (вентилятор головного провітрювання, водовідлив та ін.). Таким чином, завдання забезпечення нормативного рівня напруги на затискачах електроприймачів у нормальних та післяаварійних

режимах не завжди виконується. Зазначимо, що в умовах зростання енергоозброєності вугільних шахт, коливання напруги на затискачах електроприймачів будуть значнішими, що пов'язано з ширшим діапазоном зміни струмового навантаження.

1.4. Алгоритм регулювання напруги в СЕП промислового підприємства

Алгоритм регулювання напруги в електричній мережі СЕП промислового підприємства представлений на рис. 1.13

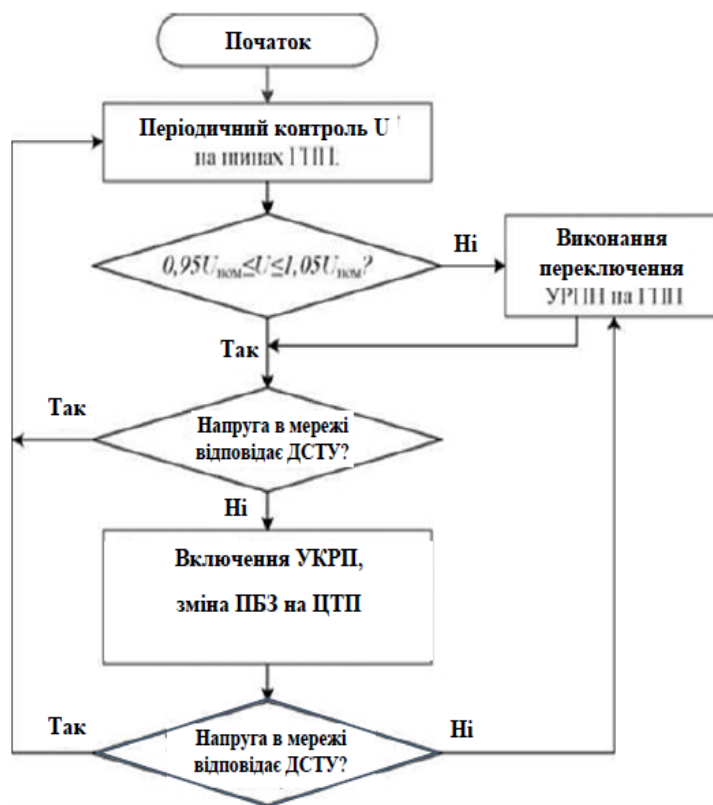


Рис. 1.13 –Алгоритм регулювання напруги у СЕП промислового підприємства

У СЕП промислових підприємств і вугільних шахт регулювання напруги виконується вручну шляхом зміни положення анцапфи УРПН на ГПП або шляхом (включення) відключення пристроїв компенсації реактивної потужності (УКРМ) [26]. На шинах 6 кВ ГПП виконується контроль напруги. Якщо напруга входить у діапазон $\pm 5\%$ від $U_{ном}$, і при цьому відбувається порушення технологічного процесу на окремих електроприймачах (зупинка очисного

комплексу, конвеєра тощо), тоді в першу чергу виконується регулювання рівня напруги з використанням місцевих засобів регулювання (ПБЗ, УКРМ).

У разі відхилення напруги на величину більш ніж $\pm 5\%$ від номінального значення приймається рішення про переключення рівня регулювання УРПН на ГПП. Перемикання може виконуватися вручному або дистанційному режимі. Якщо це дозволяє нормалізувати технологічний процес, то проводиться перемикання ступеня регулювання УРПН.

Зазначимо, що при виконанні регулювання напруги, зворотний зв'язок за напругою між електроприймачами та регуляторами здійснюється людиною, що позначається на швидкодії та правильності прийнятих рішень. У представленому алгоритмі використання відповідного пристрою регулювання чітко не визначено та практично обґрунтовано лише практичним досвідом. Також при регулюванні не враховується критерій мінімуму втрат активної потужності у СЕП. Виходячи з цього можна зробити висновок, що пристрої регулювання напруги в СЕП промислових підприємств і вугільних шахт використовуються нераціонально [26].

1.5. Особливості використання технічних засобів регулювання напруги на промислових підприємствах

Проведений аналіз нормативно-технічної літератури та принципових схем електропостачання промислових підприємств і вугільних шахт дозволив скласти структурну схему розміщення пристроїв регулювання напруги у СЕП промислових підприємств і вугільних шахт (рисунок 1.14).

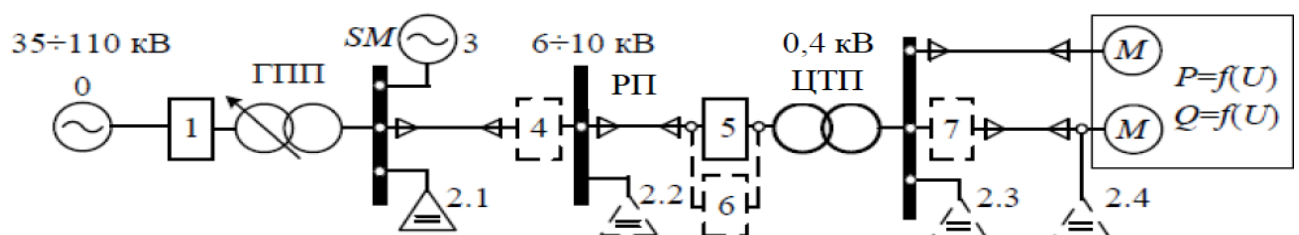


Рис. 1.14 – Структурна схема розміщення пристроїв регулювання напруги в СЕП промислових підприємств

1–УРПН із пристроями автоматичного регулювання напруги трансформаторів (АРНТ); 2.х – пристрої централізованої (2.1), групової (2.2 – 2.3) та індивідуальної компенсації реактивної потужності (2.4); 3 – синхронні машини; 4 – вольтододаткові трансформатори (ВДТ); 5 - пристрої ПБЗ; 6 – УРПН ПУПП; 7 – установки поздовжньої компенсації (УПК) та тиристорні регулятори напруги (ТРН).

Під номером 0 на рис. 1.14 зазначено точку приєднання вугільної шахти до мережі, графік зміни напруги в якій, задається енергопостачальною організацією з урахуванням режиму роботи системотворчої мережі 110-500 кВ.

Штриховими лініями відмічені пристрої регулювання напруги, які не зустрічаються у СЕП промислових підприємств і вугільних шахт, але можуть бути рекомендовані до застосування за наявності відповідних обґрунтувань [27].

Для виявлення особливостей регулювання напруги проведено аналіз роботи технічних засобів регулювання напруги в СЕП промислових підприємств і вугільних шахт.

Пристрої РПН трансформаторів На головних підстанціях напругою 35- 110 кВ використовуються, як правило, двохобмоткові трансформатори та трансформатори з розщепленими обмотками, оснащені УРПН. Принципи роботи УРПН докладно описані у [20-23]. Відповідно до п. 2.9.16 [20], а також п. 2.10.16 [21] УРПН комплектується пристроєм автоматичного регулювання напруги трансформатора (АРНТ), забезпеченим пристроєм для ручного та автоматичного керування уставкою напруги. УРПН повинен мати лічильник числа перемикань, що дозволяє оцінювати його залишковий ресурс та планувати поточний ремонт УРПН. Як показав аналіз, серед пристроїв АРНТ, що використовуються на ГПП, найпоширенішими є пристрої радянського виробництва (АРТ-1М, АРТ-1Н, БАУРПН, БАУРПН-2). На нових трансформаторах (16%) застосовуються сучасні мікропроцесорні пристрої АРНТ (KVGС 202, РНМ-1 та ін.). Дистанційне перемикання ступеня регулювання УРПН здійснюється зі щита управління за допомогою ключа управління [28].

Багаторічний досвід експлуатації [25] показав, що УРПН досить надійні і слід прагнути найбільш повного використання їх можливостей. Вже у 70-ті роки ХХ століття УРПН з автоматичним управлінням добре себе зарекомендували, і виведення УРПН з автоматичного режиму нині може бути обґрунтовано лише незадовільним станом УРПН за результатами діагностики. Використання пристроїв АРНТ без попередньої діагностики УРПН може становити небезпеку. У процесі експлуатації УРПН можлива поява наступних дефектів: порушення герметичності між баком трансформатора та баком контактора, підгорання контактів через ослаблення контактного натискання та збільшення опору контактів. Застосування УРПН в автоматичному режимі на вугільних шахтах також може перешкоджати неправильній роботі пристроїв АРНТ за умов різко змінного навантаження. Таким чином, однією з особливостей регулювання напруги в СЕП промислових підприємств і вугільних шахт є використання УРПН в неавтоматичному режимі, що пов'язано з різними причинами: незадовільний експлуатаційний стан УРПН [27], відсутність у персоналу досвіду з налаштування пристрою АРНТ, нераціональність алгоритму роботи пристрою АРНТ, швидке зношування контактів, страх відмови УРПН. В останньому випадку УРПН може не використовуватися навіть у дистанційному режимі, що призводить до суттєвої затримки при виконанні заходів щодо регулювання напруги (перемикання УРПН займає 0,5-4 години) та унеможливорює оперативне регулювання напруги в аварійних та післяаварійних режимах. Варто зазначити, що експлуатація УРПН у фіксованому положенні веде до ушкоджень рухомих та нерухомих контактів внаслідок збільшення перехідного опору через утворення напівпровідної оксидної плівки на контактних поверхнях [28].

Батареї статичних конденсаторів (БСК). Регулювання рівня напруги у вузлах розподільної мережі не обмежується використанням УРПН із пристроями АРНТ. Батареї статичних конденсаторів (БСК), впливаючи на баланс реактивної потужності у точці його підключення, також призводять до зміни рівня напруги. Установка БСК поблизу споживачів реактивної потужності зменшує повну потужність навантаження цих споживачів. Це призводить до зміни балансу реактивної потужності і, як наслідок, зміни рівнів напруги в мережі.

У розподільних мережах промислових підприємств та вугільних шахт БСК, зазвичай, підключаються до шин 6 кВ ГПП (рис. 1.15).

З рис. 1.15 (а, б) видно, що частина реактивної складової потужності навантаження Q компенсується потужністю, що генерується БСК Q_k , що знижує реактивну потужність, що споживається з мережі. Отже, знижуються втрати напруги в елементах мережі, що живлять це навантаження.

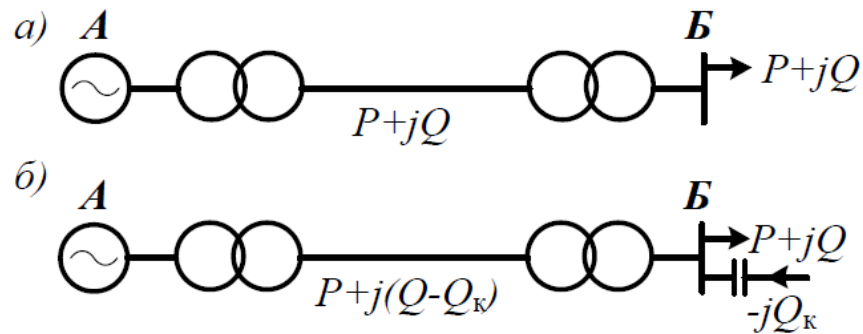


Рис. 1.15 - Схема приєднання БСК

За наявності компенсації втрати напруги визначаються за формулою:

$$\Delta U_k = \frac{P \cdot R + (Q - Q_k) \cdot X}{U_H}; \quad (1.1)$$

Внаслідок того, що реактивна потужність Q змінюється протягом доби, реактивна потужність, що генерується, повинна бути регульованою. Тому БСК складається, як правило, з декількох секцій конденсаторних батарей, що мають загальну систему управління. Управління такою установкою має на увазі підключення або відключення паралельних гілок (секцій), що відповідає збільшенню або зменшенню сумарної реактивної потужності БСК. За результатами аналізу використання БСК у СЕП промислових підприємств і вугільних шахт було виявлено, що автоматичне управління БСК виконується лише за критерієм забезпечення нормативного $\text{tg}\phi$ [26]. Тому при зниженні напруги нижче за допустимий рівень і при забезпеченні необхідного $\text{tg}\phi$, автоматичного включення БСК не відбувається. Оперативному персоналу головної знижувальної підстанції доводиться вручну виконувати включення ступенів БСК, що при зміні рівня напруги в мережі живлення може призвести до

різкого стрибка напруги на шинах 6 кВ ГПП. При цьому навіть у разі використання БСК на шинах підстанції в автоматичному режимі за критерієм підтримки певної напруги, ефект регулювання буде незначним, оскільки втрати напруги у шахтній мережі залишаться практично незмінними.

Пристрої ПБЗ. Принцип роботи пристроїв ПБЗ докладно описаний [23, 25]. Залежно від потужності, напруги та схеми регулювальних відгалужень обмоток в трансформаторах застосовують різні за конструкцією перемикаючі пристрої ПБЗ. У СЕП промислових підприємств і вугільних шахт пристрої ПБЗ використовуються на ЦТП і пересувних підземних дільничних підстанціях ПУПП. Число ступенів регулювання становить $\pm 2 \times 2,5\%$. У процесі зміни навантаження ЦТП і переміщення енергопоїзда положення ступеня регулювання пристрою ПБЗ може змінюватись для забезпечення нормативного рівня напруги. При цьому перемикання ПБЗ проводиться при відключеному трансформаторі і може тривати до 4 годин.

Синхронні двигуни. Підвищення напруги на затискачах СД призводить до зниження його потужності внаслідок збільшення реактивної складової холостого ходу двигуна [30]. Реактивна потужність Q_{pc} і втрати активної потужності ΔP є функціями коефіцієнта m завантаження статора синхронного двигуна (СД) і напруги на його затисках:

$$Q_{pc} = f(m, U); \Delta P = (\psi, m, U), \quad (1.2)$$

де $m = P/P_H$ - відносна величина споживаної СД активної потужності; $\psi = Q/Q_n$ - відносна величина реактивної потужності, що генерується або споживається; U - відносна величина напруги на затискачах двигуна. Практично значення m можуть змінюватися від 0,05 (режим, близький до холостого ходу СД) до 1,1 і від - 0,6 (режим споживання реактивної потужності) до ψ_{pc} (відносна величина наявної реактивної потужності СД при розглянутих значеннях U і m) [31].

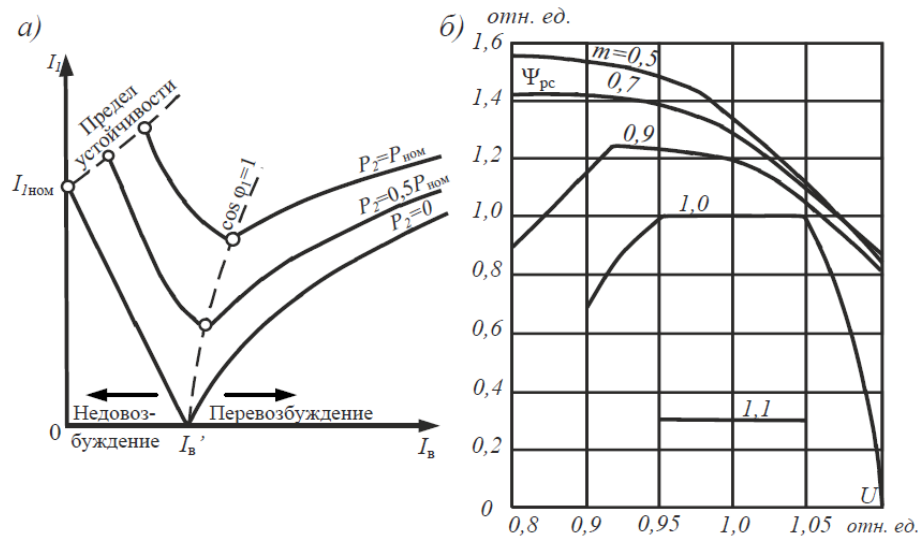


Рис. 1.16 - U-подібна характеристика (а) і залежність зміни відносної величини наявної реактивної потужності СД (б) від напруги на затискачах двигуна U

На рис. 1.16 а представлена U-подібна характеристика синхронної машини. З неї випливає, що змінюючи величину струму збудження, з'являється можливість регулювати коефіцієнт потужності двигуна. При цьому в режимі перезбудження СД видає реактивну потужність у мережу, а в режимі недозбудження споживає.

На рис. 1.16 б представлені залежності зміни відносної величини розташовується СД реактивної потужності від коефіцієнта завантаження двигуна активної потужності m при різних значеннях напруги на затискачах двигуна U . Таким чином, при сталості активної потужності СД, яка визначається його завантаженням, регулювати реактивну потужність ЦД можна зміною напруги та зміною струму збудження. Зазначимо, що в СЕП промислових підприємств і на вугільних шахтах синхронні машини не використовуються для компенсації реактивної потужності та регулювання напруги.

Синхронні генератори. Генератори працюють паралельно з мережею, та здійснюють видачу електричної енергії на шини 6 кВ ГПП, що живить СЕП вугільної шахти. Активна потужність P_r , що видається в мережу, визначається кількістю енергоносія, що подається на турбіну. Діапазон реактивної потужності, що видається, визначається навантажувальною діаграмою генератора (P-Q діаграма), а також значенням струму в обмотці збудження

генератора. Навантажувальна діаграма у загальному вигляді представлена на рис. 1.17. Навантажувальна діаграма характеризує собою діапазон реактивної потужності $[Q_{min}, Q_{max}]$, в якому може змінюватися генерована (споживана) реактивна потужність для підтримки заданого напруги на затискачах генератора.

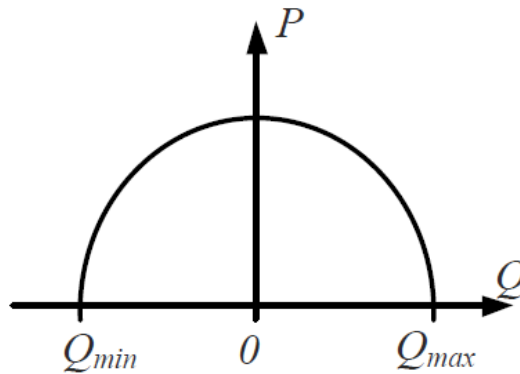


Рис. 1.17 - Навантажувальна діаграма генератора

Вплив генератора на рівень споживання активної та реактивної потужності у СЕП промислового підприємства визначається його місцем підключення. При підключенні генератора на шини 6 кВ ГПП його вплив на споживання активної та реактивної потужностей визначається видачею активної потужності в мережу, ступенем завантаження силових трансформаторів та його впливом на рівень напруги шахтної мережі. За рахунок плавного регулювання видачі реактивної потужності генератор дозволяє точно забезпечити рівень напруги на шинах ГПП, необхідний для мінімізації рівня споживання активної та реактивної потужностей.

Зазначимо, що особливістю СЕП промислових підприємств харчової та хімічної промисловості, а також вугільних шахт, яка відрізняє їх від інших споживачів, є наявність у них об'єктів життєзабезпечення, що належать до особливої групи I категорії з надійності електропостачання, які відповідно до вимог п. 1.2.19 ПУЕ повинні мати третє незалежне джерело живлення. Поряд з існуючими засобами регулювання напруги необхідно розглянути пристрої регулювання напруги, використання яких може бути рекомендовано за наявності основ та належного розвитку технологій.

Пристрої динамічної компенсації реактивної потужності (ДКРМ). Пристрої ДКРМ дозволяють забезпечити необхідну реактивну потужність під час запусків і самозапусків двигунів. За рахунок швидкодіючих тиристорних ключів пристрій ДКРМ генерує мережу необхідну реактивну потужність при провалах напруги, тим самим підтримуючи його необхідний рівень. В даний час ці пристрої набувають широкого поширення в СЕП промислових підприємств [35].

Вольтододаткові трансформатори (ВДТ). Принцип роботи ВДТ, що застосовуються у розподільчих мережах, докладно описаний у [36]. На відміну від УРПН трансформаторів ГПП ВДТ мають менший крок регулювання (0,625 %) і мають менший час перемикання (0,35 с.). В даний час номінальний струм ВДТ досягає до 500 А, що робить можливим їх застосування для здійснення групового регулювання напруги на ділянках СЕП потужних споживачів промислових підприємств і вугільних шахт.

Пристрої РПН трансформаторів ЦТП та ПВПП. Застосування пристрою РПН на трансформаторах ЦТП та ПУПП може бути обґрунтовано у разі неможливості забезпечення нормативного рівня напруги на затискачах електроприймачів при використанні засобів централізованого регулювання напруги [27]. Нині ЦТП і ПУПП із пристроями РПН не випускаються. При цьому в ПВПП використовуються сухі трансформатори, в яких можливе застосування тільки тиристорних УРПН. Існуючі тиристорні УРПН докладно розглянуті у [37-38]. В даний час ведуться роботи з інтеграції тиристорних УРПН у трансформатори розподільчих мереж 6-20 кВ [39]. Однак ці трансформатори ще не запуснені у серійне виробництво.

Установки поздовжньої компенсації (УПК). Принципи поздовжньої компенсації реактивної потужності докладно описані [40]. Головне призначення УПК – компенсація реактивного опору дільниць СЕП. Головною перевагою УПК є залежність їх регулюючого ефекту від величини навантаження, що робить їх практично ідеальними для використання як індивідуальний регулятор напруги для потужних вугледобувних комбайнів і конвеєрів [27]. Проте з появою

регульованого електроприводу ефект від застосування УПК значно знижується через зменшення діапазону коливань напруги. Зазначимо, що включення УПК призводить до збільшення струмів КЗ у всіх елементах мережі, що є небезпечним для конденсаторів УПК, оскільки призводить до зростання напруги на затискачах УПК у разі виникнення КЗ.

Тиристорні регулятори напруги (ТРН). Запитання індивідуального регулювання з використанням тиристорних регуляторів розглядалися у роботі Г.І. Івоніна [41]. У цій роботі були оцінені способи покращення якості напруги на затискачах потужних шахтних АД за умов протяжних низьковольтних мереж підземних ділянок. У якості основних способів покращення якості напруги розглядалися впровадження тиристорних регуляторів напруги та одноступінчасте автоматичне підвищення напруги до $1,2 \div 1,5 U_{ном}$ для забезпечення необхідних характеристик у пускових та перевантажувальних режимах. Однак конкретних конструкцій вищезгаданих пристроїв регулювання напруги (ДКРМ, ВДТ, ПУПП з тиристорними УРПН, УПК, ТРН), призначених для шахтних умов, на даний час не існує. Зазначимо, що рекомендації щодо застосування конкретних пристроїв місцевого регулювання напруги в даний час відсутні. При цьому, зазначається в [27], застосування будь-якого групового та індивідуального регулятора напруги на ділянці вугільної шахти потребує техніко-економічного обґрунтування.

1.6. Вплив відхилення напруги від номінального рівня на режим споживання промислового підприємства

Кожен електроприймач спроектований до роботи при номінальному напрузі і має забезпечувати нормальне функціонування при відхиленнях напруги від номінального на задану величину. При зміні напрузі в межах цього діапазону змінюються технічні показники та рівень споживання активної та реактивної потужності [42]. Залежність рівня споживання активної та реактивної потужності від напруги визначається статичною характеристикою навантаження за напругою. При малих відхиленнях напруги може бути охарактеризована регулюючим ефектом навантаження по напрузі. Регулюючим ефектом

навантаження по напрузі називають зміну споживаної потужності електроенергії у відсотках за зміни напруги однією відсоток [43].

Розглянемо вплив відхилення напруги на режим споживання окремих електроприймачів промислового підприємства і вугільної шахти.

Електроосвітлювальні прилади. На промислових підприємствах і вугільних шахтах застосовуються освітлювальні установки з лампами розжарювання, люмінесцентними (ЛСР) та світлодіодними лампами (СЗВ). Частка освітлювального навантаження на сучасних шахтах становить близько 1-3%. У зв'язку з цим вплив освітлювального навантаження на рівень споживання активної та реактивної потужності в СЕС вугільних шахт може не розглядатися.

Асинхронні двигуни (АД). На рис. 1.18 наведено Т-подібну схему заміщення АД [44]. Ця схема відображає опір статора та ротора двигуна, а також опір магнітного кола.

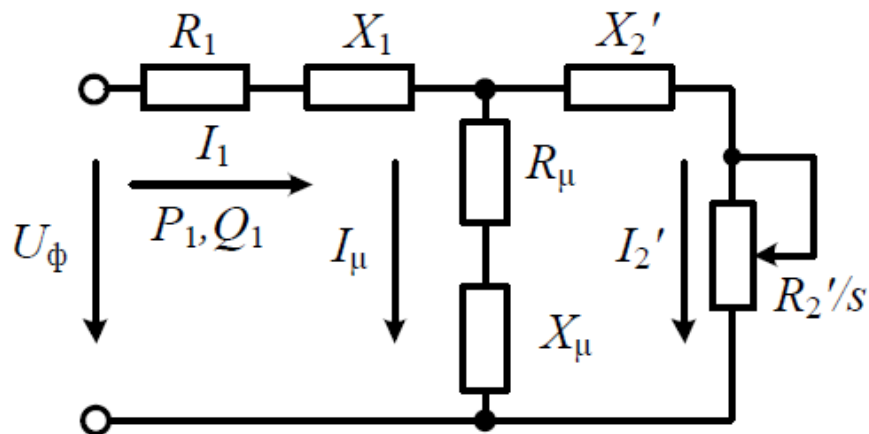


Рис. 1.18 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Схема заміщення показує, що з зміни напрузі змінюються струми в обмотках статора і ротора, і навіть опір магнітного кола. При цьому втрати, викликані проходженням цих струмів за опорами схеми заміщення, по-різному змінюються залежно від напруги. Втрати на намагнічування зі зростанням напруги зростають приблизно пропорційно квадрату напруги, що підводиться до двигуна. 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 па валу двигуна, залежність втрат відрізняється від квадратичної. Співвідношення втрат на намагнічування та електричних втрат в обмотках двигуна по-різному в залежності від завантаження двигуна. У сильно завантаженому двигуні переважають втрати в обмотках статора та ротора. У слабо завантаженого двигуна зростає питома вага втрат на намагнічування. У зв'язку з цим зміна напруги по-різному впливає втрати в двигуні залежно від коефіцієнта його завантаження. При слабо завантажених двигунах зі збільшенням напруги збільшуються сумарні втрати двигуна. Двигуни, що працюють з коефіцієнтом завантаження, близьким до одиниці, зі зростанням напруги зменшують споживану потужність [43]. Зміна напруги, що підводиться до двигунів, також впливає на механічні характеристики двигуна. На рис. 1.19 представлена залежність між електромагнітним моментом $M_{\text{эл}}$ та ковзанням s при $f = \text{const}$, $U = U_{\text{ном}}$. Тут же наведена залежність моменту, що обертає, робочого механізму $M_{\text{мех}}$ від його швидкості обертання. Точка 1 відповідає номінальному режиму роботи, при цьому ковзання двигуна відповідає номінальному ковзанню $s_{\text{ном}}$.

