

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

До захисту
Допускається
Завідувач кафедри енергетики та
електротехнічних систем

доцент Чепіжний А.В.

ДИПЛОМНА РОБОТА
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження методів підвищення надійності
електропостачання промислових споживачів»

Виконала

(підпис)

Безбородько В. В.
(прізвище, ініціали)

Група

ЕТЕС 2301м

(Науковий) керівник:

(підпис)

Савойський О. Ю.
(прізвище, ініціали)

Суми – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

завідувач кафедри енергетики та
електротехнічних систем

доцент _____ Чепіжний А.В.
(підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

« _____ » _____ 202__ року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ
Безбородька Віталія Васильовича
(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження методів підвищення надійності електропостачання промислових споживачів

керівник роботи: ст. викладач Савойський Олександр Юрійович

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

затверджено наказом по закладу вищої освіти від «26» 02 2024 р. № 572/ос

2. Термін подання здобувачем закінченої роботи «11» 11 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: річні звіти базового підприємства, нормативно-технічна документація, наукові та літературні джерела

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):

1. Аналіз існуючих способів підвищення надійності електропостачання споживачів.

2. Розробка та обґрунтування параметрів параметрів системи резервування.

3. Дослідження ефективності застосування резервування систем електропостачання.

4 Економічне обґрунтування.

5 Охорона праці.

Висновки.

Список використаної літератури.

Додатки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Презентаційний матеріал виконаний в програмі Power Point

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата

КАЛЕНДАРНИЙ ГРАФІК

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 15.08.2024 р.	
2	Складання плану роботи	до 23.08.2024 р.	
3	Написання вступу	до 26.08.2024 р.	
4	Підготовка розділу «Розділ 1»	до 28.08.2024 р.	
5	Підготовка розділу «Розділ 2»	до 16.09.2024 р.	
6	Підготовка розділу «Розділ 3»	до 14.10.2024 р.	
7	Підготовка розділу «Розділ 4» та «Розділ 5»	до 21.10.2024 р.	
8	Написання висновків та пропозицій	до 28.10.2024 р.	
9	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2024 р.	
10	Подання роботи на рецензування	до 05.11.2024 р.	
11	Подання до попереднього захисту	до 12.11.2024 р.	

Здобувач вищої освіти

_____ (Безбородько В.В.)
(підпис) (прізвище, ініціали)

**(Науковий) керівник
дипломної роботи**

_____ (Савойський О.Ю.)
(підпис) (прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Дослідження методів підвищення надійності електропостачання промислових споживачів. Кваліфікаційна робота / Безбородько Віталій Васильович – Суми: СНАУ, 2024 р. – 62 с.

У кваліфікаційній роботі було проведено аналіз методів підвищення надійності електропостачання промислових споживачів.

Досліджено метод підвищення надійності електропостачання промислових споживачів.

Під час розробки покращення надійності системи електропостачання запропоновано схему із використанням резервного джерела живлення.

В даній роботі було виконано розрахунки показників надійності існуючої системи та запропонованого рішення.

Виконано техніко-економічні розрахунки, запропоновано заходи безпеки при роботі з резервними джерелами живлення.

Ключові слова: РЕЗЕРВУВАННЯ СИСТЕМИ, ГЕНЕРАТОР, РЕЗЕРВНЕ ДЖЕРЕЛО, ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.

Графіки: 2; ілюстрації: 12; використані джерела: 20; таблиці: 16;

ЗМІСТ

ВСТУП	07
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧІВ	09
1.1 Основні показники надійності системи електропостачання	09
1.2 Фактори, що впливають на надійність систем електропостачання	11
1.3 Аналіз підвищення надійності електропостачання	13
1.3.1 Резервування системи	13
1.3.2 Секціонування в електричних системах	16
1.4 Висновки до розділу	18
2. РОЗРОБКА ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ РЕЗЕРВУВАННЯ	19
2.1 Визначення і розрахунок поточного об'єкту	19
2.2 Вибір резервного живлення	20
2.3 Складання та опис принципової електричної схеми автоматичного включення резерву	21
2.4 Вибір обладнання	23
2.4.1 Розрахунок та вибір АВР	23
2.4.2 Вибір автоматичних вимикачів	24
2.4.3 Вибір контакторів	26
2.5 Висновки до розділу	28
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗЕРВУВАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	29
3.1 Визначення показників надійності елементів	29
3.2 Аналіз надійності існуючої системи електропостачання	30
3.3 Аналіз надійності запропонованої системи електропостачання	41
3.4 Порівняння отриманих показників надійності	50
3.5 Висновок до розділу	51
4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	52

	6
4.1 Розрахунок недовідпуску електроенергії	52
4.2 Збитки від недовідпуску	52
4.3 Висновок до розділу	53
5. ОХОРОНА ПРАЦІ	54
5.1. Організація заходів безпеки під час експлуатації дизельного генератора	54
5.2 Небезпечні фактори при роботі з дизельним генератором	55
5.3 Індивідуальні заходи безпеки для працюючого персоналу	56
5.4 Висновок до розділу	57
ВИСНОВКИ	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	59
ДОДАТКИ	62

ВСТУП

У світі, де інноваційні технології, критична інфраструктура та навіть повсякденне життя потребують надійності в електропостачанні, застосування резервних джерел стає все більш актуальним. В цій роботі досліджується основні типи резервних джерел живлення, їх застосування та переваги, спираючись на досвід іноземних країн. Більшість систем резервного живлення можуть бути налаштовані під конкретні потреби споживача, що дозволяє оптимізувати витрати на електроенергію.

