

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки і електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

Удосконалення систем електропостачання з видозміненими схемами

з'єднання збірних шин

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2м курсу, групи ДЕБ-24 мг
спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____/ Єгор ОРЕЛ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/ Ірина ПАНТЕЛЄЄВА
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/ Світлана АРТЮХ
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/ Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/ Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2025 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА**

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

**ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри**

(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

**на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачу вищої освіти Єгору ОРЛУ

1. Тема «Удосконалення систем електропостачання з видозміненими схемами з'єднання збірних шин»

затверджена наказом по університету №4801-5/3664 від « 06 » 10 2025р.

2. Термін здачі закінченої роботи « 10 » 12 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: статистичні дані по аваріям, пов'язаним зі збірними шинами; параметри надійності сучасних схем; критерії вибору схем електричних з'єднань для заданого рівня напруги

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):
ВСТУП; РОЗДІЛ 1.ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ СХЕМ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ ЕНЕРГООБ'ЄКТІВ. РОЗДІЛ 2.СХЕМИ ВИДАЧІ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ. РОЗДІЛ 3.УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ВИДОЗМІНЕНИМИ СХЕМАМИ З'ЄДНАННЯ ЗБІРНИХ ШИН. ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ. СПИСОК ПОСИЛАНЬ

5.Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання « 06 » 10 2025 р.

Керівник _____ Ірина ПАНТЕЛЄЄВА
(підпис) (ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання _____ Єгор ОРЕЛ
(підпис) (ім'я, прізвище)

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи**

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	07.10.25 – 10.10.25	
2	Проведення аналізу наукової літератури	11.10.25 – 18.10.25	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	19.10.25 – 29.10.25	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	30.10.25 – 26.11.25	
5	Оформлення пояснювальної записки та підготовка презентації	27.11.25 – 10.12.25	

Студент (ка) _____ Єгор ОРЕЛ
(підпис) (ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

до магістерської роботи з теми «Удосконалення систем електропостачання з видозміненими схемами збірних шин», виконаної магістрантом Єгором ОРЛОМ

Магістерська робота виконана на 67 сторінок, містить 5 таблиць, 16 рисунків, що характеризують результати дослідження, використано літературних джерел 16.

В Україні значна частина розподільних пристроїв побудована за схемами, прийнятими ще у 1970–1980-х роках, що не повною мірою відповідає сучасним вимогам до гнучкості, резервування та автоматизації. Це обмежує можливості інтеграції нових джерел енергії, знижує селективність аварійного відключення, ускладнює впровадження цифрових підстанцій та Smart-Grid-технологій.

Особливої актуальності тема набуває в умовах післявоєнного відновлення української енергетики, коли значна кількість об'єктів електропостачання пошкоджена або потребує глибокої модернізації. Оптимальне поєднання традиційних і сучасних схем збірних шин дозволить скоротити вартість реконструкції, підвищити надійність електропостачання промислових і житлових споживачів.

Таким чином, удосконалення систем електропостачання з видозміненими схемами з'єднання збірних шин є актуальним науковим і практичним завданням, що сприятиме підвищенню надійності, ефективності та технологічної сумісності української енергосистеми з європейською мережею.

Мета магістерської кваліфікаційної роботи – підвищення надійності, гнучкості та енергоефективності систем електропостачання шляхом удосконалення схем з'єднання збірних шин на розподільних пристроях різних класів напруги, із урахуванням сучасних європейських тенденцій розвитку електричних мереж, особливостей експлуатації в Україні та можливостей впровадження цифрових технологій.

Ключові слова: збірні шини, система електропостачання, відновлювані джерела енергії, надійність схеми, гнучкість схеми, розподільний пристрій.

ABSTRACT

to the master's thesis on the topic "Improvement of power supply systems with modified busbar schemes", completed by master's student Yegor ORLOM

The master's work is executed on 67 pages, contains 5 tables, 16 drawings, which characterize the results of research, used literary sources 16

In Ukraine, a significant part of the switchgear is built according to schemes adopted back in the 1970s and 1980s, which does not fully meet modern requirements for flexibility, redundancy, and automation. This limits the possibilities of integrating new energy sources, reduces the selectivity of emergency shutdown, and complicates the implementation of digital substations and Smart Grid technologies.

The topic is particularly relevant in the post-war reconstruction of the Ukrainian energy sector, when a significant number of power supply facilities are damaged or require deep modernization. The optimal combination of traditional and modern busbar schemes will reduce the cost of reconstruction and increase the reliability of power supply to industrial and residential consumers.

Thus, improving power supply systems with modified busbar connection schemes is a relevant scientific and practical task that will contribute to increasing the reliability, efficiency, and technological compatibility of the Ukrainian power system with the European network.

The purpose of the master's qualification work is to increase the reliability, flexibility and energy efficiency of power supply systems by improving busbar connection schemes on switchgear of different voltage classes, taking into account modern European trends in the development of electrical networks, the peculiarities of operation in Ukraine and the possibilities of implementing digital technologies.

Keywords: busbars, power supply system, renewable energy sources, circuit reliability, circuit flexibility, switchgear.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ СХЕМ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ ЕНЕРГООБ'ЄКТІВ

- 1.1. Загальні відомості та вимоги до схем
- 1.2. Схеми з однократним принципом підключення приєднань
- 1.3. Схеми з двократним принципом підключення приєднань
- 1.4. Схема багатокутника з підмінним вимикачем

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

РОЗДІЛ 2. СХЕМИ ВИДАЧІ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

- 2.1. Експлуатаційна оцінка схем зі збірними шинами
- 2.2. Ліквідація аварій у схемах РП станцій та підстанцій

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ВИДОЗМІНЕНИМИ СХЕМАМИ З'ЄДНАННЯ ЗБІРНИХ ШИН

- 3.1. Модернізація схеми з двома системами збірних шин та з обхідною системою шин
- 3.2. Розробка схеми електричних мереж для електропостачання окремих груп споживачів
- 3.3. Надійність видозмінених схем збірних шин та інтелектуальний розвиток електричних мереж

3.3.1. Практичні рекомендації

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

РП	- розподільний пристрій
СЕП	- система електропостачання
ВДЕ	- відновлювані джерела енергії
ЕЕС	- електроенергетична система
КЗ	- коротке замикання
РЗА	- релейний захист та автоматики
ПРВВ	- пристрій резервування відмов вимикачів
АЧР	- автоматичне частотне розвантаження
АВР	- автоматичне включення резерву
ДЗШ	- диференційний захист шин
ШСВ	- шиносполучний вимикач
ОВ	- обхідний вимикач
ВРП	- відкритий розподільний пристрій
ГПП	- головна понижувальна підстанція
ВЗСШ	- видозмінені схеми збірних шин

ВСТУП

Актуальність.

Сучасний етап розвитку енергетичних систем характеризується стрімким зростанням навантажень, децентралізацією генерації, активним упровадженням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та переходом до «розумних» мереж (Smart Grids). У цих умовах особливої ваги набуває оптимізація схемних рішень систем електропостачання (СЕП), зокрема удосконалення схем з'єднання збірних шин на розподільних пристроях (РП) електричних станцій та підстанцій усіх рівнів напруги — від 6(10) до 750 кВ. Саме від типу та конфігурації схем шин залежить надійність, живучість і гнучкість роботи енергосистеми, а також її стійкість до аварійних ситуацій та ефективність реконструкцій.

В Україні значна частина розподільних пристроїв побудована за схемами, прийнятими ще у 1970–1980-х роках, що не повною мірою відповідає сучасним вимогам до гнучкості, резервування та автоматизації. Багато підстанцій, наприклад, 110–330 кВ досі мають традиційні схеми з однією або двома системами шин без обхідних секцій чи без можливості швидкої реконфігурації при ремонтних або аварійних режимах. Це обмежує можливості інтеграції нових джерел енергії, знижує селективність аварійного відключення, ускладнює впровадження цифрових підстанцій та Smart-Grid-технологій.

У країнах Європейського Союзу вже кілька десятиліть триває тенденція до використання видозмінених схем з'єднання збірних шин, зокрема схем типу «3/2», «чотирикутник», «кільцева», «радіально-секційна» з автоматизованими комутаційними вузлами, що забезпечують високу експлуатаційну гнучкість, мінімізацію простоїв та втрат енергії під час ремонтів чи коротких замикань (КЗ). Такий досвід є надзвичайно цінним для України, оскільки дозволяє пристосувати існуючі підстанції до нових режимів роботи, інтегрувати розосереджену генерацію та забезпечити відповідність європейським стандартам ENTSO-E.

Особливої актуальності тема набуває в умовах післявоєнного відновлення української енергетики, коли значна кількість об'єктів електропостачання пошкоджена або потребує глибокої модернізації. Оптимальне поєднання традиційних і сучасних схем збірних шин дозволить скоротити вартість реконструкції, підвищити надійність електропостачання промислових і житлових споживачів, а також створити гнучку архітектуру мережі, готову до масштабного впровадження систем накопичення енергії, мікромереж і гібридних станцій.

Таким чином, удосконалення систем електропостачання з видозміненими схемами з'єднання збірних шин є актуальним науковим і практичним завданням, що сприятиме підвищенню надійності, ефективності та технологічної сумісності української енергосистеми з європейською мережею.

Мета магістерської кваліфікаційної роботи: підвищення надійності, гнучкості та енергоефективності систем електропостачання шляхом удосконалення схем з'єднання збірних шин на розподільних пристроях різних класів напруги, із урахуванням сучасних європейських тенденцій розвитку електричних мереж, особливостей експлуатації в Україні та можливостей впровадження цифрових технологій.

Об'єкт дослідження: процес удосконалення систем електропостачання шляхом застосування видозмінених схем з'єднання збірних шин у розподільних пристроях середньої та високої напруги.

Предмет дослідження: схемні, конструктивні та експлуатаційні особливості процесу формування та оптимізації видозмінених схем з'єднання збірних шин, а також методи підвищення їх надійності, резервування та відповідності вимогам стандартів ЄС при модернізації українських електричних мереж.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання:**

✓ Проаналізувати існуючі схеми з'єднання збірних шин у системах електропостачання України та країн ЄС, визначити їхні переваги, недоліки та сфери ефективного застосування.

✓ Обґрунтувати критерії вибору оптимальної схеми з'єднання шин з урахуванням вимог надійності, ремонтпридатності, резервування та вартості реалізації.

✓ Розробити видозмінені (удосконалені) схемні рішення для РП різних рівнів напруги з урахуванням особливостей інтеграції відновлюваних джерел енергії.

✓ Сформулювати практичні рекомендації щодо впровадження оптимізованих схем з'єднання збірних шин у нових і реконструйованих системах електропостачання України відповідно до європейських стандартів.

Теоретичні результати дослідження: обґрунтовано доцільність застосування видозмінених схем з'єднання збірних шин у системах електропостачання різних рівнів напруги, визначено їх вплив на надійність, живучість та гнучкість роботи енергосистем. Розроблено методичні підходи до вибору оптимальної конфігурації схем з урахуванням критеріїв надійності, резервування та економічної ефективності.

Практичні результати полягають у створенні рекомендацій щодо модернізації РП України відповідно до європейських стандартів, удосконаленні схемних рішень для реконструкції існуючих систем електропостачання та підвищенні їх здатності до інтеграції відновлюваних джерел енергії.

Методи дослідження: методи системного аналізу, порівняльного оцінювання схемних рішень, моделювання електричних режимів, а також методи оптимізації параметрів схем з'єднання збірних шин за критеріями надійності, резервування та енергоефективності.

РОЗДІЛ 1. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ СХЕМ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ ЕНЕРГООБ'ЄКТІВ

1.1. Загальні відомості та вимоги до схем

За останні роки спостерігається суттєва еволюція підходів до проєктування схем РП, що зумовлено як розвитком технологій, так і зміною вимог до надійності, гнучкості та безпеки електропостачання. У порівнянні з нормативними документами 1987 та 1993 років відбулися істотні коригування у принципах побудови розподільних пристроїв. Зокрема, на нових проєктованих і реконструйованих РП, більше не допускається використання схем, у яких застосовуються роз'єднувачі та короткозамикачі як основні комутаційні елементи, оскільки експлуатаційна практика довела їх низьку надійність, підвищений ризик дугових замикань і складність забезпечення належного рівня електробезпеки персоналу [1].

Таке оновлення вимог пов'язане з переходом до використання більш досконалих комутаційних апаратів, насамперед вимикачів навантаження, вакуумних та елегазових вимикачів, які забезпечують швидкодію, розмикання кола без електричної дуги, а також можливість автоматизованого керування у складі цифрових систем релейного захисту та автоматики (РЗА). Крім того, сучасні стандарти ЄС орієнтують на підвищення рівня селективності відключень, скорочення часу відновлення живлення після аварій і мінімізацію ручних операцій, що також зумовлює відмову від застарілих схем із короткозамикачами.

Таким чином, відбувається поступовий перехід до сучасних схемних рішень, які відповідають вимогам надійності, ремонтпридатності енергетичної інфраструктури, а також узгоджуються з європейськими підходами до побудови підстанцій нового покоління.

Із переліку типових схем зі збірними шинами, у яких на кожне приєднання передбачено лише один вимикач, виключено варіанти, що

поєднують функції обхідного та секційного (шиноз'єднувального) вимикача, оскільки така конструкція ускладнює експлуатацію й знижує надійність РП.

Суттєво розширено застосування схем із двома вимикачами на приєднання, що забезпечує підвищену гнучкість керування, можливість проведення ремонтів без знеструмлення споживачів і кращу селективність у роботі релейного захисту.

У той же час, за умови використання сучасного високонадійного обладнання (вакуумних, елегазових або гібридних вимикачів, цифрових РЗА тощо) допускається спрощення структури окремих схем — зокрема, відмова від ремонтних перемичок або від прохідної системи шин, якщо це не погіршує показники резервування та надійності живлення.

Крім того, з метою підвищення надійності системи у низці схем передбачено встановлення двох послідовно з'єднаних вимикачів між секціями збірних шин, що забезпечує додатковий ступінь захисту та гнучкість оперативних перемикань. Наприклад, для розподільних установок напругою 6–10 кВ застосування лише одного секційного вимикача дозволяється виключно за наявності техніко-економічного обґрунтування, яке підтверджує доцільність такого рішення.

Сучасна тенденція до зростання концентрації потужності на енергетичних об'єктах висуває нові вимоги до рівня надійності, ефективності та економічної доцільності функціонування електроенергетичних систем (ЕЕС). Особливо гостро ці питання постають у частині побудови головних схем електричних з'єднань та структури розподільчих пристроїв, які визначають гнучкість і живучість енергооб'єкта.