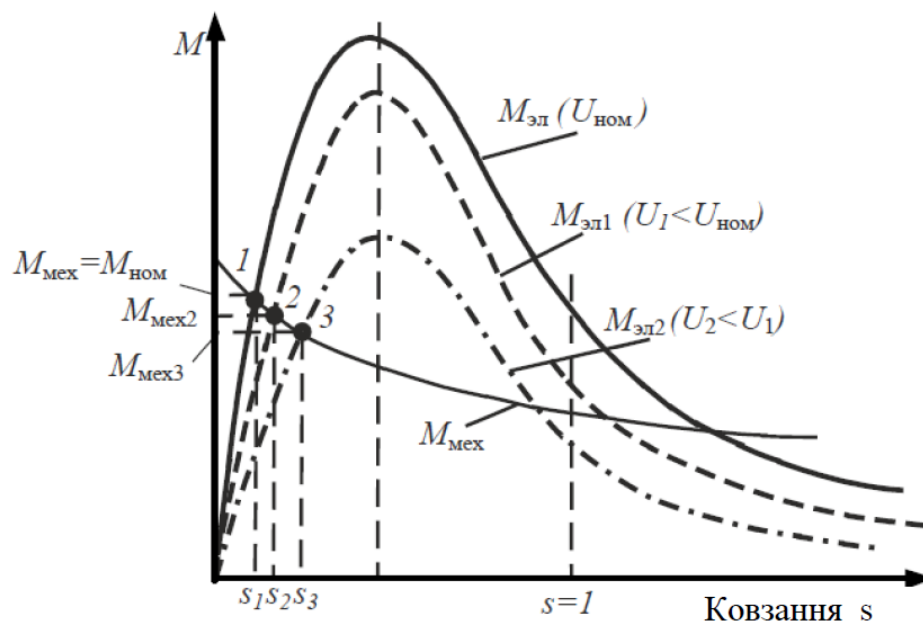


Рис. 1.19 – Вплив змін напруги на електромеханічні показники АД

При тривалому зниженні напруги, що підводиться до затискачів електродвигуна, механічна характеристика двигуна зміниться і може бути представлена залежністю моменту від ковзання $M_{\text{ел1}}=f(s)$. Характеристика $M_{\text{мех}}$ залишається незмінною. При переході на характеристику $M_{\text{ел1}}$ робочою точкою стає точка 2 з новим значенням робочого моменту $M_{\text{мех2}}$ та робочого ковзання s_2 . При зниженні напруги ковзання збільшилося і, отже, зменшилася частота обертання ротора двигуни. Залежність частоти обертання ротора двигуна від напруги можна відобразити такою формулою [34]:

$$n = n_c \left(1 - k_3 \frac{U_{\text{ном}}^2}{U^2} \cdot S_{\text{ном}} \right), \quad (1.3)$$

де n_c – синхронна частота обертання; k_3 - коефіцієнт завантаження двигуна; $U_{\text{ном}}$, $S_{\text{ном}}$ - номінальні значення напруги та ковзання відповідно. Потужність, що розвивається двигуном на валу, пропорційна частоті обертання двигуна і моменту, що розвивається:

$$P = M \cdot n \quad (1.4)$$

Отже, зміна потужності, що розвивається, при зміні напруги залежить від того, як при цьому змінюються частота обертання двигуна і момент опору. Таким чином, регулюючий ефект активного навантаження АД за напругою складається із залежностей втрат у двигуні від зміни напруги та корисної потужності на валу двигуна від напруги. Його величина змінюється від слабо негативних значень значення, близького до одиниці [43]. Реактивна потужність $Q_{\text{дв}}$, споживана з трифазним мережі АД, складається з реактивної потужності намагнічування сталі Q_0 і реактивної потужності розсіювання Q_v . При номінальній напрузі на затискачах двигуна і $t=1$ реактивна потужність дорівнює $Q_H = Q_{0н} + Q_{p.н.}$, потужності, що витрачається на намагнічування сталі при номінальній напрузі, до сумарної реактивної потужності, що споживається двигуном з мережі при номінальному навантаженні АД. Підвищення напруги на затисках АД призводить до збільшення споживаної ним реактивної потужності. Проведені дослідження щодо АД серії 4А показують, що споживання реактивної

потужності при підвищенні напруги на 1% зростає на 2÷4% при будь-яких коефіцієнтах завантаження [43]. При цьому форма статичних характеристик навантаження та значення регулюючих ефектів залежить від номінальної потужності двигуна, їх коефіцієнтів завантаження і моментно-швидкісних характеристик виробничих механізмів. АД є найпоширенішими електроприймачами на вугільних шахтах [45-46]. Орієнтовні дані про співвідношення навантажень електроприймачів на промислових підприємствах і підприємствах вугільної промисловості такі [45]: синхронні двигуни – 21%, асинхронні двигуни – 68% (6-10 кВ – 21%, до 6 кВ – 47%), освітлення – 5%, інше навантаження – 6%. Вони використовуються на очисних комплексах, насосних станціях, вентиляторах місцевого провітрювання, водовідливах та ін. Їх потужність постійно збільшується через зростання енергоозброєності очисних комплексів.

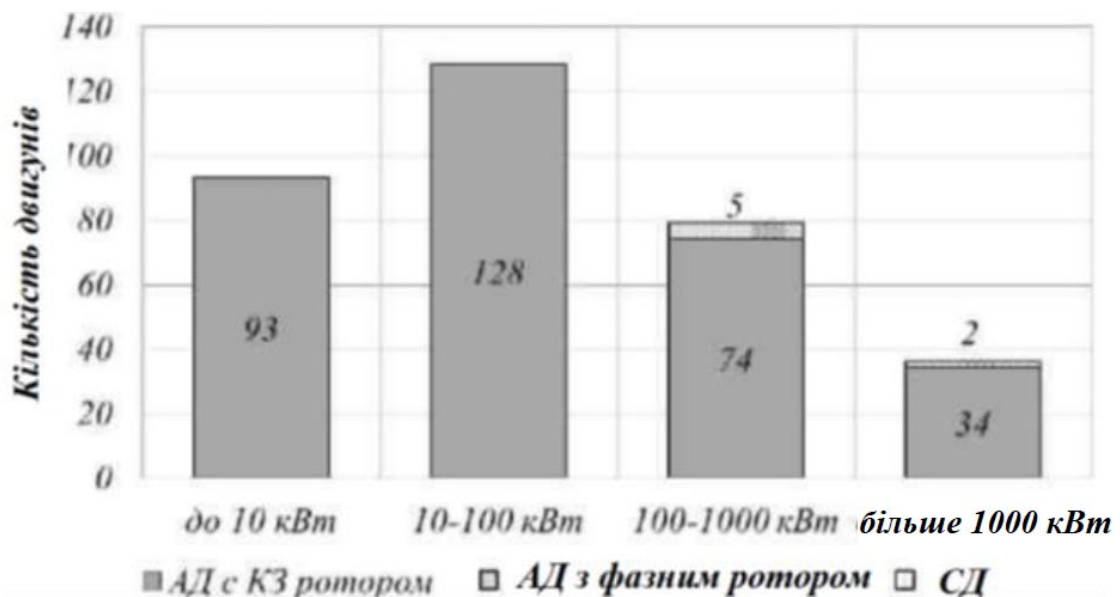


Рис. 1.20 – Дані про кількість двигунів різних типів та потужності на вугільній шахті

Дані про кількість двигунів різних типів на одній із вугільних шахт (рисунок 1.20) показують, що АД із короткозамкненим ротором переважають у кількісному відношенні над електродвигунами інших типів.

Таким чином, АД з короткозамкненим ротором є найбільш поширеними електроприймачами на вугільних шахтах і в цілому визначають рівень втрат та споживання електричної енергії. Зазначимо, що шахтні АД мають більш важкі

умови роботи та пуску порівняно з АД загальнопромислового значення. Це викликано їх більшою віддаленістю від центрів живлення та різко змінним режимом роботи. У зв'язку з цим, відрізняються їх максимальні та пускові моменти (M_{\max} та $M_{\text{пуск}}$). Наприклад, двигун загальнопромислового призначення марки АР250М6 ($P_{\text{ном}}=55$ кВт, $U_{\text{ном}}=380/660$ В) має $M_{\max}=2,2$ і $M_{\text{пуск}}=1,8$, тоді як двигун вибухозахищеного виконання марки 2ВРМ225М2 ($P_{\text{ном}}=55$ кВт, $U_{\text{ном}}=660$ В)) має $M_{\max} = 3,0$ і $M_{\text{пуск}} = 2,0$. У зв'язку з цим раніше отримані статичні характеристики навантаження АД загальнопромислового призначення за напругою не може бути використано для опису шахтних АД.

Втрати активної та реактивної потужності в пасивних елементах.

З виразу (1.5) для втрат активної потужності відомо, що одночасне збільшення всіх напруг на «n%», що призводить до зниження цих втрат у цій частині мережі на [47]:

$$\frac{\Delta P}{(1 + 0,01n)^2} \approx \Delta P(1 - 0,02n), \text{ кВт} \quad (1.5)$$

тобто. приблизно 2n%.

Фактично величина втрат активної та реактивної потужності на пасивних елементах мережі визначається їх опором, а також величиною їх струмового навантаження [48]. У разі врахування статичних характеристик величина активної та реактивної потужності, що споживається електроприймачами, залежатиме від рівня напруги на їх затискачах. При цьому рівень напруги визначатиметься втратами напруги в пасивних елементах. Отже, характер зміни струмового навантаження, втрат активної та реактивної потужності буде неоднозначним. Активні та індуктивні опори пасивних елементів СЕП можуть бути постійними величинами (кабельні лінії, струмообмежуючий реактор), змінними (силові трансформатори ГПП), умовно змінними (ПУПП).

Змінний характер опорів трансформаторів ГПП викликаний наявністю пристрою регулювання під навантаженням (РПН) перемикачів, що призводить до зміни числа витків обмотки ВН і, як наслідок, зміни індуктивного та

активного опорів. Умовно змінний характер опорів ПУПП викликаний тим, що в процесі переміщення ПУПП у виробленні виконуються перемикання пристрою ПБЗ, які призводять до зміни опору трансформатора.

Аналіз науково-технічної літератури [23, 42, 45] показує, що при розробці заходів щодо підвищення енергоефективності зміни опорів на пасивних елементах СЕП практично не враховуються. В умовах урахування статичних характеристик навантаження за напругою це може призвести до серйозних похибок під час моделювання режиму роботи СЕП вугільної шахти. Зокрема, це наголошується в роботі [49], де показано, що зміна рівня споживання активної та реактивної потужності може бути порівняно зі зміною рівня втрат.

Узагальнені статичні характеристики навантаження промислового підприємства (вугільної шахти) за напругою.

У вузлі навантаження зазвичай є приєднання різних електроприймачів, що відрізняються своїми статичними характеристиками. Узагальнена статична характеристика навантаження вузла за напругою залежить від статичних характеристик окремих електроприймачів та пайової участі навантаження кожної групи електроприймачів. У деяких наукових працях наводяться узагальнені статичні характеристики навантаження, одержані шляхом підсумовування статичних характеристик навантаження окремих електроприймачів. У роботі [50] для СЕП промислового підприємства було отримано статичні характеристики навантаження цехових підстанцій по напрузі при різних коефіцієнтах завантаження обладнання. Проведений аналіз отриманих статичних характеристик навантаження за напругою показує, що оптимальний рівень напруги на шинах підстанції живлення може відповідати будь-якому значенню в діапазоні $0,85-1,1U_{ном}$. Визначальними факторами є склад навантаження, завантаження електроприймачів і довжина ліній СЕП. У роботі [5] наводяться статичні характеристики навантаження по напрузі, отримані для вузлів навантаження, що включають різні групи електроприймачів: АД, СД, освітлення. При цьому показано, що раціональний рівень напруги може бути будь-яким у межах від $0,9$ до $1,1U_{ном}$.

Однак для вугільних шахт подібні узагальнені статичні характеристики навантаження по напрузі ще не були отримані. Отже, відсутнє розуміння того, який рівень напруги має підтримуватись у СЕП для забезпечення мінімізації рівня втрат електроенергії.

1.7. Висновки

1. Аналіз наукових праць у сфері розробки систем регулювання напруги показує, що у час відсутні системи регулювання напруги, що забезпечують оптимальну роботу пристроїв регулювання напруги в СЕП промислових підприємств і вугільних шахт. Отже, розробка системи оптимального регулювання напруги у СЕП промислових підприємств є актуальним науково-технічним завданням.

2. Оптимальне регулювання напруги в СЕП промислового підприємства і вугільної шахти вимагає виконання завдань забезпечення нормативного рівня напруги та мінімізації втрат електроенергії у шахтній мережі.

3. Аналіз змін рівня напруги у СЕП промислових підприємств і вугільної шахти показав, що діапазон одиночних відхилень напруги може досягати $-16,9 \div (+6,2)\%$. Це свідчить, що завдання підтримки нормативного рівня напруги на затискачах електроприймачів вугільної шахти не завжди виконується.

4. Аналіз використання технічних засобів регулювання напруги на промислових підприємствах і вугільних шахтах показав, що потенціал засобів регулювання напруги не реалізується повною мірою для виконання завдань регулювання напруги. Для реалізації їхнього потенціалу потрібна розробка системи оптимального регулювання напруги, що виконує завдання забезпечення нормативного рівня напруги та мінімізації втрат електроенергії.

5. При розробці алгоритму оптимального регулювання необхідно враховувати наявність синхронних машин, які в даний час практично не задіяні в регулюванні напрузі в СЕП промислових підприємств і вугільних шахт.

6. Встановлено, що перспективні засоби регулювання напруги (ДКРМ, ВДТ, ПУПП з тиристорними УРПН, КПК, ТРН) не реалізовані у вибухозахищеному

виконанні. В даний час для автоматичного регулювання напруги в СЕП промислових підприємств і вугільних шахт можуть бути використані виключно УРПН, БСК та синхронні машини.

7. Спираючись на раніше проведені дослідження, для реалізації оптимального регулювання напруги потрібне отримання статичних характеристик навантаження за напругою та регулюючих ефектів навантаження, які раніше не були отримані для деяких електроприймачів СЕП промислових підприємств і вугільної шахти. При цьому насамперед доцільно дослідити статичні характеристики навантаження за напругою для шахтних АД, які становлять близько 70% встановленої потужності електродвигунів, що використовуються на вугільних шахтах.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СПОЖИВАННЯ АКТИВНОЇ І РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ У ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД НАПРУГИ

2.1. Дослідження статичних характеристик та регулюючих ефектів навантаження за напругою асинхронних двигунів

Однією із задач системи регулювання напруги є забезпечення відхилень напруги в межах нормативних значень. При цьому згідно з ГОСТ 13109-97 відхилення напруги є кількісною характеристикою повільних змін напруги електроживлення (тривалістю більше 1 хвилини). Відхилення напруги визначаються за усередненими значеннями напруги в інтервалі часу 10 хвилин відповідно до вимог ДСТУ EN 50160:2014. Як зазначається в [51], процеси при повільних відхиленнях від стану завжди можуть розглядатися на основі статичних характеристик. Їх застосування також припустимо під час розгляду динамічних процесів [51]. Таким чином, в рамках системи регулювання, що розробляється, враховуючи, що при регулюванні напруги припустимо розглядати статичні режими роботи електроприймачів промислових підприємств (вугільних шахт), які характеризують їх статичні характеристики навантаження за напругою. При цьому статичні характеристики навантаження електроприймачів і втрат потужності пасивних елементах мережі допустимо

розглядати окремо з подальшим аналізом імітаційної моделі СЕП промислового підприємства (вугільної шахти).

2.1.1. Загальні відомості

Статичні характеристики активного та реактивного навантаження за напругою АД можуть бути отримані розрахунковим або експериментальним (метод пасивного чи активного експерименту) способом. Методи пасивного та активного експерименту дозволяють за даними вимірювань сформувавши регресійні залежності та визначити параметри статичних характеристик навантаження за напругою. Однак проведення пасивного експерименту не дозволяє отримати достатню кількість даних для отримання точних статичних характеристик навантаження, а проведення активного експерименту загрожує пошкодженням обладнання та порушенням технологічного процесу. У зв'язку з цим, надалі визначення статичних характеристик АД за напругою розглядається лише розрахунковий спосіб. При вирішенні задачі мінімізації рівня споживання активної потужності доцільно розглядати статичні характеристики АД за напругою в діапазоні $(0,9-1,1)U_{ном}$, оскільки він відповідає гранично допустимим відхиленням напруги, встановленим 13109-97. Враховуючи, що характер статичних характеристик навантаження за напругою в цьому діапазоні практично лінійний [43] для їх апроксимації достатньо використовувати поліном 1-го ступеня:

$$P(U) = P_n P^*(U) = P_n \left[a_0 + a_1 \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}} \right) \right]; \quad (2.1)$$

$$J Q(U) = Q_n Q^*(U) = Q_n \left[b_0 + b_1 \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}} \right) \right]; \quad (2-2)$$

де P_n і Q_n - активна та реактивна потужності АТ при номінальній напрузі; $P^*(U)$ та $Q^*(U)$ – статичні характеристики активного та реактивного навантаження за напругою у в. о. АД; $U_{ном}$ – номінальна напруга АД; a_0, a_1, b_0, b_1 – коефіцієнти полінома 1-го ступеня.

Регулюючі ефекти активного (α_1) та реактивного (β_1) навантаження АД за напругою визначаються за формулами:

$$\alpha_1 = \frac{dP}{dU}; \quad (2.3)$$

$$\beta_1 = \frac{dQ}{dU}; \quad (2.4)$$

де dP , dQ - зміна активного та реактивного навантаження, dU зміна рівня напруги в мережі.

2.1.2. Алгоритм визначення статичних характеристик навантаження асинхронних двигунів за напругою

При моделюванні АД в інженерних розрахунках для спрощення математичних операцій використовують Г-подібну схему заміщення (рисунок 2.1).

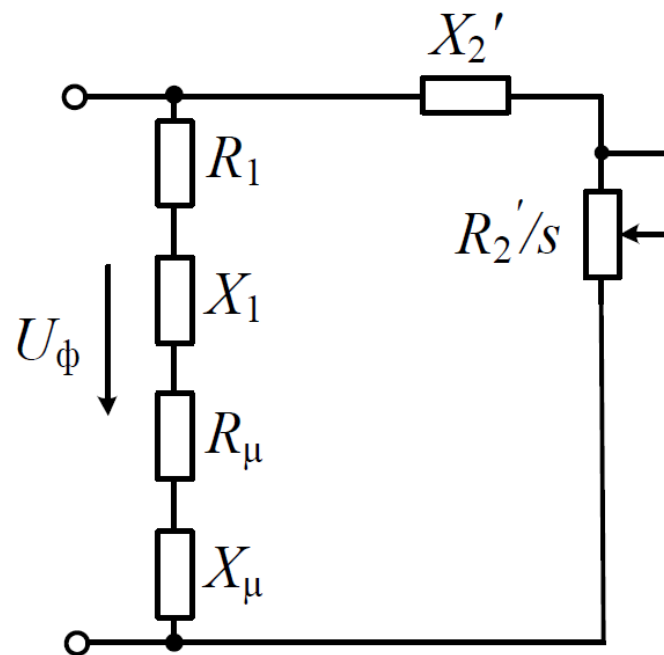


Рис. 2.1 – Г-подібна схема заміщення АД

При переході від Т-подібної схеми заміщення до Г-подібної виконується перенесення гілки намагнічування до місця прикладання напруги живлення з використанням коефіцієнта перетворення. При цьому при зміні навантаження не відбувається зміни струму намагнічування, отже, в номінальному режимі струм намагнічування виявляється завищеним.

Однак найбільш повно характеристики АД можна отримати лише з використанням Т-подібної схеми заміщення асинхронної машини (рисунок 1.17). У [52] зазначається, що перехід до Г-подібної схеми заміщення призводить до похибки 3-5% щодо сили струму ротора. При цьому порівняльний аналіз результатів розрахунку параметрів АД та його характеристик при використанні двох схем заміщення (Т-подібної та Г-подібної) показує, що при переході від Т-подібної схеми заміщення АД до Г-подібної у розрахунках струмів гілок АД виникає похибка до 5,8% і до 7,6% при розрахунку перетікань реактивних потужностей [52]. У роботі [49] в якості причини застосування Г-подібної схеми заміщення наводиться відсутність даних про опір ротора і гілки намагнічування. Однак, формули розрахунку параметрів Т-подібної схеми заміщення, представлені в [53-55] дозволяють визначити опір ротора та статора за каталожними даними. Таким чином, при дослідженні статичних характеристик навантаження напруги електроприймачів доцільно розглядати Т-подібну схему заміщення. Вищезазначений аналіз дозволив скласти алгоритм визначення статичних характеристик АД за напругою із застосуванням MATLAB Simulink (рис/ 2.2).

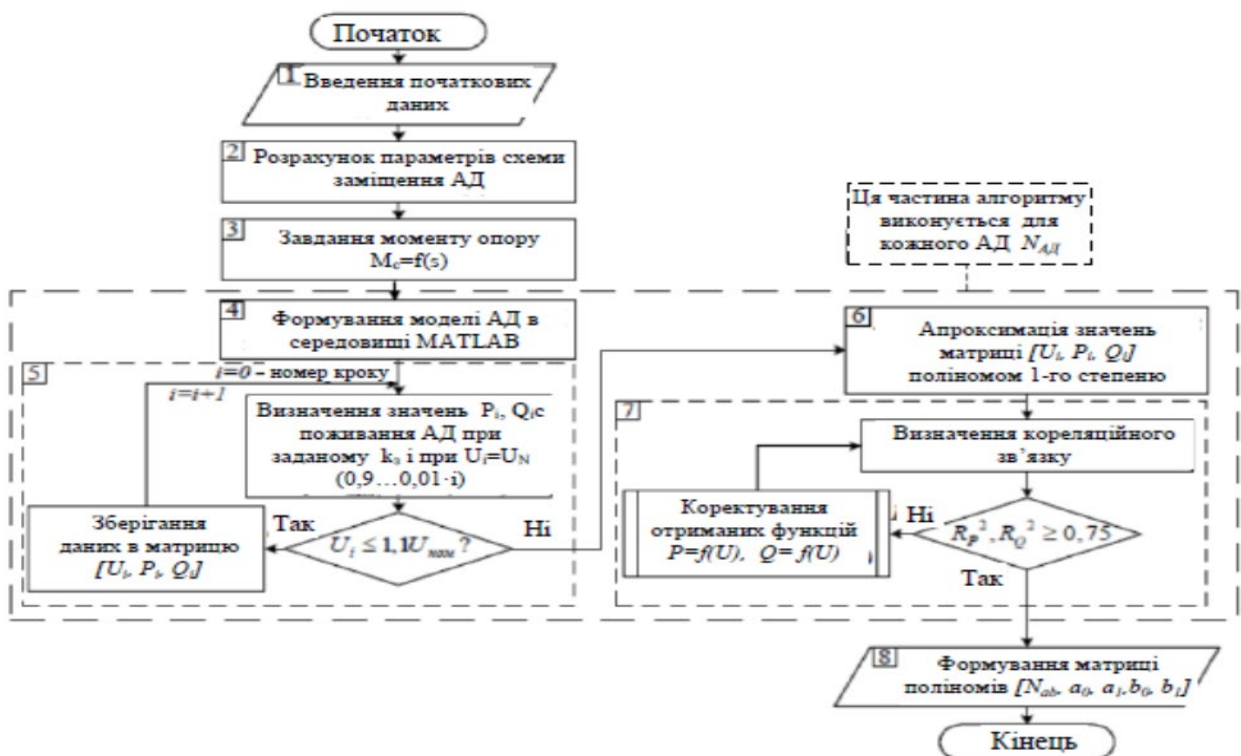


Рис. 2.2 – Алгоритм визначення параметрів статичних характеристик навантаження АТ за напругою з використанням MATLAB Simulink

Запропонований алгоритм включає наступні етапи:

1. Введення вихідних даних.

Вихідними даними для розрахунку параметрів машини є: f - частота мережі (Гц); P_H - номінальна потужність [Вт]; U_H - номінальна лінійна напруга (В); n_H - номінальна кутова частота обертання валу (про/хв); p - число пар полюсів; $\eta_{\text{ном}}$ - коефіцієнт корисної дії (в.о.); $\cos \varphi_H$ - коефіцієнт потужності (в.о.); I_H - номінальний струм статора (А); k_I - кратність пускового струму (в.о.); m_{max} - кратність максимального моменту (в.о.); m_H - кратність пускового моменту (в.о.); J - момент інерції (кг м²).

Вихідні дані моменту опору механізму (навантаження): $M_{\text{тр}}$ - початковий момент тертя ($s = 1$) (Н-м), k_3 - коефіцієнт завантаження двигуна (в.о.); α - показник ступеня, що характеризує механізм (в.о.). За наявності вихідних даних у рамках програми можливе врахування насичення сталі АД. Параметри кривої намагнічування АД вводяться у блоці параметрів АД «[i;v] (pu)» середовища MATLAB Simulink. Криві намагнічування $U=f(I_\mu)$ задаються з використанням вольтамперної характеристики двигуна чи довідкових даних.

2. Розрахунок параметрів схеми заміщення АД

Виконується з використанням формул, поданих у [54]. Процес визначення точного значення розрахункового коефіцієнта C реалізується шляхом розв'язання наступного рівняння:

$$0 = 1 + \frac{\sqrt{\left[\left(\frac{U_H}{\sqrt{3}} \right) / (k_I \cdot I_H) \right]^2 - \left(\frac{1}{2} \frac{U_H^2 \cdot (1 - s_H)}{C(1 + C/s_k) m_{\text{max}} (P_H + \Delta P_{\text{мех}})} + R_r \right)^2}}{4pf_1} - C, \\ L_s - \frac{\sqrt{\left[\left(\frac{U_H}{\sqrt{3}} \right) / (k_I \cdot I_H) \right]^2 - \left(\frac{1}{2} \frac{U_H^2 \cdot (1 - s_H)}{C(1 + C/s_k) m_{\text{max}} (P_H + \Delta P_{\text{мех}})} + R_r \right)^2}}{4pf_1}$$

де s_k - критичне ковзання (в.о.); $\Delta P_{\text{мех}}$ - механічні втрати (Вт) R_r - опір ротора (Ом); L_s - індуктивність статора (Гн). Рішення рівняння виконується з використанням вбудованої в MATLAB команди /zero для пошуку нулів функції

однієї змінної. При завершенні розрахунку у робоче середовище програми параметри схеми заміщення для кожного досліджуваного двигуна виводяться у вигляді матриці.

3. Завдання механічної характеристики моменту навантаження

Механічна характеристика моменту опору навантаження задається з використанням формули:

$$M_c = k_3 M_{\text{НОМ}} \left(M_{\text{ТР}} + (1 - M_{\text{ТР}}) \cdot \left(\frac{1 - s}{1 - s_{\text{НОМ}}} \right)^\alpha \right), \quad (2.6)$$

Показник ступеня α , що враховує зміну M_c при зміні швидкості обертання двигуна, визначається типом механізму.

4. Створення моделі АД в середовищі MATLAB Simulink.

Модель АД створюється за допомогою інструментарію MATLAB Simulink. У параметри моделі вводяться параметри, визначені п. 2.3. Зовнішній вигляд моделі представлений на рис. 2.3. Параметри моделі можуть коригуватися залежно від типу двигуна.