Застосування резервних джерел живлення є невід'ємною частиною у забезпеченні надійності електропостачання в сучасних умовах. Особливо це актуально в нашій країні, через можливі довготривалі відключення електроенергії.

Мета даного дослідження. Розробка науково-обґрунтованих рекомендацій щодо підвищення надійності електропостачання споживачів шляхом застосування методу резервування. Для виконання поставленої мети в роботі було поставлено наступні завдання:

Проаналізувати методи підвищення надійності електропостачання промислових споживачів.

Дослідити показники надійності існуючої системи.

Розрахувати показники надійності електропостачання існуючої системи з урахуванням резервування.

Здійснити порівняльний аналіз метода резервування на основі розробленої моделі.

Запропонувати заходи щодо охорони праці.

Виконати економічні обґрунтування.

Предмет дослідження. Предметом дослідження являють собою показники надійності системи електропостачання споживачів.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є система електропостачання.

Практичне значення. Результати проведеного дослідження можуть знайти застосування на практиці в умовах електропостачання організацій для вирішення питань підвищення надійності системи електропостачання під час проектування систем електропостачання з використанням резервного живлення у вигляді дизельного генератора.

Апробація. За результатами досліджень було опубліковано дві тези на всеукраїнських конференціях[24,25].

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧІВ

1.1 Основні показники надійності системи електропостачання

Показники надійності електричних мереж визначають ефективність та безперебійність електропостачання споживачів. Одним із ключових показників є середній час відновлення електропостачання, який визначає, скільки часу потрібно для усунення аварії або відновлення роботи після відмови. Чим менший цей показник, тим швидше мережа повертається до нормальної роботи. Інший важливий показник – частота відмов, яка визначається кількістю відмов за певний період часу і зазвичай вимірюється кількістю відмов на 100 км лінії або на рік. Середній час безвідмовної роботи показує, скільки часу проходить між двома послідовними відмовами, а високі значення цього показника свідчать про рідкісні збої в мережі. Імовірність безперебійної роботи характеризує те, наскільки ймовірно, що система працюватиме без відмов у конкретний момент часу.

Серед важливих показників надійності також виділяються частота і тривалість перерв в електропостачанні, які вимірюються за допомогою індексів SAIFI та SAIDI. Індекс SAIFI демонструє середню кількість перерв в електропостачанні на одного споживача за певний період часу. Формула знаходження показника [1,7]:

$$SAIFI = \frac{\sum N_i}{N_{total}} \quad (1.1)$$

Де N_i – кількість споживачів, що зазнали кожної перерви, шт [1].

N_{total} – загальна кількість споживачів у системі скільки разів споживач може стикнутися з перервою в постачанні електроенергії за певний період (зазвичай рік).

Індекс SAIDI відображає середню тривалість перерв на одного споживача і рахується за формулою [1,7]:

$$SAIDI = \frac{\sum (U_i \times N_i)}{N_{total}} \quad (1.2)$$

де U_i – тривалість кожної перерви в год [1],

N_i – кількість споживачів, що зазнали цієї перерви. SAIDI вимірює загальний час, протягом якого споживач залишається без електроенергії. Таким чином, обидва індекси (SAIFI та SAIDI) є важливими для оцінки якості електропостачання, оскільки вони відображають, скільки разів і на скільки часу споживачі залишалися без електроенергії. Підвищення цих показників є ключовим для забезпечення стабільності та надійності електричних мереж, що має вирішальне значення для сучасних підприємств.

Формула для розрахунку показника надійності, що враховує середню тривалість безаварійної роботи (MTBF) і середній час відновлення (MTTR), виглядає наступним чином[10]:

$$R = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (1.3)$$

де R – коефіцієнт надійності або ймовірність безперебійної роботи системи за певний період часу. Даний коефіцієнт лежить від 0 до 1, де 1 означає 100% максимальна надійність (система не виходить з ладу), а 0 – мінімальна надійність (система постійно виходить з ладу).

MTBF – середній час між відмовами системи. Даний показник визначає скільки часу в середньому система працює без збоїв. Чим більше значення MTBF, тим довше система працює без поломок [10].

MTTR – середній час на відновлення. Час, який потрібен для усунення несправності і повернення системи до робочого стану. Чим менше значення MTTR, тим швидше відновлюється робота системи після збою [10].

Формула (1.3) дозволяє оцінити ймовірність безперервної роботи системи протягом періоду часу. також важливо враховувати вплив резервування, яке

дозволяє зменшити ризики відмови системи в разі виходу з ладу окремих елементів.