З одного боку, підвищення потужності окремих приєднань збільшує їхню роль у забезпеченні стабільної роботи всієї системи, роблячи кожен вузол критично важливим для енергопостачання. З іншого — зростання вартості та складності електротехнічного обладнання вимагає ретельного обґрунтування кожного схемного рішення з позицій надійності, резервування та оптимізації витрат.

Найбільш відчутно ця проблема проявляється у розподільчих пристроях надвисокої та ультрависокої напруги, де будь-яке відключення або відмова елемента може призвести до значних енергетичних і фінансових втрат, а отже — потребує впровадження удосконалених схемних рішень, що поєднують високу технічну надійність із економічною доцільністю.

З огляду на індивідуальні особливості кожного енергетичного об'єкта та високий рівень невизначеності вихідних даних, процес вибору головної електричної схеми завжди має характер техніко-економічного компромісу. Такий вибір базується на порівняльному аналізі кількох можливих варіантів схемних рішень, метою якого є визначення оптимального варіанту, що найповніше задовольняє встановлені технічні, експлуатаційні та економічні критерії ефективності [2].

Найбільші труднощі на етапі техніко-економічного порівняння варіантів головних схем пов'язані з необхідністю врахування економічних, технічних і соціальних наслідків, що виникають при різному рівні їх надійності.

Основна складність полягає у нестачі достовірних вихідних даних, насамперед статистичних характеристик відмов та показників надійності, а також у складності формалізації інтегральних критеріїв надійності головної схеми як єдиної системи. Додаткову проблему становить визначення потенційних збитків, спричинених недовідпусткою електроенергії або порушенням стійкості паралельної роботи енергосистем, що суттєво ускладнює прийняття обґрунтованого інженерно-економічного рішення.

Оцінювання надійності схем електричних з'єднань проводиться шляхом аналізу можливих аварійних режимів і їх наслідків, що можуть виникати як на окремих приєднаннях, так і на елементах головної схеми (ГС). Будь-який елемент схеми або приєднання потенційно може стати джерелом відмови, а також потребує періодичного технічного обслуговування чи ремонту, що впливає на загальну надійність системи.

Для зручності аналізу аварійні ситуації у складі ГС поділяють на кілька основних типів.

Першу групу становлять ситуації типу «відмова», коли вихід з ладу будь-якого елемента або приєднання відбувається під час нормальної роботи схеми.

Другу групу формують ситуації типу «ремонт», які виникають під час планового чи позапланового виведення з роботи окремих елементів або приєднань для виконання ремонтних чи профілактичних робіт.

Третю групу становлять аварійні ситуації типу «ремонт + відмова», які виникають у разі виходу з ладу будь-якого приєднання або елемента головної схеми під час виконання ремонтних робіт на інших її елементах. Такі випадки є найскладнішими з точки зору забезпечення надійності, оскільки поєднують у собі зменшену резервованість системи через виведення частини обладнання з роботи та раптову відмову діючого елемента, що може призвести до порушення нормального режиму або повного знеструмлення частини споживачів.

Узагальнюючи, схеми електричних з'єднань енергооб'єктів повинні забезпечувати надійну, безпечну та економічно обґрунтовану роботу системи. До основних вимог належать простота конструкції, можливість проведення ремонтів без відключення споживачів, селективність захистів і зручність експлуатації. Оптимальна схема має поєднувати технічну ефективність, гнучкість у роботі та мінімальні витрати на реалізацію й обслуговування.

1.2. Схеми з однократним принципом підключення приєднань

У схемах цього типу виконання комутації приєднання потребує спрацювання лише одного вимикача, що забезпечує простоту керування та високу експлуатаційну надійність. До даного класу належать схеми зі збірними шинами, які нині мають найширше застосування на підстанціях напругою до 220 кВ включно [3].

Першим і базовим представником цього класу вважається схема з однією системою збірних шин, у якій кожне приєднання комутується одним вимикачем (рис.1.1,а). З погляду топології, така схема має структуру «зірки» (рис.1.1,б), характеризується симетричністю та однозв'язністю, тобто між будь-якими двома приєднаннями існує лише один шлях електричного зв'язку, що забезпечує простоту, але обмежує можливості резервування.

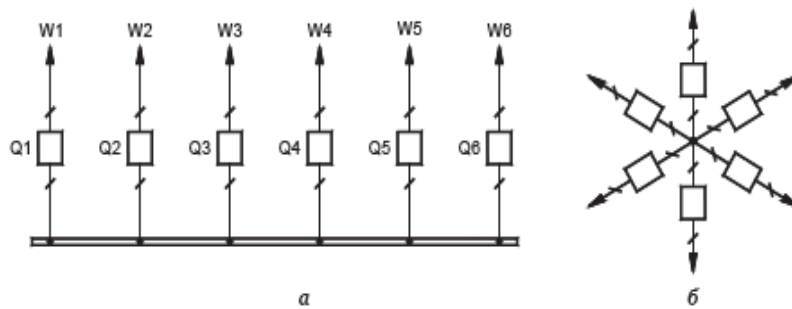


Рисунок 1.1 - Принципові схеми електричних з'єднань:

а - схема з однією системою шин та підключенням приєднань через один вимикач; б - структура схеми з одноразовим принципом підключення приєднань

До основних переваг схем цього типу належать їх економічність, конструктивна простота та наочність побудови, що робить їх зручними в експлуатації та обслуговуванні. Комутація кожного приєднання одним вимикачем забезпечує оперативність керування й зменшує імовірність розвитку каскадних аварій, оскільки локалізує зону пошкодження.

Водночас така структура має і суттєвий недолік: між будь-якими двома приєднаннями існує лише один електричний шлях зв'язку, тому будь-яке внутрішнє пошкодження або відмова окремого елемента призводить до спрацювання значної кількості вимикачів та втрати живлення відразу кількох приєднань, що істотно знижує загальну надійність схеми.

Встановлення секційного вимикача (рис.1.2) лише частково покращує роботу схеми, оскільки не усуває її головного недоліку, а лише зменшує удвічі кількість приєднань, що одночасно відключаються під час внутрішнього пошкодження.

Використання розгалуження з роз'єднувачів, тобто побудова схеми з двома робочими системами збірних шин, дає змогу виконувати ремонтні роботи на одній системі шин без припинення живлення приєднань, що значно підвищує експлуатаційну зручність.

Проте в нормальному режимі така схема переважно працює як односекційна, і при виникненні внутрішнього пошкодження втрачаються всі приєднання, пов'язані з ушкодженою системою збірних шин, що й надалі обмежує рівень її надійності.

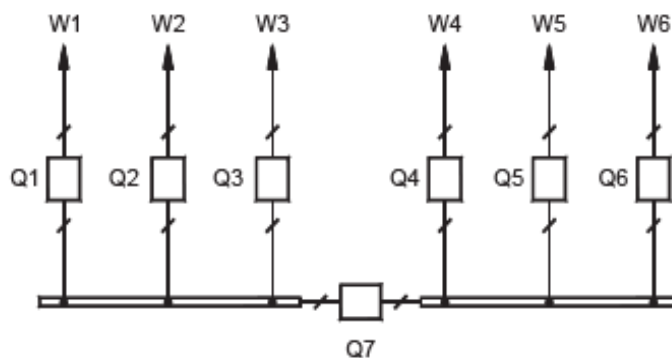


Рисунок 1.2 - Схема одна система шин, секційована вимикачем

Схеми з однократним принципом підключення приєднань відзначаються простотою, наочністю та низькою вартістю, однак мають обмежену надійність, оскільки будь-яке пошкодження або ремонт елемента призводить до відключення всього приєднання. Такі схеми доцільно застосовувати в мережах з невеликим числом приєднань і невисокими вимогами до безперервності електропостачання.

1.3. Схеми з двократним принципом підключення приєднань

У цьому типі схем для виконання комутації приєднання необхідна одночасна робота двох вимикачів. До цього класу належать схеми, які нині є найпоширенішими для розподільчих пристроїв енергооб'єктів із напругою 330–500 кВ і вище.

Першою представницею цього класу вважається схема багатокутника (рис. 1.3).

У такій схемі кількість вимикачів відповідає числу приєднань, з'єднаних у кільце. Кожен вимикач має по два роз'єднувачі — з обох боків, що забезпечує можливість безпечного проведення ремонтних робіт. Приєднання підключаються між вимикачами й додатково оснащуються роз'єднувачами для підвищення ремонтпридатності та зручності експлуатації.

Схема багатокутника характеризується найвищою стійкістю до аварійних режимів типу «відмова». У разі короткого замикання на будь-якому приєднанні або елементі схеми усунення пошкодження здійснюється лише двома вимикачами. Це ж правило зберігається і при відмові одного з вимикачів схеми чи її окремого приєднання, що забезпечує високу надійність та селективність її роботи.

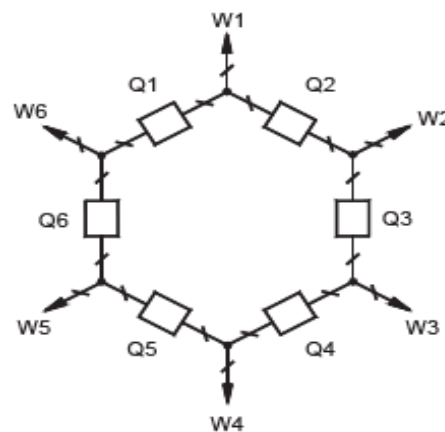


Рисунок 1.3 - Схема багатокутника

Ця особливість схеми є надзвичайно важливою, оскільки дозволяє ефективно запобігати розвитку ланцюгових аварій — їх локалізація досягається спрацюванням лише одного додаткового вимикача. Варто підкреслити, що серед усіх відомих типів схем такою унікальною властивістю володіє лише схема багатокутника (рис. 1.4).

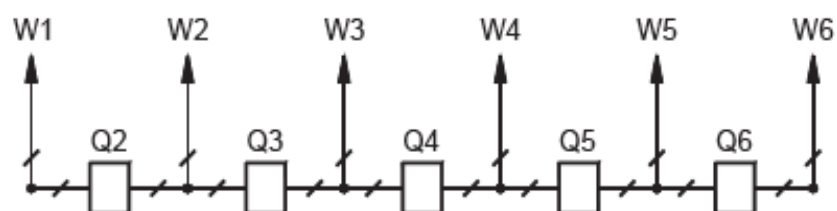


Рисунок 1.4 - Схема багатокутника під час ремонту вимикача Q1

Головним недоліком схеми багатокутника є суттєва зміна її конфігурації під час проведення ремонтних робіт будь-якого елемента кільця, що може ускладнювати експлуатацію та знижувати гнучкість роботи схеми.

Під час ремонту будь-якого елемента кільцева схема перетворюється на розімкнутий ланцюг. У цей період навіть одне пошкодження може спричинити серйозні наслідки. Наприклад, відмова вимикача W4 під час ремонту вимикача Q1 вимагає відключення апаратів Q4 і Q5, що призводить до розділення схеми на окремі частини та, відповідно, до різкої зміни конфігурації й режиму роботи енергосистеми.

Схеми типу «3/2» (рис. 1.5) та «4/3», що нині застосовуються для високих класів напруги, фактично є різновидами схем із суміжними багатокутниками. Збільшення кількості вимикачів у таких схемах має важливу перевагу: під час ремонту окремих вимикачів знижується надійність не всієї системи, а лише частини приєднань — тобто розривається не все кільце, а лише його сегмент.

Наприклад, при виконанні ремонту вимикача Q1 приєднання W1 і W4 переходять у «однозв'язковий» режим. У разі відмови вимикачів Q7, Q8, Q9 або шини A2 ці приєднання відокремлюються від решти схеми, що призводить до часткової втрати зв'язності та істотної зміни структури енергосистеми.

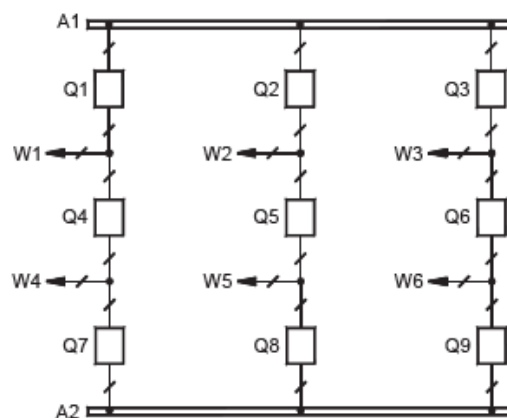


Рисунок 1.5 - Схема «3/2»

Крім того, у зазначених вище схемах існують режими роботи (зокрема під час ремонту систем збірних шин), коли всі кільця розриваються, що призводить до зниження надійності всіх приєднань. На рис.1.6 показано конфігурацію схеми «3/2» у період ремонту системи шин. Із наведеного рисунка видно, що будь-яка аварія в зоні другої системи збірних шин спричиняє повне розділення схеми на три незалежні ділянки. Це, безумовно, може стати причиною серйозної системної аварії через втрату зв'язності та порушення сталості режиму енергосистеми.

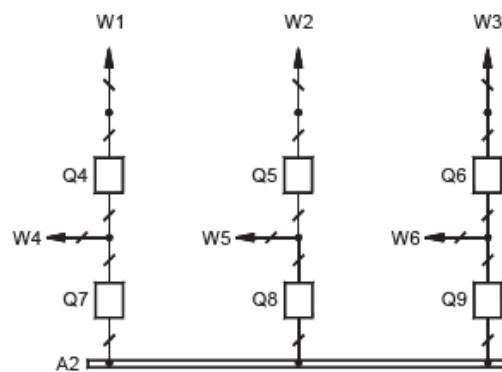


Рисунок 1.6 - Схема «3/2» під час ремонту системи шин

Характер роботи більш економічної схеми «4/3» загалом подібний до поведінки схеми «3/2» — різниця між ними полягає переважно у кількісних показниках. Зокрема, під час ремонту вимикача в схемі «3/2» зменшується надійність двох приєднань, тоді як у схемі «4/3» аналогічна ситуація призводить до зниження надійності вже трьох приєднань.

Однією з переваг схем типу «3/2» і «4/3» порівняно зі схемою багатокутника вважають те, що при відмові крайніх вимикачів ланцюга під час оперативних перемикач без живлення залишається лише одне приєднання. Проте ця перевага є радше умовною: для ліквідації такої ситуації потрібно спрацювання трьох вимикачів замість двох, як це відбувається у схемі багатокутника. До того ж, аналогічного ефекту можна досягти і в багатокутній схемі, просто збільшивши кількість вимикачів у її структурі.