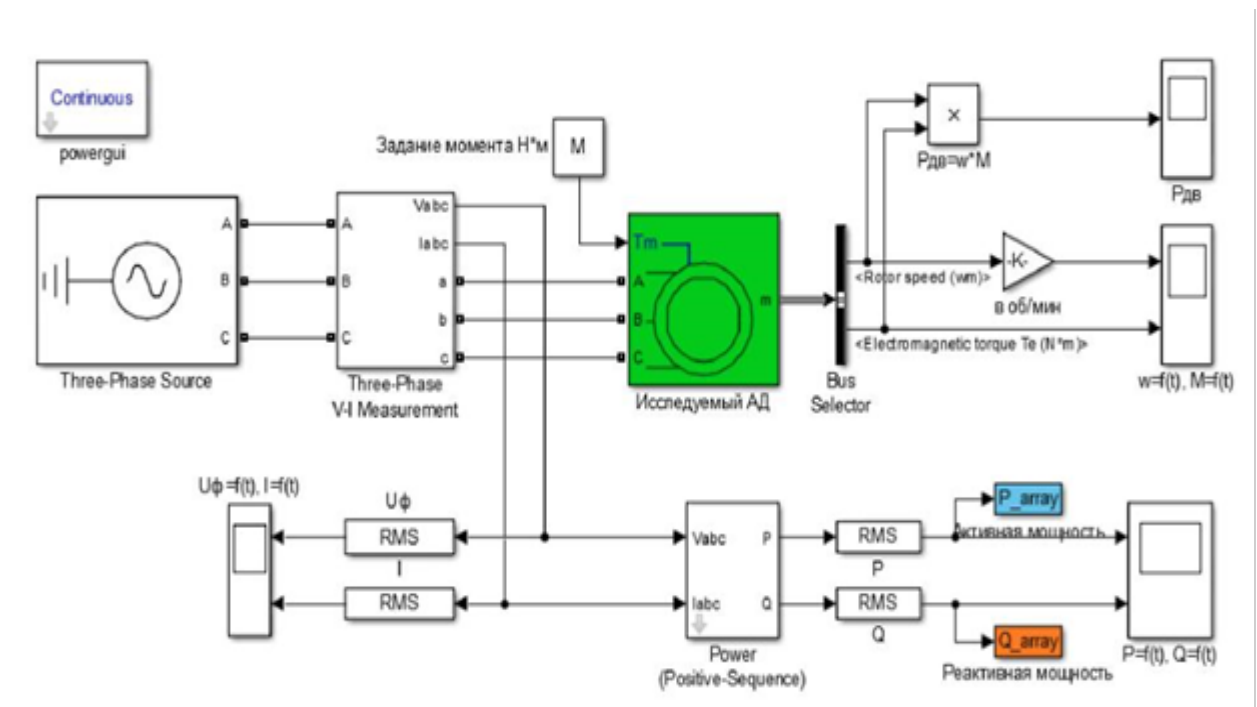


Рис. 2.3 – Модель визначення параметрів статичних характеристик АД за напругою в середовищі MATLAB Simulink

5. Визначення значень активної та реактивної потужності, що споживаються АД при різних рівнях напруги.

Для кожного досліджуваного двигуна виконується розрахунок електричного режиму до настання встановленого режиму. Розрахунок виконується для діапазону напруги $0,9-1,1U_{ном}$ (розрахунок виконується з дискретністю $0,01U_{ном}$). Отримані дані про зміну споживання активної та реактивної потужності (блоки P_array , Q_array) зберігаються у робочому середовищі MATLAB. Також виконується формування матриць $[U_i, P_i, Q_i]$ для кожного модельованого АД.

6. Апроксимація отриманих матриць $[U_i, P_i, Q_i]$ поліномом першої ступеня

Для апроксимації отриманих залежностей використовується вбудована функція `polyfit` MATLAB. В результаті для кожного АД формується поліном 1-го ступеня.

7. Оцінка кореляційного зв'язку

Для оцінки достовірності отриманих поліномів виконується визначення коефіцієнта детермінації:

$$R_p^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{20} (P_i - P_{схнi})^2}{\sum_{i=1}^{20} (P_i - \bar{P})^2}, \quad (2.7)$$

$$R_Q^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{20} (Q_i - Q_{схнi})^2}{\sum_{i=1}^{20} (Q_i - \bar{Q})^2}, \quad (2.8)$$

де P_i, Q_i — значення активної та реактивної потужностей, отримані в результаті моделювання; $P_{схнi}, Q_{схнi}$ — значення активної та реактивної потужності, отримані з відповідних поліномів 1-го ступеня, $\bar{P}; \bar{Q}$ — середні значення. Якщо $R_p^2, R_Q^2 \geq 0,75$, отримані функції мають сильну кореляційним зв'язком з даними, отриманими серед MATLAB Simulink [18]. В іншому випадку коригування отриманих функцій.

8. Отримання остаточних значень коефіцієнта полінома 1-го ступеня

Дані виводяться у вигляді матриці форми $[N_{ad}, a_1, a_0, b_1, b_0]$ (N_{ad} номер АД) і можуть бути надалі використані для формування бази даних для завдання рухового навантаження при розрахунку електричних режимів СЕП вугільної

шахти або для виконання наступного визначення еквівалентних статичних характеристик навантаження по напруги.

2.1.3. Задання кривих намагнічування асинхронних двигунів

У зв'язку з відсутністю даних про конструктивні параметри більшості АД доцільно прийняти до розгляду універсальну криву намагнічування, представлена в довіднику (рис. 2.4) [56].

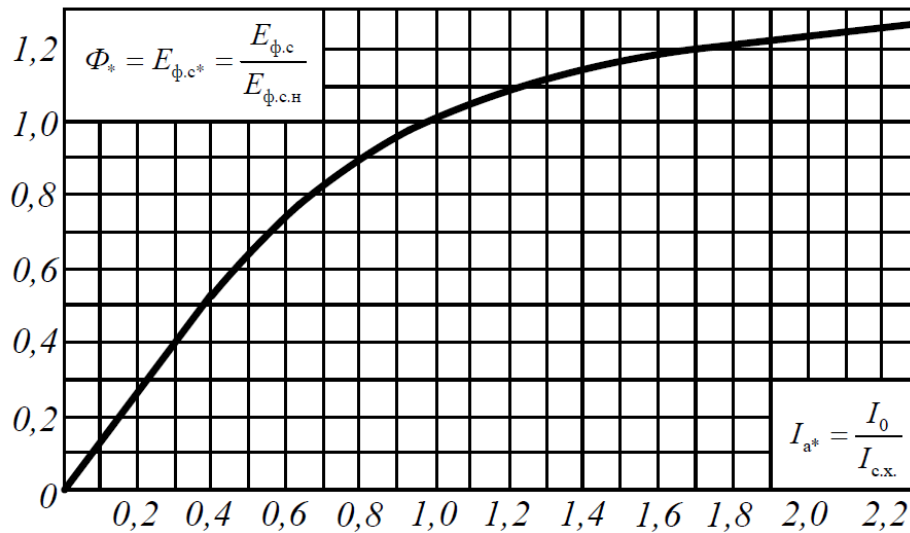


Рис. 2.4 – Універсальна крива намагнічування для АД із короткозамкненим ротором

Користуючись тим, що ЕРС АД при номінальній частоті мало відрізняється від напруги на затискачах двигуна навіть при великих струмах статора, магнітний потік прийнято вважати пропорційним напрузі. Таким чином, для заповнення поля "[i;v] (pu)" в середовищі MATLAB Simulink може бути використана крива намагнічування на рис. 2.4. Оскільки для двигунів різних потужностей використовуватиметься одна крива, координати точок кривої повинні бути представлені у відносних одиницях. Для завдання осі абсцис необхідно визначити струм холостого ходу двигуна при номінальній напрузі 1.0. Для цього використовується така формула [57]:

$$I_0 = I_H \left(\sin \varphi_{\text{НОМ}} - \frac{\eta_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}}}{2 \cdot m_{\text{макс}}} \right) \quad (2.9)$$

При необхідності вольт-амперні характеристики можуть бути отримані експериментальним або розрахунковим шляхом, виходячи з кривих намагнічування сталі (залежності $B=f(H)$) та конструктивних параметрів АД [58].

2.1.4. Аналіз статичних характеристик та регулюючих ефектів навантаження асинхронних двигунів за напругою

На базі запропонованого алгоритму було розроблено програму в середовищі MATLAB, що дозволяє виконувати розрахунок параметрів статичних характеристик навантаження АД за напругою з використанням програми визначені статичні характеристики за напругою при різних коефіцієнтах завантаження (k_3) для двигунів серії ВАО2 ($U_{\text{ном}}=1140$ В), що використовуються на насосних станціях. Приклад отриманих статичних характеристик навантаження напруги для АД ВАО2-280S4 представлений рис.2.5.

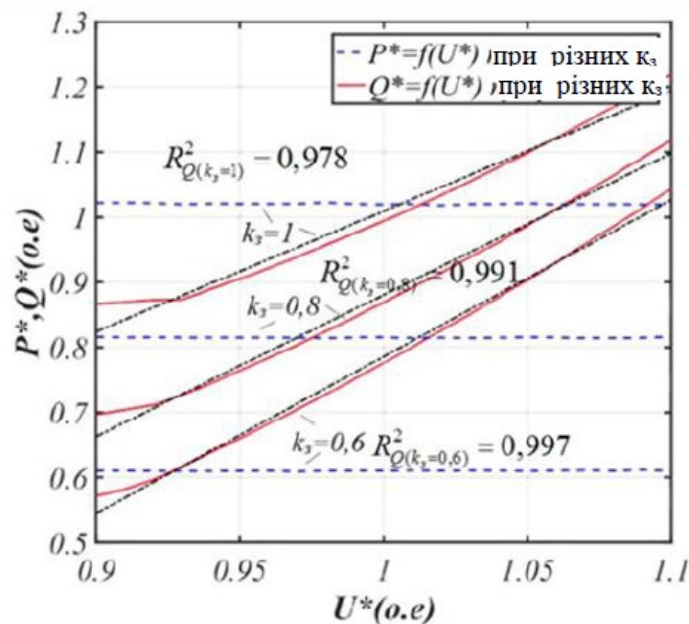


Рис. 2.5 – Статичні характеристики навантаження за напругою для АД ВАО2-280S4 для різних коефіцієнтів завантаження

Отримані статичні характеристики навантаження напруги для двигунів серії ВАО2 були апроксимовані. В результаті отримані коефіцієнти полінома 1-го ступеня, які наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Отримані значення коефіцієнтів полінома 1-го ступеня для двигунів насосної станції серії ВАО2 ($U_{ном} = 1140$ В)

Марка АД	P_n , кВт	k_3	Коефіцієнти полінома 1-го ступеня			
			за активною потужністю		за реактивною потужністю	
			a_i	d_o	b_i	b_o
ВАО2-280S4	132	1,0	-0,023	1,023	1,390	-0,366
		0,8	-0,009	0,809	1,784	-0,859
		0,6	0,003	0,597	2,042	-1,212
		0,4	0,005	0,395	2,221	-1,456
		0,2	0,007	0,193	2,330	-1,601
ВАО2-280M4	160	1,0	-0,022	1,023	1,376	-0,353
		0,8	-0,011	0,811	1,767	-0,846
		0,6	0,000	0,600	2,022	-1,198
		0,4	0,006	0,394	2,199	-1,440
		0,2	0,009	0,191	2,310	-1,586
ВАО2-315M4	250	1,0	-0,018	1,018	1,277	-0,254
		0,8	-0,011	0,811	1,650	-0,766
		0,6	-0,004	0,603	1,950	-1,135
		0,4	0,003	0,397	2,132	-1,388
		0,2	0,008	0,192	2,243	-1,538
ВАО2-315L4	315	1,0	-0,015	1,015	1,167	-0,144
		0,8	-0,011	0,811	1,614	-0,687
		0,6	-0,001	0,601	1,877	-1,074
		0,4	0,004	0,396	2,065	-1,336
		0,2	0,005	0,195	2,180	-1,493

Використовуючи дані таблиці 2.1 та формули (2.3 – 2.4), були побудовані графіки зміни регулюючого ефекту активного та реактивного навантаження АД за напругою залежно від їх завантаження, які представлені на рис.2.6.

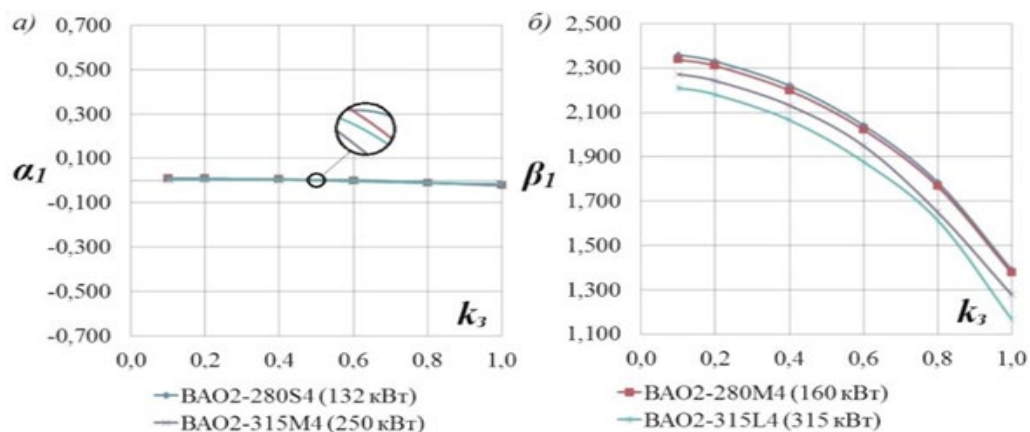


Рис. 2.6 – Регулюючі ефекти активного (а) та реактивного (б) навантаження за напругою АД серії ВАО2 (132-315 кВт) з $U_{ном} = 1140$ кВ для насосів

Дані, представлені в таблиці 2.1 та на рис. 2.6, показують, що зміна напруги на затискачах двигунів серії ВАО2 практично не призводить до зміни споживання активної потужності незалежно від коефіцієнта завантаження двигуна та його номінальної потужності ($\alpha_1 = -0,023 \div 0,009\%$). Тоді як при підвищенні напруги на 1% рівень споживання реактивної потужності зростає на 1,17-2,33% залежно від коефіцієнта завантаження двигуна та його номінальної потужності.

За допомогою програми також було визначено регулюючі ефекти активного та реактивного навантаження АД для водовідливних насосів, вентиляторів головного та місцевого провітрювання, стрічкових конвеєрів та очисних комплексів [59]. Отримані дані подано у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Регулюючі ефекти активного та реактивного навантаження по напруги для шахтних електродвигунів

Серія двигунів	$U_{ном}, \text{кВ}$	$P_{ном}, \text{кВт}$	p	a_i	P_i	Призначення
ВА02	0,66-1,14	132-315	1	-0,023-0,009	-1,17 -2,33	Насосні станції, стрічкові конвеєри
ВА07	6	200-1000	1	-0,009-0,008	0,95 -2,32	Вентилятори головного провітрювання, водовідливні насоси
			2	-0,013-0,004	1,02 -2,21	
			3	-0,008-0,007	1,20 - 2,40	
			4	-0,004-0,018	1,40 -2,55	
ВРМ	0,66-1,14	2,2-110	1	-0,083-0,028	1,46 - 2,60	Вентилятори місцевого провітрювання
АД очисних комплексів	1,14-3,3	160-850	1	-0,017-0,014	0,95-2,55	Приводи різання очисних комплексів

Проведений аналіз отриманих статичних характеристик та регулюючих ефектів навантаження шахтних АД за напругою показав:

1. Зміна напруги на 1% від номінального практично не призводить до зміни споживання активної потужності шахтовими електродвигунами, отже, вона може прийматися постійною.
2. Регулюючий ефект реактивного навантаження шахтних АД за напругою в межах 0,95 – 2,60%. При цьому його значення є обернено пропорційним коефіцієнту завантаження, номінальної потужності та кількості пар полюсів двигуна.
3. Отримані результати можуть бути використані при моделюванні СЕП вугільної шахти з метою визначення оптимального рівня напруги у вузлах мережі.

2.2. Дослідження еквівалентних статичних характеристик навантаження за напругою для ділянок системи електропостачання

2.2.1. Алгоритм визначення еквівалентних статичних характеристик навантаження за напругою у системі електропостачання

При визначенні еквівалентних статичних характеристик навантаження за напругою доцільно розглядати СЕП промислового підприємства (вугільної шахти) ієрархічно з її поділом на ряд підсистем та їх подальшим поданням у вигляді еквівалентних статичних характеристик. Це необхідно для подальшого визначення оптимальних рівнів напруги у вузлах СЕП та формування відповідного регулювання напруги. При еквівалентуванні особливий інтерес являють собою підсистеми СЕП з електроприймачами, на затискачах яких відсутня можливість контролю фактичного рівня напруги та споживання. Як таку підсистему в СЕП промислового підприємства (вугільної шахти) доцільно розглядати ділянку СЕП що включає ЦТП (ПУПП), радіальну низьковольтну розподільну мережу і приймачі цієї мережі (рис. 2.7).

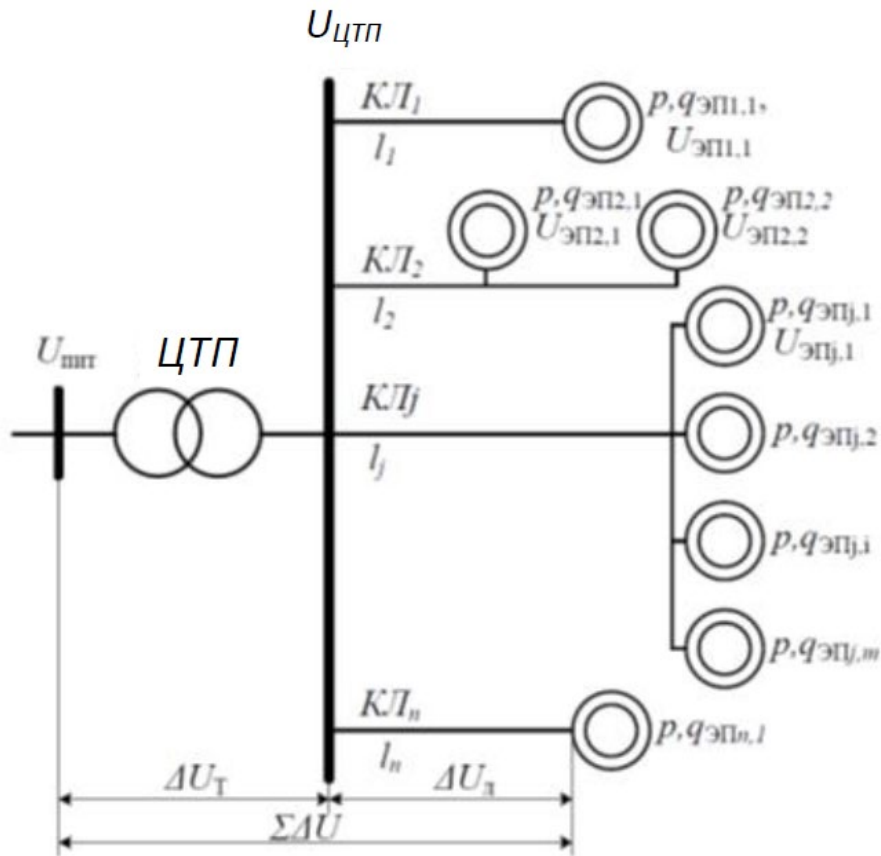


Рис.2.7 – Схема електропостачання споживачів цеху від ЦТП (ПУПП)

Для формування еквівалентних статичних характеристик навантаження необхідно сформувати схему заміщення підсистеми мережі (рис. 2.8).

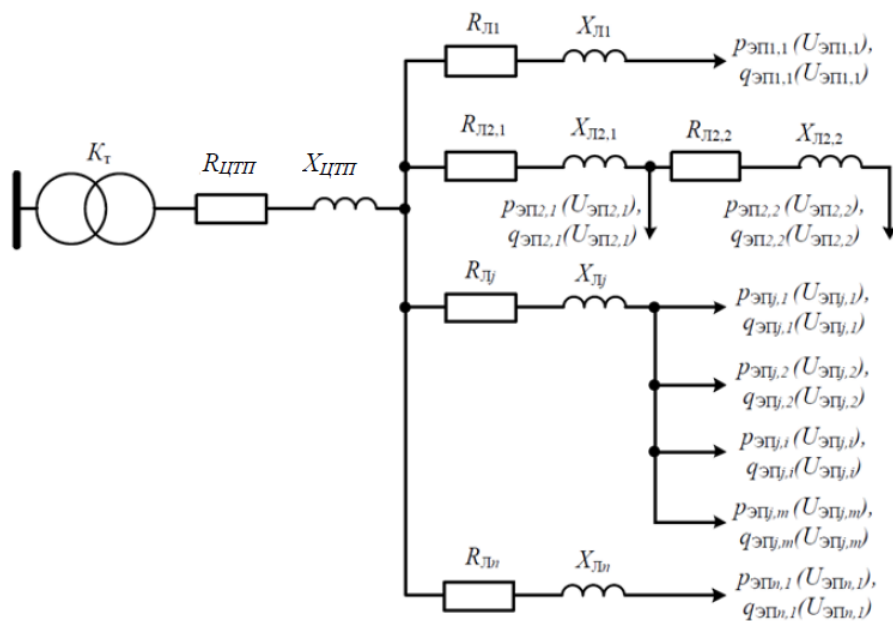


Рис. 2.8 – Схема заміщення

Відповідно до отриманої схеми заміщення потужностей, що надходить від джерела живлення, визначатиметься потужністю електроприймачів та втратами потужності в лініях та ПУПП.

Таким чином, активна та реактивна потужність, що споживається ЦТП (ПУПП) від мережі, може бути виражена за формулами:

$$P_{\text{ПУПП}} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m p_{\text{еп},i} (U_{\text{еп},j,i^*}) + \sum_{j=1}^n \Delta P_{\text{л},j} (U_{\text{ПУПП}^*}) + \Delta P_{\text{ПУПП}} (U_{\text{шт}^*}, k_3), \quad (2.10)$$

$$Q_{\text{ПУПП}} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m q_{\text{еп},i} (U_{\text{еп},j,i^*}) + \sum_{j=1}^n \Delta Q_{\text{л},j} (U_{\text{ПУПП}^*}) + \Delta Q_{\text{ПУПП}} (U_{\text{шт}^*}, k_3), \quad (2.11)$$

де $p_{\text{еп}}$, $q_{\text{еп}}$ - активна і реактивна потужність, споживана і-м електроприймачем, підключеним до j-ої лінії, $\Delta P_{\text{л},j}$, $\Delta Q_{\text{л},j}$ - втрати активної та реактивної потужності в j-й лінії, $\Delta P_{\text{ПУПП}}$, $\Delta Q_{\text{ПУПП}}$ - втрати активної та реактивної потужності в ПУПП, k_3 - коефіцієнт завантаження трансформатора ЦТП (ПУПП), n - кількість низьковольтних ліній, що відходять від ЦТП (ПУПП), m - кількість електроприймачів, підключених до однієї лінії.

Напруга у вузлах у відносних одиницях до номінальної $U_{\text{н}}$: $U_{\text{шт}^*}$ - джерела живлення, $U_{\text{ПУПП}^*}$ - на шинах ПУПП, $U_{\text{еп},j,i^*}$ - напруга на затискання /-ого електроприймача, підключеного ку-ой лінії. При використанні поліномів 1-го ступеня (2.6-2.7) формули (2.10-2.11) матимуть такий вигляд: (2.12)

$$P_{\text{ПУПП}} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m p_{\text{тех.еп},i} (a_0 + a_1 \cdot U_{\text{еп},j,i^*}) + \frac{\sum_{i=1}^m (p_{\text{тех.еп},i} (a_0 + a_1 \cdot U_{\text{еп},j,i^*}))^2 + \sum_{i=1}^m (q_{\text{тех.еп},i} (b_0 + b_1 \cdot U_{\text{еп},j,i^*}))^2}{U_{\text{ном}}^2 \cdot U_{\text{ПУПП}^*}^2} \cdot R_{\text{л},j} + \frac{\sum_{j=1}^n (P_{\text{тех.еп},j} (A_0 + A_1 \cdot U_{\text{ПУПП}^*}))^2 + \sum_{j=1}^n (Q_{\text{тех.еп},j} (B_0 + B_1 \cdot U_{\text{ПУПП}^*}))^2}{U_{\text{ном}}^2 \cdot U_{\text{шт}^*}^2} \cdot R_{\text{ПУПП}} + \Delta P_{\text{хх}} \cdot (U_{\text{шт}^*})^2; \quad (2.12)$$

$$Q_{\text{ПУПП}} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m q_{\text{тех.еп},i} (a_0 + a_1 \cdot U_{\text{еп},j,i^*}) + \frac{\sum_{i=1}^m (p_{\text{тех.еп},i} (a_0 + a_1 \cdot U_{\text{еп},j,i^*}))^2 + \sum_{i=1}^m (q_{\text{тех.еп},i} (b_0 + b_1 \cdot U_{\text{еп},j,i^*}))^2}{U_{\text{ном}}^2 \cdot U_{\text{ПУПП}^*}^2} \cdot X_{\text{л},j} + \frac{\sum_{j=1}^n (P_{\text{тех.еп},j} (A_0 + A_1 \cdot U_{\text{ПУПП}^*}))^2 + \sum_{j=1}^n (Q_{\text{тех.еп},j} (B_0 + B_1 \cdot U_{\text{ПУПП}^*}))^2}{U_{\text{ном}}^2 \cdot U_{\text{шт}^*}^2} \cdot X_{\text{ПУПП}} + \Delta Q_{\text{хх}} \cdot (U_{\text{шт}^*})^2; \quad (2.13)$$

де $P_{\text{тех.епі}}$, $U_{\text{тех.епі}}$ - активна та реактивна потужність споживана електроприймачем, що визначається технологічним процесом та відповідає номінальному рівню напруги; $a_{j,i}$, $a_{1j,i}$, $b_{0j,i}$, $b_{1j,i}$ - коефіцієнти статичних характеристик електроприймача; $P_{\text{тех.эпј}}$, $Q_{\text{тех.эпј}}$ - сумарна потужність електроприймачів, підключених до КЛ при U_n ; A_{0j} , A_{1j} , B_{0j} , B_{1j} - коефіцієнти еквівалентних статичних характеристик навантаження, підключеного до ЦТП (ПУПП); R_{lj} , X_{lj} - активний та індуктивний опір j -ої лінії, $R_{\text{пупп}}$, $X_{\text{пупп}}$ - активний та індуктивний опір ЦТП (ПУПП), ΔP_{xx} , ΔQ_{xx} - активні та реактивні втрати холостого ходу в ЦТП (ПУПП).

Для визначення еквівалентних статичних характеристик навантаження підсистеми з використанням формул (2.12-2.13) необхідно визначити рівень напруги у вузлах мережі. Розрахунок може бути виконаний з використанням різних методів: за даними початку лінії, за даними кінця лінії, методом Зейделя, методом Ньютона та ін. Для виконання розрахунків пропонується використовувати готове програмне забезпечення - програмно-обчислювальний комплекс (ПОК) [60], в якому є можливість урахування статичних характеристик навантаження. Алгоритм визначення еквівалентних статичних характеристик навантаження з допомогою ПОК представлений на рис. 2.9.