1.2 Фактори, що впливають на надійність систем електропостачання

Технічні фактори включають стан обладнання, зокрема трансформаторів, ліній електропередач, комутаційних пристроїв та інших компонентів мережі. Застаріле або неправильно експлуатоване обладнання може призвести до аварій або перерв у подачі електроенергії. Для забезпечення високої надійності системи необхідно регулярно проводити діагностику і технічне обслуговування, а також своєчасно модернізувати ключові елементи системи. Технологічні нововведення, зокрема впровадження смарт-мереж, можуть значно підвищити стійкість системи, оскільки вони дозволяють швидше виявляти та усувати проблеми, оптимізувати навантаження і покращувати прогнозування. Одним із важливих показників надійності системи є середній час відновлення електропостачання після аварії, який залежить як від технічного стану обладнання, так і від кваліфікації персоналу[21].

Для оцінки надійності системи електропостачання використовуються різні методи і моделі. Одним із поширених є ймовірнісний метод, який дозволяє визначити ймовірність відмови окремих елементів системи і її вплив на загальну надійність. При цьому розрахунки базуються на статистичних даних про тривалість роботи обладнання без відмов і можливі ризики аварій.

Надійність та якість електропостачання має відповідати вимогам нормативних документів. На (рис. 1.1) зображено методи підвищення надійності електропостачання промислових споживачів [3].

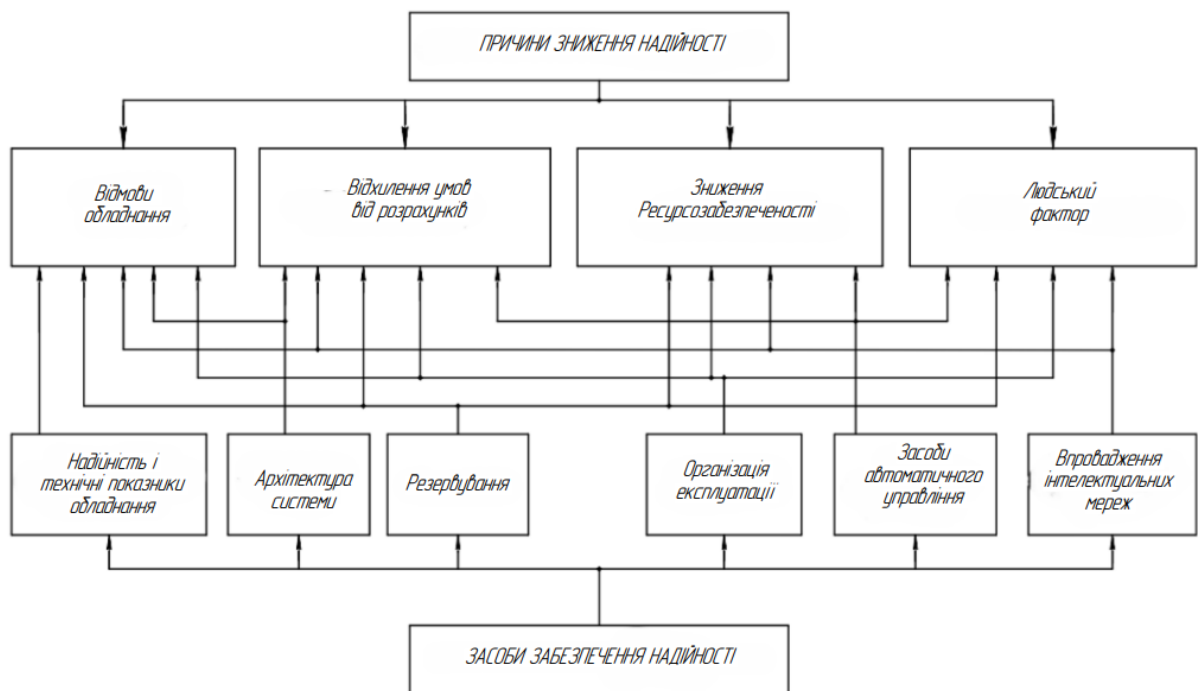


Рис. 1.1. Причини зниження надійності електропостачання та засоби забезпечення надійності [3].

Головними вимогами забезпечення надійності електропостачання

є:

– введення автоматизації в системи;

– створення однієї інформаційної структури, мета якої реалізація вдалого переходу до "розумного" електропостачання працівники розподільних мереж мають розробити стратегію, спрямовану на ефективне вирішення проблем різного характеру, які можуть з'явитись під час переходу.

Природні фактори також мають значний вплив на надійність електропостачання. Екстремальні погодні умови, такі як грози, сильні вітри, обледеніння, або паводки, можуть призводити до пошкодження ліній електропередач і збоїв у подачі енергії. Зменшити вплив цих факторів можна шляхом використання більш стійких матеріалів для будівництва інфраструктури, таких як ізольовані проводи, а також проведення заходів з інженерного захисту об'єктів[22].

Організаційні фактори включають управління та координацію робіт персоналу, що обслуговує енергетичну систему. Неправильне планування робіт або відсутність достатньої координації між різними підрозділами може призвести до затримок у відновленні системи після аварій або навіть до виникнення нових проблем через помилки в управлінні. Важливим фактором є також наявність чітких регламентів і процедур для забезпечення оперативного усунення неполадок та ефективної комунікації між відповідальними особами.