Наприклад, якщо сформувати багатокутну схему з дев'яти вимикачів і під'єднати до неї шість приєднань, то відмова трьох вимикачів призведе до тимчасової втрати живлення лише двох приєднань під час оперативних перемикачів, а відмова шести — лише одного приєднання. При цьому усунення будь-якої відмови, як і раніше, забезпечується спрацюванням лише двох вимикачів, що зберігає простоту та високу надійність схеми.

Збереження кільцевої структури під час роботи схеми є надзвичайно важливим завданням. Його реалізація дала б змогу суттєво підвищити надійність окремих приєднань і забезпечити цілісність вузла енергосистеми. Особливо актуальною ця проблема стає для високих класів напруги, де потужність окремих приєднань є значною, а поділ вузла на ізольовані частини може призвести до масштабних системних аварій і порушення стійкості енергосистеми в цілому.

Схеми з двократним принципом підключення приєднань забезпечують підвищену надійність та гнучкість експлуатації порівняно з однократними, оскільки дозволяють виконувати ремонти або відновлення живлення без повного відключення споживачів. Водночас вони складніші за конструкцією та дорожчі, тому їх застосування доцільне на об'єктах із підвищеними вимогами до безперервності електропостачання.

1.4. Схема багатокутника з підмінним вимикачем

У нормальному режимі роботи роз'єднувачі QS13–QS18 залишаються вимкненими, тому схема функціонує як багатокутна. Така конфігурація зберігає всі переваги класичної схеми багатокутника та має додаткові позитивні риси:

- нові елементи обладнання залишаються відключеними від основної схеми, що запобігає зниженню її надійності під час нормальної експлуатації;
- ремонт будь-якого вимикача кільця можливий без порушення кільцевої структури. Наприклад, для проведення ремонту вимикача Q4 достатньо розімкнути QS23 та замкнути QS15 і QS16 — у цьому випадку

вимикач Q7 бере на себе функцію шунтування Q4, забезпечуючи безперервність живлення та стабільність роботи схеми.

Після роз'єднання QS7 і QS8 вимикач Q4 може бути безпечно виведений у ремонт. Роз'єднувачі QS19 і QS20, розташовані на крайніх підмінних ділянках, забезпечують можливість проведення ремонтів вимикачів Q1 і Q6 без порушення роботи решти схеми.

На рис.1.7 представлено варіант схеми багатокутника з підмінним вимикачем. Така конфігурація дозволяє виконувати ремонт будь-якого елемента, включно з додатковим обладнанням, без втрати кільцевої структури. Наприклад, під час ремонту вимикачів Q4, Q5 або роз'єднувачів QS8, QS9, QS16 та QS29 достатньо розімкнути QS23 і QS24 та замкнути QS15 і QS17 — у цьому випадку вимикач Q7 виконує функцію шунтування для Q4 і Q5, забезпечуючи безперервність живлення та збереження топології багатокутника.

Після вимкнення роз'єднувачів QS7 і QS10 усе зазначене обладнання може бути безпечно виведене в ремонт. При цьому кільцева структура схеми зберігається, тобто багатокутник залишається замкнутим, що забезпечує безперервність живлення та високу надійність роботи схеми навіть у ремонтному режимі.

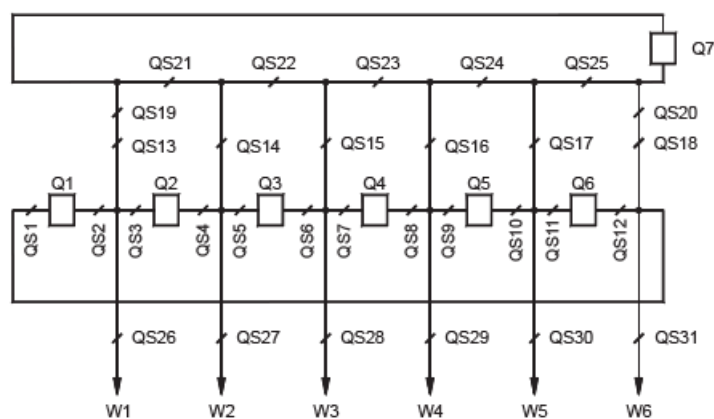


Рисунок 1.7 - Схема багатокутника із підмінним вимикачем

Інакше кажучи, ремонт будь-якого елемента в цій схемі може виконуватися без зниження надійності живлення приєднань. Жодна інша відома схема не володіє подібною перевагою.

Детальний аналіз роботи схеми за різних аварійних режимів показує, що її поведінка щонайменше не поступається схемам типу «3/2» або «4/3», а за показниками економічності схема багатокутника суттєво перевершує їх.

Схема багатокутника з підмінним вимикачем поєднує високу надійність, гнучкість та економічність. Вона дозволяє проводити ремонти будь-якого елемента без втрати живлення приєднань і зберігає працездатність схеми в аварійних режимах. За експлуатаційними властивостями схема не поступається схемам типу «3/2» або «4/3», а за економічними показниками значно перевершує їх.

Принципи побудови схем електричних з'єднань енергооб'єктів ґрунтуються на забезпеченні максимальної надійності, гнучкості експлуатації та економічної доцільності.

Проведений аналіз показав, що вибір схеми має враховувати не лише технічні характеристики обладнання, а й можливість проведення ремонтів без порушення живлення споживачів, селективність дії захистів і збереження стійкості системи в аварійних режимах. Схема багатокутника, на відміну від традиційних рішень типу «3/2» або «4/3», дозволяє здійснювати ремонт будь-якого елемента без зниження надійності приєднань, поєднуючи високу експлуатаційну зручність із суттєвими економічними перевагами.

Таким чином, сучасні підходи до побудови схем електричних з'єднань мають базуватись на раціональному поєднанні технічної ефективності, надійності та мінімізації витрат, що забезпечує оптимальне функціонування енергооб'єктів у нормальних і післяаварійних режимах.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

Схеми електричних з'єднань енергооб'єктів повинні забезпечувати надійну, безпечну та економічно обґрунтовану роботу системи. До основних вимог належать простота конструкції, можливість проведення ремонтів без відключення споживачів, селективність захистів і зручність експлуатації. Оптимальна схема має поєднувати технічну ефективність, гнучкість у роботі та мінімальні витрати на реалізацію й обслуговування.

Схеми з однократним принципом підключення приєднань відзначаються простотою, наочністю та низькою вартістю, однак мають обмежену надійність, оскільки будь-яке пошкодження або ремонт елемента призводить до відключення всього приєднання. Такі схеми доцільно застосовувати в мережах з невеликим числом приєднань і невисокими вимогами до безперервності електропостачання.

Принципи побудови схем електричних з'єднань енергооб'єктів ґрунтуються на забезпеченні максимальної надійності, гнучкості експлуатації та економічної доцільності.

Проведений аналіз показав, що вибір схеми має враховувати не лише технічні характеристики обладнання, а й можливість проведення ремонтів без порушення живлення споживачів, селективність дії захистів і збереження стійкості системи в аварійних режимах. Схема багатокутника, на відміну від традиційних рішень типу «3/2» або «4/3», дозволяє здійснювати ремонт будь-якого елемента без зниження надійності приєднань, поєднуючи високу експлуатаційну зручність із суттєвими економічними перевагами.

Таким чином, сучасні підходи до побудови схем електричних з'єднань мають базуватись на раціональному поєднанні технічної ефективності, надійності та мінімізації витрат, що забезпечує оптимальне функціонування енергооб'єктів у нормальних і післяаварійних режимах.

РОЗДІЛ 2. СХЕМИ ВИДАЧІ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

2.1. Експлуатаційна оцінка схем зі збірними шинами

У вітчизняній енергетичній практиці радіальна схема з двома системами збірних шин тривалий час була найпоширенішою, а до 1950-х років у багатьох випадках — єдино застосовуваною. Починаючи з кінця 1940-х років, у проєктуванні РП почали активно впроваджувати обхідні системи шин.

Для схем із двома системами шин було характерним те, що в нормальному режимі всі приєднання підключалися переважно до однієї системи, тоді як друга залишалася резервною. Подвійна система шин передбачалася з метою підвищення надійності — для резервування як самих шин, так і вимикачів приєднань (ремонтований вимикач шунтувався тимчасовою перемичкою та замінювався шиноз'єднувальним). Крім того, така схема забезпечувала можливість синхронізації, а також тимчасового виведення окремих джерел живлення з паралельної роботи — процесу, відомого як транспозиція джерел живлення між системами шин.

Після впровадження обов'язкового використання обхідної системи шин у схемах 110 кВ і вище, подвійні системи збірних шин зазнали суттєвої трансформації. Завдяки цьому рішення стало можливим скоротити енергетичні втрати у приєднаних повітряних лініях, а резервні функції шиноз'єднувальних вимикачів фактично втратили актуальність.

Частину завдань другої, раніше «вільної» системи шин було передано обхідній, що дозволило мінімізувати час простою приєднань під час ремонтів — він тепер визначається лише тривалістю оперативних перемикачів і залишається практично однаковим як при планових, так і при аварійних роботах. Подальше широке об'єднання енерговузлів у паралельну роботу та інтеграція енергосистем загалом усунули потребу у використанні окремої вільної системи шин для транспозиції джерел живлення.

Наявність двох систем шин замість однієї дає змогу під час планового ремонту однієї з них безперервно підтримувати роботу приєднань, тимчасово перевівши їх на іншу систему без відключення від мережі.

В українських енергетичних умовах [4,5] така можливість є корисною, проте не завжди обов'язковою. Це пояснюється тим, що мережі 110–220 кВ проєктуються таким чином, щоб споживачі отримували живлення щонайменше по двох незалежних лініях. Для мереж 110 кВ типовими є конфігурації, які вже розглянуто, тоді як у мережах 220 кВ переважають структури типу (рис.1.5).

На підстанціях, як правило, встановлюють не менше двох автотрансформаторів, а їх пропускну здатність і параметри живильних ліній визначають так, щоб навіть у ремонтних режимах (наприклад, при плановому відключенні одного з елементів схеми) забезпечувалося повне електропостачання споживачів. Таким чином, проведення планового ремонту однієї з систем шин із відключенням її елементів не призводить до обмеження подачі електроенергії.

Слід пам'ятати, що тривалість планових ремонтів шин є незначною. Зокрема, поточний ремонт шинного роз'єднувача 110–220 кВ триває близько 3,5–4 годин, а його періодичність становить трохи більше одного разу на рік. Найбільш трудомістка операція — очищення гірлянди ізоляторів — потребує орієнтовно 0,8 люд.-год для обладнання 110 кВ та 1,4 люд.-год для 220 кВ при роботі двох працівників.

Для робіт із використанням підйомників ці норми часу знижено [6,7]. Переведення приєднань із однієї системи шин на іншу з метою профілактики виконується щорічно, тому виведення з роботи однієї системи шин під час планового ремонту не спричиняє помітного збільшення втрат електроенергії в мережі.

Крім того, за прийнятої в Україні практики нормального включеного стану шиноз'єднувальних (у схемах із двома системами шин) та секційних (у схемах із однією секціонованою системою) вимикачів, їхня відмова, яка

вимагає відключення суміжних приєднань, має однакові наслідки — повне знеструмлення розподільчого пристрою. Тому такі випадки не мають суттєвого впливу на загальну оцінку надійності та в подальшому аналізі не розглядаються.

Наявність у схемі двох систем збірних шин, на перший погляд, здається доцільною з точки зору підвищення надійності в післяаварійних режимах. Однак аналіз практичних даних свідчить про протилежне. Саме застосування двох систем шин із розгалуженням через два шинні роз'єднувачі на кожне приєднання часто ставало причиною відмов, яких можна було б уникнути при використанні однієї секціонованої системи шин.

Інакше кажучи, перехід від схеми з однією секціонованою системою шин з обхідною до варіанта з двома системами шин і обхідною не підвищує, а навпаки — знижує загальну надійність електроустановки. Обґрунтування цього твердження наведено далі.

Було проведено аналіз відмов на 26 підстанціях 500/220 кВ АТ «Лінії електропередачі сходу» за період (2000–2018 рр.). Ці підстанції є ключовими комутаційними вузлами української мережі 500 кВ. Рівень підготовки їх експлуатаційного персоналу відповідає високим вимогам, подібним до тих, що діють на електростанціях. Конструктивно розподільчі установки мають однотипне виконання: застосовано гнучку ошиновку та горизонтально-поворотні двоколонкові роз'єднувачі.

РУ 220 кВ побудовані за схемою з двома системами шин та обхідною (лише на одній підстанції шини 220 кВ поділені секційними вимикачами), тоді як РУ 500 кВ виконані за схемами «трансформатори – шини» та полуторною. У дослідження було включено 25 розподільчих установок 220 кВ (що відповідає 52 системам або секціям шин) і 26 розподільних установок 500 кВ. Загальне напрацювання склало 10 245 «роз'єднувачів-років» для обладнання 220 кВ та 6 255 «роз'єднувачів-років» для рівня 500 кВ.

Як вихідні дані для дослідження було використано журнали реєстрації відмов першого та другого ступеня, а також акти розслідування аварійних

подій. Під час аналізу враховувалися лише ті відмови систем збірних шин, що були спричинені пошкодженнями їхніх безпосередніх елементів — ошиновки, шинних роз'єднувачів та обладнання комірок трансформаторів напруги, підключених до шин. При цьому не враховувалися випадки відключення шин, пов'язані з відмовами інших елементів електричної схеми, наприклад, через спрацювання пристроїв резервування відмов вимикачів (ПРВВ) або диференціального захисту автотрансформаторів у схемах типу «трансформатори – шини».

Також не враховувалися випадки успішного автоматичного повторного включення (АПВ) збірних шин, а також відмови роз'єднувачів, що виникали під час введення обладнання в роботу внаслідок розбалансування ножів.

Аналіз технічної документації показав, що відмови систем збірних шин фіксувалися у випадках: несправностей шинних роз'єднувачів; пошкоджень у комірках трансформаторів напруги; потрапляння сторонніх предметів на ошиновку; помилкового включення заземлювальних ножів шинних роз'єднувачів, що перебували під напругою; неправильних дій пристроїв релейного захисту й автоматики; порушень у вторинних колах; проектних помилок, а також у ситуаціях із невстановленими причинами.