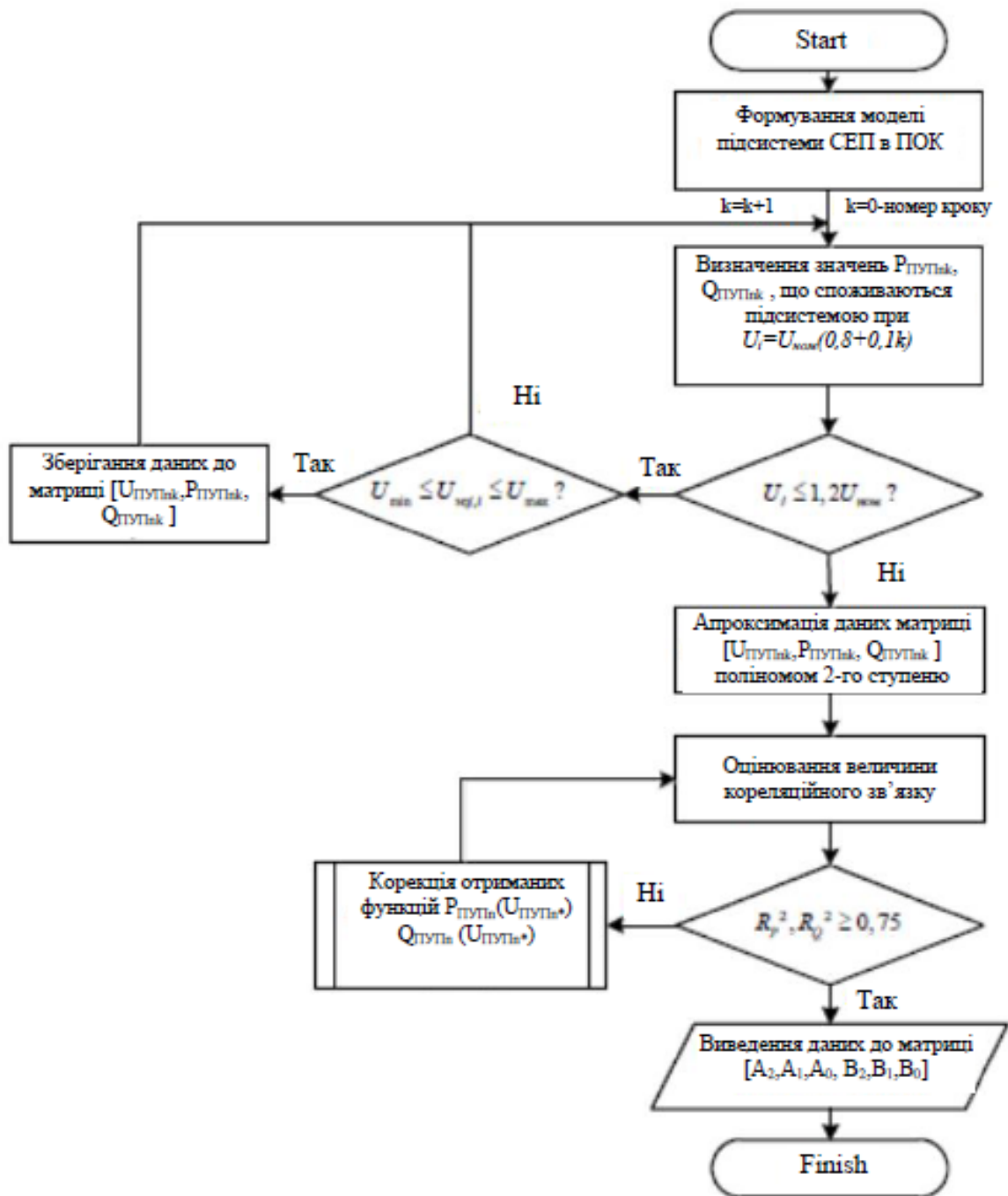


Рис. 2.9 – Алгоритм визначення статичних еквівалентних характеристик навантаження вузла навантаження за напругою

Спочатку виконується моделювання схеми мережі, підключеної до ПУПП. Визначаються параметри схеми заміщення, статичні характеристики навантаження за напругою. Далі виконується розрахунок електричного режиму із послідовним зміною рівня напруги на стороні ВН ЦТП (ПУПП) з кроком 1% межах $0,85 \div 1,2U_{\text{ном}}$. Ці межі задані, щоб визначити допустимий діапазон зміни напруги на шинах ВН ЦТП (ПУПП) при якому дотримуються вимог до

відхилень напруги на затискачах кожного електроприймача. Діапазон варіюється в залежності від фактичного номера ступеня регулювання пристрою ПБВ трансформатора ЦТП (ПУПП).

Таким чином, на кожному k-му кроці необхідно перевіряти відповідність напруги на затискачах електроприймачів граничним умовам $U_{\text{ЕП.min}} \leq U_{\text{ЕПj,i}} \leq U_{\text{ЕП.max}}$, де $U_{\text{ЕП.min}}$, $U_{\text{ЕП.max}}$ – мінімально та максимально допустимі значення напруги на затискачах електроприймачів. Дані про рівень потужності, що споживається ЦТП (ПУПП) та прилеглою низьковольтною мережею, зберігаються для подальшого формування статичних показників навантаження. При цьому якщо фактичний рівень напруги на затискачах електроприймачів не відповідає граничним умовам, дані не зберігаються і в подальших розрахунках не враховуються. Отримані дані про споживання активної та реактивної потужності апроксимуються поліномом 2-го ступеня і можуть бути використані в якості еквівалента навантаження (ЦТП) ПУПП та прилеглої низьковольтної мережі.

2.2.2. Вплив навантаження трансформаторів ЦТП (ПУПП) на рівень втрат активної та реактивної потужності

Для оцінки впливу ЦТП (ПУПП) на рівень споживання активної та реактивної потужності, необхідно проаналізувати характер зміни втрат активної та реактивної потужності [61]. Параметри схеми заміщення ЦТП (ПУПП) визначаються каталожним або паспортним даним. Необхідно враховувати, що на ЦТП (ПУПП) є пристрої перемикання без збудження (ПБЗ), положення яких впливає на параметри схеми заміщення ЦТП (ПУПП).

Враховуючи наявність пристрою ПБЗ, параметри схеми заміщення трансформатора ЦТП (ПУПП), приведені до напруги 6 кВ, визначаються за такими формулами:

$$R_{\text{ПУПП}} = \frac{\Delta P_{\text{к}} (U_{\text{ном}} (1 + n \cdot \Delta U_{\text{ст}^*}))^2}{S_{\text{ном}}^2 \cdot 10^3}, \quad (2.14)$$

де $R_{\text{ПУПП}}$ - активний опір трансформатора ЦТП(ПУПП) (Ом), $\Delta P_{\text{к}}$ - втрати короткого замикання (кВт), $U_{\text{ном}}$ - номінальна напруга (кВ), $S_{\text{ном}}$ - номінальна

потужність трансформатора ЦТП(ПУПП) (кВА), n – номер відпайки ПБЗ, $\Delta U_{ст*}$ – крок регулювання УРПН, %;

$$Z_{ПУПП} = \frac{u_{k\%отв} (U_{НОМ} (1 + n \cdot \Delta U_{ст*}))^2}{100 \cdot S_{НОМ}}, \quad (2.15)$$

де $Z_{ПУПП}$ – повний опір трансформатора ЦТП(ПУПП) (Ом), $u_{k\%отв}$ – номінальна напруга короткого замикання, %.

$$X_{ПУПП} = \sqrt{Z_{ПУПП}^2 - R_{ПУПП}^2}, \quad (2.16)$$

де $X_{ПУПП}$ – індуктивний опір трансформатора ЦТП(ПУПП) (Ом).

Враховуючи загальноприйняті формули для визначення втрат активної та реактивної потужності у трансформаторах [62], а також формули (2.14-2.16), втрати активної та реактивної потужності в ПУПП можна визначити за формулам:

$$\Delta P_{ПУПП}(U) = \frac{(k_3 \cdot S_{НОМ})^2}{U^2} \frac{\Delta P_K (U_{НОМ} (1 + n \cdot \Delta U_{ст*}))^2}{S_{НОМ}^2 \cdot 10^3} + \Delta P_x \cdot \left(\frac{U}{U_{НОМ}} \right)^2, \quad (2.17)$$

$$\Delta Q_{ПУПП}(U) = \frac{(k_3 \cdot S_{НОМ})^2}{U^2} \frac{(U_{НОМ} (1 + n \cdot \Delta U_{ст*}))^2}{S_{НОМ}} \cdot \sqrt{\frac{u_{k\%отв}^2}{10000} - \frac{\Delta P_K^2}{S_{НОМ}^2}} + \Delta Q_x \cdot \left(\frac{U}{U_{НОМ}} \right)^2, \quad (2.18)$$

де ΔP_x , ΔQ_x , – активні та реактивні втрати холостого ходу (кВАр), k_3 – коефіцієнт завантаження силового трансформатора; Приймаючи, що пристрій ПБЗ знаходиться в положенні "-1" і $U_{НОМ}$ дорівнює 6 кВ отримаємо такі вирази:

$$\Delta P_{ПУПП}(U) = \frac{34,2 \cdot k_3^2 \cdot \Delta P_K}{U^2} + \Delta P_x \cdot \left(\frac{U}{U_{НОМ}} \right)^2, \quad (2.19)$$

$$\Delta Q_{ПУПП}(U) = \frac{34,2 \cdot k_3^2 \cdot S_{НОМ}}{U^2} \sqrt{\frac{u_k^2}{10000} - \frac{\Delta P_K^2}{S_{НОМ}^2}} + \Delta Q_x \cdot \left(\frac{U}{U_{НОМ}} \right)^2, \quad (2.20)$$

Статичні характеристики втрат активної та реактивної потужності за напругою, побудовані за виразами (2.19) та (2.20) для трансформатора КТПВ-1000/6 представлені рис.2.10.

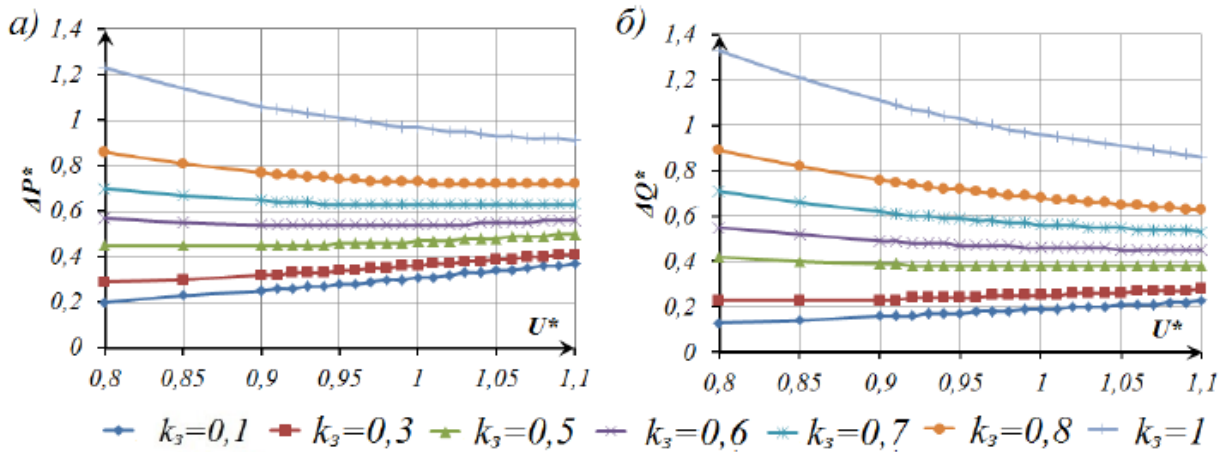


Рис. 2.10 – Залежність втрат активної (а) та реактивної (б) потужності в трансформаторах від рівня напруги мережі живлення при різних значеннях коефіцієнта завантаження трансформаторів КТПВ-1000/6

Також було виконано аналіз регулюючих ефектів втрат активної та реактивної потужності за напругою для ПУПП різних номіналів [63]. Графіки залежності регулюючих ефектів втрат активної та реактивної потужності для трансформаторів КТПВ в залежності від коефіцієнта завантаження представлені на рис. 2.11.

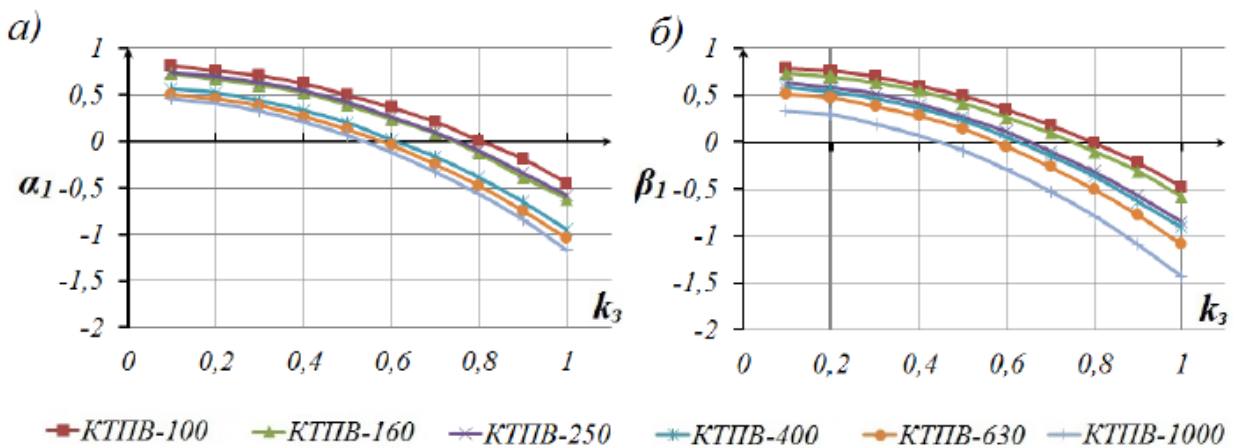


Рис. 2.11 – Регулюючі ефекти втрат активної (а) та реактивної (б) потужності за напругою для трансформаторів КТПВ в залежності від коефіцієнта завантаження k_3

Дані на рис. 2.10-2.11 дозволяють зробити такі висновки:

- при $k_3 = 0,6-0,7$ втрати потужності в трансформаторах практично не залежить від рівня напруги. При цьому згідно [44] при такому завантаженні ККД трансформатора має максимальне значення. Отже, якщо завантаження трансформатора відповідає максимальному ККД, рівень втрат потужності у трансформаторі практично не залежить від напруги;

- характер зміни втрат активної потужності в трансформаторах неоднозначний і залежить від коефіцієнта завантаження та співвідношення ΔP_k і ΔP_{x0} ;

- зі збільшенням завантаження трансформаторів регулюючий ефект втрат активної та реактивної потужності стає негативним. Під час завантаження нижче критичного значення рівень втрат активної потужності зростає; – регулюючий ефект втрат активної потужності в трансформаторах змінюється не більше від $-1,17$ до $0,51$;

- регулюючий ефект втрат реактивної потужності у трансформаторах змінюється не більше від $-1,53$ до $0,79$;

- статичні характеристики втрат реактивної потужності за напругою мають крутіший характер і регулюючий ефект втрат реактивної потужності в трансформаторах за напругою значніший;

- зі збільшенням номінальної потужності трансформаторів значення критичного завантаження, при якому спостерігається негативний ефект у щодо рівня втрат активної та реактивної потужності, зменшується.

2.2.3. Визначення еквівалентних статичних характеристик навантаження за напругою для трансформаторів ЦТП(ПУПП)

З використанням вищезазначеного алгоритму були отримані узагальнені статичні характеристики навантаження для різного складу навантаження ЦТП (ПУПП) з прикладу для вугільної шахти ДВАТ Шахта «Червоноградська».

Використовуючи ПВК RastrWin3, було виконано моделювання мережі прилеглої до ПУПП за різних коефіцієнтів завантаження обладнання. В результаті було отримано еквівалентні статичні характеристики активного та реактивного навантаження за напругою при різних коефіцієнтах завантаження

електроприймачів. Також були визначено допустимі відхилення напруги на затискачах трансформатора ЦТП(ПУПП) нейтральному положенні анцапфи пристрою ПБЗ. Отримані результати представлені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Значення коефіцієнтів полінома 1-го ступеня для навантаження трансформатора ЦТП (ПУПП) і низьковольтної мережі, що живиться від них

№ п/п	$\Sigma P_{\text{н}}$ кВт	k_3	Коефіцієнти полінома 1-го ступеня						Допустимий діапазон відхилення напруги на затискачах ПУПП
			активної потужності			реактивної потужності			
			A_2	A_i	A_o	B_2	B_i	B_o	
ПУПП №1	1074	1	0,073	-0,223	1,15	4,65	-8,39	4,74	$0,9U_{\text{НОМ}} \leq U \leq 1,13U_{\text{НОМ}}$
		0,8	0,053	-0,148	0,895	3,63	-6,19	3,36	$0,96U_{\text{НОМ}} \leq U \leq 1,2U_{\text{НОМ}}$
		0,6	0,04	-0,082	0,641	2,66	-4,1	2,04	$0,95U_{\text{НОМ}} \leq U \leq 1,2U_{\text{НОМ}}$
		0,4	0,028	-0,049	0,421	2Д	-2,7	1	$0,94U_{\text{НОМ}} \leq U \leq 1,1U_{\text{НОМ}}$
ПУПП №2	2000	1,0	0,083	-0,323	1,240	4,3	-7,79	4,49	$U_{\text{НОМ}} \leq U \leq 1,1U_{\text{НОМ}}$
		0,8	0,061	-0,228	0,967	3,33	-5,7	3,17	$0,98U_{\text{НОМ}} \leq U \leq 1,3U_{\text{НОМ}}$
		0,6	0,046	-0,142	0,695	2,36	-3,5	1,74	$0,97U_{\text{НОМ}} \leq U \leq 1,3U_{\text{НОМ}}$
		0,4	0,032	-0,089	0,457	1,9	-2,5	1	$0,96U_{\text{НОМ}} \leq U \leq 1,2U_{\text{НОМ}}$
ПУПП №3	1200	1,0	0,076	-0,273	1,197	4,55	-8,22	4,67	$0,97U_{\text{НОМ}} < U < 1,13U_{\text{НОМ}}$
		0,8	0,055	-0,164	0,909	3,52	-6,09	3,37	$0,96U_{\text{НОМ}} < U < 1,12U_{\text{НОМ}}$
		0,6	0,041	-0,118	0,677	2,62	-4,1	2,08	$0,94U_{\text{НОМ}} < U < 1,12U_{\text{НОМ}}$
		0,4	0,027	-0,061	0,434	2,05	-2,7	1,05	$0,94U_{\text{НОМ}} < U < 1,11U_{\text{НОМ}}$
ПУПП №4	947	1,0	0,068	-0,175	1,107	4,85	-8,32	4,47	$0,96U_{\text{НОМ}} < U < 1,14U_{\text{НОМ}}$
		0,8	0,050	-0,132	0,882	3,92	-6,19	3,07	$0,95U_{\text{НОМ}} < U < 1,13U_{\text{НОМ}}$
		0,6	0,035	-0,066	0,631	3,42	-5,1	2,28	$0,95U_{\text{НОМ}} < U < 1,13U_{\text{НОМ}}$
		0,4	0,023	-0,040	0,417	2,39	-2,9	0,91	$0,94U_{\text{НОМ}} < U < 1,12U_{\text{НОМ}}$
ПУПП №5	631	1,0	0,068	-0,175	1,107	4,95	-8,32	4,37	$0,95U_{\text{НОМ}} < U < 1,13U_{\text{НОМ}}$
		0,8	0,050	-0,132	0,882	3,92	-6,19	3,07	$0,94U_{\text{НОМ}} < U < 1,12U_{\text{НОМ}}$
		0,6	0,035	-0,066	0,631	3,52	-5,1	2,18	$0,93U_{\text{НОМ}} < U < 1,11U_{\text{НОМ}}$
		0,4	0,023	-0,040	0,417	2,55	-2,9	0,75	$0,93U_{\text{НОМ}} < U < 1,11U_{\text{НОМ}}$
ПУПП №6	56	1,0	0,058	-0,155	1,097	3,56	-7,13	4,56	$0,94U_{\text{НОМ}} < U < 1,12U_{\text{НОМ}}$
		0,8	0,045	-0,100	0,855	2,92	-6,49	4,37	$0,93U_{\text{НОМ}} < U < 1,11U_{\text{НОМ}}$
		0,6	0,035	-0,054	0,619	2,22	-5,9	4,28	$0,92U_{\text{НОМ}} < U < 1,1U_{\text{НОМ}}$
		0,4	0,023	-0,016	0,393	1,29	-4,6	3,71	$0,9U_{\text{НОМ}} < U < 1,1U_{\text{НОМ}}$

На рисунках 2.12-2.13 представлені статичні характеристики втрат активної потужності в електричній мережі, в трансформаторах ЦТП (ПУПП) та сумарних втрат активної потужності при коефіцієнтах завантаження $k_3=0,4;0,6;0,8;1$. Штриховими лініями на рисунках 2.12 – 2.13 наведено статичні характеристики втрат активної потужності у разі не врахування статичних характеристик навантаження (СХН).

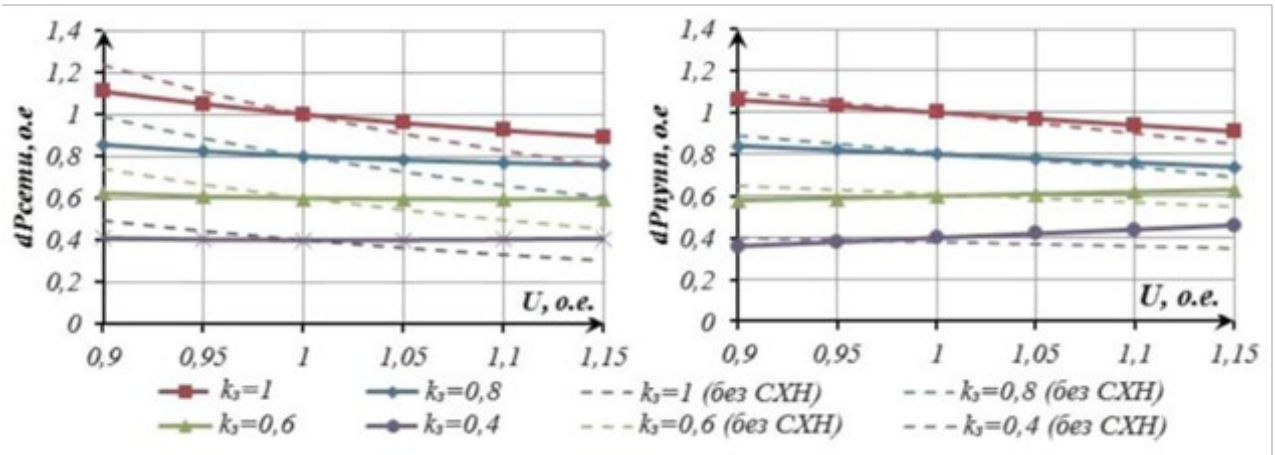


Рисунок 2.12 – Статичні характеристики втрат активної потужності в мережі (а) та в трансформаторах ЦТП (ПУПП) (б) за різних коефіцієнтів завантаження з урахуванням і без урахуванням СХН

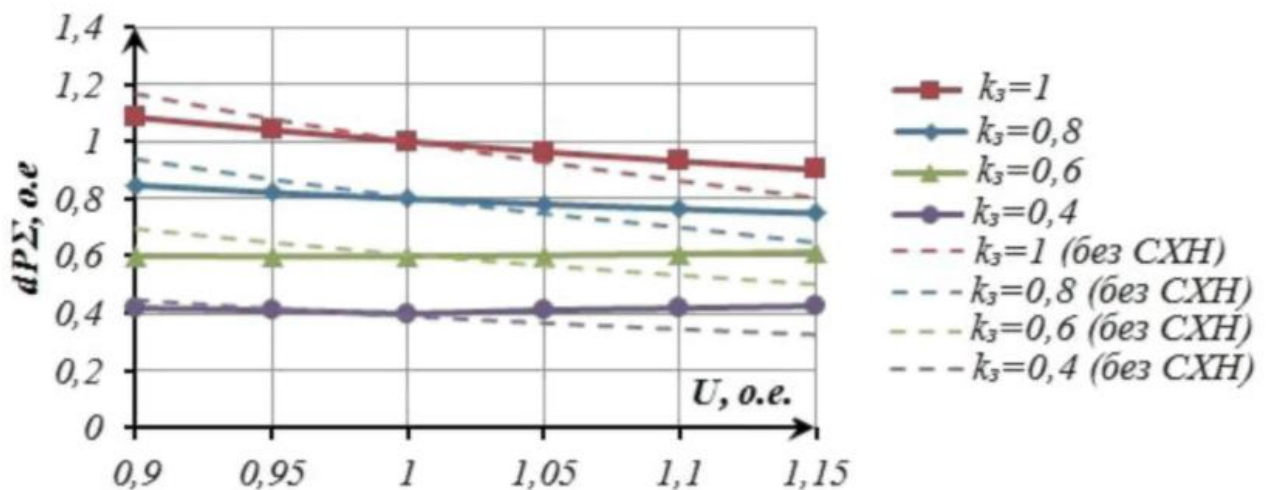


Рисунок 2.13 – Статичні характеристики сумарних втрат активної потужності при різних коефіцієнтах завантаження трансформаторів ЦТП (ПУПП) без урахування і з урахуванням СХН

З отриманих статичних показників можна зробити такі висновки:

1. Для трансформаторів ЦТП (ПУПП №1), що живить очисний комплекс (Joy 4LS20), при коефіцієнті завантаження $k_3=0,4$ сумарний рівень втрат активної потужності має мінімальну величину при напрузі $U_{ном}$. При збільшенні

завантаження трансформаторів ПУПП оптимальний рівень напруги збільшується, при зменшенні коефіцієнта завантаження оптимальний рівень напруги на затискачі трансформаторів ЦТП(ПУПП) зменшується. При завантаженні трансформаторів ЦТП (ПУПП) $k_3 \geq 0,7$ оптимальний рівень напруги відповідає верхній межі напруги.

2. Для трансформаторів ЦТП (ПУПП №2), що живить скребковий конвеєр, при коефіцієнті завантаження $k_3 = 0,3$ сумарний рівень втрат активної потужності має мінімальну величину при нарузі $U_{\text{ном}}$. При збільшенні завантаження трансформаторів ЦТП (ПУПП) оптимальний рівень напруги збільшується, при зменшенні коефіцієнта завантаження оптимальний рівень напруги на затискачі ПУПП зменшується. При завантаженні трансформаторів ЦТП (ПУПП) $k_3 \geq 0,5$ оптимальний рівень напруги відповідає верхній межі напруги.

3. Для трансформаторів ЦТП (ПУПП №3), що живить насосну станцію, при коефіцієнті завантаження $k_3 = 0,35$ сумарний рівень втрат активної потужності має мінімальну величину при нарузі $U_{\text{ном}}$. При збільшенні завантаження трансформаторів ЦТП (ПУПП) оптимальний рівень напруги збільшується, при зменшенні коефіцієнта завантаження оптимальний рівень напруги на затискачі ПУПП зменшується. При завантаженні ПУПП $k_3 \geq 0,55$ оптимальний рівень напруги відповідає верхній межі напруги.

4. Для трансформаторів ЦТП (ПУПП №4-5), що живить приводну станцію конвеєра, при коефіцієнті завантаження $k_3 = 0,4$ сумарний рівень втрат активної потужності має мінімальну величину при нарузі $U_{\text{ном}}$. При збільшенні завантаження трансформаторів ЦТП (ПУПП) оптимальний рівень напруги збільшується, при зменшенні коефіцієнта завантаження оптимальний рівень напруги на затискачі трансформаторів ЦТП (ПУПП) зменшується. При завантаженні трансформаторів ЦТП (ПУПП) $k_3 \geq 0,5$ оптимальний рівень напруги відповідає верхній межі напруги.

5. Для трансформаторів ЦТП (ПУПП №6), що живить натяжну станцію, при коефіцієнті конвеєра завантаження $k_3 = 0,7$ сумарний рівень втрат активної потужності має мінімальну величину при нарузі $U_{\text{ном}}$. При збільшенні завантаження ПУПП оптимальний рівень напруги збільшується, при зменшенні

коефіцієнта завантаження оптимальний рівень напруги на затискачі трансформаторів ЦТП (ПУПП) зменшується. При завантаженні трансформаторів ЦТП (ПУПП) $k_3 \geq 0,8$ оптимальний рівень напруги відповідає верхній межі напруги.

Значення коефіцієнта завантаження k_3 , у якому мінімальний рівень втрат активної потужності відповідає $U_{ном}$, визначається складом навантаження, і навіть протяжністю низьковольтних мереж. При збільшенні одиничної потужності електродвигунів та зменшенні протяжності низьковольтних мереж значення коефіцієнта завантаження, при якому мінімальний рівень втрат активної потужності відповідає номінальній напрузі, зменшується.

2.3. Визначення узагальнених статичних характеристик СЕП промислового підприємства

2.3.1. Особливості зміни рівня втрат активної потужності в силових трансформаторах ГПП

На ГПП промислових підприємств (вугільних шахт) встановлюються трансформатори з вищою напругою 35 та 110 кВ із номінальною потужністю від 1600 до 40000 кВА. Технічні характеристики трансформаторів, встановлених ГПП, представлені у таблиці 2.5. Усі трансформатори оснащені пристроями РНН.

Таблиця 2.5 - Технічні характеристики силових трансформаторів, що встановлюються на ГПП вугільних шахт.