Експлуатаційні фактори включають навантаження на систему та баланс попиту і пропозиції електроенергії. Під час пікових періодів навантаження може перевищувати можливості мережі, що створює ризики для надійності. Важливу роль у цьому відіграють прогнозування попиту та відповідне планування потужностей[23]. Використання резервних джерел енергії, таких як акумуляторні системи або резервні генератори, може допомогти зменшити навантаження на систему під час пікових періодів і забезпечити безперервність електропостачання[2].

Невід'ємною частиною забезпечення надійності є захист системи від аварійних ситуацій. Для цього застосовуються автоматичні системи захисту, що дозволяють швидко відключити пошкоджені ділянки мережі і запобігти поширенню аварії.

1.3 Аналіз підвищення надійності електропостачання

1.3.1 Резервування систем

Одним із найпоширеніших способів підвищення надійності електропостачання є використання резервних джерел живлення. Це можуть бути дизельні генератори, акумуляторні батареї або інші джерела електроенергії, які здатні забезпечити живлення споживачів у разі відмови основного джерела. Резервні джерела зазвичай використовуються для

живлення критично важливих об'єктів і систем, де навіть короточасний перебіг може мати серйозні наслідки[18].

Застосування резервних джерел живлення дозволяє значно підвищити надійність електропостачання, але водночас вимагає додаткових фінансових витрат на закупівлю, установку та обслуговування обладнання. Крім того, необхідно забезпечити своєчасне включення резервного джерела в роботу у разі відмови основного, що вимагає використання автоматичних систем перемикавання[24].

На (рис 1.2) показано схему вводу резерву використовуючи секційний вимикач (СВ). Забезпечення живлення кожної із секцій відбувається від іншого джерела (для прикладу, трансформатори TV1 та TV2) за умовою, що кожен із трансформаторів за пропускну здатністю зважаючи на їх допустиме перевантаження буде відбуватись навантаження кожної із секцій.

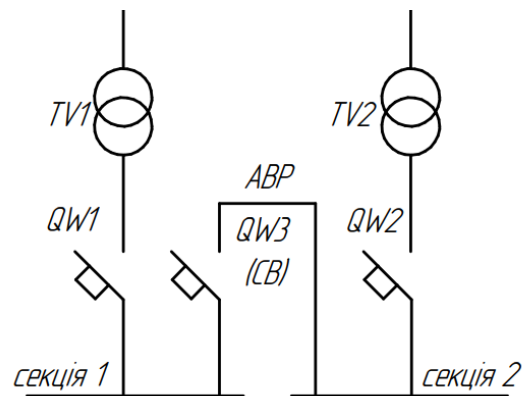


Рис.1.2 Схема вводу резерву з використанням секційного вимикача(СВ)[9]

Наведена схема вводу резерву має назву АВР. На схемі живлення (рис. 1.2) обидва вимикачі QW1 та QW2 обирають за сумарним навантаженням обох секцій, а секційний вимикач (СВ) QW3 обирається тільки за навантаженням однієї секції. В даному випадку для такого метода застосовують електричне блокування, але даний метод не має максимальну надійність. На (рис. 1.3) зображено схему, живлення секційної системи відбувається від двох шин трансформаторів та є окремі вводи кожної секції від кожного трансформатора.

Автоматичні вимикачі вибираються за номінальним струмом навантаження однієї секції.

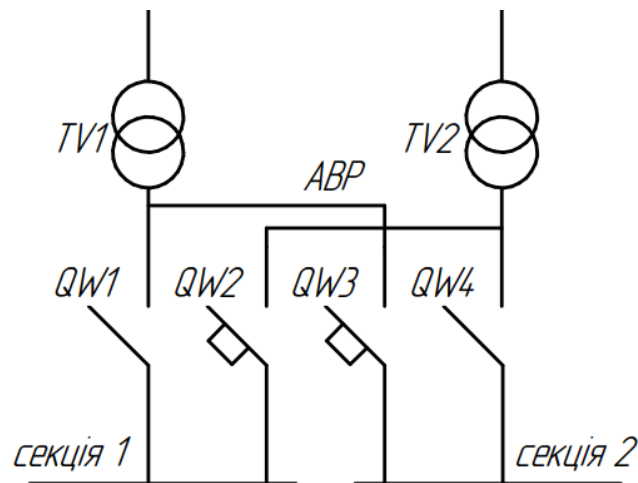


Рис.1.3 Схема вводу резерву з механічним блокуванням[9]

У звичайних випадках достатньо використовувати одну несекціоновану систему шин, а резервування в свою чергу виконувати за схемою, як зображено на (рис. 1.2). На даній схемі показано, дві лінії, робоча та резервна. В даному випадку можливі підвищення втрат електроенергії в порівнянні з схемами, де обидві лінії робочі. Механічне блокування забезпечує умови надійної роботи обох трансформаторів.

Попри використання магнітних контакторів, система має низку недоліків[9]:

- Постійне перебування під напругою котушки контактора;
- вібрація або залипання контактів;
- велика кількість виділеного тепла;
- довготривалий процес комутації.

Проте незважаючи на недоліки, використання схем які наведені на (рис 1.2-1.3) мають простоту в становленні, низьку вартість.