У таблиці 2.1 наведено класифіковані результати аналізу відмов систем збірних шин (для 220 кВ — робочих шин) за цей період. Для рівня 220 кВ у чисельнику вказано загальну кількість відмов, а в знаменнику — кількість відмов, що призвели до одночасного відключення обох систем шин. Із загальної кількості п'ять відмов належали до першого ступеня: три — у РП 220 кВ і дві — у РП 500 кВ; решта класифіковані як відмови другого ступеня. При цьому в РП 220 кВ відключення однієї системи шин не супроводжувалося недовідпусткою електроенергії — втрати спостерігалися лише у випадках повного знеструмлення обох систем шин.

Таблиця 2.1 – Відмови систем збірних шин

№	Причина відмов збірних шин	Кількість відмов в РП 220 кВ	Кількість відмов в РП 500 кВ
1	Відмови шинних роз'єднувачів У тому числі:	10/4	3
1.1	при переведенні приєднань з однієї системи збірних шин на іншу	4/4	-
1.2	при відключеннях, пов'язаних з виведенням приєднань у плановий ремонт	2/-	-
1.3	у статичному стані	4/-	3
2	Відмови в комірці трансформатора напруги У тому числі:	13/1	2
2.1	трансформатора напруги	6/-	2
2.2	розрядника	7/1	-
3	Накиди сторонніх предметів на ошиновку У тому числі:	6/2	1
3.1	падіння блискавковідводу	7/1	-
3.2	падіння дроту, що використовувався птахами під час гніздування	6/2	1
3.3	з вини експлуатаційного персоналу	1/-	-
4	Помилкове включення заземлюючих ножів роз'єднувача	5/3	1
5	Хибна дія РЗА, відмови у вторинних ланцюгах	4/-	12
6	Помилки проектування	1/-	-
7	Невстановлені причини	1/1	-
8	Всього	40/11	19

Найсерйознішою аварією слід вважати руйнування ізоляційної колонки роз'єднувача, яке сталося під час виконання оперативних перемикачів при переведенні приєднань з однієї системи шин на іншу. Усі такі відмови

призвели до одночасного знеструмлення обох систем шин. На відновлення працездатності — зокрема, заміну пошкодженої колонки — зазвичай витрачається 3–5 годин.

У пункті 1.1 таблиці 2.1 не враховано випадок поломки тяги у приводі роз'єднувача 220 кВ під час зміни фіксації приєднань, оскільки ця подія не супроводжувалася вимкненням обладнання. На РП, що аналізуються, для схем 500 кВ застосовано таку конфігурацію, у якій роз'єднувачі виконують лише одну функцію — створення видимого розриву під час ремонтних робіт. Саме тому у відповідній графі пункту 1.1 таблиці 2.1 проставлено прочерк.

У розподільчих установках 220 кВ обидві зафіксовані відмови роз'єднувачів, що сталися під час виведення вимикачів у плановий ремонт, були спричинені руйнуванням опорних колонок. Водночас причини відмов роз'єднувачів напругою 220 та 500 кВ у статичному режимі відрізняються. Для роз'єднувачів 220 кВ усі чотири випадки відмов пов'язані з мимовільним руйнуванням опорних ізоляційних колонок.

Для роз'єднувачів напругою 500 кВ зафіксовано дві події, спричинені перекриттям ізоляційних колонок під дією грозової перенапруги і пилової бурі, а також одну подію — мимовільне відключення під напругою внаслідок сильного вітру. Після кожного такого випадку здійснювалася заміна або відновлення контактної системи роз'єднувача, що тривало близько 5–6 годин.

У пункті 1.3 таблиці 2.1 не враховано інцидент із одночасним руйнуванням двох роз'єднувачів 500 кВ, спричиненим вибухом повітряного вимикача, розташованого в тому самому осередку.

Таким чином, для схем напругою 220 кВ із двома системами шин, де шинні роз'єднувачі виконують як оперативні функції, так і забезпечують створення видимого розриву, основною причиною відмов виявилось руйнування опорних ізоляційних колонок. Натомість у схемах 500 кВ, де роз'єднувачі застосовуються виключно для створення видимого розриву,

відмови виникали переважно під впливом несприятливих природних факторів.

Отже, можна зробити висновок, що причиною відмов шинних роз'єднувачів 220 кВ є виконання ними оперативних перемикань, характерних лише для схем із двома робочими системами збірних шин. Для виконання аварійно-відновлювальних робіт на таких роз'єднувачах було необхідно переводити приєднання на другу, неушкоджену систему шин.

Відмови в комірках трансформаторів напруги здебільшого супроводжувалися їх фізичним руйнуванням. За винятком одного випадку, усі несправності трансформаторів напруги типу НКФ та розрядників були пов'язані саме з пошкодженням або руйнуванням їх конструкції. У таблиці 2.1 наведено лише первинні відмови, що безпосередньо спричинили відключення або погашення збірних шин.

Зокрема, дві відмови трансформаторів напруги 220 кВ призвели до руйнування розрядників, а одна відмова трансформатора напруги 500 кВ — до пошкодження роз'єднувача. Останні випадки у таблиці 2.1 не враховувалися, щоб уникнути подвійного підрахунку відмов.

Погашення розподільного пристрою 220 кВ через відмову в комірці трансформатора напруги спостерігалось лише один раз. У цьому випадку уламки зруйнованого розрядника пошкодили вторинні ланцюги вимикача приєднання другого автотрансформатора, підключеного до іншої системи шин.

Проведення аварійно-відновлювальних ремонтів у комірці трансформатора напруги 220 кВ зазвичай не потребувало переведення приєднань на іншу систему шин. Для відновлення нормальної схеми достатньо було відключити роз'єднувач у колі трансформатора напруги та переключити вторинні ланцюги на трансформатор напруги іншої системи шин.

У ряді випадків, однак, через психологічний фактор персонал, прагнучи забезпечити повну надійність, тимчасово переводив усі приєднання

на одну систему шин. Під час відмови трансформатора напруги 500 кВ, що супроводжувалася пожежею, виникла потреба у заміні гірлянди ізоляторів системи шин; тривалість таких відновлювальних робіт становила 7–8 годин.

Накиди сторонніх предметів на ошиновку.

Як видно з таблиці 2.1, більшість випадків погашення шин були спричинені падінням на ошиновку сторонніх предметів, найчастіше дротів, принесених птахами. У двох випадках — при падінні блискавковідводу та дроту — відбулося руйнування опорних колонок шинних роз'єднувачів 220 кВ. Проведення аварійно-відновлювальних робіт у таких ситуаціях вимагало переведення приєднань на іншу, неушкоджену систему шин.

Інші подібні відмови не потребували зміни схеми підключення, оскільки обмежувалися короткими замиканнями на ошиновці, що відповідає розрахунковому режиму при перевірці електродинамічної стійкості.

Два випадки падіння дроту на шини 220 кВ призвели до виникнення ферорезонансних процесів і подальшого руйнування трансформаторів напруги. Ці події не були враховані в пункті 2.1 таблиці 2.1, щоб уникнути подвійного обліку відмов.

Помилкові вмикання заземлювальних ножів

Помилкові дії полягали у вмиканні заземлювальних ножів шинних роз'єднувачів, які перебували під напругою. Такі відмови не потребували переведення приєднань з однієї системи шин на іншу. Наслідки усувалися оперативно — переважно шляхом очищення контактних поверхонь, а в окремих випадках додатково проводилося регулювання положення ножів для відновлення їхнього нормального функціонування.

Хибна дія РЗА

Хибні спрацювання пристроїв релейного захисту та автоматики (зайве спрацювання, відмови у вторинних колах тощо) не потребували переведення приєднань з однієї системи збірних шин на іншу. Такі відмови усувалися досить швидко — час відновлення нормальної схеми становив від 5 до 40 хвилин. Для мереж напругою 500 кВ цей тип відмов траплявся

найчастіше, що, ймовірно, пояснюється застосуванням у магістральних мережах складніших систем захисту та автоматики.

В одному з випадків погашення системи шин 220 кВ було спричинене помилкою проектування: у схемі помилково не передбачили другий комплект вентильних розрядників, унаслідок чого через недостатню грозостійкість збірних шин відбулося перекриття двох гірлянд ізоляторів. Після очищення ізоляторів від нагару збірні шини були повторно введені в роботу.

Окрім цього, зафіксовано один випадок відключення обох систем збірних шин розподільного пристрою 220 кВ із невстановленої причини. Відновлення нормального стану схеми тривало не більше 30 хвилин.

У таблиці 2.2 наведено узагальнені частки відмов, узяті з даних таблиці 2.1.

Таблиця 2.2 - Структура відмов систем збірних шин

Причина відмови систем збірних шин	Число відмов у РП напругою: 220 кВ	Число відмов у РП напругою: 500 кВ
Відмови шинних роз'єднувачів	25,0	15,8
Відмови в комірці трансформатора напруги	32,5	10,5
Накиди: сторонніх предметів на ошиновку	15,0	5,3
Помилкове включення заземлюючих ножів роз'єднувача	12,5	5,3
Хибна дія РЗА, відмови у вторинних ланцюгах	10,0	63,1
Інші причини	5,0	-

Із загальної кількості зафіксованих відмов систем збірних шин 11 випадків (що становить 28%) супроводжувалися повним погашенням розподільного пристрою 220 кВ. Із них дев'ять аварій (пунктів 1.1, 3.2, 3.3 та 4 табл. 2.1) були безпосередньо пов'язані із застосуванням на підстанціях схеми з двома системами шин.

В альтернативній схемі з однією секціонованою системою збірних шин і обхідною системою подібні відмови — наприклад, поломки шинних роз'єднувачів або помилкові вмикання заземлювальних ножів — не призводять до повного погашення РП. Це пояснюється відсутністю розвилки з шинних роз'єднувачів, тобто виключається можливість підживлення точки короткого замикання одночасно від обох систем шин. За такого варіанта виконання схеми частота повного знеструмлення розподільчого пристрою могла б зменшитися у 4–5 разів.

Крім того, майже всі випадки (10 із 12), коли для ліквідації відмови було необхідно переводити приєднання з однієї системи шин на іншу, стосувалися саме пошкоджень шинних роз'єднувачів. Такі поломки знову ж таки обумовлені тим, що в схемах із двома системами шин роз'єднувачі виконують не лише функцію створення видимого розриву, а й беруть участь в оперативних перемиканнях.

Таким чином, застосування схеми з двома системами збірних шин з обхідною, порівняно з варіантом однієї секціонованої системи шин із обхідною, призводить до зниження загальної надійності електропостачання споживачів (рис.2.1).



Рисунок 2.1 - Структура відмов систем збірних шин 220–500 кВ

Отже, спостерігається певна суперечність. Експлуатаційний персонал, який прагне мінімізувати тривалість відключення споживачів, віддає перевагу більш гнучкій схемі з двома системами шин, яка забезпечує швидке відновлення електропостачання у разі порушення нормального режиму роботи. Водночас саме така схема стає основним джерелом підвищеної кількості відмов, що знижують загальну надійність роботи розподільчого пристрою.

У табл. 2.3 наведено структуру відмов шин у схемі з двома системами шин з обхідною.

Таблиця 2.3 - Структура відмов у схемі з двома системами шин з обхідною

Причина відмов	Погашення збірних шин, %: однієї	Погашення збірних шин, %: двох	Разом
Відмови шинних роз'єднувачів	15,0	10,0	25,0
Відмови в комірці трансформатора напруги	30,0	2,5	32,5
Накиди на ошиновку	10,0	5,0	15,0
З вини оперативного персоналу	5,0	7,5	12,5
Хибна дія РЗА, відмови у вторинних ланцюгах	10,0	-	10,0
Помилки проектування	2,5	-	2,5
Інші	-	2,5	2,5
Всього	72,5	27,5	100

На рис.2.2 побудований графік, який ілюструє розподіл різновидів відмов у схемах з двома системами збірних шин для напруги 220 кВ та 500 кВ.

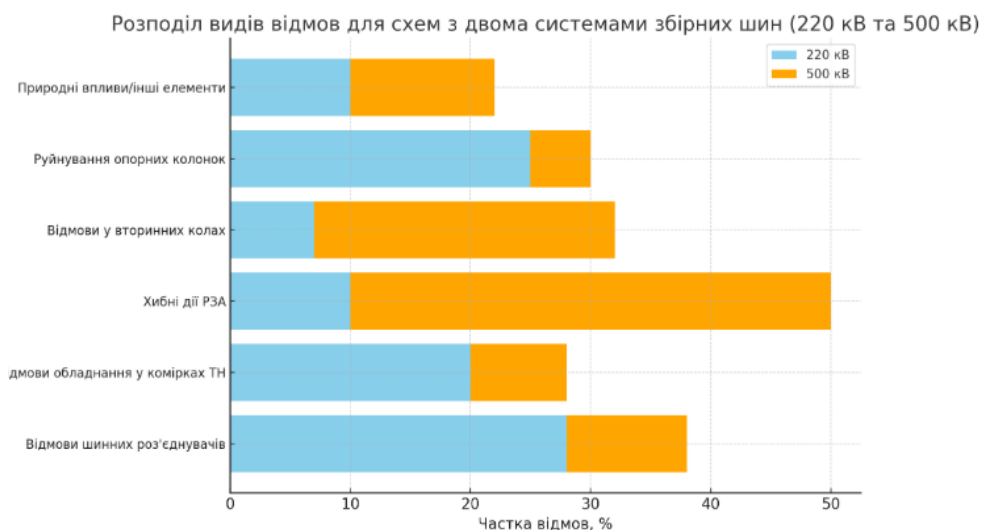


Рисунок 2.2 – Структура відмов для схем з двома системами збірних шин

Він наочно показує, що для 220 кВ домінують відмови шинних роз'єднувачів і механічні пошкодження, тоді як для 500 кВ найбільшу частку становлять хибні дії РЗА та відмови у вторинних колах

Проведений аналіз експлуатаційної надійності схем комутації із збірними шинами дозволив сформулювати наступні висновки.

Основною причиною аварійного відключення систем збірних шин 220 кВ є відмови шинних роз'єднувачів та несправності обладнання у комірках трансформаторів напруги, підключених до шин. Для систем збірних шин 500 кВ характерною причиною аварійного знеструмлення виступають хибні дії релейного захисту та автоматики, а також відмови у вторинних колах.

Відмови роз'єднувачів 220 кВ у схемах із двома системами шин та обхідною зазвичай зумовлені механічними пошкодженнями — руйнуванням опорних колонок апаратів. Для роз'єднувачів 500 кВ, що працюють у схемах типу «трансформатори – шини» або 3/2, основними факторами відмов стали природні впливи або несправності інших елементів електричних з'єднань.

Інтенсивність відмов роз'єднувачів на напрузі 220 кВ значно перевищує аналогічний показник для обладнання 500 кВ. Це пояснюється тим, що в колах 220 кВ роз'єднувачі виконують не лише функцію створення

видимого розриву, а й оперативного керування, що підвищує їх навантаження і, відповідно, аварійність.