Марка трансформатора	$S_{ном}$, кВА	$U_{ном}$, кВ		ΔP_x , кВт	ΔP_k , кВт	i_x , %	$u_k\%_{отв}$, %
		ВН	НН				
ТМН-2500/35	2500	35	6,3	5,1	23,5	1,1	6,5
ТМН-4000/35	4000	35	6,3	6,7	33,5	1,0	7,5
ТМН-6300/35	6300	35	6,3	9,25	46,5	0,9	7,5
ТМН-10000/35	10000	35	6,3	12,0	65,0	0,8	7,5
ТДН-16000/35	16000	35	6,3	12,94	90	0,6	10
ТРДН-25000/110	25000	110	6,3 (6,6)	15,94	122,26	0,45	10,74
ТРДН-40000/110	40000	110	6,3 (6,6)	31,4	179,61	0,55	10,4

Відомо, що під час перемикання УРПН відбувається зміна числа витків в обмотці вищої напруги, а також змінюється магнітний потік [23,62]. Найбільш поширена схема з'єднань УРПН з діапазоном регулювання $\pm 9 \times 1,78\%$ наведена рис. 2.14.

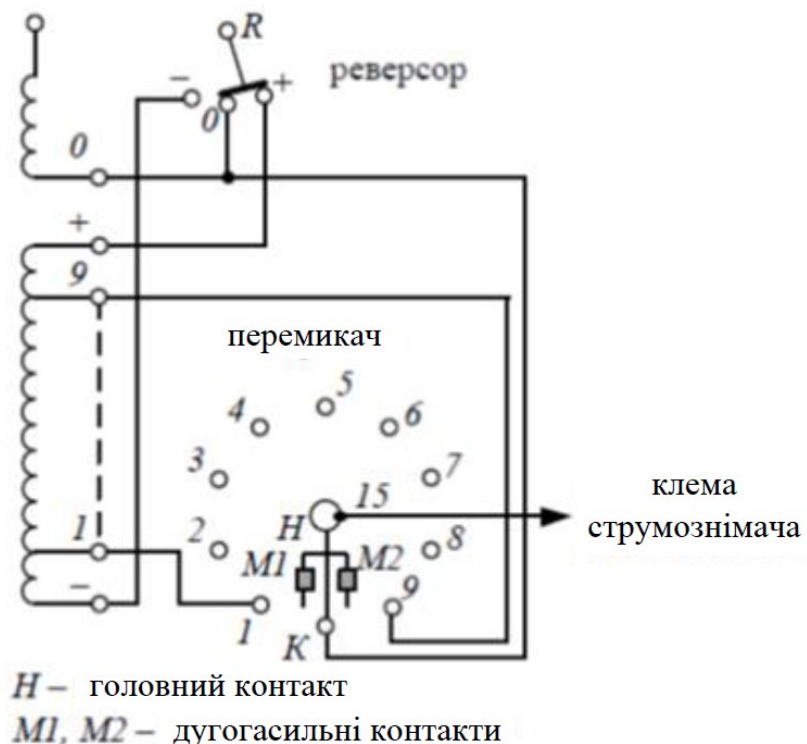


Рис. 2.14 – Схема з'єднань УРПН

У положенні реверсора «+» регульовальна обмотка включається згідно з основною обмоткою трансформатора, при цьому відбувається збільшення магнітного потоку та коефіцієнта трансформації. Також збільшується активний та індуктивний опір трансформатора. При перемиканні реверсора в положення «-» регульовальна обмотка включається зустрічно основний, при цьому відбувається зменшення магнітного потоку та коефіцієнта трансформації, а також збільшення активного опору та зменшення індуктивного опору. Параметри схеми заміщення силових трансформаторів з УРПН можуть бути визначені за паспортними або каталожними даними.

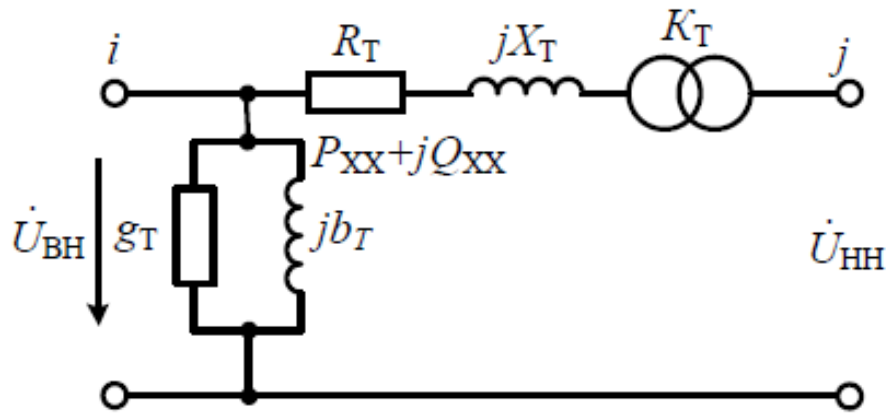


Рис. 2.15 – Схема заміщення двообмоткового трансформатора

У більшості випадків параметри схеми заміщення силового трансформатора (рисунок 2.15) визначаються за формулами [20,23]:

$$R_T = \frac{\Delta P_k \cdot U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}^2 \cdot 10^3}, \quad (2.21)$$

$$Z_T = \frac{u_{k\% \text{отв}} U_{\text{отв}}^2}{S_{\text{ном}} \cdot 100}, \quad (2.22)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}, \quad (2.23)$$

де ΔP_k - втрати короткого замикання (кВт), $U_{\text{ном}}$ - номінальна лінійна напруга основного відгалуження обмотки (кВ), $U_{\text{отв}}$ - номінальна лінійна напруга відгалуження обмотки (кВ), $S_{\text{ном}}$ - номінальна потужність трансформатора (МВА), $u_{k\% \text{відв}}$ - розрахункове значення напруга замикання відгалуження, наведеної до номінальної потужності трансформатора на нейтральній відпайці УРПН, %.

Номінальна лінійна напруга відгалуження обмотки може бути визначена за формулою:

$$U_{\text{отв}} = U_{\text{ном}} (1 + n \cdot \Delta U_{\text{см}^*}), \quad (2.24)$$

де n - номер анцапфи УРПН, що змінюється в межах, що визначаються типом пристрою РПН, $\Delta U_{\text{см}^*}$ - крок регулювання УРПН, %;

При визначенні параметрів схеми заміщення за формулами (2.21-2.23) не

враховується залежність активного опору кількості витків регулювальної обмотки в процесі перемикання УРПН. Реальні залежності активних опорів обмоток від номера анцапфи (відгалуження) за паспортними даними трансформаторів типу ТДН-16000/35, ТРДН-25000/110 та ТРДН-40000/110 $R_{пасп}=f(n)$ представлені рис.2.16.

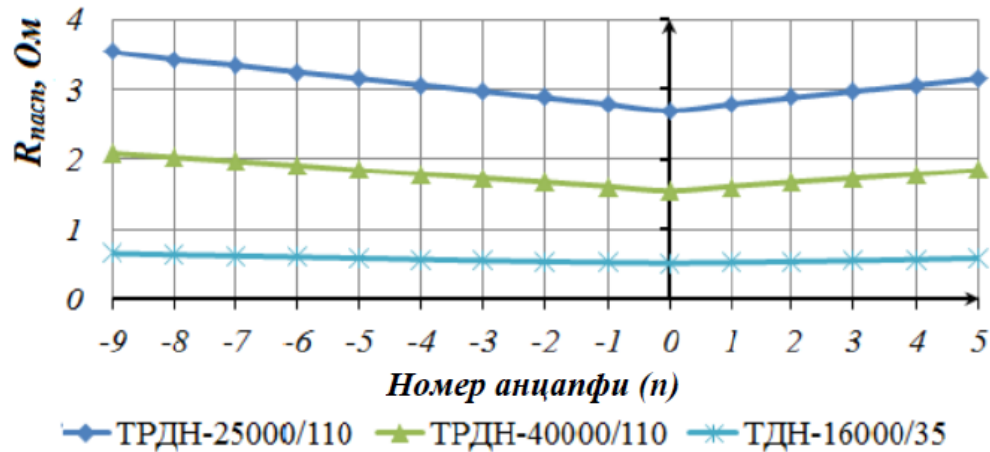


Рис. 2.16 – Залежність $R_{пасп} = f(n)$

В результаті апроксимації отриманих графіків $R_{пасп} = f(n)$ поліноміальною функцією 2-го ступеня в середовищі MATLAB були отримані наступні регресійні залежності:

для трансформатора марки ТДН-16000/35

$$R_T(n_T) = 0,0004 \cdot |n_T|^2 + 0,012 \cdot |n_T| + 0,5047, \quad (2.25)$$

для трансформатора марки ТРДН-25000/110,

$$R_T(n_T) = 0,0003 \cdot |n_T|^2 + 0,0893 \cdot |n_T| + 2,6968, \quad (2.26)$$

для трансформатора марки ТРДН-40000/110

$$R_T(n_T) = 0,00008 \cdot |n_T|^2 + 0,0616 \cdot |n_T| + 1,5384, \quad (2.27)$$

Коефіцієнти детермінації R^2 цих залежностей, розраховані в середовищі MATLAB, дорівнюють одиниці, отже, отримані залежності (2.25-2.27) повністю відповідають спостережанам даним і є функціональними. За відсутності інформації про активні та повні опори обмотки на кожній анцапфи УРПН,

використовуються формули:

$$R_{\tau} = \frac{\Delta P_{\kappa} (U_{\text{НОМ}} (1 + |n| \cdot \Delta U_{\text{СТ}^*}))^2}{S_{\text{НОМ}}^2 \cdot 10^3}, \quad (2.28)$$

При цьому отримані значення коефіцієнтів детермінації (R^2) та середніх помилок апроксимації (\bar{A}) становлять:

ТРДН-25000/110 ($R^2 = 0,896$; $\bar{A} = 2,73\%$);

ТРДН-40000/110 ($R^2 = 0,799$; $\bar{A} = 4,26\%$);

ТДН-16000/35 ($R^2 = 0,86$; $\bar{A} = 2,62\%$);

Це свідчить про сильну кореляцію паспортних даних трансформатора із функцією (2.28). Залежності $R_{\text{расч}} = f(n)$, отримані за формулою (2.28), для трансформаторів марки ТРДН-25000/110, ТРДН 40000/110, ТДН-16000/35 представлені на рис.2.14.

Положення УРПН "6-9" не розглядаються, оскільки відповідають номінальній лінійній напрузі відгалужень 127,2 – 133,4 кВ, що вище максимально допустимої напруги для електроустаткування згідно з п.2.4 [64].

Втрати в силових трансформаторах впливають на рівень споживаної активної та реактивної потужності. У загальному випадку втрати активної ΔP_{τ} (кВт) та реактивної ΔQ_{τ} (кВАр) потужності у трансформаторі визначаються за формулами:

$$\Delta P_{\tau} = \frac{(k_3 \cdot S_{\text{НОМ}})^2}{U^2} R_{\tau} \cdot 1000 + \Delta P_{\kappa} \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2, \quad (2.29)$$

$$\Delta Q_{\tau} = \frac{(k_3 \cdot S_{\text{НОМ}})^2}{U^2} X_{\tau} \cdot 1000 + \Delta Q_{\kappa} \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2, \quad (2.30)$$

де k_3 – коефіцієнт завантаження силового трансформатора; ΔP_{κ} , ΔQ_{κ} – активні та реактивні втрати холостого ходу.

Рівень втрат активної та реактивної потужності в трансформаторі з урахуванням виразів (2.22 – 2.23) та (2.28) можна оцінити за формулами:

$$\Delta P_{\tau}(n) = \frac{k_3^2 \cdot \Delta P_{\kappa} (U_{\text{НОМ}} (1 + |n| \cdot \Delta U_{\text{СТ}^*}))^2}{U^2} + \Delta P_{\text{X}} \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2, \quad (2.31)$$

$$\Delta Q_{\tau}(n) = \frac{k_3^2 \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot U_{\text{НОМ}}^2 \cdot 10}{U^2} \sqrt{u_{k\% \text{отв}}^2 (1 + n \cdot \Delta U_{\text{СТ}^*})^4 - \frac{\Delta P_{\kappa}^2 (1 + |n| \cdot \Delta U_{\text{СТ}^*})^4}{S_{\text{НОМ}}^2 \cdot 100}} + \Delta Q_{\text{X}} \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2, \quad (2.32)$$

Розрахунок втрат активної та реактивної потужності за формулами (2.31-2.32) дозволяє врахувати залежність активного опору трансформатора від положення анцапфи УРПН.

З формул (2.31 - 2.32) випливає, що на рівень втрат активної та реактивної потужності в трансформаторі впливає коефіцієнт завантаження трансформатора, номер анцапфи УРПН та рівень напруги в мережі живлення.

Формули (2.31 – 2.32) доцільно розглянути при збільшенні та зменшенні коефіцієнта трансформації щодо номінального. Важливо, що при роботі пристрою АРНТ в режимі стабілізації номер анцапфи УРПН підлаштовується під напругу мережі живлення. Таким чином, при збільшенні напруги в мережі живлення відбувається перемиканні анцапфи УРПН і збільшенні опору трансформатора.

При збільшенні коефіцієнта трансформації (перемикання анцапф на «+») рівень втрат активної та реактивної потужності у трансформаторі визначається за формулами:

$$\Delta P_{\tau}(n) = k_3^2 \cdot \Delta P_{\kappa} + \Delta P_{\text{X}} \cdot (1 + n \cdot \Delta U_{\text{СТ}^*})^2, \quad (2.33)$$

$$\Delta Q_{\tau}(n) = k_3^2 \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot 10 \cdot \sqrt{u_{k\% \text{отв}}^2 - \frac{\Delta P_{\kappa}^2}{S_{\text{НОМ}}^2 \cdot 100}} + \Delta Q_{\text{X}} \cdot (1 + n \cdot \Delta U_{\text{СТ}^*})^2, \quad (2.34)$$

Формула (2.33) показує, що при підвищенні напруги в мережі живлення і регулюванні напруги пристроєм АРНТ в режимі «стабілізації» відбувається збільшення рівня втрат активної потужності в трансформаторі за рахунок

зростання втрат холостого ходу. У цьому рівень навантажувальних втрат залишається незмінним.

В умовах зниження напруги в мережі живлення і перемиканні анцапф в негативні положення, втрати активної та реактивної потужності в трансформаторі визначаються за формулами:

$$\Delta P_T(n) = \frac{k_3^2 \cdot \Delta P_K (1 + |n| \cdot \Delta U_{CT*})^2}{(1 + n \cdot \Delta U_{CT*})^2} + \Delta P_X \cdot (1 + n \cdot \Delta U_{CT*})^2, \quad (2.35)$$

$$\Delta Q_T(n) = \frac{k_3^2 \cdot S_{НОМ} \cdot 10}{(1 + n \cdot \Delta U_{CT*})^2} \sqrt{u_{k\%отв}^2 (1 + n \cdot \Delta U_{CT*})^4 - \frac{\Delta P_K^2 (1 + |n| \cdot \Delta U_{CT*})^4}{S_{НОМ}^2 \cdot 100}} + \Delta Q_X \cdot (1 + n \cdot \Delta U_{CT*})^2. \quad (2.36)$$

Формула (2.35) показує, що при зниженні напруги мережі живлення і перемиканні анцапфи в негативні положення відбувається значне збільшення втрат активної потужності, пов'язане зі збільшенням струмового навантаження та збільшенням опору трансформатор.

Графіки залежностей $\Delta P^*, \Delta Q^* = f(n)$ у відносних одиницях при перемиканні пристрою РПН пристроєм АРНТ у режимі «стабілізації» та різних коефіцієнтах завантаження трансформатора представлені на рис. 2.17. Зазначимо, що при граничному коефіцієнті завантаження трансформатора $k_{згр}$ мінімум втрат активної потужності трансформатора не відповідає нейтральному положенню анцапфи.

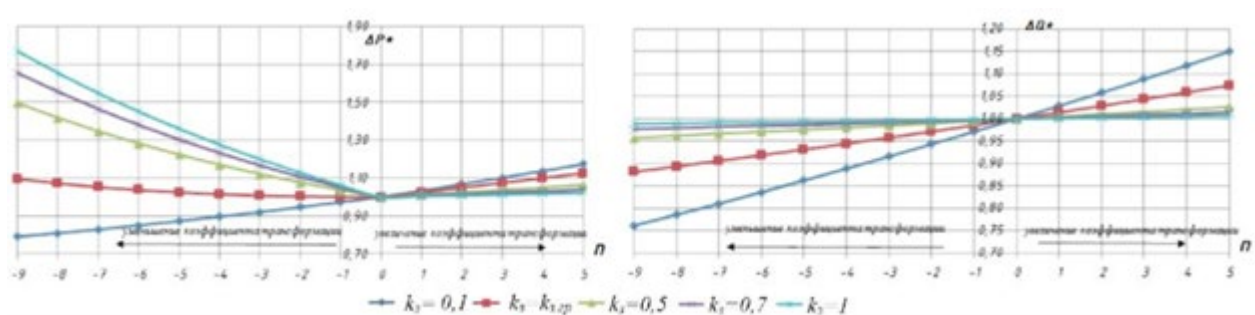


Рис. 2.17 - Графіки залежності $\Delta P^*, \Delta Q^* = f(n)$ при різних коефіцієнтах завантаження трансформатора ГПП k_3

Необхідно зазначити, що залежності, представлені на рис. 2.17, справедливі у разі, якщо напруга у мережі відповідають напрузі анцапф УРПН.

При коливаннях напруги в межах однієї відпаювання УРПН, коли відхилення напруги знаходяться в зоні нечутливості (зона НЧ) пристрою АРНТ ($U_{нч} = (1,2 \div 1,5)\Delta U_{cm}^*$), втрати активної потужності змінюються відповідно до графіків, представлених на рис 2.18.

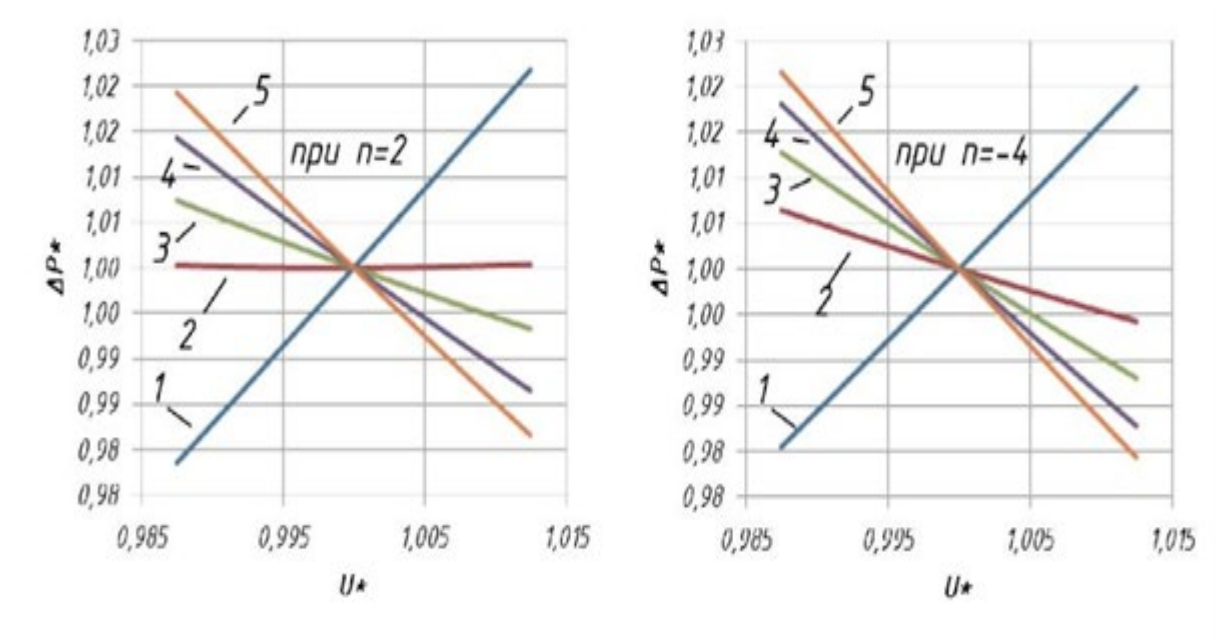


Рис. 2.18 – Зміна втрат активної потужності в трансформаторі при різних положеннях УРПН та коливаннях напруги в межах зони НЧ ($U_{нч}=2,5\%$) та різних коефіцієнтах завантаження (1 – при $k_3=0,1$; 2 – при $k_3=k_{згр}$ для $n=2$; 3 – при $k_3 = 0,5$; 4 - при $k_3 = 0,7$; 5 - при $k_3 = 1$)

За формулами (2.3 – 2.4) були розраховані регулюючі ефекти втрат активної та реактивної потужності силових трансформаторів за напругою. Графіки залежності регулюючих ефектів втрат активної α_1 та реактивної потужності β_1 трансформатора марки ТРДН-25000/110 в залежності від коефіцієнта завантаження k_3 та положення УРПН представлені на рис. 2.19.

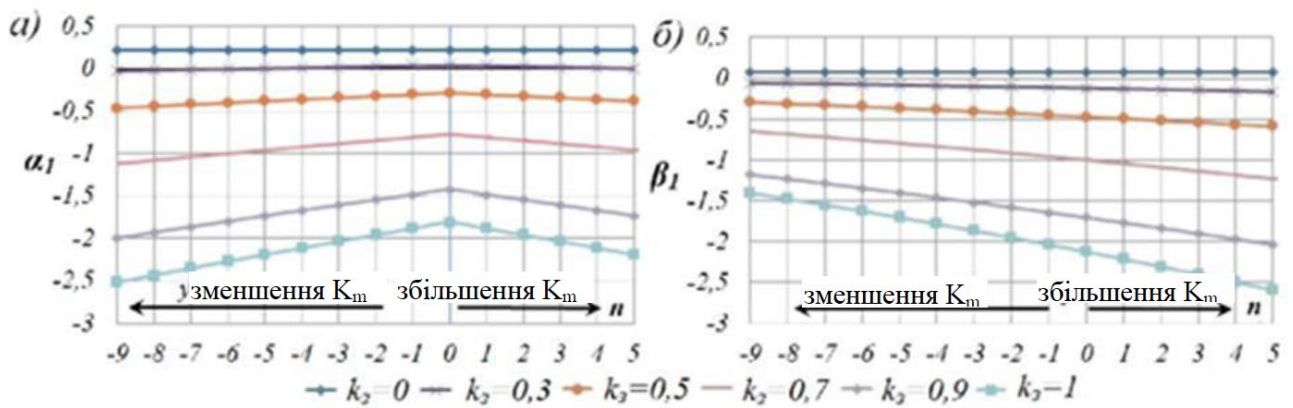


Рис. 2.19 – Регулюючі ефекти втрат активної (а) та реактивної (б) потужності трансформатора марки ТРДН – 25000/110 залежно від коефіцієнта завантаження k_3 за різних положень УРПН

Залежності, подані на рис. 2.18-2.19, дозволяють зробити такі висновки:

1. При $k_3 > k_{згр}$ мінімальний рівень втрат активної потужності трансформатора відповідає нейтральному положенню анцапфи УРПН. Значення $k_{згр}$ визначається співвідношенням втрат холостого ходу та навантажувальних втрат.

2. При $k_3 < k_{згр}$ втрати активної потужності, головним чином, визначаються втратами холостого ходу. У зв'язку з цим мінімум ΔP не спостерігається в нейтральному положенні. Мінімум функції $\Delta P^* = f(n)$ зміщується у негативному напрямку.

3. При зменшенні коефіцієнта трансформації (перемикання УРПН на «←») втрати активної потужності збільшуються пропорційно квадрату коефіцієнта завантаження трансформатора, положенню анцапфи УРПН і обернено пропорційно квадрату рівня напруги на вводах трансформатора. При цьому зі збільшенням k_3 втрати активної потужності збільшуються значніше.

4. При збільшенні коефіцієнта трансформації (перемикання УРПН на «+») навантажувальні втрати трансформатора залишаються практично незмінними, але збільшуються втрати холостого ходу. Приріст втрат активної потужності значніший у міру зменшення k_3 .

5. При зміні напруги в межах зони нечутливості пристрою АРНТ характер залежності $\Delta P^* = f(U)$ залежить від коефіцієнта завантаження трансформатора.

При цьому, якщо $k_3 > k_{згр}$ втрати активної потужності зменшуються зі збільшенням напруги. Якщо $k_3 < k_{згр}$, втрати активної потужності збільшуються зі збільшенням напруги межах зони НЧ. Значення $k_{згр}$ обумовлюється співвідношенням втрат холостого ходу та навантажувальних втрат, а також поточним положенням УРПН.

6. Діапазон зміни втрат активної потужності трансформатора в різних положеннях УРПН залежить від коефіцієнта завантаження трансформатора. 7. Втрати реактивної потужності мають лінійну залежність від коефіцієнта трансформації. У цьому графік зміни втрат реактивної потужності стає більш пологим зі збільшенням завантаження трансформатора.

Таким чином, як показав аналіз, зміна втрат активної потужності у силових трансформаторах при роботі УРПН на різних відгалуженнях має неоднозначний характер. Характер зміни втрат активної потужності визначається коефіцієнтом завантаження, шириною зони НЧ, напрямом перемикавання відпайок УРПН щодо нейтрального положення, співвідношенням втрат холостого ходу та навантажувальних втрат. При цьому втрати реактивної потужності трансформатора мають лінійну залежність від коефіцієнта трансформації. У зв'язку з вищесказаним при виконанні оптимізації рівня напруги за критерієм мінімуму втрат активної потужності необхідно враховувати залежність втрат активної потужності трансформатора від номера ступеня регулювання УРПН.

2.3.2 Узагальнені статичні характеристики СЕП промислового підприємства (вугільної шахти) за напругою

Для отримання еквівалентних характеристик навантаження необхідно виконати моделювання СЕП промислового підприємства (вугільної шахти) до шин ВН ЦТП (ПУПП). При цьому можна розглянути декілька типових режимів роботи СЕП у межах робочої зміни.

На основі аналізу графіка електричних навантажень було виділено такі основні типові режими:

1. піковий максимум;
2. напівпіковий максимум;

3. піковий мінімум;
4. напівпіковий мінімум.

Для кожного з режимів з прикладу ДВАТ Шахта «Червоноградська» було отримано узагальнені статичні характеристики втрат навантаження для навантаження ПС 35 кВ №111 (рисунок 2.20).

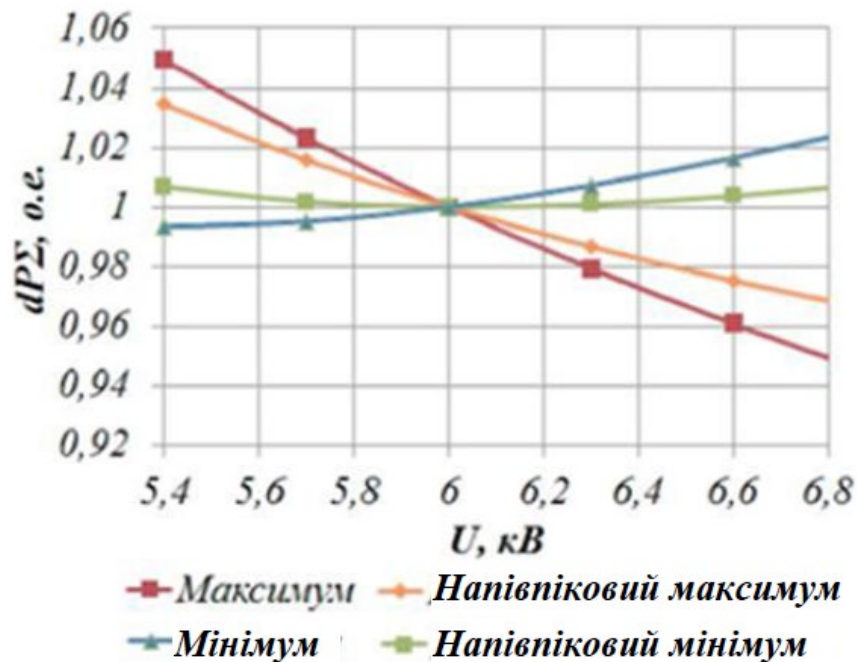


Рис. 2.20 – Узагальнені статичні характеристики втрат активної потужності за напругою у типових режимах СЕП вугільної шахти

Дані рис. 2.20 дозволяють зробити висновок, що при збільшенні навантаження підприємства в піковому максимумі доцільно підтримувати підвищену напругу (6,6-6,8 кВ). При цьому спостерігатиметься зниження рівня втрат активної потужності.