Резервні джерела живлення стають невід'ємною частиною сучасних енергетичних систем, особливо коли потребується безперервне електропостачання.

1.3.2. Секціонування в електричних системах

Секціонування електричних систем - метод розподілу електричних мереж на секції з метою підвищення надійності та гнучкості роботи системи. Воно дозволяє мінімізувати наслідки аварій, локалізуючи пошкодження та зберігаючи електропостачання для більшості споживачів. Цей метод набув широкого застосування в різних країнах світу, і досвід іноземних держав у цій сфері може бути корисним для вдосконалення українських енергетичних мереж[16].

Секціонування електричних мереж полягає у створенні окремих одна від одної секцій в електричній мережі, які можуть працювати незалежно одна від одної. Це дозволяє швидко відключати пошкоджену ділянку мережі, не впливаючи на інші її частини. Важливим елементом секціонування є розподільні пункти, які дозволяють автоматично чи вручну відключати окремі секції мережі. Наприклад реклоузер (рис. 1.4), який встановлюється на повітряній лінії, призначений для захисту лінії, і в випадку пошкоджень - відключення.[4]



Рис 1.4 Реклоузер на повітряній лінії

Схеми в деяких ланках системи електропостачання бувають радіальні та магістральні (рис. 1.5) [8]. Радіальну систему використовують там, де є

масштабні зосереджені навантаження, які розгалужені в різних напрямках від джерела живлення. При швидкозмінних навантаженнях, які викликають вагомні коливання в напрузі, застосування даної системи живлення дає змогу зменшити вплив коливань напруги на роботу інших електроприладів. Ця система електроживлення характеризується високою гнучкістю та зручністю в експлуатації, оскільки пошкодження або ремонт однієї лінії впливає лише на роботу одного споживача[24].

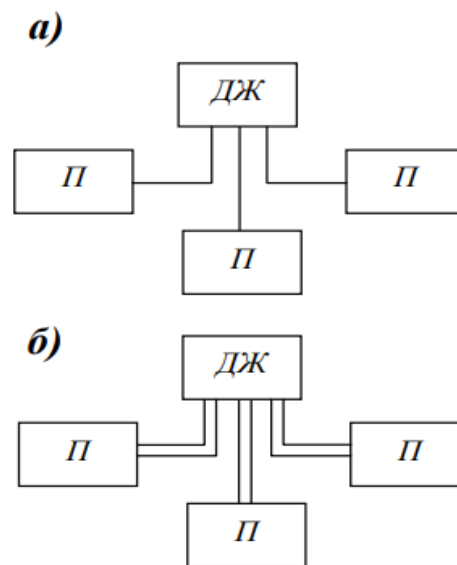


Рис1.5 Радіальна схема: а)одиночна, б) подвійна [8].

Магістральними називаються схеми, де від однієї лінії живляться декілька споживачів, які розташовані вздовж її траси. (рис. 1.6) [8].

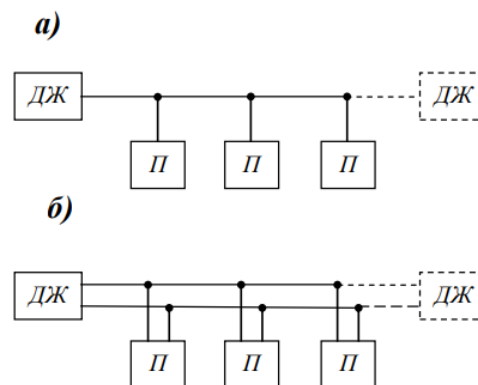


Рис1.6 Магістральна схема: а)одиночна, б) подвійна [8].

Вибір однієї із схем залежить від територіального розташування навантажень, їхніх величин, необхідного рівня надійності електропостачання та інших особливостей підприємства. Системи секціонування дозволяють легко адаптувати мережу до змінних навантажень, що підвищує її ефективність. При виникненні аварії, пошкодження локалізується лише в межах однієї секції, не впливаючи на інші частини системи[25]. Це дозволяє зберегти безперебійне електропостачання для більшої частини споживачів. Але попри інтеграції сучасних систем секціонування в існуючі мережі може бути складною, особливо в старих мережах з обмеженою інфраструктурою. Це вимагає додаткових інвестицій та часу.[8]

Таким чином, секціонування є ефективним способом підвищення надійності та гнучкості системи електропостачання, але вимагає значних початкових інвестицій та може бути складним у реалізації. Вибір на користь секціонування повинен ґрунтуватися на детальному аналізі конкретних умов роботи електричної мережі та очікуваних економічних ефектів.

1.4 Висновки до розділу

1. Проведено аналіз двох методів підвищення надійності електропостачання промислових споживачів, а саме резервування та секціонування.
2. Наведено схеми підключення для даних методів.
3. Проаналізовано основні показники надійності систем електропостачання.
4. Наведено фактори, які впливають на надійність електропостачання.
5. Запропоновано більш детально розглянути резервування систем електропостачання, так як ідеально підходить для існуючої схеми.