Близько чверті відмов систем збірних шин 220 кВ у схемі з двома робочими та обхідною системами призводили до одночасного погашення обох робочих шин, що суттєво знижувало надійність живлення споживачів.

Застосування на підстанціях схем із двома системами збірних шин з обхідною, у порівнянні з альтернативним рішенням — однією секціонованою системою шин з обхідною, виявилось технічно та економічно менш ефективним і призвело до зниження загальної надійності електропостачання.

Використання двох, а не однієї робочої системи збірних шин у радіальних схемах може бути виправданим лише з точки зору режимних переваг, а не з позицій надійності чи економічності.

Різниця в умовах експлуатації радіальних схем із кількома системами шин та відмінності у конструкції електротехнічного обладнання, що застосовується в Україні й у країнах Західної Європи, обумовлюють різні показники їхньої надійності.

Запропонована узагальнена модель відмов систем збірних шин враховує інтенсивність подій, які призводять як до відключення однієї, так і двох систем шин одночасно. При цьому роз'єднувачі не слід розглядати як окремі елементи у структурі електричних з'єднань, оскільки їхній вплив інтегрується у загальний потік відмов системи.

Доцільно нормативно закріпити положення, згідно з яким у більшості електроустановок достатньо передбачати одну секціоновану систему збірних шин, тоді як застосування двох систем повинно супроводжуватися детальним техніко-економічним обґрунтуванням у проектній документації.

2.2. Ліквідація аварій у схемах РП станцій та підстанцій

У штатному режимі експлуатації всі оперативні перемикання та дії з обладнанням головних електричних схем здійснюються виключно за розпорядженнями та під контролем того оперативного персоналу, у чиєму

безпосередньому управлінні перебуває дане обладнання. Недотримання цього правила неприпустиме, оскільки воно є ключовим принципом організації централізованого диспетчерського керування станціями, електричними мережами та енергосистемами [8,9].

Безпосереднє оперативне управління обладнанням головних схем, а також пристроями релейного захисту й автоматики здійснюється диспетчерами енергосистем, диспетчерами електричних мереж і начальниками змін електростанцій, кожен із яких відповідає за конкретну ділянку енергетичного об'єкта.

У певних ситуаціях, наприклад, за відсутності засобів телемеханіки або надійного зв'язку між диспетчером і черговим персоналом підстанцій, обладнання може тимчасово передаватися в оперативне управління нижчим рівням — черговим електромережових ділянок (районів) чи навіть черговим вузлових підстанцій.

Закріплення кожного елемента обладнання за конкретною ланкою диспетчерської структури забезпечує чіткість та однозначність у взаємодії персоналу під час виконання перемикань, а також при локалізації та ліквідації аварійних ситуацій.

Час, необхідний персоналу для ліквідації незначних аварій після автоматичного відключення пошкодженого обладнання релейним захистом, зазвичай вимірюється кількома хвилинами — за умови, що черговий персонал перебуває на щиті керування та готовий до оперативних дій. Ліквідація складніших аварійних ситуацій може тривати десятки хвилин.

Автоматичні пристрої значно перевищують можливості оперативного персоналу як за швидкістю, так і за точністю визначення характеру пошкодження. Саме тому з розвитком енергетичних систем широкого поширення набули засоби протиаварійної автоматики, які дозволяють протягом лічених секунд усувати аварійні режими та відновлювати нормальні схеми електропостачання споживачів, часто без необхідності втручання людини.

До найпоширеніших пристроїв цього типу належать: автоматичне повторне вмикання (АПВ) ліній електропередачі, збірних шин і трансформаторів; автоматичне введення резерву (АВР); а також системи автоматичного частотного розвантаження (АЧР).

Розглянемо ситуацію втрати напруги на збірних шинах. Збірні шини підстанцій можуть залишитися без напруги внаслідок таких причин:

- виникнення короткого замикання безпосередньо на шинах або на обладнанні, підключеному до них — трансформаторах напруги, вентильних розрядниках, ізоляторах шинних роз'єднувачів, а також на ділянках провідників між шинами та вимикачами чи на самих вимикачах;
- короткого замикання на будь-якому з приєднань, що відходять від шин, у поєднанні з відмовою спрацювання вимикача або пристроїв релейного захисту;
- несправності або хибної роботи захисту шин чи пристроїв резервування на випадок відмови вимикачів;
- системних аварій або порушень у роботі енергосистеми.

На підстанціях з напругою 110 кВ і вище, де необхідне миттєве відключення КЗ, для захисту збірних шин та приєданого до них обладнання застосовують диференційний струмовий захист шин (ДЗШ).

У випадках, коли звичайні диференційні захисти не забезпечують достатньої чутливості або надійності, використовуються вдосконалені схеми — диференційний захист на випрямленому струмі з гальмуванням або диференціально-фазний захист.

Зазначені види захисту гарантують високу швидкодію та селективність відключення коротких замикань на збірних шинах за будь-яких можливих у експлуатації варіантів первинних електричних з'єднань.

Збірні шини розподільчих установок 6 і 10 кВ, до яких підключено реакторні лінії та кілька джерел живлення, зазвичай захищаються диференційним струмовим захистом, виконаним за неповною схемою. У такій схемі струмові реле підключаються до суми струмів усіх джерел

живлення, а також секційного чи шиноз'єднувального вимикача. Це дозволяє захисту реагувати лише на струми короткого замикання, що протікають до місця пошкодження, розташованого за реактором будь-якої з відхідних ліній.

Крім того, для підвищення надійності захисту збірних шин РУ 6–10 кВ додатково використовуються струмові відсічки та дистанційні захисти, які встановлюються на стороні 6–10 кВ живильних трансформаторів.

Під час короткого замикання на обладнанні або при автоматичному відокремленні пошкодженої ділянки можливі поодинокі випадки відмов у роботі вимикачів чи релейного захисту. Хоча такі ситуації трапляються вкрай рідко, їхня потенційна небезпека вимагає обов'язкового врахування в схемах захисту.

Резервування у разі відмов вимикачів і пристроїв захисту, що діють на їх відключення, здійснюється кількома способами.

У випадку відмови вимикача застосовується спеціальний пристрій — ПРВВ (пристрій резервування відмови вимикача). Його робота починається сигналом від захисту того приєднання, вимикач якого не спрацював. Пристрій подає команду на відключення вимикачів усіх інших приєднань, що продовжують жити місце короткого замикання.

Для резервування у разі відмови самого захисту кожне електричне коло має бути оснащено щонайменше двома незалежними системами — основним і резервним захистом. Вони взаємно дублюють один одного у разі КЗ на захищеній ділянці й неспрацювання однієї з систем. Зона дії резервного захисту, як правило, охоплює не лише власну ділянку, а й частину суміжних відгалужень мережі, забезпечуючи надійне відключення пошкоджень.

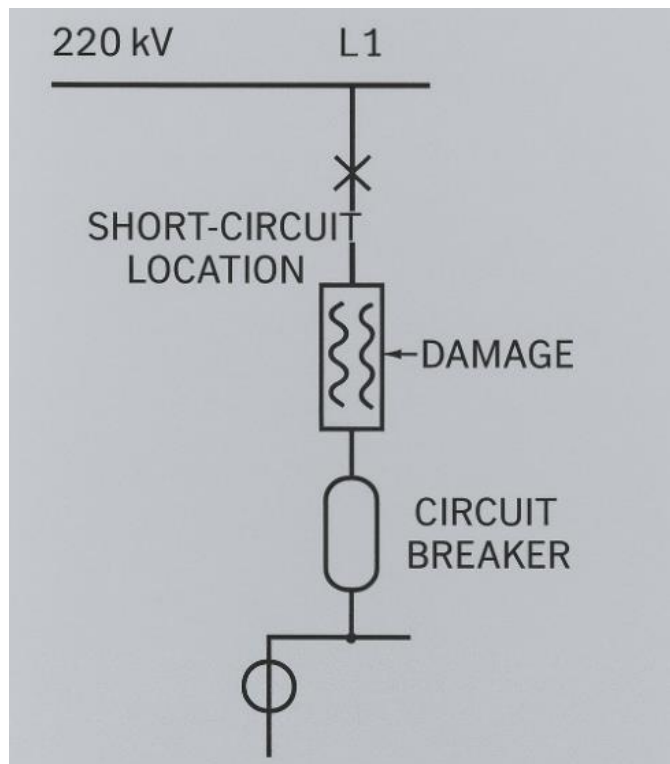


Рисунок 2.3 - Аварія на розподільному пристрої 110–220 кВ

На рис.2.3 показано аварію на РП 110–220 кВ, що виникла внаслідок короткого замикання на шинній опорі — тобто в місці механічного кріплення збірних шин. Це типова ситуація, яка може статися через старіння ізоляції, забруднення поверхні ізоляторів, відкладення пилу, вологи або часткові розряди, що поступово призводять до пробоя ізоляції.

Суть аварії: у момент пробоя між фазами або між фазою та землею виникає міжфазне КЗ на ділянці шинного роз'єднувача або ізолятора. Через це по шині починає протікати великий струм короткого замикання, що викликає миттєве зниження напруги в усьому розподільчому пристрої; може пошкодити обладнання, підключене до тієї ж системи шин; запускає спрацювання релейного захисту шин, який відключає всі приєднання, підключені до пошкодженої секції.

Якщо схема має дві системи шин, аварія може призвести до погашення однієї або обох систем (залежно від типу схеми — звичайна або з обхідною системою шин).

Послідовність дій персоналу при такій аварії:

1. Спрацювання релейного захисту. Диференційний захист шин (ДЗШ) або струмовий захист із гальмуванням автоматично відключає всі вимикачі, що підключені до пошкодженої системи шин.

2. Оперативний контроль. Черговий персонал фіксує спрацювання захисту за індикацією на щиті керування та перевіряє, які вимикачі спрацювали.

3. Візуальний огляд (після зняття напруги!). Після підтвердження повного відключення напруги проводиться зовнішній огляд шинного обладнання. Найчастіше виявляють: прогар або обвуглення на поверхні ізолятора; сліди дуги чи металеві напливи на ошиновці; пошкодження шинних з'єднань або опорних колонок.

4. Відновлення живлення споживачів. Якщо на підстанції є друга (резервна) система шин або обхідна, після ізоляції пошкодженої ділянки персонал виконує переключення і підключає живлення через резервну систему.

5. Ремонтні роботи. Пошкоджені ізолятори або шинні ділянки замінюють, проводять контроль ізоляції, очищення ошиновки, вимірювання опору ізоляції та перевірку роботи захистів.

Такі аварії є рідкісними, але потенційно небезпечними. Їх правильне виявлення та ізоляція за допомогою диференційного захисту шин дозволяють запобігти поширенню пошкодження на інші елементи підстанції та швидко відновити живлення споживачів.

Ліквідація аварій у схемах РП станцій і підстанцій повинна здійснюватися швидко, послідовно й під суворим оперативним контролем. Вирішальну роль відіграють надійні системи релейного захисту та автоматики, які забезпечують миттєве відключення пошкодженого обладнання й обмеження наслідків аварії.

Особливої уваги потребують аварії на збірних шинах, оскільки вони можуть призвести до знеструмлення всієї секції або навіть підстанції. У таких випадках спрацювання диференційного захисту шин має забезпечити

повне й вибіркове відключення пошкодженої системи шин. Після цього оперативний персонал проводить візуальний огляд, визначає характер пошкодження (наприклад, пробій ізолятора, замикання на ошиновці) і за можливості переводить навантаження на резервну систему шин чи обхідну секцію.

Ефективна ліквідація аварій на збірних шинах досягається завдяки справній роботі захистів, наявності дублюючих систем шин і чітким діям персоналу, який забезпечує безпечне відновлення електропостачання споживачів у найкоротші терміни.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

Проведений аналіз експлуатаційної надійності схем комутації із збірними шинами дозволив сформулювати наступні висновки.

Основною причиною аварійного відключення систем збірних шин 220 кВ є відмови шинних роз'єднувачів та несправності обладнання у комірках трансформаторів напруги, підключених до шин. Для систем збірних шин 500 кВ характерною причиною аварійного знеструмлення виступають хибні дії релейного захисту та автоматики, а також відмови у вторинних колах.

Близько чверті відмов систем збірних шин 220 кВ у схемі з двома робочими та обхідною системами призводили до одночасного погашення обох робочих шин, що суттєво знижувало надійність живлення споживачів.

Застосування на підстанціях схем із двома системами збірних шин з обхідною, у порівнянні з альтернативним рішенням — однією секціонованою системою шин з обхідною, виявилось технічно та економічно менш ефективним і призвело до зниження загальної надійності електропостачання.

Використання двох, а не однієї робочої системи збірних шин у радіальних схемах може бути виправданим лише з точки зору режимних переваг, а не з позицій надійності чи економічності.

Запропонована узагальнена модель відмов систем збірних шин враховує інтенсивність подій, які призводять як до відключення однієї, так і двох систем шин одночасно. При цьому роз'єднувачі не слід розглядати як окремі елементи у структурі електричних з'єднань, оскільки їхній вплив інтегрується у загальний потік відмов системи.

Ліквідація аварій у схемах РП станцій і підстанцій повинна здійснюватися швидко, послідовно й під суворим оперативним контролем. Вирішальну роль відіграють надійні системи релейного захисту та автоматики, які забезпечують миттєве відключення пошкодженого обладнання й обмеження наслідків аварії.

Особливої уваги потребують аварії на збірних шинах, оскільки вони можуть призвести до знеструмлення всієї секції або навіть підстанції. У

таких випадках спрацювання диференційного захисту шин має забезпечити повне й вибіркове відключення пошкодженої системи шин. Після цього оперативний персонал проводить візуальний огляд, визначає характер пошкодження (наприклад, пробій ізолятора, замикання на ошиновці) і за можливості переводить навантаження на резервну систему шин чи обхідну секцію.

Ефективна ліквідація аварій на збірних шинах досягається завдяки справній роботі захистів, наявності дублюючих систем шин і чітким діям персоналу, який забезпечує безпечне відновлення електропостачання споживачів у найкоротші терміни.

У нормальному режимі роботи приєднання розподілені між двома системами збірних шин якнайбільш симетрично, що забезпечує рівномірне навантаження шин та зменшує втрати потужності. Шиноз'єднувальний вимикач (ШЗВ) у цьому режимі, як правило, включений і виконує функцію секціонування (режим фіксованих приєднань). У разі необхідності обмеження струмів короткого замикання або підтримання певної

конфігурації мережі, він може бути відключений — це відповідає режиму стаціонарного поділу мережі [11].