У режимі пікового мінімуму доцільно підтримувати знижений рівень напруги (5,8-6,2 кВ). У проміжних режимах оптимальний режим обумовлюється складом електричного навантаження вугільної шахти. При завантаженні потужніших двигунів доцільно збільшувати рівень напруги значніше, ніж при завантаженні малопотужних двигунів.

Отримані еквівалентні статичні характеристики навантаження напруги свідчать про необхідність їхнього врахування при регулюванні напруги і можуть бути використані при розробці рекомендацій щодо регулювання напруги в умовах існуючої системи регулювання, а також у рамках розробки системи оптимального регулювання напруги.

2.4. Висновки за розділом 2

1. Розроблено алгоритм визначення коефіцієнтів полінома статичних характеристик напруги рухового навантаження вугільної шахти з урахуванням параметрів схеми заміщення, характеристик навантаження, коефіцієнта завантаження двигуна. Представлений алгоритм відрізняється від існуючих алгоритмів одночасним використанням Т-подібної схеми заміщення АД, врахуванням кривих намагнічування та показників ступеня моменту навантаження.

2. З використанням запропонованого алгоритму виконано аналіз статичних характеристик навантаження за напругою для АД різних типів та потужності, встановлених на промислових підприємствах (вугільних шахтах). В результаті встановлено, що зміна напруги на 1% від номінальної практично не призводить до зміни споживання активної потужності і, отже, може прийматися постійною.

3. Виявлено, що регулюючий ефект реактивного навантаження шахтових АД за напругою знаходиться в межах 0,95 – 2,60%. При цьому його значення є обернено пропорційним кількості пар полюсів, номінальній потужності та коефіцієнту завантаження двигуна.

4. Розроблено алгоритм визначення еквівалентних статичних характеристик навантаження із використанням програмного комплексу для розрахунку режимів RastrWin3.

5. Встановлено, що зі збільшенням завантаження трансформаторів ЦТП (ПУП) регулюючий ефект втрат активної та реактивної потужності стає негативним. При завантаженні нижче критичного значення рівень втрат активної

потужності зростає. Регулюючий ефект втрат активної (реактивної) потужності в трансформаторах ЦТП (ПУПП) змінюється в межах $-1,17 \div 0,51$ ($-1,53 \div 0,79$). При цьому зі збільшенням коефіцієнта реактивної потужності посилюється регулюючий ефект трансформаторів ЦТП (ПУПП) щодо її електроприймачів.

6. Визначено еквівалентні статичні характеристики навантаження для трансформаторів ЦТП (ПУПП). Виявлено, що оптимальний рівень напруги на шинах трансформаторів ЦТП (ПУПП) залежить від завантаження електроприймачів, протяжності мережі та одиничної потужності електроприймачів.

7. Зміна втрат активної потужності в силових трансформаторах під час роботи УРПН на різних відгалуженнях має неоднозначний характер. Характер зміни втрат активної потужності визначається коефіцієнтом завантаження, шириною зони нечутливості, напрямом перемикання відпайок УРПН щодо нейтрального положення, співвідношенням втрат холостого ходу та навантажувальних втрат.

8. Визначено еквівалентні статичні характеристики навантаження для однієї з вугільних шахт. Встановлено, що в режимі пікового максимуму оптимальний рівень напруги на шинах ПС відповідає максимальному значенню напруги (6,6 – 6,8 кВ), у режимі пікового мінімуму відповідає мінімальному значенню напруги (5,8 – 6,2 кВ). У режимі напівпікового мінімуму оптимальний рівень напруги відповідає проміжним значенням у межах (6,2-6,6 кВ).

3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ У СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

3.1. Формулювання цільової функції оптимізації рівня напруги за критерієм мінімуму втрат активної потужності

Для розробки алгоритму оптимального регулювання напруги в СЕП промислового підприємства (вугільної шахти), представленої на рис.3.1,

необхідно визначити залежні змінні, граничні умови та цільову функцію.

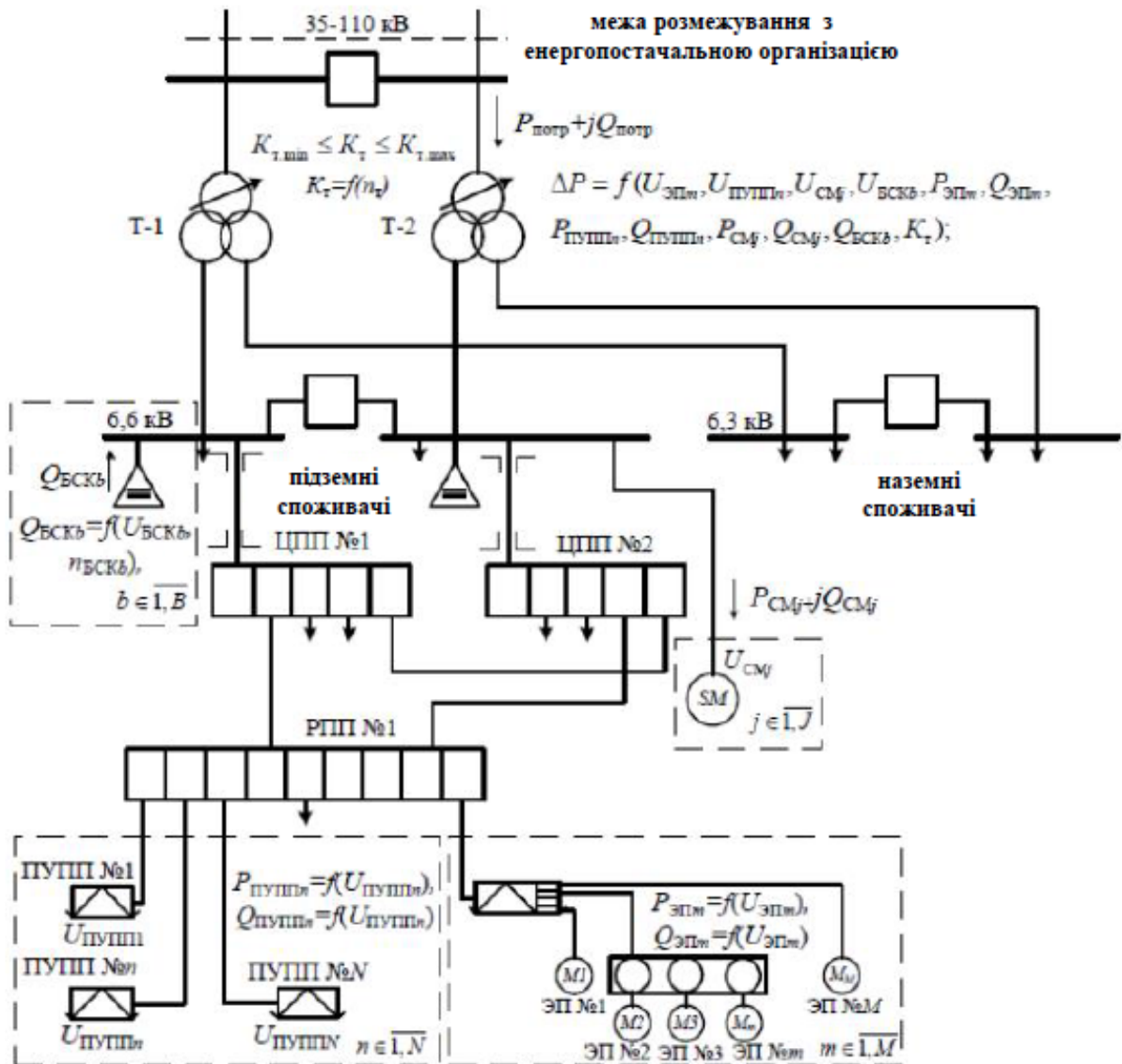


Рис. 3.1 – Структурна схема СЕП промислового підприємства (вугільної шахти) для вирішення завдання оптимального регулювання напруги

Електроприймачі (множина $\overline{1, M}$, де M – кількість електроприймачів з контрольованим рівнем навантаження), групи електроприймачів (множина $\overline{1, N}$, де N - кількість ПУПП, що живлять групу електроприймачів, що не мають телевізійних пристроїв) мають відповідні статичні характеристики навантаження за напругою.

Крім того, в СЕП промислового підприємства (вугільної шахти) можуть бути представлені синхронні машини (множина $\overline{1, J}$, де J - кількість синхронних машин), здатні забезпечити недискретне регулювання рівня напруги. При цьому кожна синхронна машина має свою PQ-діаграму, що визначає межі генерації (споживання) реактивної потужності.

Трансформатори ГПП оснащені пристроями регулювання під навантаженням (РПН), що дозволяють змінювати коефіцієнт трансформації K_T у заданих межах.

Залежними змінними є сукупність параметрів СЕП, регулюючи які, можливо змінити значення цільової функції. Ці змінні можуть бути дискретними чи недискретними.

У разі оптимізації режиму СЕП за напругою дискретними змінними є номер ступеня регулювання УРПН трансформаторів ГПП n_T , номер ступеня регулювання БСК $n_{БСК}$. Недискретними змінними є значення генерації (споживання) реактивної потужності синхронними машинами $Q_{СМ}$.

Таким чином, регулювання напруги в СЕП вугільної шахти може здійснюватися плавно (автоматичними регуляторами збудження, встановленими на синхронних машинах) та ступінчасто (автоматичними регуляторами, встановленими на підстанціях та здійснюють зміна коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів, тобто. УРПН, оснащеними АРНТ, а також включенням та відключенням БСК).

Цільова функція та граничні умови оптимізації рівня напруги в СЕП за критерієм мінімуму втрат активної потужності представлені у (3.1).

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P \rightarrow \min; \\ \Delta P = f(U_{ЭПm}, U_{ПУПШn}, U_{СМj}, U_{БСКb}, P_{ЭПm}, Q_{ЭПm}, P_{ПУПШn}, Q_{ПУПШn}, P_{СМj}, Q_{СМj}, Q_{БСКb}, K_T); \\ P_{ЭПm} = f(U_{ЭПm}), Q_{ЭПm} = f(U_{ЭПm}), P_{ПУПШn} = f(U_{ПУПШn}), Q_{ПУПШn} = f(U_{ПУПШn}); \\ K_T = f(n_T), Q_{БСКb} = f(U_{БСКb}, n_{БСКb}); m \in \overline{1, M}; n \in \overline{1, N}; j \in \overline{1, J}; b \in \overline{1, B}; \\ K_{T, \min} \leq K_T \leq K_{T, \max}; Q_{СМ, \min j} \leq Q_{СМj} \leq Q_{СМ, \max j}; \\ U_{ЭП, \min m} \leq U_{ЭПm} \leq U_{ЭП, \max m}; U_{ПУПШ, \min n} \leq U_{ПУПШn} \leq U_{ПУПШ, \max n}; \\ U_{СМ, \min j} \leq U_{СМj} \leq U_{СМ, \max j}; U_{БСК, \min b} \leq U_{БСКb} \leq U_{БСК, \max b}; \end{array} \right. \quad (3.1)$$

де ΔP – втрати активної потужності в СЕП вугільної шахти; V – кількість БСК; $U_{EПm}$, $U_{ПУППn}$, $U_{СМj}$, $U_{БСКb}$ – рівень напруги у вузлах СЕП; $U_{ПУПП.минн}$, $U_{ПУПП.максн}$, $U_{ЭП.минт}$, $U_{ЭП.макт}$, $U_{СМ.минj}$, $U_{СМ.макeј}$, $U_{БСК.минb}$, $U_{БСК.максb}$ – максимальні та мінімальні обмеження за рівнем напруги, що визначаються вимогами ГОСТ, паспортними даними електрообладнання; $Q_{СМ.минj}$, $Q_{СМ.макeј}$ – максимальні та мінімальні обмеження за рівнем споживання (генерації) реактивної потужності, що визначаються паспортними даними синхронних машин та P-Q діаграмою; $P_{EПm} = f(U_{EПm})$, $Q_{EПm} = f(U_{EПm})$ – статичні характеристики навантаження по напрузі для n-ого електроприймача промислового підприємства (вугільної шахти), $P_{ПУППn} = f(U_{ПУППn})$, $Q_{ПУППn} = f(U_{ПУППn})$ – статичні характеристики навантаження по напрузі для n-ої групи електроприймачів; $Q_{БСКb}$ – реактивна потужність, що генерується b-ою БСК, $K_{т.мін}$, $K_{т.макс}$ – мінімальний та максимальний коефіцієнти трансформації трансформатора ГПП.

3.2. Алгоритм визначення оптимального рівня напруги

З урахуванням отриманої цільової функції (3.1) розроблено алгоритм визначення оптимального рівня напруги в СЕП промислового підприємства за критерієм мінімуму втрат активної потужності (рисунок 3.2). Алгоритм передбачає роздільне виконання операцій розрахунку параметрів поточного режиму та його оптимізації. Це дозволяє здійснювати моніторинг стану СЕП вугільної шахти та забезпечувати максимальну ефективність використання пристроїв регулювання напруги.

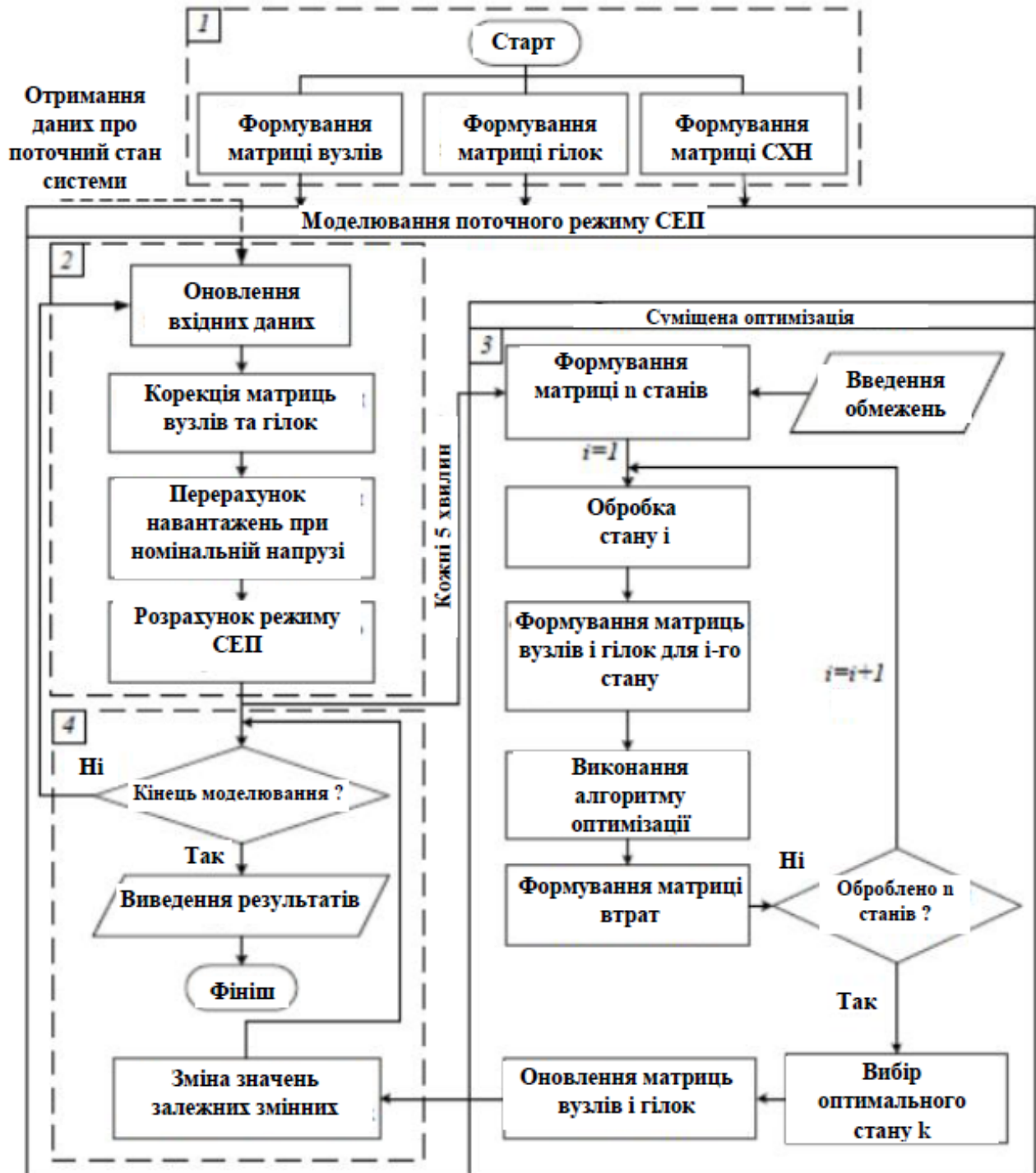


Рис. 3.2 – Алгоритм оптимізації рівня напруги у СЕП вугільної шахти
Запропонований алгоритм включає наступні блоки:

Блок 1 – підготовка вихідних даних. У ньому виконується збір даних про топологію електричної мережі (матриці вузлів, гілок) та формується матриця статичних характеристик навантаження за напругою.

Блок 2 – оновлення вихідних даних та розрахунок поточного режиму. Виконується збір даних телевимірювань та коригування вихідних даних. За отриманими даними виконується визначення навантажень для номінального рівня напруги та оновлюються матриці вузлів та гілок. Далі виконується розрахунок поточного режиму функціонування СЕП.

Блок 3 – суміщена оптимізація. У ньому з певною періодичністю здійснюється визначення значень залежних змінних для отримання мінімуму цільової функції (3.1). Принцип запропонованого алгоритму оптимізації полягає у спільному розгляді дискретних та недискретних змінних. На першому етапі оптимізації виконується формування матриці станів СЕП. Складана матриця станів дозволяє отримати математичне уявлення про можливі стани СЕП вугільної шахти, тобто. відображає сукупність всіх можливих станів системи в даний час. Другий етап полягає у розпізнаванні матриці станів та виконанні оптимізації недискретних параметрів. На кожному етапі пошуку цільової функції виконується звернення до матриці станів СЕП. Після виконання оптимізації недискретних змінних вибирається стан СЕП із найменшим значенням втрат активної потужності та виконується коригування матриць вузлів та гілок.

Блок 4 – Блок формування управляючих сигналів зміну значень залежних змінних. У ньому формуються керуючі сигнали зміну значень залежних змінних і оптимальні рівні напруги у вузлах мережі, і навіть оптимальне значення напруги на шинах ГПП. Потім операція оптимізації залежних змінних повторюється із заданою періодичністю. Періодичність виконання оптимізації залежних параметрів визначається комутаційним ресурсом та алгоритмом роботи пристрою РПН на ГПП.

3.2.1. Підготовка вихідних даних

Для розрахунку електричних режимів необхідно підготувати вихідні дані. Вихідні дані повинні включати відомості про топологію електричної мережі, інформацію про навантаження вузлів СЕП вугільної шахти, а також інформацію про значення залежних змінних. Дані про топологію електричної мережі,

інформація про навантаження вузлів, а також інформація про значення залежних змінних подаються у вигляді двох матриць: матриця гілок та матриця вузлів.

Кожна з матриць створюється за аналогією: кожен рядок є вузол або гілка схеми, а кожен стовпець – відповідні параметри.

Для вузлів матриця містить такі параметри:

1. Номер вузла;
2. Назва вузла;
3. Тип вузла (базисний вузол, вузол генерації, вузол навантаження);
4. Номінальна напруга (кВ);
5. Активна провідність шунта (мкСм);
6. Реактивна провідність шунта (мкСм);
7. Тип статичних характеристик навантаження за напругою;
8. Споживана активна потужність для вузла навантаження (кВт);
9. Споживана реактивна потужність для вузла навантаження (кВАр);
10. Генерована активна потужність для генераторного вузла (кВт);
11. Генерована активна потужність для генераторного вузла (кВАр);
12. Максимальна реактивна потужність, що видається генераторним вузлом (кВАр);
13. Максимальна реактивна потужність, що споживається генераторним вузлом (кВАр);
14. Заданий модуль напруги (кВ);

Матриця гілок містить у кожному стовпці такі дані:

1. Номер гілки;
2. Номер вузла початку;
3. Номер вузла кінця;

4. Тип гілки;
5. Назва гілки;
6. Активний опір (Ом);
7. Індуктивний опір (Ом);
8. Активна провідність гілки (мкСм);
9. Реактивна провідність шунта (мкСм);
10. Номер анцапфи трансформатора;
11. Тип УРПН;
12. Коефіцієнт трансформації.

Потім складається матриця суміжності, яка містить у собі інформацію про топологію мережі. У цій матриці число стовпців і число рядків дорівнює числу вузлів у мережі.

Якщо два вузли пов'язані між собою, то у відповідному перетині стовпців і рядків ставиться 1. Якщо ці вузли електрично не пов'язані, то ставиться 0. Подібна матриця може використовуватися для еквівалентування мережі з метою скорочення часу розрахунків.

Отримана матриця є математичним описом топології електромережі шахти. Матричний спосіб завдання вихідних даних є найбільш зручним та ефективним для подальшого розрахунку та оптимізації електричного режиму [67].

Також формуються дані про статичні характеристики навантаження електроприймачів шахти за напругою, які можуть бути визначені як розрахунковим, так і експериментальним шляхом.

Матриця статичних характеристик навантаження за напругою (СХН) містить у кожному стовпці такі дані:

1. Тип СХН;
2. Мінімальна напруга для заданої СХН (кВ);

3. Постійний коефіцієнт активної потужності;
4. Лінійний коефіцієнт активної потужності;
5. Квадратичний коефіцієнт за активною потужністю (задається тільки для ПУПП, що живлять групу електроприймачів, що не мають пристроїв телемеханіки);
6. Постійний коефіцієнт реактивної потужності;
7. Лінійний коефіцієнт реактивної потужності;
8. Квадратичний коефіцієнт за реактивною потужністю (задається тільки для ПУПП, що живлять групу електроприймачів, що не мають пристроїв телемеханіки).

Виходячи з матриці вузлів та гілок, створюється матриця вузлових провідностей, яка надалі є вихідною для виконання розрахунку електричних режимів.

Процес формування матриць вузлових провідностей описаний у Додатку 2. Дані про навантаження та генерацію перетворюються на окремі матриці, які використовуються при виконанні розрахунку електричних режимів. Отримані матриці використовуються для формування нелінійних рівнянь режиму, що встановився (УУР).

3.2.2. Вибір методу розрахунку встановленого режиму роботи СЕП промислового підприємства

Існує велика кількість чисельних методів, за допомогою яких можуть бути оброблені нелінійні УУР для отримання даних про модулі та фази напруги у вузлах. Точних методів на вирішення цих рівнянь немає.

Методи вирішення нелінійних УУР докладно розглянуті на роботах [65-87]. Методи розв'язання нелінійних УУР можна класифікувати так:

I. Традиційні методи [65-80]

1. Метод покоординатного спуску (градієнтний метод).

2. Методи Зейделевського типу (методи Зейделя та Гауса-Зейделя).
3. Метод вузлових напруг.
4. Методи Ньютонівського типу.
 - 4.1. Класичний метод Ньютон.
 - 4.2. Методи за параметром.
 - 4.3. Методи зі зміною точки лінеаризації в процесі формування матриці Якобі та її трикутного розкладання (методи К.М. Брауна, Н.І. Бартоломея).

II. Нетрадиційні методи [81-87]

1. Метод нечіткої логіки
2. Метод на основі штучних нейронних мереж
3. Інші методи (на базі генетичних алгоритмів та ін.)

У [66] розглянуто застосування на вирішення УУР методу якнайшвидшого спуску. Для аналізу використовували УУР у формі балансів струмів в декартових координатах. Проведено оцінку швидкості збіжності цього методу в рамках мережі 110 кВ (7 вузлів). На виконання розрахунку режимів такої схеми знадобилося 3220 ітерацій. При цьому показано, що швидкість збіжності методу якнайшвидшого спуску принципово не зміниться, якщо УУР буде записано у будь-якій іншій формі та полярних координатах. Також у [66] виконувалася зміна інших параметрів схеми заміщення: кількість вузлів, клас напруги, ступінь неоднорідності пасивних параметрів, величини навантажень та ін, але поліпшення збіжності при цьому не спостерігалось. Рішення УУР методами зейделівського типу докладно розглянуто на роботах [66-68, 74, 78-79]. Ітераційна схема методу Зейделя проста, але розрахунок може сходитися повільно чи розходитися. Тим не менш, методи зейделевського типу мають кращу збіжність і часто застосовуються для визначення початкових наближень при вирішенні нелінійних УУР методами ньютонівського типу.

З іншого боку, методи зейделевського типу пред'являють мінімальні вимоги до пам'яті ЕОМ оскільки. при їх використанні немає потреби у зберіганні

матриць великого розміру. Також варто відзначити метод Гаусса-Зейделя, який отримав на початкових етапах застосування ЕОМ для вирішення УУР. У ньому покращення збіжності процесу ітерацій вводиться спеціальний прискорюючий коефіцієнт. Однак, незважаючи на введення коефіцієнтів прискорення, метод Зейделя – Гауса не набагато кращий за метод Зейделя [74, с. 147].

У [66-67, 80] розглянуто застосування методу вузлових потенціалів на вирішення нелінійних УУР. Основною перевагою цього є те, що кількість ітерацій не залежить від числа змінних. Метод полягає у послідовному уточненні значень вузлових напруг шляхом вирішення системи лінійних рівнянь алгебри (СЛАУ). Для покращення збіжності методу вузлових потенціалів ітераційний процес може регулюватися шляхом множення поправки за напругою певний коефіцієнт демпфування. Метод отримав поширення для виконання попередніх обчислень поточкорозподілу в мережах із класом напруги 110 кВ та вище. Методи ньютонівського типу включають класичний метод Ньютона та його модифікації, пов'язані з введенням коефіцієнта прискорення – параметра (метод «за параметром»).

В даний час методи ньютонівського типу широко застосовуються для реалізації програмних комплексів для розрахунку режимів [80]. Класичний метод Ньютона докладно описаний роботах [65-67,69-71,80]. Різні варіації методу "за параметром" описані в роботах [68, 72-76].

Класичний метод Ньютона чутливий до вибору початкових наближень, якщо початкові наближення далекі від шуканого рішення, то класичний метод Ньютона може сходитися повільно або взагалі не сходитися. У разі монотонності функції метод забезпечує отримання рішення з наближення. Якщо функція немонотонна, отримання рішення істотно залежить від початкового наближення. Метод може пропустити правильне рішення і вийти до іншого рішення або взагалі розійтися.

Усі методи ньютонівського типу полягають у формуванні матриці Якобі та подальшим визначенням поправок до шуканих змінних. Формування матриці Якобі проводиться на кожній ітерації до моменту, коли точність розрахунків

досягне заданої. У [81] зазначається, що рішення системи УУР методом Ньютона має вищу надійність з погляду збіжності проти методами Зейделевського типу. Методи Ньютонівського типу дозволяють отримати рішення, коли градієнтний метод та методи Зейделевського типу розходяться при вирішенні УУР.