2. РОЗРОБКА ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ РЕЗЕРВУВАННЯ

2.1. Визначення і розрахунок поточного об'єкту

Проходячи переддипломну практику на підприємстві ТОВ «Шлях» було запропоновано рішення підвищити надійність електропостачання за допомогою резервного живлення. Питання про надійність електропостачання гостро поставлене на даному підприємстві, так як воно знаходиться в прикордонній області, і із-за регулярних обстрілів об'єктів електропостачання підприємство зазнає великих збитків.

Таблиця 2.1 Перелік обладнання, та його номінальні потужності

№	Найменування	кількість	Потужність, кВт
1	2	3	4
1	Норія	1	1,1
2	Валки	1	11
3	Горизонтальний транспортер	3	1,1
4	Електропечі	4	12
5	Тістоміс	2	11
6	Циклон	2	5,5
Загальна потужність			108,4

Загальну потужність струмоприймачів можна знайти за формулою:

$$P_{\max} = K_0 * \sum P_H \quad (2.1)$$

де K_0 – коефіцієнт одночасності, для промислових підприємств $K_0=0,7-0,85$. Обираємо 0,75;

$\sum P_H$ – сума номінальних потужностей струмоприймачів.

$$P_{\max} = 0,75 * 108,4 = 81,3 \text{ кВт}$$

2.2 Вибір резервного джерела живлення

В якості резервного живлення було прийнято рішення обрати дизельний генератор. Вибір дизельного генератора виконується за наступними умовами:

За номінальною потужністю генератора з урахуванням коефіцієнта одночасності і запасу потужності:

$$P_{\text{ген}} = \frac{P_{\text{загальна}} * K_0}{\eta} \quad (2.2)$$

де $P_{\text{ген}}$ – потрібна потужність генератора, кВт;

$P_{\text{загальна}}$ – загальна потужність струмоприймачів, кВт;

K_0 – коефіцієнт одночасності;

η - коефіцієнт запасу потужності генератора (який лежить в діапазоні $\eta \approx 0.7-0.8$) приймаємо середнє значення – 0,75.

$$P_{\text{ген}} = \frac{81,3 * 0,75}{0,75} 81,3 \text{ кВт}$$

З каталогу [15] обираємо дизельний генератор PROFI-TEC WDSG125-3 Power MAX з номінальною потужністю 100 кВт, загальний вид якого представлено на (рис 2.2). Технічні характеристики наведені в таблиці 2.2.



Рис. 2.2 Вид обраного дизельного генератора

Таблиця 2.2 Технічні характеристики обраного генератора

Характеристика	Найменування
1	2
Виробник	PROFI-TEC
Номінальний струм, А	180 А
Напруга, В	220/380
Частота	50 Гц
Кількість фаз	3
Двигун	WEICHAH WP6D132E200
Швидкість обертів валу	1500 об/хв
Ступінь захисту	IP23
Маса	1950кг
Габарити	2800×1100×1600 мм

2.3 Складання та опис принципової електричної схеми автоматичного включення резерву

На (рис.2.1) наведено схему системи електрозабезпечення з автозапуском генератора. Електрична схема автоматичного введення резерву (АВР) забезпечує безперервність електропостачання шляхом автоматичного

перемикання між основним джерелом живлення і резервним генератором у разі аварійного відключення основного джерела. У нормальних умовах система працює на основній мережі живлення, що подається через головні вводи. Автоматичний вимикач QF1 увімкнений, і через контактор KM1 живлення передається на навантаження. У цьому режимі всі інші компоненти, що відповідають за перемикання на резерв, неактивні, а індикатор HL1 сигналізує про наявність основного живлення.