Для кожного приєднання включений один із шинних роз'єднувачів, що визначає активну систему шин, а другий — відключений. Інші вимикачі та роз'єднувачі у схемі перебувають у включеному стані, забезпечуючи нормальний режим живлення.

Обхідний вимикач (ОВ) застосовується для заміни будь-якого робочого вимикача під час проведення ремонтних або профілактичних робіт. У нормальному режимі він не задіяний, проте його наявність забезпечує безперервність електропостачання при виведенні окремих елементів у ремонт або при відмові основного обладнання.

Критерії надійності:

а) У разі відмови шиноз'єднувального вимикача, який перебуває у нормально ввімкненому стані, існує ризик повного знеструмлення розподільного пристрою, що може призвести до порушення живлення усіх приєднань.

б) Під час оперативних перемикань між системами збірних шин виникає безпосередній електричний зв'язок на розвилках через шинні роз'єднувачі, що потребує високої координації дій персоналу та дотримання суворої послідовності операцій, аби запобігти помилковим комутаціям і аваріям.

в) Для великих підстанцій інтенсивність відмов, що можуть призвести до повного знеструмлення розподільного пристрою, становить приблизно 0,04 1/рік, тобто така подія може траплятися раз на 25 років. Це свідчить про те, що рівень надійності існуючої схеми є недостатньо високим для сучасних вимог до безперервності електропостачання.

З метою підвищення надійності пропонується модернізована схема 110-13Н (рис.3.2), у якій передбачено дві основні та одну обхідну систему шин.

У такій конфігурації паралельна робота двох несекціонованих систем шин (рис.3.1) забезпечується за допомогою постійно ввімкненого шиноз'єднувального вимикача (ШЗВ), що підвищує гнучкість експлуатації, зручність оперативних перемикачів і зменшує ймовірність повного погашення РП у разі окремих відмов.

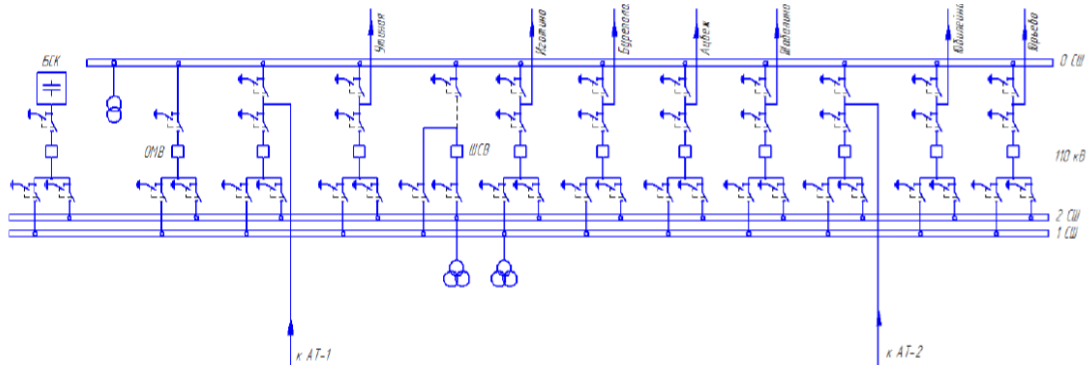


Рисунок 3.2 - Схема ВРП 110 кВ підстанції з двома системами збірних шин та з обхідною системою шин із «суміщеним» ОВ та ШЗВ

Для того, щоб обхідний вимикач міг замінювати шиноз'єднувальний вимикач під час його ремонту, на відгалуженні ОВ встановлюється додатковий роз'єднувач, який забезпечує приєднання ОВ до однієї з основних систем шин. Такий вимикач отримує назву «суміщений ОВ» (ШЗВ+ОВ), оскільки він поєднує функції як шиноз'єднувального, так і обхідного вимикача.

У нормальному режимі роботи половина приєднань (лінії та трансформатори) підключається до однієї системи шин, а друга половина – до іншої, що забезпечує рівномірний розподіл навантаження та підвищує надійність і гнучкість експлуатації розподільного пристрою.

У такому режимі роботи схеми, у разі відмови вимикача будь-якої лінії або трансформатора, релейний захист спрацює на відключення ШЗВ. Завдяки цьому половина приєднань розподільного пристрою залишається в роботі, що забезпечує безперервне електропостачання споживачів, підключених до відповідної системи шин.

Водночас, у випадку відмови самого ШЗВ, особливо якщо вона супроводжується коротким замиканням на обох системах шин одночасно, виникає повна втрата працездатності РП, тобто знеструмлення всіх приєднань. Така ситуація є найбільш небезпечною з точки зору загальної надійності схеми та потребує підвищеної уваги при експлуатації та виборі апаратури.

Як показує експлуатаційний досвід, приблизно у 10% випадків повного знеструмлення обох систем шин у таких розподільних пристроях причиною були відмови саме ШЗВ.

З метою усунення подібних аварійних ситуацій запропоновано послідовне з'єднання ШЗВ та обхідного вимикача у нормальному режимі роботи (рис.3.2). Для реалізації такого технічного рішення у ланцюг ШЗВ вводиться додатковий комутаційний апарат (роз'єднувач), який забезпечує гнучке оперативне переключення між системами шин та дублювання функцій ШЗВ у разі його відмови.

У запропонованій конфігурації послідовного включення двох вимикачів відмова будь-якого з них локалізується другим, справним апаратом. Це забезпечує збереження в роботі щонайменше половини приєднань РП та унеможлиблює повне погашення підстанції за одиничної відмови. Іншими словами, схема формує оперативне резервування функції відключення без істотної зміни режимів навантаження.

Водночас необхідно підкреслити, що рішення не належить до типових і потребує окремого техніко-економічного обґрунтування, перевірки узгодженості з нормативними документами (у частині вибору апаратів, вторинних з'єднань і алгоритмів РЗА).

Для подальшого аналізу та візуального зіставлення узагальнимо отримані результати у вигляді таблиці 3.1, де наведено порівняння ключових показників надійності та збереження живлення для розглянутих варіантів схем РП.

Таблиця 3.1 - Різниця математичних очікувань недовідпущеної електроенергії типового та нетипового рішення ВРП 110 кВ підстанції

Ситуація відключення елементів мережі	Математичне очікування недовідпущеної електроенергії типового рішення ВРП 110 кВ, ΔW , МВт·год	Математичне очікування недовідпущеної електроенергії модернізованого рішення ВРП 110 кВ, ΔW , МВт·год	Різниця математичних очікувань недовідпущеної електроенергії типового рішення ВРП 110кВ, МВтгод	Різниця математичних очікувань недовідпущеної електроенергії типового рішення ВРП 110 кВ, %
Одночасно вимкнено обидва автотрансформатора	8,608	6,084	-2,524	29,322
Вимкнено автотрансформатор АТ1	6,093	6,329	0,234	-3,873
Вимкнено автотрансформатор АТ2	8,021	8,281	0,260	-3,241
Вимкнено лінія до підстанції П1	1,458	1,506	0,048	-3,292
Вимкнено лінія до підстанції П2	1,123	1,160	0,037	-3,295
Вимкнено лінія до підстанції П3	1,492	1,552	0,060	-4,021
Вимкнено лінія до підстанції П4	4,099	4,232	0,133	-3,245

Слід зауважити, що у разі відмови “суміщеного” обхідного вимикача або шиноз’єднувального вимикача у нормальному режимі роботи виникає необхідність у додаткових оперативних перемиканнях, що потребують більшого часу для відновлення нормальної схеми живлення.

У зв’язку з цим, відмова вимикача будь-якого приєднання у схемі з двома основними та третьою обхідною системами збірних шин із “суміщеним” ОВ і ШЗВ супроводжується збільшенням математичного очікування недовідпущеної електроенергії порівняно з типовою схемою ВРП 110 кВ підстанції «Виповзове».

Проте ця різниця є несуттєвою: максимальне збільшення математичного очікування недовідпущеної електроенергії при відмові вимикача будь-якого приєднання становить близько 0,26 МВт·год, що можна вважати прийнятним з експлуатаційної точки зору, враховуючи загальне підвищення гнучкості та ремонтпридатності схеми.

Зі зменшенням імовірності повного знеструмлення ВРП 110 кВ підстанції, виконаного за схемою з двома системами збірних шин та обхідною системою із “суміщеним” вимикачем (ОВ+ШЗВ), спостерігається зниження частоти перерв у електропостачанні та відповідно зменшення обсягів недовідпущеної електроенергії споживачам.

Крім того, знижуються витрати на формування аварійних і страхових запасів матеріальних ресурсів у мережевому господарстві, оскільки зменшується ймовірність виникнення масштабних аварійних ситуацій. Ці скорочені витрати є порівнянними із потенційними збитками, яких вдається уникнути завдяки підвищенню надійності роботи енергосистеми.

3.2. Розробка схеми електричних мереж для електропостачання окремих груп споживачів

У практиці проєктування електричних мереж застосовуються принципи та нормативні положення, що визначають побудову систем електропостачання для груп споживачів, об’єднаних спільністю

територіального розташування або єдністю технологічного процесу. До таких груп належать комплекси споживачів, розміщених у межах міських територій, великі промислові підприємства та промислові вузли, об'єкти електрифікованого залізничного й трубопровідного транспорту, а також споживачі, розташовані в сільській місцевості.

У межах міських агломерацій зосереджена переважна більшість споживачів електричної енергії — близько 75 % загального обсягу споживання. Така концентрація визначає вагомий вплив міських систем електропостачання на загальну конфігурацію та режим роботи енергетичної мережі країни [12,13].

Схеми побудови міських електричних мереж повинні враховувати низку специфічних особливостей. Насамперед це висока щільність електричних навантажень: у комунально-побутових районах вона становить 9–12 МВт/км², тоді як у промислових зонах може досягати 30 МВт/км². Крім того, для умов міської забудови характерні обмежені можливості прокладання повітряних ліній електропередачі та вибору майданчиків для розміщення підстанцій. Додатковим чинником є підвищені архітектурно-естетичні вимоги до споруджуваних елементів електричної мережі, які мають гармонійно поєднуватися з міським середовищем та забезпечувати безпечну, надійну і безперебійну подачу електроенергії споживачам.

Враховуючи ключову роль електроенергії у забезпеченні безперервної життєдіяльності міста, до систем міського електропостачання висуваються особливо жорсткі вимоги щодо надійності та безпеки. Значна частина міських електроприймачів належить до першої категорії за надійністю, що потребує дублювання джерел живлення та мінімізації часу перерв у подачі електроенергії.

Електропостачання центральної зони міста із сумарним навантаженням понад 10 МВА повинно проектуватися за тими ж принципами, що й для електроприймачів першої категорії, забезпечуючи гарантовану безперебійну

роботу основних об'єктів житлово-комунального, транспортного та соціального призначення.

Джерелами електропостачання середніх і великих міських агломерацій — від міст із населенням 150–250 тисяч до мегаполісів із чисельністю понад 500 тисяч мешканців — слугують, як правило, теплоелектроцентралі (ТЕЦ), розташовані безпосередньо на території міста, а також зовнішні мережі енергосистем напругою переважно 220 кВ і вище. Таке поєднання місцевих та системних джерел забезпечує необхідну надійність живлення і стійкість міського енергетичного балансу.

Розвиток електричних мереж напругою 110–220 (330) кВ у великих містах відбувався поетапно, із поступовим ускладненням структури та підвищенням рівня надійності електропостачання.

На першому етапі формування міської мережі основним джерелом живлення слугувала місцева теплоелектроцентраль (ТЕЦ). У цей період окремі лінії та підстанції напругою 110 кВ функціонували відокремлено, без утворення єдиної системи електропостачання, що обмежувало можливості резервування та маневрування електричними потоками.

Другий етап розвитку пов'язаний із введенням у дію першої підстанції 220/110 кВ, що забезпечило взаємозв'язок міської мережі з енергосистемою вищого рівня напруги. На цьому етапі починають чітко проявлятися принципи системної побудови міської електричної мережі та її розподільної структури.

Третій і четвертий етапи характеризуються завершенням формування кільцевої або радіально-кільцевої мережі 110 кВ, розбудовою мережі 220 кВ і створенням повноцінної системи електропостачання міста з високим рівнем надійності, резервування та можливістю гнучкого перерозподілу електричних навантажень між підстанціями.

Міська мережа напругою 110 кВ зазвичай будується за кільцевим принципом, утворюючи замкнуте кільце, що охоплює місто переважно по його периферії. Таке кільце виконує функції своєрідних «збірних шин»

високої напруги, які приймають електроенергію від центральних джерел живлення (ЦЖ) і рівномірно розподіляють її між районними підстанціями 110/10 кВ.

Кільцева структура забезпечує високу надійність та оперативну гнучкість системи електропостачання: у разі пошкодження будь-якої ділянки лінії живлення споживачів може бути швидко відновлено за рахунок живлення з протилежного боку кільця. Окрім підвищення надійності, така конфігурація сприяє економічному розвитку та поетапному нарощуванню потужності мережі 110 кВ відповідно до зростання електричних навантажень у міських районах.

Усі підстанції напругою 110 кВ, як правило, підключаються до міської мережі за двома незалежними ланцюгами, що підвищує надійність електропостачання. При цьому застосовуються схеми приєднання двох типів: відгалуження без вимикачів або схема «містка», у якій передбачено вимикач у перемичці між двома вводами.

Використання спрощених схем на стороні 110 кВ є особливо доцільним у міських умовах, де територія для розміщення електротехнічного обладнання обмежена, а також часто виникає потреба виконання підстанцій у закритому виконанні — для зниження рівня шуму трансформаторів чи відповідно до архітектурно-естетичних вимог забудови.

У зв'язку з цим доцільно використовувати як основні комутаційні вузли мережі 110 кВ центри живлення — підстанції класу напруги 220 (330)/110 кВ, які забезпечують не лише живлення міської мережі, але й її секціонування, резервування та надійне оперативне керування потоками електроенергії.

Сучасна практика проектування систем електропостачання промислових підприємств і промислових вузлів характеризується тенденцією до використання глибоких вводів. Це означає максимально можливе наближення джерел живлення до безпосередніх споживачів електроенергії на

підприємстві, що дозволяє мінімізувати кількість проміжних ланок мережі та ступенів трансформації.

Такий підхід сприяє підвищенню енергоефективності, зниженню втрат електроенергії, спрощенню схем розподілу та підвищенню надійності живлення технологічного обладнання. У випадку розміщення підприємства на великій території передбачається поділ системи живлення на кілька підстанцій високої напруги, рівномірно розташованих поблизу основних споживачів, що забезпечує раціональний розподіл потужності та гнучкість у роботі мережі.