Сутність класичного методу Ньютона полягає у визначенні на кожній ітерації вектора поправок $\Delta X^{(k+1)}$ і додаванні його до вектора незалежних змінних $X^{(k)}$. Ітераційний процес має вигляд:

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + \Delta X^{(k+1)} \quad (3.2)$$

Класичний метод Ньютона має погану збіжність у системах УУР з погано обумовленою матрицею Якобі або при поганих початкових наближеннях. Тому класичний метод Ньютона не придатний для аналізу граничних режимів, а також аналізу нормальних режимів, близьких до граничних режимів. У такому разі рекомендується застосовувати метод Ньютона за параметром. На відміну від класичного методу Ньютона, методи за параметром передбачають розрахунок змінних на кожній ітерації до наступної формулі:

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + \lambda^{(k)} \Delta X^{(k+1)} \quad (3.3)$$

де $\lambda^{(k)}$ - коефіцієнт демпфування чи коефіцієнт коригування довжини кроку, який визначається для кожної ітерації.

Мета введення параметра $\lambda^{(k)}$ полягає у попередженні розбіжності процесу ітерацій. Збіжність методу Ньютона можна оцінити зміни різних норм вектора небалансов $\|W_{nb}\|$. Монотонне зниження будь-якої з цих норм у процесі ітерацій є достатньою умовою збіжності процесу.

Одним із перших метод за параметром, званий метод послідовних інтервалів, було запропоновано Л. А. Круммом [78, с. 85]. Цей метод фактично відповідає обтяженню режиму та рішення на кожному кроці обтяження рівнянь УР. Тут величина параметра визначається довжиною інтервалів, що вибираються, які вибираються випадковим чином. Таким чином, швидкість збіжності найпростішого методу за параметром залежить від довжини

інтервалів, що вибираються. Нині у програмах розрахунку електричних режимів найбільшого поширення набуло обчислення коефіцієнта демпфування за схемою Енеєва-Матвеева [72]. Така схема має високу надійність і окупає додаткові витрати часу в порівнянні з класичним методом Ньютона.

Додаткові витрати викликані необхідністю визначення коефіцієнта демпфування та збільшенням кількості ітерацій внаслідок обмеження кроку. Зокрема, така схема застосовується в ПК для розрахунку та аналізу встановлених та перехідних електромеханічних режимів енергосистем MUSTANG [77].

У методі Брауна [79] запропоновано виконувати лінеаризацію кожного окремого рівняння з виконання процедури виключення Гаусса. Метод Брауна є особливо надійним, спеціально орієнтованим вирішення завдань з погано обумовленою матрицею Якобі.

Метод П.І. Бартоломея також полягає у зміні точки лінеаризації від одного рівняння до іншого [87]. Проте, вищезазначені методи не мають явних переваг перед методами ньютонівського типу. Також варто виділити нетрадиційні методи рішення УУР, докладний аналіз яких виконано у роботі [82]. У цілому нині нетрадиційні методи рішення УУР показали себе досить добре, зокрема, у деяких роботах [83-86] було досягнуто скорочення часу рішення УУР проти традиційними методами. Тим не менш, через відсутність свідчень, що підтверджують явні переваги нетрадиційних методів вирішення УУР над традиційними методами, можливість їх застосування в рамках СЕП промислового підприємства (вугільної шахти) не розглядатиметься.

У таблиці 3.1 наведено результати порівняльного аналізу ефективності традиційних методів розв'язання нелінійних УУР. Проведений аналіз показує, що найефективнішим серед розглянутих методів є метод Ньютона з розрахунку коефіцієнта демпфування за схемою Енеєва-Матвеева. Зазначений метод відповідає необхідним вимогам щодо точності, а також має хорошу збіжність у СЕП будь-якої конфігурації.

Методи розв'язання	Метод найшвидшого спуску (градієнтний метод)	Методи зейделевського типу	Метод вузлових потенціалів	Класичний метод Ньютона	Метод Ньютона з обчисленням за схемою Енеєва-Матвєєва	Метод Ньютона, заснований на зміні точки лінеаризації
Переваги	- простота реалізації - не чутливий до вибору поганих початкових наближень і до зустрічі з дискримінантою; обсяг обчислень на кожній ітерації порівняно малий	- простота реалізації, вимагають мало пам'яті ЕОМ - мають кращою збіжністю, ніж метод якнайшвидшого спуску	число ітерацій для отримання рішення не залежить від числа змінних висока надійність малий обсяг обчислень та часу розрахунку режиму	. - висока збіжність із хорошого початкового наближення за умови, що матриця Якобі не вироджена	- висока надійність - можливість рішення УУР у СЕП будь-який конфігурації	- висока надійність
недоліки	-неприпустимо повільна збіжність -низька надійність	- повільна збіжність, що залежить від складності розрахункової схеми;	-складність обліку вузлів P-U типу	- залежність збіжності методу від початкових наближень - Відсутність глобальної збіжності в СЕП будь-який конфігурації	- необхідність обчислення коефіцієнта демпфування кожної ітерації	- немає явних переваг перед методами Ньютоновського типу

Однак цей метод має певну складність у процесі реалізації, що пов'язано з необхідністю формування матриць подвійних похідних (матриць Гессе). Тим не менш, сучасні програмні засоби дозволяють ефективно реалізувати вказаний вище метод на ЕОМ.

Таким чином, у рамках алгоритму оптимального регулювання напруги розглядатиметься метод Ньютона з розрахунком коефіцієнта демпфування за схемою Енєєва – Матвєєва. Детальний опис даного методу наведено в Додатку 3

3.2.3. Опис залежних змінних, що змінюються у процесі оптимізації

Після виконання симуляції поточного режиму виконується оптимізація режиму роботи СЕП промислового підприємства. Для прискорення процесу оптимізації пропонується окремо розглядати дискретні та недискретні залежні змінні. Види залежних змінних, які можуть бути змінені для отримання оптимального режиму, представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Види залежних змінних, регульованих у процесі оптимізації режиму роботи СЕП

Для кожного трансформатора визначено дискретне значення змінної n_i , що знаходиться в межах $n_T = [n_{T.хв}, n_{T.макс}]$.

Найменування змінної	Позначення	Тип	Примітка
Реактивна потужність, що видається або споживається синхронними машинами	$Q_{смj}$	Недискретна	Для кожної синхронної машини в СЕП вугільної шахти визначено величину $Q_{смj}$, що входить в інтервал $[Q_{см.мінj}, Q_{см.максj}]$. Верхня та нижня межа визначається особливостями кожної синхронної машини.
Номер ступеня регулювання УРПН	n_T	Дискретна	Для кожного трансформатора визначено дискретне значення змінної n_i , що знаходиться в межах $n_T = [n_{T.мін}, n_{T.макс}]$.
Номер ступеня БСК	«БСК»	Дискретна	Кожна БСК має певну кількість ступенів. При цьому потужність БСК дорівнює дискретній величині з ряду $n_{БСК} = [n_{БСК.мін}, n_{БСК.макс}]$.

Принцип запропонованого алгоритму поєднаної оптимізації полягає у окремому розгляді дискретних та недискретних змінних. Спочатку у вигляді матриці складається перелік усіх дискретних станів досліджуваної СЕП вугільної шахти. Складана матриця станів дозволяє отримати математичне уявлення про можливі стани СЕП вугільної шахти, тобто, відображає сукупність всіх можливих станів системи в даний час.

Кожен рядок матриці є можливим станом системи, а кожен стовпець число можливих варіацій окремої змінної. Число колонок у матриці відповідає числу дискретних регуляторів напруги, а число рядків відповідає можливому числу дискретних станів системи. Кількість можливих станів СЕП промислового підприємства залежить від числа дискретних регуляторів рівня напруги. Число можливих станів дуже важливе оскільки, воно безпосередньо впливає швидкість обчислень. Наприклад, якщо на ГПП промислового підприємства встановлені два силові трансформатори з числом положень РПН 19, а на шинах ГПП встановлені два пристрої БСК з трьома ступенями регулювання, число можливих станів системи складе $172 \cdot 32 = 2601$. Умовно приймаючи, що час оптимізації цільової функції для недискретних змінних складе 1 секунду, необхідний час для аналізу всіх можливих станів СЕП промислового підприємства може зайняти тривалий проміжок часу.

Отже, необхідно зменшити кількість можливих комбінацій. Для забезпечення зниження рівня струмів короткого замикання та виключення зрівняльних перетікань трансформатори ГПП вугільної шахти працюють на окремі секції шин. У зв'язку з цим, одним із способів зниження можливого числа комбінацій є роздільний розгляд мереж, що живляться від кожного трансформатора. Цей спосіб є цілком прийнятним оскільки у нормальному режимі мережі, оскільки живлення кожного трансформатора можна вважати незалежним. Таким чином, при розгляді радіальних мереж стає можливим зменшити кількість можливих комбінацій дискретних змінних.

Другий спосіб полягає в тому, що пристрій РПН трансформатора не може відразу перейти з поточного стану до крайнього. Іншими словами пристрій РПН

перемикає анцапфи послідовно. Час перемикання становить від 3 до 10 секунд. При цьому незалежно від тривалості перемикання пристрою РПН мають блокування, що дозволяє роботи перехід лише на один щабель. Отже, розглядати матрицю станів із числом можливих положень РПН більше 3 немає сенсу.

Таким чином, розглядаються три положення РПН: $n_{\text{тек}}$, $n_{\text{тек}+1}$, $n_{\text{тек}-1}$. Зважаючи на дві вищевказані гіпотези, кількість можливих комбінацій знижується до $3 \cdot 3 = 9$.

3.2.4. Формування матриці станів мережі

Матриця станів містить у собі всі можливі дискретні стани мережі у час з урахуванням всіх можливих значень дискретних змінних. Кожен стовпець є дискретною змінною, а кожен рядок один із можливих станів СЕП. До кожного з цих станів виконується оптимізація недискретних змінних.

Щоб бути впевненим у тому, що всі можливі стани включені до матриці стану, матриця конструюється за аналогією з таблицею істинності, що використовується в булевій алгебрі. Основне завдання полягає у послідовному перерахуванні всіх можливих станів. Припустимо, що є три змінні x_1 , x_2 , x_3 значення яких варіюються в межах $\{-1,0,1\}$, $\{0,1\}$, $\{0,1\}$. У разі число можливих станів системи дорівнює $2 \cdot 2 \cdot 3 = 12$. Формування матриці починається з останнього стовпця, в якому розміщуються всі можливі значення змінної x_1 . У наступному стовпці вказуються всі можливі значення змінної x_2 . Чергування змінних x_2 і x_3 починається, коли повністю заповнений стовпець зі змінною x_1 . Зрештою буде отримано наступну матрицю:

№склад.	Дискр. змінна №1	Дискр. змінна №2	Дискр. змінна №3
1	0	0	-1
2	0	0	0
3	0	0	1
4	0	1	-1
5	0	1	0
6	0	1	1
7	1	0	-1
8	1	0	0
9	1	0	1
10	1	1	-1
11	1	1	0
12	1	1	1

Як тільки матриця станів мережі сформована, наступний етап полягає у розпізнаванні матриці мережі та виконанні оптимізації не дискретних параметрів. Після отримання результатів оптимізації та вибору найбільш оптимального режиму, рекомендовані значення дискретних та не дискретних змінних передаються на відповідні регулятори напруги. Матриця станів є джерелом даних подальшого виконання оптимізації не дискретних параметрів.

На кожному етапі пошуку цільової функції виконується звернення до матриці станів СЕП. Наступним етапом оптимізації є оптимізація не дискретних змінних кожного з можливих станів СЕП промислового підприємства.

Оптимізованою змінною є величина реактивної потужності, що споживається (генерується) синхронними машинами. Після виконання оптимізації кожного з дискретних станів системи вибирається той стан, в якому значення втрат активної потужності в СЕП промислового підприємства мінімально.

3.2.5. Оптимізація значень не дискретних змінних

Існує багато методів нелінійної умовної оптимізації. Однак для вирішення завдання нелінійної умовної оптимізації доцільно розглядати метод послідовного квадратичного програмування (SQP) і метод внутрішньої точки. Ці методи згідно [88, 89] є найбільш досконалими для таких завдань. Пропонується в рамках практичної реалізації запропонованого алгоритму розглянути ці методи оптимізації та порівняти їх за двома показниками:

1. Ефективність алгоритму оптимізації, що оцінюється величиною зниження втрат активної електроенергії в СЕП (кВтгод).
2. Швидкість виконання алгоритму (с).

Процес оптимізації повинен здійснюватися в режимі реального часу із заданою періодичністю. Тому для виключення прийняття рішень із запізненням важливо, щоб реалізація алгоритму була максимально швидкою.

3.2.5.1. Метод послідовного квадратичного програмування

Метод послідовного квадратичного програмування (SQP) є одним із найсучасніших методів нелінійної оптимізації [88, 89]. У статті Schittkowski K. [90] представлені тестові розрахунки успішно реалізовані з використанням даного алгоритму. В результаті було отримано перевагу методу SQP порівняно з іншими методами оптимізації щодо ефективності, точності та відсотка успішного вирішення тестових оптимізаційних завдань.

Метод SQP ґрунтується на роботах Biggs M.C. [91], Han S.P. [92] та Powell M.J.D.[93-94]. Він дозволяє використовувати метод Ньютон для оптимізації за наявності обмежень, як це зроблено для оптимізації без обмежень. На кожній основній ітерації здійснюється апроксимація Гессіана для функцій Лагранжа з допомогою квазиньютонівського модифікованого методу. Такий підхід необхідний формування підзадачі квадратичного програмування, рішення якої використовується визначення напрямки пошуку у процедурі лінійного пошуку.

Огляд методів послідовного квадратичного програмування представлений роботами Fletcher R. [95], Gill P.E. [96], Powell M.J.D. [94] та Schittkowski K. [90]. Детальний опис методу SQP наводиться у [88, 89].

Цільову функцію в рамках задачі нелінійної оптимізації можна сформулювати так:

$$\begin{aligned} \min_{x \in R^n} f(x), \\ h_{R^n \rightarrow R^m}(x) = 0, \\ g_{R^n \rightarrow R^p}(x) \leq 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

де $f: R^n \rightarrow R^1$ - цільова функція, $h: R^n \rightarrow R^m$ - функція завдання обмежень у вигляді рівності, $g: R^n \rightarrow R^p$ - функція завдання обмежень цільової функції у вигляді нерівностей.

Принцип послідовного квадратичного програмування полягає у пошуку мінімуму цільової функції шляхом ітеративного вирішення підзадачі квадратичного

програмування. Для ітерації, відповідної вектору \mathbf{x}_k , $k \in N^*$, рішення підзадачі квадратичного програмування дозволяє знайти нове рішення, яке формує новий вектор \mathbf{x}_{k+1} і провести нову ітерацію. Процес повторюється поки послідовність \mathbf{x}_k , $k \in N^*$ почне рухатися у бік локального мінімуму x^* цільової функції, коли $k \rightarrow \infty$. Насправді процес закінчується, коли різниця між векторами \mathbf{x}_{k+1} і \mathbf{x}_k менше заданого параметра ε . Параметр ε визначає швидкість збіжності.

Вказані методи оптимізації представлені у програмному середовищі MATLAB.

3.3. Розробка алгоритмічного забезпечення автоматичного блоку регулювання УРПН

3.3.1. Завдання регулювання при використанні блоку автоматичного регулювання

Для успішного виконання оптимального регулювання напруги з використанням блоку автоматичного регулювання УРПН необхідно створення системи управління, алгоритму управління та вибір уставок спрацьовування УРПН.

Вибір нижньої уставки спрацьовування УРПН визначає стійку роботу електродвигунів та важливий для СЕП промислових підприємств, внаслідок віддаленості електроприймачів від центру живлення та важких умов роботи та пуску електродвигунів. Мінімум регульовальних характеристик навантаження за напругою може мати різні значення залежно від режиму роботи СЕП промислового підприємства та складу навантаження. Таким чином, нижня межа регулювання є плаваючою.

При моделюванні режиму роботи СЕП промислового підприємства нижня межа регулювання визначається розрахунковим способом, з поточного режиму роботи промислового підприємства.

Фактично розрахунок є визначення лінії з найбільшими втратами і розрахунок нижньої уставки РПН за формулою [5,6]:

$$U_{\text{уст.н}} = U_{\text{мін.доп}} + \text{MAX} \{ I_{\text{нг.і}} (R_{\text{лі}} \cos \varphi_i + X_{\text{лі}} \sin \varphi_i) \}; \quad (3.6)$$

де: $I_{\text{нг.і}}$ - струм навантаження і-тої лінії в години максимуму навантаження; $R_{\text{лі}}$ та $X_{\text{лі}}$ - відповідно активний та реактивний опір і-ої лінії.

При регулюванні напруги на ГПП необхідно забезпечити баланс між зниженням добового числа перемикань (що залежить від ширини зони нечутливості), збільшенням терміну служби УРПН до декількох років та досягненням економічного ефекту від процесу регулювання напруги [5,6]. Широка зона нечутливості є причиною підвищеного споживання електроенергії під час роботи на підвищеній напрузі [5,6].

Проблему знаходження верхньої уставки спрацьовування пристроїв РПН, коли він процес регулювання буде економічно вигідним, можна вирішити, побудувавши цільову функцію економічної ефективності регулювання напруги на шинах нижчої підстанції залежно від ширини зони нечутливості $Z = f(\Delta U)$

$$Z = E_p - C_{зм} - C_{пост} - K_p, \quad (3.7)$$

де: E_p – річна економія від зниження втрат активної електроенергії при впровадженні автоматичного регулювання режиму напруги на шинах знижувальної підстанції; $C_{зм}$ - річні поточні витрати, що залежать від ширини зони нечутливості; $C_{пост}$ - річні поточні витрати, що не залежать від ширини зони нечутливості; K_p - капітальні витрати на апаратуру автоматичного управління пристроям РПН, приведені до одного року [5].

Визначивши нижню уставку спрацьовування РПН і задаючи різними значеннями ширини зони нечутливості ΔU можна знайти область значень верхньої уставки, при якій регулювання режиму напруги за допомогою пристрою РПН силового трансформатора економічно вигідно.

Вхідними параметрами для розробки структури алгоритму роботи пристрою БАР РПН відповідно до ГОСТ 13109-97 є:

$U_{доп+}$, $U_{доп-}$ - межі допустимих відхилень напруги від номінальної. Зазначені межі не змінюються протягом роботи пристрою на конкретному об'єкті.

$U_{рац}$ - напруга, що підтримується РПН, визначене з використанням алгоритму оптимізації рівня напруги;

ΔU – зона нечутливості роботи БАР РПН;

T_1 – затримка часу видачі первинної команди управління приводом, с;

T_2 - затримки часу видачі повторної команди управління приводом у тому напрямі, с;

T_3 - затримки часу видачі чергової команди на керування приводом при відпрацюванні перенапруги, с.

Графічне відображення вхідних величин алгоритму роботи РПН показано на рис. 3.3.

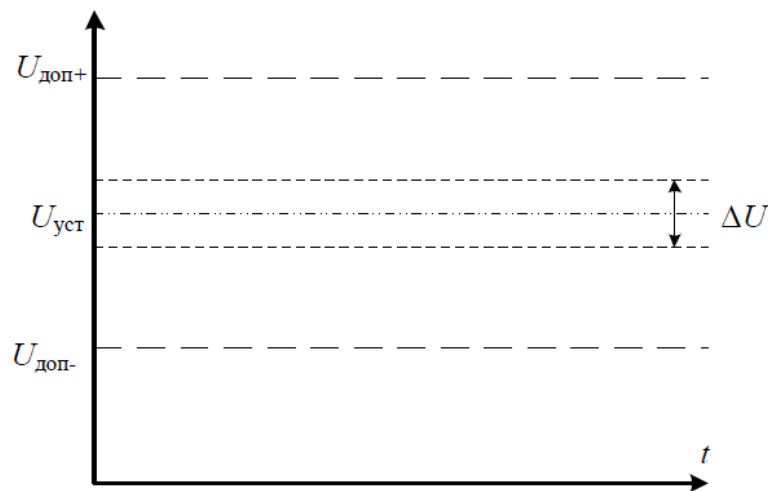


Рис. 3.3 – Графічне відображення вхідних величин алгоритму роботи

3.3.2. Алгоритм регулювання напруги

Під час створення алгоритму регулювання пристроєм БАР РПН необхідно враховувати такі фактори:

- при регулюванні напруги необхідно підтримувати його значення у споживача в межах, що нормуються ГОСТ 13109-97;

- необхідно, щоб УРПН не реагував на короточасні зниження напруги, зумовлені короткими замиканнями, різкими змінами навантаження, роботою релейного захисту тощо;

- при регулюванні напруги необхідно, щоб враховувалися оптимальні значення напруги, одержані за алгоритмом п. 3.2;

- кількість перемикачів контролера повинна бути найменшою. Ця вимога впливає із забезпечення надійності функціонування УРПН, оскільки зі зростанням частоти перемикачів зростає ризик відмови обладнання.

При формуванні алгоритму роботи БАР РПН за основу прийнято алгоритм роботи пристрою «Сіріус-2-РН» [100].

Запропонований алгоритм роботи блоку автоматичного регулювання РПН включає виконання наступних операцій:

1. При включенні живлення відбувається тестування працездатності регулятора. У разі успішного проходження тестів включається реле «Відмова», нормально замкнуті контакти розмикаються, сигнал «Відмова» знімається.

2. Дані ADC циклічно зчитуються, проводиться цифрова фільтрація сигналів, обчислюються поточні значення струмів та напруги, а також на основі взаємного розташування векторів напруги обчислюються (за необхідності) напруги зворотної послідовності U_2 для кожної секції.

3. Виконання алгоритму для визначення оптимального рівня напруги в СЕП запускається. Інформація про SES та електричні приймачі виконується, і починають збирати дані телевізійних вимірювань.

4. Наявність зовнішнього блокування сигналу ("Зовнішнє блокування 1, 2") забороняє формування команд "Додати" та "зменшити", на передній панелі пристрою "блокування у зовнішньому вході" на передній панелі пристрою повертається на. Знімаючи зовнішні сигнали блокування, світлодіод вимикається, допускається регулювання. Два універсальні дискретні входи працюють аналогічно, якщо вони запрограмовані як блокуючі входи. Якщо сигнал виявлений з вимикача нижнього кінця (на вході до "заборони зменшити"), видання команди "зменшення" заборонено, увімкнено світлодіод "нижня позиція". Під час зняття сигналу з кінцевого комутатора світлодіод гасне.

Якщо сигнал виявлений із вимикача верхнього кінця (на вході до "заборони ADD"), заборонено видавати команду "Додати", увімкнено світлодіод "верхня позиція". Під час зняття сигналу з кінцевого комутатора світлодіод гасне. Одночасно з наявністю сигналів

на дискретних входах "заборона додати" та "заборона зменшити" повністю заборонено коригування напруги: спалахують обидві світлодіоди крайніх положень, "відмова ПМ" та "сигналізація" реле і "сигналізація" увімкнено, індикатор відображається: "ПМ несправний".

Пристрій деблокується, коли видаляється щонайменше один із сигналів. За відсутності сигналу на вході "ручне/автоматика", пристрій знаходиться у зовнішньому режимі ручного регулювання, тоді як включений світлодіод.

5. Фактичні значення напруг і струмів порівнюються з налаштуваннями смуги. Якщо регульована величина введення $I_{\text{вв}} > I_{\text{ввmax}}$, тоді заборонена видача команди "Додати", увімкнено світлодіод "перевантаження", через 10 секунд увімкнеться реле "перевантаження". Світлодіоди та реле «Перевантаження» залишаються включеними до тих пір, поки струми перевищують задану обстановку.

Якщо напруга U_0 перевищує уставку, тоді видача команди "додавання" заборонено, увімкнено "блокування за U_0 ". Із зменшенням напруги U_0 нижче порогового значення, світлодіод "Блокування за U_0 " гасне, допускається регулювання.

Якщо напруга U_2 на регульованій секції перевищує налаштування, тоді команда "додати" забороняється, увімкнено світлодіод "заблокований за U_2 ". При зменшенні напруги U_2 нижче порогового значення гасне світлодіод "блокування за допомогою U_2 ", дозволяється регулювання вгору.

Якщо дійсне значення напруги нижче U_{MIN} на регульованій секції, тоді будь-яке регулювання заборонено, увімкнено світлодіод «Низька напруга». Зі збільшенням напруги більше U_{MIN} гасне світлодіод «Низька напруга», регулювання дозволяється.

Якщо напруга на регульованій секції більше, ніж U_{MAX} , то запускається відлік часу T_3 (затримка формування команди "зменшення" при перенапрузі) і увімкнено світлодіод "перенапруга", а також напис на екрані "надмірна напруга". Якщо після цього часу вхідна напруга залишається більше уставки, тоді запускається програма на відпрацювання перенапруги, видаючи команду "зменшити" через T_3 після завершення наступного циклу комутації, поки напруга не опуститься до напруги технічного обслуговування.

Світлодіод "надмірна напруга" гасне коли напруга стає менше, ніж U_{MAX} . Напис на екрані залишатиметься до скидання.

6. Якщо при аналізі струмів та напруги граничні умови не порушуються, тоді перевіряється умова:

$$U_{рац} - \Delta U/2 < U_{ном} < U_{рац} + \Delta U/2 \quad (3.8)$$

де: $U_{рац}$ - раціональне значення напруги обслуговування; $U_{ном}$ - значення напруги, що розливається, на регульованій секції. ΔU - налаштування напруги зони нечутливості

Якщо напруга знаходиться в межах (3.8), перемикання РПН не відбувається.

7. Якщо напруга зменшується і виходить за межі зони нечутливості:

$$U_{ном} < U_{рац} - \Delta U/2 \quad (3.9)$$

тоді вмикається світлодіод "U < норми" і запускається розрахунок часу T_1 (затримка формування первинної команди для управління приводом). За цей час контролюється виконання умови (3.9).

Якщо умова (3.9) перестає виконуватися, тоді розрахунок T_1 скидається і вимикається світлодіод "U < норми".

Якщо умова (3.9) виконується, тоді через час T_1 включається реле "додати". Запускається розрахунок T_1 (час перевірки реакції приводу на команду управління). Перевіряється сигнал "перемикання". Якщо за час T_1 від приводу не надійшов сигнал про початок переключення, тоді включається світлодіод «Привід не пішов», включаються реле «Сигналізація» і реле «Відмова ПМ», відключаються реле «Додати» і «Зменшити», на індикатор виводиться повідомлення «ПМ не пішов».

Якщо протягом T_1 надходить сигнал від приводу про початок переключення, тоді включається світлодіод «Переключення», через витримку T_3 виключається реле «Додати» (якщо заданий безперервний режим роботи, тоді реле виключається, коли напруга досягне зони нечутливості), запускається підрахунок витримки часу T_2 (час обробки команди керування). Якщо за цей час від приводу не надійшов сигнал про закінчення переключення, тоді включається світлодіод «Привід застряг», включаються

реле «Сигналізація» і реле «Відмова ПМ», на індикатор виводиться повідомлення «ПМ застряг».

Якщо протягом часу T_2 сигнал від приводу скинувся, тоді виключається світлодіод «Переключення», збільшується значення лічильника поточного положення УРПН і лічильника відпрацьованого ресурсу. На індикатор виводиться нове значення лічильника положення УРПН.

8. Перевіряється умова (3.9). Якщо вона виконується, тоді ознаки коригування напруги (збільшення та зменшення) відкидаються.