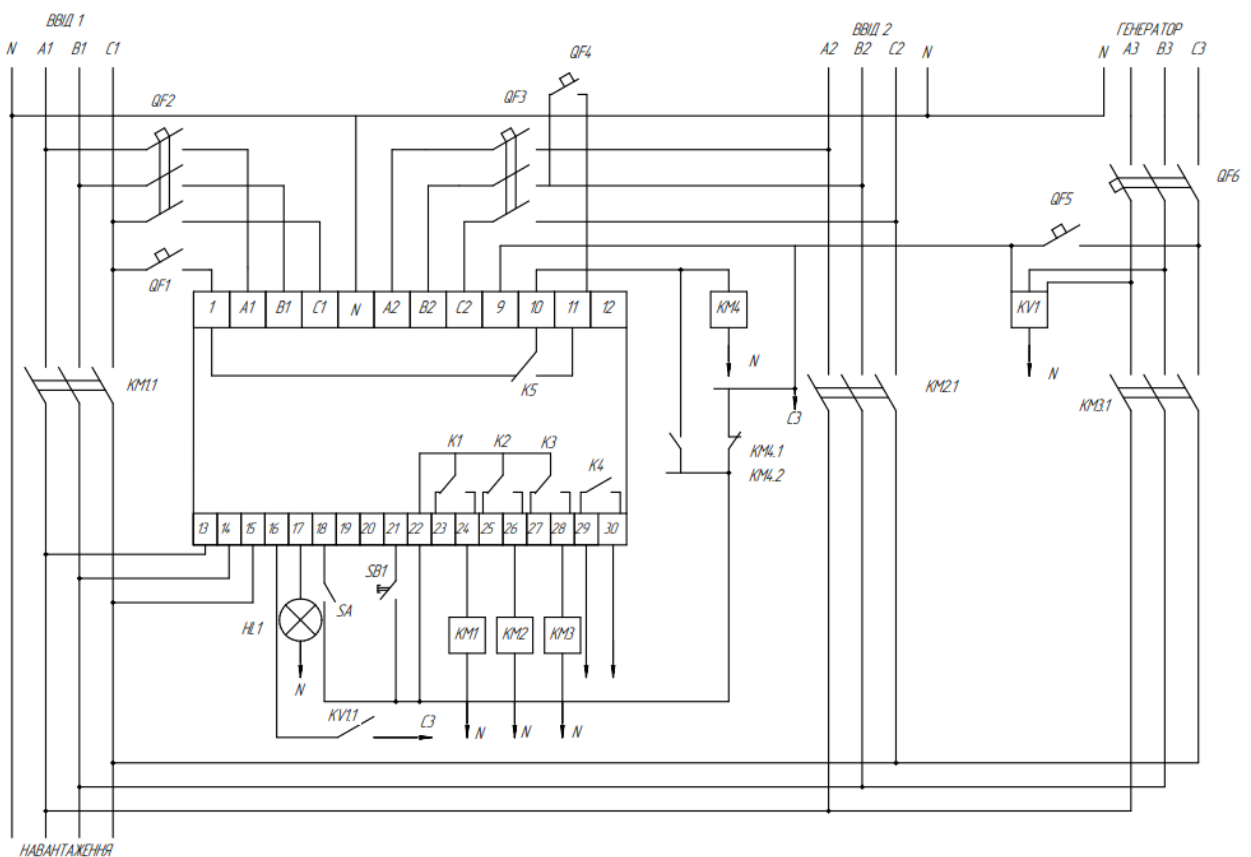


Рис.2.1 Принципова електрична схема системи автономного підключення резерву на основі генератора із самозапуском

У випадку відбувається аварійне відключення основного джерела, реле напруги KV5 фіксує втрату напруги, і автоматичний вимикач QF1 відключається. Після цього реле часу KT2 запускає відлік затримки, щоб уникнути випадкового перемикання через короткочасні збої в мережі. Після

завершення затримки контактор КМ1 розмикається, і живлення навантаження зникає. Тоді активується резервний генератор, що підключений через QF6. Після запуску генератора реле часу КТ3 забезпечує контроль стабільної роботи генератора, після чого автоматичний вимикач QF5 вмикається, і контактор КМ2 замикається, передаючи живлення на навантаження від резервного генератора. Індикація HL1 показує, що система перейшла на живлення від резервного джерела.

Під час роботи від резервного генератора навантаження повністю живиться від нього, а основна мережа залишається відключеною. У цьому стані система працює до моменту відновлення основного живлення. Коли живлення від основної мережі відновлюється, реле KV5 фіксує наявність напруги, а реле часу КТ1 відраховує затримку для перевірки стабільності відновлення мережі. Після завершення затримки автоматичний вимикач QF1 вмикається, а контактор КМ1 замикається, підключаючи навантаження до основної мережі. Паралельно з цим вмикається резервний генератор через QF5, а контактор КМ2 розмикається, відключаючи навантаження від генератора. Після цього генератор переходить у режим очікування, готовий до повторного запуску у разі чергового аварійного відключення основного джерела.

2.4 Вибір обладнання

2.4.1 Розрахунок та вибір АВР

Автоматичне вводу резерву (АВР) потрібне для забезпечення безперебійного живлення споживачів під час зникнення основного джерела живлення.

АВР обираємо за наступними умовами[14]:

- 1) Номінальний струм не повинен перевищувати струму АВР:

$$I_{ном} \leq I_{АВР}$$

- 2) За струмом навантаження:

$$I_{ном} = \frac{P}{\sqrt{3} * U * \cos \varphi}, \quad (2.3)$$

де I – струм, А;

P – потужність навантаження, Вт або кВт;

U – фазна напруга (наприклад, 380 В для трифазної мережі), В;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності, лежить в межах від 0,8 до 1.

$$I_{ном} = \frac{81,3}{\sqrt{3} * 380 * 0,9} = 137 \text{ А}$$

$$I_{ном} \leq I_{ABP} \quad (2.4)$$

$$137 \leq 200 \text{ А}$$

3) За номінальною напругою:

$$U_{ном} \geq U_m \quad (2.5)$$

$$400 \text{ В} \geq 380 \text{ В}$$

4) за кліматичним виконанням – УХЛ;

5) категорія розміщення – 1;

6) ступень захисту – IP30;

7) кількість полюсів – триполюсний;

За цими умовами з каталогу обираємо автомат включення резерву(АВР) АВР 200А NZ7-250S Chint 422159 [5].