Рівень напруги, що застосовується для зовнішнього електропостачання промислових підприємств, визначається величиною їх електричного навантаження. Залежно від установленної потужності електроприймачів промислові підприємства умовно поділяють на три групи: дрібні — із сумарною потужністю до 5 МВт, середні — від 5 до 75 МВт, та великі — 75–100 МВт і більше. Така класифікація дозволяє обґрунтовано обирати напругу живлення, структуру мережі та кількість ступенів трансформації для забезпечення оптимальної енергоефективності та надійності електропостачання.

Електропостачання дрібних промислових підприємств зазвичай здійснюється від підстанцій загального призначення напругою 110 кВ, які подають електроенергію на середньому або низькому рівні напруги залежно від потреб споживачів. Такий підхід дозволяє оптимізувати витрати на будівництво та експлуатацію мережі при відносно невеликих навантаженнях.

Для середніх і великих підприємств використовуються мережі напругою 110 кВ і вище. У цьому випадку застосовуються кілька типових схем розподілу електроенергії:

- Головна понижувальна підстанція (ГПП) 220 (330, 500)/110 кВ, яка виконує функцію розподільного вузла, забезпечуючи живлення та перерозподіл потужності між підстанціями 110/10(6) кВ глибоких вводів;

- Одна або кілька підстанцій 110/10(6) кВ, безпосередньо приєднаних до мережі 110 кВ енергосистеми, що забезпечують живлення технологічних споживачів середнього рівня потужності;
- Підстанції глибокого вводу 220/10(6) кВ, які застосовуються на особливо енергоємних підприємствах, таких як металургійні комбінати або алюмінієві заводи, де необхідна подача потужності великої величини з мінімальною кількістю проміжних трансформацій.

Такий підхід забезпечує високу ефективність, гнучкість і надійність систем електропостачання промислових об'єктів різних масштабів.

Підстанції глибоких введів, як правило, проєктуються за спрощеними схемами з мінімальною кількістю комутаційного та трансформаторного обладнання на стороні високої напруги. Такий підхід дозволяє підвищити надійність роботи та знизити ризик аварій, особливо в умовах підвищеного промислового забруднення, яке може спричиняти погіршення ізоляційних властивостей обладнання.

На рис. 3.3 та 3.4 подано варіанти схем зовнішнього електропостачання великих промислових підприємств, що ілюструють принципи побудови та особливості застосування підстанцій глибоких введів у сучасних енергосистемах.

Для більшості промислових споживачів характерним є використання схем типу “лінія–трансформатор”, що забезпечують простоту побудови та високу експлуатаційну надійність. Найпоширенішими є радіальні схеми типу Р2, які дозволяють здійснювати незалежне електропостачання окремих об'єктів або підприємств, зменшуючи ймовірність взаємного впливу при аварійних відключеннях (рис.3.3).

На прикладі заводу мінеральних добрив (рис.3.4) показано, що надійність електропостачання підвищується шляхом живлення підстанцій 110 кВ за двома незалежними схемами типу Р1 від різних підстанцій 330 кВ енергосистеми. При цьому підстанції №1 та №2 отримують живлення двома окремими лініями, прокладеними на різних дволанцюгових опорах, що

забезпечує високу ступінь резервування та мінімізацію ризику одночасного відключення живлення.

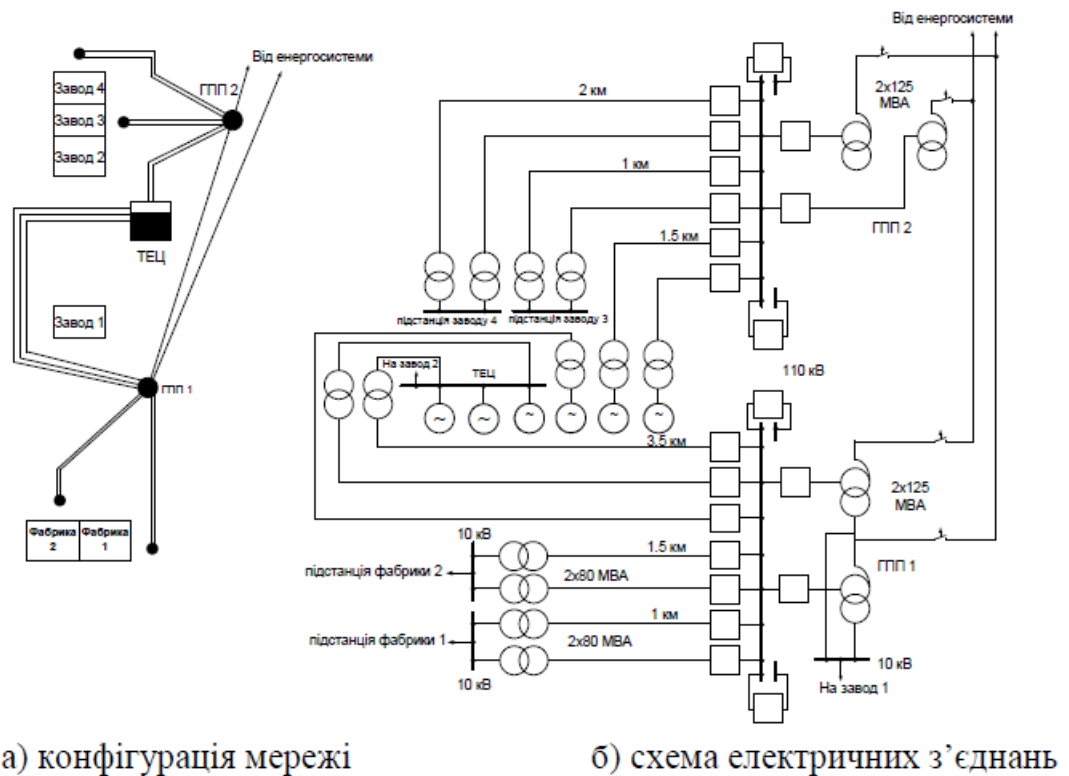
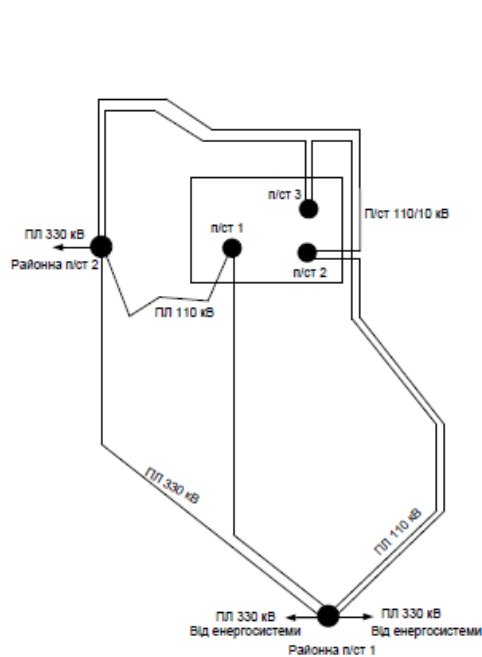
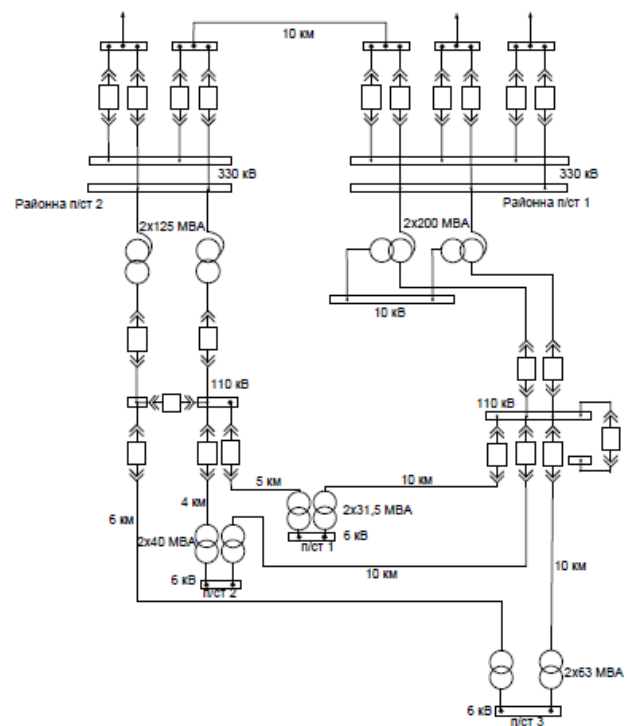


Рисунок 3.3 - Схема зовнішнього електропостачання крупного хімкомбінату з навантаженням 300 МВт

Застосування спрощеної схеми на стороні високої напруги дозволяє забезпечити високий рівень надійності електропостачання завдяки продуманій системі резервування. Зокрема, передбачається встановлення одного резервного трансформатора на кожні чотири робочих, що гарантує можливість оперативного відновлення живлення у разі виходу з ладу будь-якого з основних агрегатів.



а) конфігурація мережі



б) схема електричних з'єднань

Рисунок 3.4 - Схема зовнішнього електропостачання заводу мінеральних добрив з навантаженням 150 МВт

Розглянуті принципи побудови систем електропостачання промислових підприємств показують, що висока ефективність і надійність роботи досягається завдяки застосуванню спрощених, але конструктивно продуманих схем високої напруги. Використання схем типу «лінія–трансформатор», радіальних структур живлення та підстанцій глибоких введів забезпечує автономність і стійкість електропостачання окремих виробничих об'єктів.

Додаткове підвищення надійності досягається завдяки застосуванню видозмінених схем збірних шин, які поєднують простоту конструкції з можливістю секціонування, обходу або гнучкого резервування живлення.

Такі схеми дозволяють проводити ремонтні чи післяаварійні перемикання без перерви електропостачання основних споживачів.

Наявність резервних трансформаторів та обхідних систем шин створює додаткові можливості для маневрування електричними потоками, що

забезпечує стабільність, безперервність і гнучкість роботи промислових енергетичних комплексів навіть за умов зростання навантажень чи аварійних ситуацій.

3.3. Надійність видозмінених схем збірних шин та інтелектуальний розвиток електричних мереж

Сучасний етап розвитку електроенергетики характеризується підвищеними вимогами до надійності, безпеки, гнучкості та енергоефективності систем електропостачання. В умовах зростання навантажень, урбанізації, а також впровадження відновлюваних джерел енергії, особливого значення набувають удосконалені, або видозмінені, схеми збірних шин, які поєднують переваги традиційних конструкцій і новітніх інтелектуальних технологій керування. Вони є перехідною ланкою між класичними схемами підстанцій (з однією або двома системами шин, схемою 3/2, «чотирикутником») і сучасними концепціями Smart Grid, у межах яких електричні мережі стають самодіагностичними, адаптивними та взаємопов'язаними [13].

Розвиток видозмінених схем збірних шин зумовлений прагненням забезпечити максимальну надійність за мінімальних витрат. Їхньою головною особливістю є оптимальне поєднання компактності, гнучкості комутацій, зручності обслуговування та можливості швидкого резервування живлення. Такі схеми особливо ефективні для міських і промислових підстанцій, де обмежена площа, жорсткі архітектурні вимоги, а також підвищена відповідальність за безперервність подачі електроенергії.

Видозмінені схеми збірних шин (ВСЗШ) створюються шляхом функціонального поєднання елементів традиційних рішень. Наприклад, схеми з обхідною системою шин і «сумісним» вимикачем забезпечують можливість ремонту або виведення в резерв частини обладнання без відключення основних приєднань.

На рисунку 3.5 показано узагальнену схему видозміненої системи збірних шин з обхідною системою та інтегрованим вимикачем у перемичці. Секційний вимикач дозволяє проводити ремонтні або післяаварійні перемикання без знеструмлення основних приєднань, що підвищує гнучкість та експлуатаційну надійність системи [14].

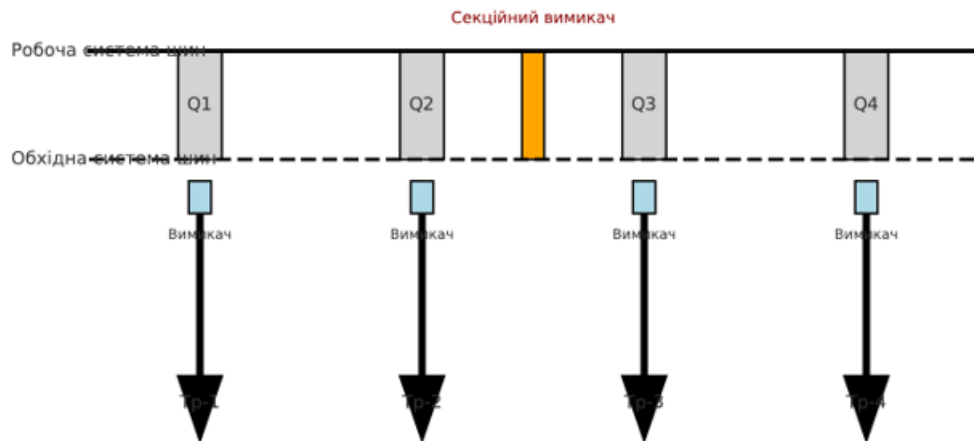


Рисунок 3.5 – Узагальнена схема видозміненої системи збірних шин з обхідною системою та інтегрованим вимикачем у перемичці

Надійність таких схем визначається не лише кількістю комутаційних апаратів, а й логікою їх взаємодії. При виникненні аварійної ситуації чи відмові вимикача система зберігає працездатність завдяки альтернативним шляхам живлення. Це суттєво знижує імовірність повного погашення підстанції й скорочує час відновлення електропостачання. Додатковий ефект досягається при інтеграції автоматизованих систем відновлення живлення (САВС), які в реальному часі локалізують місце пошкодження, здійснюють ізоляцію несправної ділянки та автоматично відновлюють подачу електроенергії по резервному колу.

Для кількісної оцінки надійності видозмінених схем використовують такі показники, як середня частота відключень (SAIFI), середня тривалість відключень (SAIDI), середній час відновлення (CAIDI) та обсяг невідпущеної електроенергії. Імовірнісне моделювання показує, що впровадження систем із подвійним резервуванням шин і секціонованими

перемичками дозволяє знизити інтегральний показник SAIDI у 1,5–2 рази, а втрати електроенергії внаслідок аварій — до 30–40 % у порівнянні з типовими схемами. Результати порівняльного аналізу (рис. 3.6 і табл. 3.2) свідчать, що впровадження видозмінених схем дозволяє знизити інтегральний показник SAIDI у 1,5–2 рази, а обсяг недовідпущеної електроенергії — до 40 % у порівнянні зі стандартними рішеннями.