Якщо умова не виконується, тоді перевіряються умови (3.9) та (3.10):

$$U_{\text{пот}} > U_{\text{рац}} + \Delta U/2 \quad (3.10)$$

Якщо умова (3.10) виконується, тоді за попередній крок регулювання напруги не досягнуто зони нечутливості, тоді включається (підтверджується включення) світлодіод «U-норм» і реле «Знизити». Витримка часу буде знову дорівнювати T_1 . Якщо виявлено перенапругу ($U_{\text{пот}} > U_{\text{max}}$), тоді включається (або підтверджується включення) світлодіода «U>норми» і світлодіод «Перенапруга», на індикатор виводить повідомлення: «Перенапруга», запускається підрахунок витримки часу T_3 (затримка формування чергової команди на керування приводом при відпрацюванні перенапруги). Якщо через цей час перенапруга зберігається, тоді, за умови задання уставки «Сигналізація при блокуванні», включається реле «Сигналізація», встановлюється ознака перенапруги, запускається програма зниження напруги. Переключення вниз будуть тривати до тих пір, поки виконується умова (3.10), тобто доки напруга не повернеться в зону нечутливості. При $U_{\text{пот}} < U_{\text{max}}$ світлодіод «Перенапруга» гасне.

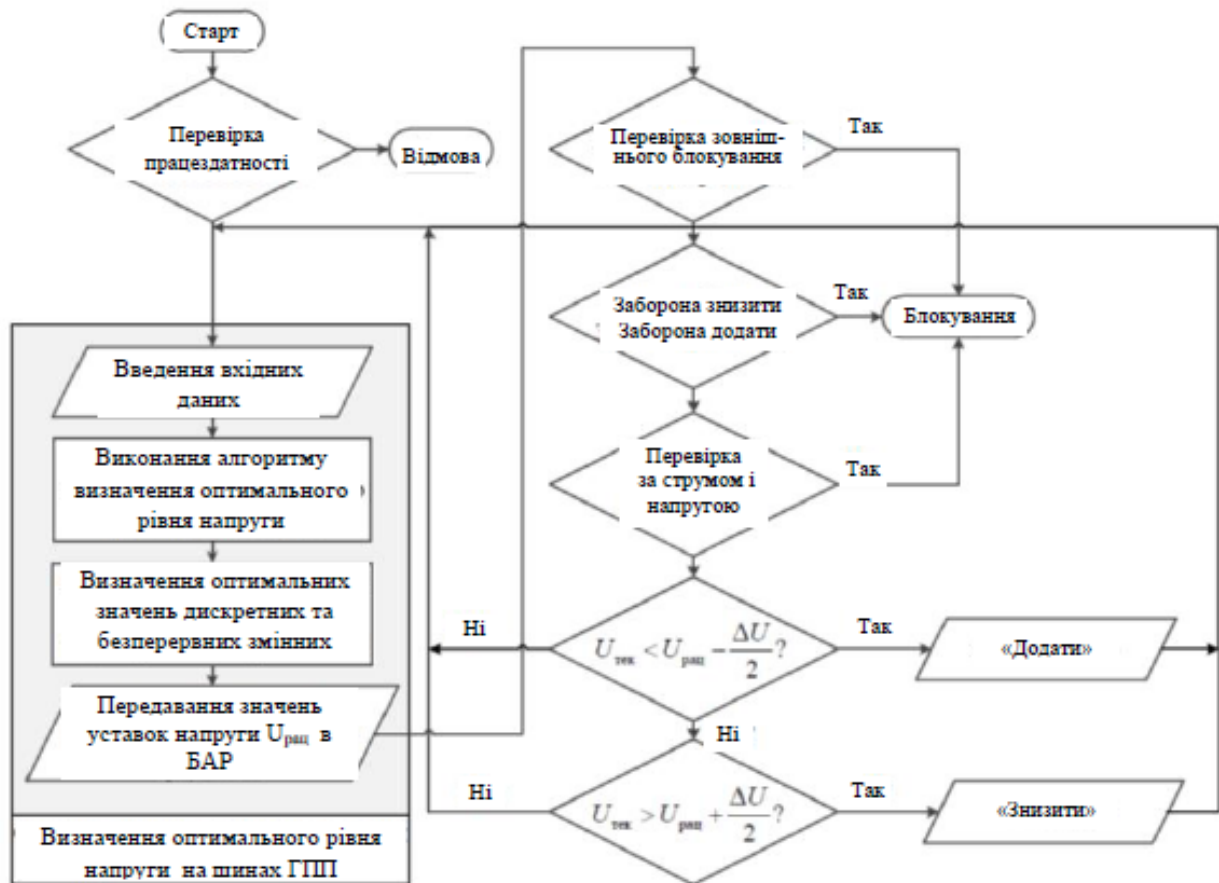


Рис. 3.4 - Алгоритм формування сигналу керування при регулюванні напруги на ГПП

Перед кожним переключенням задається витримка T_3 . При зниженні напруги до значення $U_{\text{ном}} < U_{\text{рац}} + \Delta U / 2$ вмикається світлодіод «U>норми», знімається заборона на видачу команди «Додати», скидається ознака перенапруга. Якщо при відсутності команди управління «Додати» або «Знизити» виявлений сигнал «Переключення», тоді включається світлодіод «Переключення», а після зняття цього сигналу забороняється регулювання напруги, включається реле «Сигналізація» і реле «Відмова ПМ», світлодіод «Привід пішов», включається реле «Живлення ПМ», яке відключає живлення привода. На індикатор виводиться повідомлення «ПМ пішов». Алгоритм формування сигналу, що подається на регулюючий пристрій, представлений на рис. 3.4.

Алгоритм забезпечує оптимальний рівень напруги на шинах силових трансформаторів (ЦТП), що дозволяє підтримувати раціональні режими напруги для електричних приймачів, розташованих на початку та кінці лінії живлення протягом годин максимального та мінімального навантаження.

3.4. Реалізація оптимального регулювання напруги в СЕП промислового підприємства з використанням SCADA-систем

Розглянемо програмно-інструментальний комплекс для реалізації автоматизованих систем управління технологічними процесами (SCADA Infinity). У ПК SCADA Infinity поєднано такі системи:

- виробничі системи (видобуток (очисний комбайн), прохідні комбайни, стрічковий транспорт, підйом, ваги конвеєрні, навантаження та контроль якості, електропостачання);
- системи безпеки та життєзабезпечення (система спостереження, оповіщення та пошуку людей, застигнутих аварією, газовий захист, протипожежний захист та водопостачання, вентиляція, водовідлив, тепlopостачання).

ПК SCADA Infinity виконує такі функції:

- отримання даних про стан технологічного обладнання та параметри технологічного процесу;
- отримання діагностичних даних про стан обладнання;
- передача команд телеуправління та телерегулювання;
- приведення отриманих даних до необхідних розмірностей;
- контроль достовірності значень технологічних параметрів;
- відстеження зв'язку з джерелами даних;
- отримання даних від сторонніх OPC DA серверів як клієнта;
- отримання даних від існуючих ЛСА, які не підтримують OPC, за погодженими протоколами передачі;

– отримання доступу до БД ЛСА життєво важливих технологічних систем, які не підтримують OPC;

надання доступу до оперативних даних за специфікації OPC DA. – кількість підключень до системи для отримання інформації немає обмежень. Структура запропонованої системи збору та передачі інформації СЕП промислового підприємства (на базі SCADA) представлена на рис. 3.5.

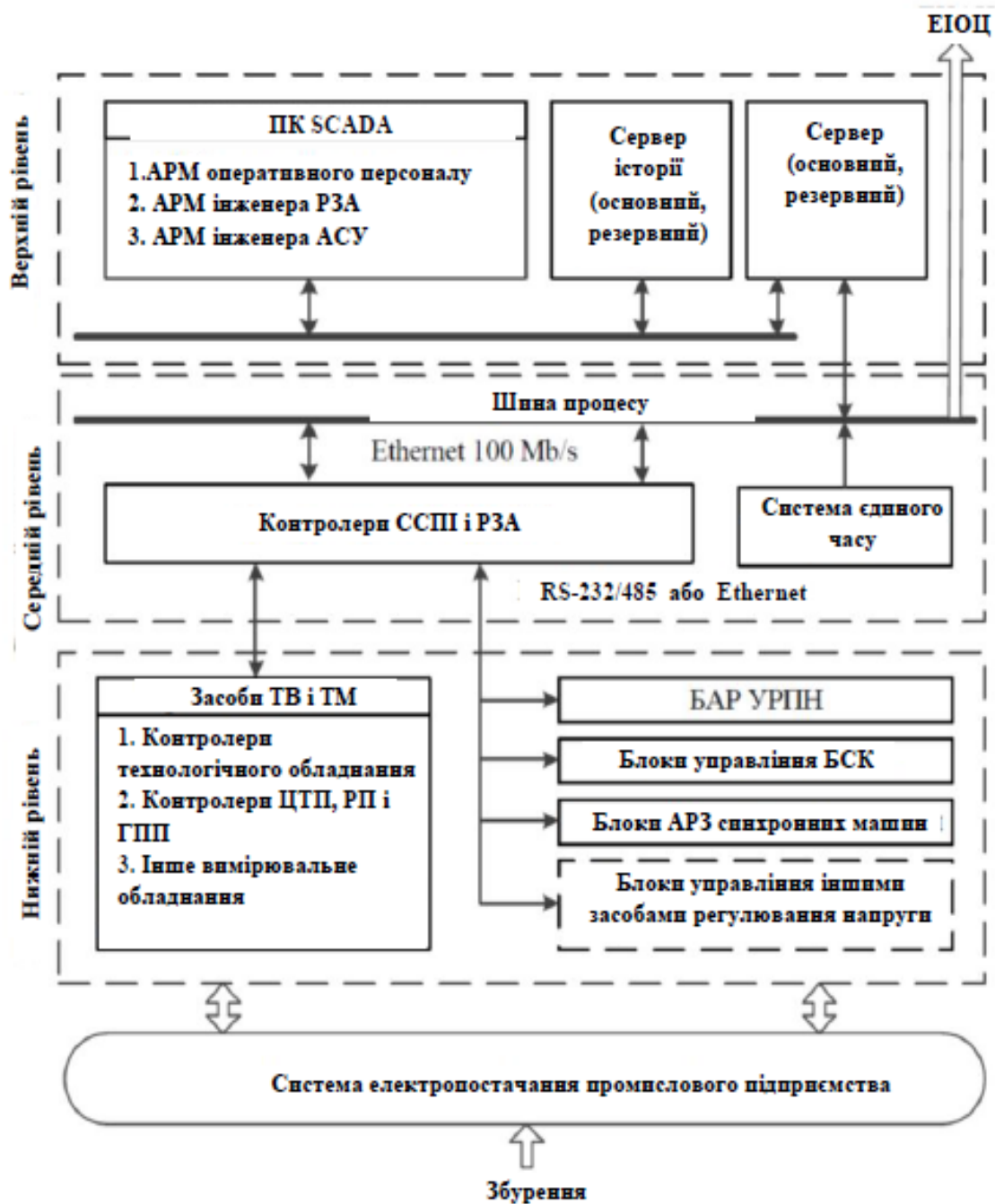


Рис. 3.5. Структура запропонованої системи збору та передачі інформації СЕП промислового підприємства (на базі SCADA)

Система дозволяє реалізувати розроблений алгоритм оптимального регулювання напруги та включає наступні підсистеми:

1. Підсистема нижнього рівня

Включає вимірювальний комплекс (вимірювальні трансформатори струму та напруги, датчики струму та напруги, вбудовані в технологічне обладнання; мікропроцесорні лічильники), який здійснює обробку параметрів режиму реального часу. Сигнали на цьому рівні можуть існувати в аналоговій (датчики струму та напруги) та в цифровій формі (контролери гірничо-шахтного обладнання та ПУПП). Для реалізації зв'язку із мікропроцесорними лічильниками використовується модемний інтерфейс RS 232 або RS-485. Сучасні цехові трансформаторні підстанції (наприклад, КТСВП-УХЛ-ВВ) мають цифровий інтерфейс RS-485 для виконання завдання автоматизації та диспетчеризації. Також вони дозволяють здійснювати контроль струму та напруги в силових колах [106]. На сучасному технологічному устаткуванні також передбачені датчики струму та напруги, інформація від яких може бути передана в систему SCADA за допомогою каналу Ethernet [107]. Дані про значення струму та напруги від вимірювальних трансформаторів струму та напруги по каналах зв'язку надходять на аналогові входи контролера. Якщо на ЦТП встановлений контролер з інтерфейсом RS-485, сигнал передається на дискретний вхід програмованого контролера системи SCADA. До підсистеми нижнього рівня також відносяться блоки керування засобами регулювання напруги: БАР РПН, блок управління БСК, блок АРВ . Вони можуть бути підключені до системи SCADA Infinity за допомогою інтерфейсів RS-485 та Ethernet.

2. Підсистема середнього рівня

Включає проміжні контролери, що приймають дані від контролерів та датчиків нижнього рівня. Їх основне завдання - збір даних та передача сигналів управління від технологічного обладнання.

3. Підсистема верхнього рівня

На цьому рівні одержувані дані від підсистем нижнього та середнього рівня класифікуються та візуалізуються. На підставі отриманих даних, за заданими алгоритмів формуються управляючі сигнали. Зазначимо, що ПК SCADA Infinity забезпечує гнучку та швидку розробку SCADA-систем [105]. Зокрема SCADA Infinity дозволяє розробляти алгоритми контролю та управління технологічними процесами за допомогою вбудованих мов програмування VBA, C#.

Таким чином, у рамках ПК SCADA можна реалізувати алгоритм оптимального регулювання напруги у СЕП промислових підприємств. Реалізація запропонованого алгоритму роботи системи регулювання напруги в середовищі SCADA дозволить знизити витрати на втрати електроенергії і підвищити якість електроенергії за показником «відхилення напруги» в умовах зміни режиму роботи системоутворюючої мережі.

Зазначимо, що для підвищення ефективності алгоритму оптимального регулювання напруги доцільно виконання досліджень у галузі розвитку методів оперативного прогнозування електричних навантажень у СЕП промислових підприємств (вугільних шахт).

3.5. Висновки по розділу 3

1. Розроблений алгоритм оптимізації рівня напруги в СЕП промислового підприємства. Цей алгоритм передбачає сумісну оптимізацію дискретних та неперервних змінних шляхом формування матриці станів. Для прискорення розрахунків при формуванні матриці станів відносно РПН -трансформаторів ГПП запропоновано враховувати лише сусідні положення ступенів регулювання пристрою РПН.
2. Запропонований алгоритм враховує статичні характеристики навантаження за напругою, що збільшує його точність та надійність.
3. Аналіз показав, що для виконання моделювання поточного стану режиму роботи СЕП промислового підприємства доцільно використовувати метод Ньютона з визначенням коефіцієнта демпфування відповідно до схеми Анеєва -

Матвеева. Цей метод має високу конвергенцію і може бути використаний для обчислення режимів СЕП будь-якої конфігурації, включаючи режими, близькі до граничних режимів.

4. Для оптимізації недискретних змінних пропонується розглянути два найсучасніші методи: метод внутрішньої точки та метод послідовного квадратичного програмування. В рамках практичної частини необхідно виконати порівняння цих алгоритмів за двома параметрами: ефективність оптимізації та швидкість оптимізації.

5. Оскільки пристрій РПН для трансформаторів на ГПП має обмежений ресурс, пропонується проводити перемикання ступенів пристроїв РПН з урахуванням показника економічної ефективності.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі міститься вирішення актуального завдання зниження втрат електроенергії в СЕП промислових підприємств та підвищення їх енергоефективності при оптимальному регулюванні напруги.

На основі проведених досліджень отримано такі результати.

1. Встановлено, що наявні засоби регулювання напруги (УРПН, БСК та СМ) в СЕП промислових підприємств (вугільних шахт) використовуються неоптимальним чином. При цьому, за умови дотримання нормативних відхилень напруги на затискачах електроприймачів вони не забезпечують мінімізації втрат електроенергії.

2. З використанням розробленого алгоритму визначення статичних характеристик навантаження АД за напругою встановлено, що регулюючий ефект реактивного навантаження шахтних АД за напругою знаходиться в межах $0,95 \div 2,6\%$. Регулюючий ефект активного навантаження АД за напругою незначний і може не враховуватися при регулювання напруги.

3. Встановлено, що регулюючі ефекти за напругою для втрат активної та реактивної потужності в ЦТП (ПУПП) змінюються в межах $-1,17 \div 0,51\%$ та –

1,53 ÷ 0,79% відповідно, і залежать від завантаження та номінальної потужності трансформаторів ЦТП (ПУПП).

4. Виявлено, що приріст втрат активної та реактивної потужності в трансформаторах ГПП зі збільшенням коефіцієнта трансформації незначний і визначається коефіцієнтом завантаження трансформатора. При зменшенні коефіцієнта трансформації втрати реактивної потужності зменшуються, а характер зміни втрат активної потужності залежить від коефіцієнта завантаження трансформатора.

5. Запропоновано алгоритм оптимізації рівня напруги за критерієм мінімуму втрат активної потужності з урахуванням статичних характеристик навантаження за напругою, що визначає оптимальні значення дискретних та недискретних параметрів пристроїв регулювання напруги.

6. Розроблено імітаційну модель СЕП промислового підприємства (вугільної шахти), що дозволяє моделювати оптимальне регулювання напруги по критерієм мінімуму втрат активної потужності згідно із запропонованим алгоритмом, використовуючи вибрані методи оптимізації недискретних змінних (метод послідовного квадратичного програмування та метод внутрішньої точки).

7. Запропоновано реалізацію алгоритму оптимального керування на базі програмно-інструментального комплексу SCADA Infinity.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. S.M. Baliuta, L. O. Kopylova, O. A. Mashchenko. Ukrainian Journal of Food Science. – 2018. - Volume 6, Issue 1, pp. 114–127.
2. П.Г. Плєшков, , О.І. Сіріков, Г.В. Безкровна Оптимізація рівня напруги в цехових мережах промислових підприємств. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація, 2011, випуск 24, ч.І. стор. 237-242
3. Яндульський О.С. Регулювання напруги в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії [текст]: Монографія / О.С. Яндульський, Г.О. Труніна, А.Б. Нестерко - К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.- 191 с.
4. Лежнюк П.Д. Електроощадні технології в електричних мережах енергосистем / Л. Н. Добровольська, В.В. Кулик, П. Д. Лежнюк // Під редакцією Лежнюка П.Д. – Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2018. – 328 с.
5. Левицький, С. М. Система автоматичного керування трансформатором з інтелектуальним регулятором напруги : монографія /С. М. Левицький, К. І. Колмачов. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 72 с.
6. S.Baliuta, L. Kopylova, Iu.Kuievda, V.Kuevda, O.Kovalchuk. Fuzzy logic energy management system of food manufacturing processes. Ukrainian Food Journal. – 2020. – Vol. 9., Is. 1 – P. 221-239.
7. Canard, J-F. Impact de la génération d'énergie dispersée dans les réseaux de distribution: Ph.D. dissertation – Institut National Polytechnique de Grenoble, 2000 – 212 p.
8. Caire, R. Gestion de la production décentralisée dans les réseaux de distribution: Ph.D. dissertation – Institut National Polytechnique de Grenoble, 2004 – 213 p.
9. Rami, G. Contrôle de tension auto adaptatif pour des productions d'énergies décentralisées connectées au réseau de distribution: Ph.D. dissertation – Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006 – 175 p.
10. Richardot, O. Réglage coordonné de tension dans les réseaux de distribution à l'aide de la production décentralisée: Ph.D. dissertation – Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006 – 192 p.
11. Rahimi, S. Evaluation of Requirements for Volt/Var Control and Optimization Function in Distribution Management Systems / S. Rahimi, M. Marinelli, F. Silvestro // In Proceedings of 2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition. IEEE. DOI: 10.1109/EnergyCon.2012.6347777 – pp. 331-336.
12. Шестеренко В.Е. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Підручник. - Вінниця: Нова книга, 2004. - 656с.

13. С. М. Балюта, В. Д. Йовбак, Л. О. Копилова, Є. О. Корольов Автоматизована система управління електропостачанням промислових підприємств Науково-практичний галузевий журнал Цукор України. — 2015. — № 11-12 (119-120). — С. 31-35.
14. С. М. Балюта, В. Д. Йовбак, Л. О. Копилова, Є. О. Методологічні основи управління споживанням електричної енергії промисловими підприємствами. Науково-практичний галузевий журнал Цукор України. — 2015. — № 4 (112). — С. 22-30.
15. Балюта С.М., Йовбак В. Д., Копилова Л. О., Литвин І. Ю. Математична модель електроспоживачів для керування напругою цехового трансформатора. Нау-кові праці НУХТ. – 2017. – Том 23, №3 – С. 126–140.
16. Балюта С.М.,Йовбак В.Д., Копилова Л.О., Соколова О.М. Інтелектуальне управління електроспоживанням промислового підприємства. Наукові праці Національного університету харчових технологій – 2019. – т.25, №1. – С. 128–139.
17. Ягуп В. Г.Моделювання та оптимізація режимів систем енергопостачання та електроспоживання : навч. посібник / В. Г. Ягуп, К. В. Ягуп ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім.О. М. Бекетова, 2019. – 183 с.
18. Василенко О. А. Математично-статистичні методи аналізу у прикладних дослідженнях: навч. посіб. / О. А. Василенко, І. А. Сенча. – Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2011. – 166 с
19. Захожай В. Б. Практикум з основ статистики / Захожай В. Б., Попов І. І. Коваленко О. В. – К.: МАУП, 2001. – 172 с..
20. ГОСТ 24126-80 (СТ РЕВ 634-88). Пристрої регулювання напруги силових трансформаторів під навантаженням Загальні технічні умови (із змінами № 1, 2) - Введ. 1982-01-01. - М.: Видавництво стандартів, 1988. – 36 с.
21. ГОСТ 17500-72. Трансформатори силові. Пристрої перемикання відгалужень обмоток. Загальні технічні умови - Введ. 1973-01-01., скас. 1982-01-01. - М.: Видавництво стандартів, 1979. – 24 с.
22. Технічний опис та інструкція з експлуатації регулятора напруги трансформаторів АРТ-ІМ та РНМ-1. – Рига: Ризький дослідний завод «Енергоавтоматика», 1988. – 58 с.
23. Сегеда, М. С. Електричні мережі та системи : підручник / М. С. Сегеда, Нац. ун-т "Львівська політехніка".– 3-е вид, доповн. та перероб.– Львів : Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2015.– 538 с.
24. Чисельний розрахунок нелінійних електричних кіл: навч. посібник/

25. О. О. Ситник, К. М. Ключка, В. В. Палагін, О. С. Гавриш, І. Б. Семко; Мво освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси : ЧДТУ, 2019. – 140 с. с..
26. Ортега, Д. Ітераційні методи вирішення нелінійних систем рівнянь з багатьма невідомими / Д. Ортега, В. Рейнбольдт.- М.: Мир, 1975. – 560 с.
27. Tinney, W.E. Power flow solution by Newton's method / W.E. Tinney, C.E. Hart // IEEE Trans. 1967. Vol. PAS-86. – № 115 – pp. 1449 – 1460.
28. Dharamjit, D.K. Load Flow Analysis on IEEE 30 bus System / D.K. Dharamjit // International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 2, Issue 11, November 2012. – pp. 61 – 70.
29. Колесницький О. К. Чисельні методи : навчальний посібник / О. К. Колесницький, І. Р. Арсенюк, В. І. Месюра. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 130 с.
30. Павленко П. М., Філоненко С. Ф., Чередніков О. М., Трейтяк В. В. Математичне моделювання систем і процесів: навч. посіб. – К. : НАУ, 2017. – 392 с.
31. Електроенергетика України. Структура, керування, інновації : монографія / І. В. Хоменко, О. А. Плахтій, В. П. Нерубацький, І. В. Стасюк. – Харків: НТУ «ХПІ», ТОВ «Планета-Прінт», 2020. – 132 с
32. Лежнюк, П. Д. Оптимізація режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами електроенергії : монографія / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 164 с.
33. Журахівський А. В. Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж: підручник / А. В. Журахівський, С. В. Казанський, Ю. П. Матеєнко, О. Р. Пастух. – Київ. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – 456 с.
34. Опис алгоритмів та моделей ПВК Mustang. – Рига, 2001. – 42 с.
35. Журахівський А. В., Яцейко А. Я. Оптимізація режимів електроенергетичних систем. Навчальний посібник. Друге видання, виправлене. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. 140 с.
36. Математичні задачі енергетики. Частина 1. Моделювання і аналіз усталених режимів роботи електричних систем [Електронний ресурс]: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Управління, захист та автоматизація енергосистем» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; укладач: О. В. Хоменко. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,19 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 108 с..
37. Тептя, В. В. Електромеханічні перехідні процеси в електроенергетичних системах : електронний конспект лекцій комбінованого (локального та

- мережного) використання [Електронний ресурс] / В. В. Тептя, В. В. Кулик. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 183 с.
38. Van Ness, J. E. Elimination methods for load flow studies / J. E. Van Ness, J. H. Griffin // *Power Apparatus and Systems*, 1961.
39. Bhowmik, P. S. Load Flow Analysis: An Overview / P. S. Bhowmik, D.V. Rajan, S. P. Bose // *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, vol. 6, 2012. – №3.
40. Dixit, S. Power flow analysis using fuzzy logic / S. Dixit, L. Srivastava, G. Agnihotri // in *Proc. Power India Conference, IEEE, New Delhi, 2006*.
41. Mohatram, M. Economic load flow using lagrange neural network / M. Mohatram, P. Tewari, N. Latanath // in *Proc. Electronics, Communications and Photonics Conference (SIEPCP), 2011 Saudi International, 2011 – Apr.*
42. Wallach, Y. Gradient methods for load flow-problems / Y. Wallach // *IEEE Trans, Power App. Syst.*, vol. PAS-87, May 1968, pp. 1314 – 1318.
43. Brown, H. E. Contingencies evaluated by a Z-matrix method, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-88, pp. 409 – 412, Apr. 1969.
44. Моделі оптимального розвитку енергосистем: Методи оптимізації розвитку електричних мереж енергосистем. Навчальний посібник. [Електронний ресурс] для студ. спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В. А. Баженов. – Електронні текстові дані (1 файл: 462 кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 38 с..
45. Nocedal, J. Numerical Optimization / J. Nocedal, S. J. Wright. – Eds. Springer, 2006.
46. Жалдак М.І., Триус Ю.В. Основи теорії і методів оптимізації: Навчальний посібник. - Черкаси: Брама-Україна, 2005. - 608 с..
47. Schittkowski, K. NLQPL: A FORTRAN-Subroutine Solving Constrained Nonlinear Programming Problems, *Annals of Operations Research*, Vol. 5, pp 485 – 500, 1985.
48. Biggs, M.C. Constrained Minimization Using Recursive Quadratic Programming, *Towards Global Optimization* (L.C.W. Dixon and G.P. Szergo, eds.), North-Holland, pp 341 – 349, 1975.
49. Han, S.P. A Globally Convergent Method for Nonlinear Programming, *J. Optimization Theory and Applications*, Vol. 22, p. 297, 1977.
50. Powell, M.J.D. The Convergence of Variable Metric Methods for Nonlinearly Constrained Optimization Calculations, *Nonlinear Programming 3*, (O.L. Mangasarian, R.R. Meyer and S.M. Robinson, eds.), Academic Press, 1978.

51. Powell, M.J.D., A Fast Algorithm for Nonlinearly Constrained Optimization Calculations, Numerical Analysis, G.A.Watson ed., Lecture Notes in Mathematics, Springer Verlag, Vol. 630, 1978.
52. Fletcher, R. Practical Methods of Optimization, Vol. 1, Unconstrained Optimization, and Vol. 2, Constrained Optimization, John Wiley and Sons, 1980.
53. Gill, P.E. Practical Optimization / P.E. Gill, W. Murray, M.H.Wright // London, Academic Press, 1981.
54. Powell, M.J.D. Variable Metric Methods for Constrained Optimization, Mathematical Programming: The State of the Art, (A. Bachem, M. Grottschel and B. Korte, eds.) Springer Verlag, pp. 288 – 311, 1983.
55. Hock, W. Comparative Performance Evaluation of 27 Nonlinear Programming Codes / W. Hock, K. A. Schittkowski //, Computing, Vol. 30, p. 335, 1983.