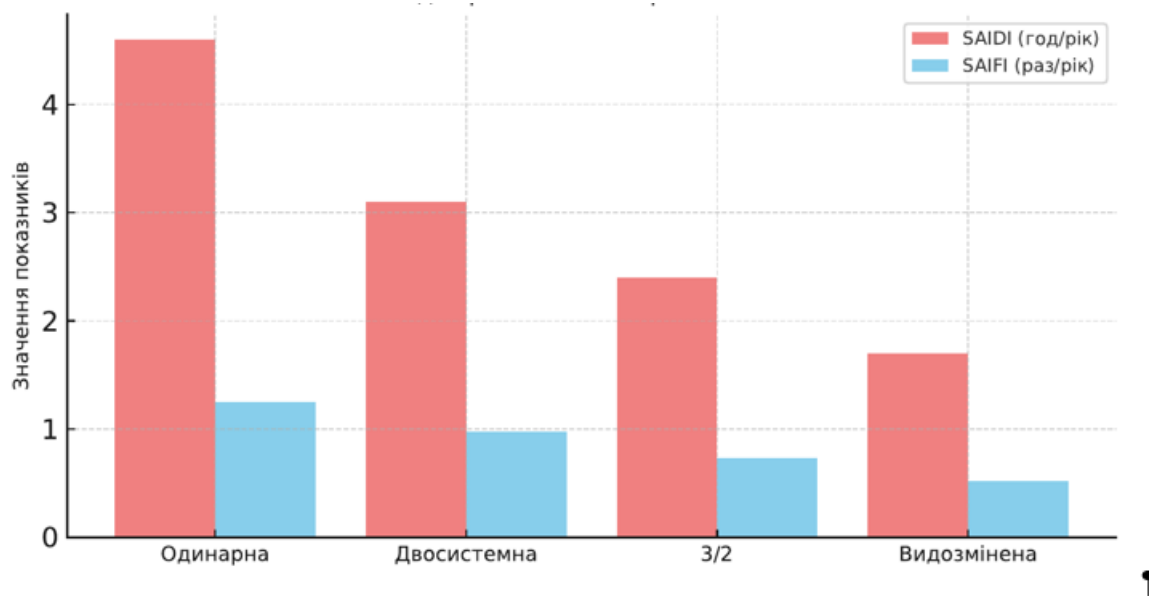


Рисунок 3.6 – Порівняльна діаграма показників SAIDI і SAIFI для традиційних та видозмінених схем збірних шин (ось Y — показники в %, ось X — типи схем: одинарна, двосистемна, 3/2, видозмінена. Видозмінена схема показує найнижчі значення)

Інтелектуальні підстанції нового покоління оснащуються цифровими системами керування, які реалізують моніторинг у реальному часі, прогнозування аварійних ситуацій, а також динамічне керування конфігурацією збірних шин. Використання протоколу IEC 61850, мікропроцесорних пристроїв РЗА та сенсорних систем дає змогу здійснювати дистанційне керування комутаційними апаратами й оптимізувати режими навантажень. У результаті коефіцієнт готовності підстанції досягає 0,9995–0,9997, що відповідає найвищим міжнародним стандартам.

Завдяки цьому здійснюється динамічне керування конфігурацією збірних шин, автоматична локалізація пошкоджень, прогнозування аварійних ситуацій та оптимізація режимів роботи з урахуванням поточних навантажень [15].

■ Таблиця 3.2—Порівняння показників надійності різних схем збірних шин □

Тип схеми збірних шин □	SAIDI, год/рік □	SAIFI, раз/рік □	ENS, МВт·год/рік □	Коеф. готовності □
Одинарна система шин □	4,6 □	1,25 □	14,8 □	0,9925 □
Двосистемна схема □	3,1 □	0,98 □	10,2 □	0,9950 □
Схема 3/2 □	2,4 □	0,73 □	7,5 □	0,9968 □
Видозмінена схема □	1,7 □	0,52 □	4,3 □	0,9992 □

Цифровізація процесів управління сприяє зростанню експлуатаційної надійності та скороченню часу ліквідації аварій. У системах із цифровими двійниками підстанцій можливе попереднє моделювання режимів роботи, аналіз наслідків виходу з ладу окремих елементів і оптимізація варіантів перемикання. Застосування технологій машинного навчання дозволяє виявляти закономірності зміни параметрів обладнання та прогнозувати відмови. Результатом є підвищення коефіцієнта готовності системи до рівня 0,9995–0,9997, що відповідає найвищим міжнародним критеріям надійності.

Видно, що найвищі показники надійності спостерігаються саме для видозмінених схем, де поєднані оптимальні умови резервування, автоматичного керування та швидкого відновлення живлення.

Подальший розвиток таких рішень пов'язаний із впровадженням інтелектуальних систем керування на основі принципів Smart Grid [16]. У майбутньому підстанції з видозміненими схемами збірних шин функціонуватимуть як елементи розподіленої енергетичної мережі, здатної до саморегулювання, адаптації та взаємодії з відновлюваними джерелами енергії. В межах цієї концепції передбачено використання мультиагентних систем для координації дій між підстанціями, гнучке керування потоками

потужності, інтеграцію накопичувачів енергії, а також застосування розподіленої аналітики для виявлення потенційних відмов на ранніх стадіях.

3.3.1. Практичні рекомендації

На основі проведених досліджень щодо підвищення надійності електропостачання за рахунок застосування видозмінених схем збірних шин можна сформулювати низку практичних рекомендацій для проектування, модернізації та експлуатації підстанцій.

Передусім доцільно впроваджувати схеми з обхідною системою шин і сумісним вимикачем, які забезпечують можливість оперативного резервування без знеструмлення споживачів. У разі реконструкції існуючих РП 110–220 кВ рекомендується заміна застарілих односистемних конфігурацій на модульні або комбіновані 3/2-схеми, що дозволяють локалізувати пошкодження та спрощують проведення ремонтів.

У міських умовах, де простір для електроустановок обмежений, варто віддавати перевагу компактним комплектним розподільчим пристроям з інтегрованими комутаційними апаратами та цифровими системами захисту. Такі рішення знижують ризик міжфазних замикань і підвищують рівень електричної безпеки персоналу.

Для підвищення ефективності експлуатації необхідно впроваджувати системи технічного моніторингу стану обладнання, що включають датчики струму, напруги, температури та вологості, інтегровані у систему керування підстанцією за протоколом IEC 61850. Отримані дані можуть використовуватись для формування цифрових двійників підстанцій, прогнозування зношування апаратури та запобігання відмовам.

Рекомендується проводити поетапну автоматизацію операцій перемикання шляхом встановлення мікропроцесорних пристроїв САВЖ (систем автоматичного відновлення живлення). Вони забезпечують відновлення живлення споживачів протягом 1–2 с після короткочасних пошкоджень і дозволяють скоротити показники SAIDI та SAIFI на 30–40 %.

Для великих промислових підприємств доцільним є використання підстанцій глибокого вводу 220/10(6) кВ, що зменшує кількість ступенів трансформації й втрати електроенергії. У перспективі впровадження накопичувачів енергії (BESS) у вузлах навантаження дозволить підвищити стійкість мережі до пікових режимів.

В цілому, реалізація наведених рекомендацій сприятиме формуванню інтелектуальних підстанцій нового покоління, здатних забезпечувати високу надійність, енергоефективність і готовність до інтеграції відновлюваних джерел у єдину енергосистему.

Таким чином, видозмінені схеми збірних шин у поєднанні з інтелектуальними технологіями стають основою для створення нового покоління електричних мереж — адаптивних, цифрових і самокерованих. Вони забезпечують безперервність подачі електроенергії, підвищену стійкість до аварійних впливів і гнучкість у керуванні енергетичними потоками, що є ключовими умовами переходу до енергосистем майбутнього.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3:

Проаналізована робота видозміненої схеми збірних шин на реальній підстанції «Виповзове», розраховані показники надійності її роботи. У результаті можна сказати, що при її застосуванні зменшуються економічні втрати, пов'язані з порушенням роботи промислових, комунальних і побутових споживачів, що в комплексі сприяє підвищенню ефективності та стабільності функціонування економіки регіону та енергосистеми в цілому.

Це свідчить про зменшення фінансових втрат, зокрема штрафних санкцій, пені та неустойок, що виникають унаслідок порушення договірних зобов'язань через перерви в електропостачанні споживачів.

Розглянуті принципи побудови систем електропостачання промислових підприємств показують, що висока ефективність і надійність роботи досягається завдяки застосуванню спрощених, але конструктивно продуманих схем високої напруги. Використання схем типу «лінія–трансформатор», радіальних структур живлення та підстанцій глибоких введів забезпечує автономність і стійкість електропостачання окремих виробничих об'єктів.

Додаткове підвищення надійності досягається завдяки застосуванню видозмінених схем збірних шин, які поєднують простоту конструкції з можливістю секціонування, обходу або гнучкого резервування живлення.

У майбутньому підстанції з видозміненими схемами збірних шин функціонуватимуть як елементи розподіленої енергетичної мережі, здатної до саморегулювання, адаптації та взаємодії з відновлюваними джерелами енергії.

В межах цієї концепції передбачено використання мультиагентних систем для координації дій між підстанціями, гнучке керування потоками потужності, інтеграцію накопичувачів енергії, а також застосування розподіленої аналітики для виявлення потенційних відмов на ранніх стадіях.

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ:

Розглянуті принципи побудови систем електропостачання промислових підприємств показують, що висока ефективність і надійність роботи досягається завдяки застосуванню спрощених, але конструктивно продуманих схем високої напруги. Використання схем типу «лінія–трансформатор», радіальних структур живлення та підстанцій глибоких введів забезпечує автономність і стійкість електропостачання окремих виробничих об'єктів.

Додаткове підвищення надійності досягається завдяки застосуванню видозмінених схем збірних шин, які поєднують простоту конструкції з можливістю секціонування, обходу або гнучкого резервування живлення.

У майбутньому підстанції з видозміненими схемами збірних шин функціонуватимуть як елементи розподіленої енергетичної мережі, здатної до саморегулювання, адаптації та взаємодії з відновлюваними джерелами енергії.

В межах цієї концепції передбачено використання мультиагентних систем для координації дій між підстанціями, гнучке керування потоками потужності, інтеграцію накопичувачів енергії, а також застосування розподіленої аналітики для виявлення потенційних відмов на ранніх стадіях.

Для підвищення ефективності експлуатації необхідно впроваджувати системи технічного моніторингу стану обладнання, що включають датчики струму, напруги, температури та вологості, інтегровані у систему керування підстанцією за протоколом IEC 61850. Отримані дані можуть використовуватись для формування цифрових двійників підстанцій, прогнозування зношування апаратури та запобігання відмовам.

Рекомендується проводити поетапну автоматизацію операцій перемикання шляхом встановлення мікропроцесорних пристроїв САВЖ (систем автоматичного відновлення живлення). Вони забезпечують відновлення живлення споживачів протягом 1–2 с після короточасних пошкоджень і дозволяють скоротити показники SAIDI та SAIFI на 30–40 %.

Для великих промислових підприємств доцільним є використання підстанцій глибокого вводу 220/10(6) кВ, що зменшує кількість ступенів трансформації й втрати електроенергії. У перспективі впровадження накопичувачів енергії (BESS) у вузлах навантаження дозволить підвищити стійкість мережі до пікових режимів.

Таким чином, видозмінені схеми збірних шин у поєднанні з інтелектуальними технологіями стають основою для створення нового покоління електричних мереж — адаптивних, цифрових і самокерованих. Вони забезпечують безперервність подачі електроенергії, підвищену стійкість до аварійних впливів і гнучкість у керуванні енергетичними потоками, що є ключовими умовами переходу до енергосистем майбутнього.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ:

1. Лежнюк П. Д. Проектування електричної частини електричних станцій: навчальний посібник / Лежнюк П. Д. , Лагутін В. М. , Тептя В. В. –Вінниця : ВНТУ, 2019. – 194 с.
2. СОУ-Н ЕЕ 20.178-2008 «Схеми принципів електричні розподільних установок напругою від 6 кВ до 750 кВ електричних підстанцій. Настанова»
3. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х. : Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
4. Кириленко О.В., Денисюк С.П. Сучасні тенденції побудови та керування режимами електроенергетичних мереж // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. №4 (147). 2016. – с. 2- 14.
5. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
6. Totally Integrated Power. Planning of Electric Power Distribution. Technical Principles. Siemens AG Energy Management Medium Voltage & Systems. Mozartstr. 31c 91052 Erlangen Germany. 2018 Siemens AG Berlin and Munich. [siemens.com/tip](https://www.siemens.com/tip)
7. Bernd M. Buchholz, Zbigniew Styczynski. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2018, 396p.
8. Abo-Hamad, G.M.; Ibrahim, D.K.; Aboul Zahab, E.; Zobaa, A.F. Dynamic Quadrilateral Characteristic-Based Distance Relays for Transmission Lines Equipped with TCSC. Energies 2021, 14, 7074. <https://doi.org/10.3390/en14217074>
9. Helder Lopes Ferreira, Angelo L'Abbate, Gianluca Fulli, and Ulf Häger Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS) Devices. Chapter 4. Advanced Technologies for Future Transmission Grids/Springer-Verlag London. 2019. 119-156 pp. DOI 10.1007/978-1-4471-4549-3

10. Electrical Transmission Systems and Smart Grids: Selected Entries from the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology. Miroslav M Begovic. Chapter 5 Wide Area Monitoring, Protection and Control. James S. Thorp and Arun G. Phadke. DOI 10.1007/978-1-4614-5830-2
11. Alvarez J.-M., Mercado P.E. Online Inference of the Dynamic Security Level of Power Systems Using Fuzzy Techniques // IEEE Trans. On Power Systems, Vol 22, No.2, May 2017, pp.717-726/
12. CIGRE 898 Knowledge transfer of substation engineering and experience WG B3.58. April 2023.
13. ABB Switchgear Manual, Cornelsen Verlag, Berlin 10th, 10th revised, 2021. 903 p.
14. John D. McDonald. Electric Power Substations Engineering – Third Edition. CRC Press, 2022. 53 p.
15. Bernd M. Buchholz, Zbigniew Styczynski. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016, 396 p.
16. Друбецька Т.І., Більцан К.М. Сучасні тенденції в проектуванні електричних підстанцій. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. №1. С.46-53.