Таблиця 2.1 Паспортні дані АВР [5]

Найменування	Позначення
1	2
Виробник	Chint
Клас електроприладу	СВ класс
Частота	50Гц
Номінальна напруга	400В
напруга ізоляції	800В
напруга ізоляції	АС 800В

1	2
Номинальний струм	200А
Кількість полюсів	3Р
Температура навколишнього середовища	-5 +40°C
Ступінь захисту	IP30
Габарити	435x240x160 мм

2.4.2 вибір автоматичних вимикачів

Вибір автоматичного вимикача проводимо за наступними умовами[14]:
за номінальною напругою:

$$U_{ном} \geq U_m \quad (2.6)$$

де $U_{ном}$ - встановлена напруга вимикача, В;

U_m - напруга мережі, В;

кількістю полюсів – триполюсний;

за видом розчеплювача – Комбінований;

по номінальному струму;

$$I_{нав} \geq I_{н.д} \quad (2.7)$$

де $I_{нав}$ - струм вимикача, А;

$I_{н.д}$ - струм кола, А;

по номінальному струму розчеплювача:

$$I_{н.розч} \geq I_{н.д} \quad (2.8)$$

1) по струму відсічки розчеплювача:

$$I_{відс.розч.} \geq (1,5 - 1,6)k_i I_{н.д}. \quad (2.9)$$

Де: $I_{відс.розч.}$ - струм відсічки розчеплювача;

K_3 - кратність пускового струму, приймаємо $k_i=7$.

- 7) за кліматичним виконанням – УХЛ;
- 8) категорія розміщення – 1;
- 9) ступень захисту – IP20.

Виконуємо вибір АВ QF6, який призначений для захисту обладнання при живленні від генератора. Відповідно до умов (2.6-2.9) з каталогу [11] обираємо АВ типу NM1-250S/3300 160А CHINT з такими характеристиками:

Таблиця 2.2 Паспортні дані автоматичного вимикача.

Найменування	Позначення
1	2
Виробник	Chint
Номінальна напруга,В	400В
Номінальна робоча напруга	690В
Номінальний струм,А	160А
Кількість полюсів	3
Серія	NM1
Номінальна напруга ізоляції	800В
Частота	50Гц
Температура монтаж та експлуатація обладнання	-5 +70°C
Ступінь захисту	20

2.4.3. Вибір контакторів

Для того щоб обрати контактор, слід дотримуватись наступних умов[14]:

- 1) за номінальною напругою магнітного пускача:

$$U_{\text{ном.МП}} \geq U_{\text{мер}} \quad (2.10)$$

де $U_{\text{ном.МП}}$ –напруга контактора;

$U_{\text{мер}}$ – напруга мережі; $U_{\text{мер}} = 380 \text{ В}$.

2) за номінальною напругою котушки електромагнітного пускача:

$$U_{\text{НОМ.КОТ}} \geq U_{\text{Ф}} \quad (2.11)$$

Де $U_{\text{НОМ.КОТ}}$ – номінальна напруга контактора;

$$U_{\text{НОМ.КОТ}} = 400\text{В}$$

$U_{\text{Ф}}$ – фазна напруга мережі; $U_{\text{Ф}} = 380\text{В}$.

3) за струмом магнітного пускача:

$$I_{\text{НОМ.МП}} \geq I_{\text{н.ЕД}} \quad (2.12)$$

де $I_{\text{НОМ.МП}}$ – струм контактор;

$I_{\text{н.КОЛА}}$ – струм електричного кола; $I_{\text{н.КОЛА}} = 137\text{А}$;

- 1) за кількістю блок-контактів – 1 нормально розімкнутий;
- 2) за кліматичним виконанням – УХЛ;
- 3) за категорією розміщення – 1;
- 4) за ступенем захисту – IP20;
- 5) за комутаційною стійкістю – А;
- 6) за наявністю кнопок «ПУСК», «СТОП» - кнопки відсутні;
- 7) за наявністю реверсу – реверс відсутній;

Відповідно до умов (2.10-2.12) з каталогу обираємо контактор типу NC2-150 400V 50Hz 150A AC 3NO 671691 CHINT характеристика якого наведена в таблиці (2.3)[6]:

Таблиця 2.3 Паспортні дані обраного контактора.

Найменування	Позначення
Виробник	Chint
Номінальна напруга, В	400В
Номінальний струм, А	150А
Кількість полюсів	3
Ступінь захисту	20
Температура експлуатації	-25 +40°C

2.5 Висновки до розділу

1. За основу взятого підприємства було складено принципову електричну схему з автоматичним введенням резерву, використовуючи дизельний генератор в якості резервного живлення.
2. Розраховано та обрано дизельний генератор PROFI-TEC WDSG125-3 Power MAX з номінальною потужністю 100 кВт.
3. В якості автоматичного вводу резерву за розрахунками було обрано АВР 200А NZ7-250S Chint 422159.
4. Для захисту обладнання було обрано автоматичний вимикач типу NM1-250S/3300 160А CHINT.
5. Для керування обладнанням за розрахунками було обрано контактор типу NC2-150 400V 50Hz 150A AC 3NO 671691 CHINT

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗЕРВУВАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

3.1 Визначення показників надійності елементів

Надійність елементів електричної системи визначається частотою їх відмов: ω , рік⁻¹ – показує, як часто в середньому за рік виходить з ладу конкретний елемент; τ , год. – середній час відновлення, тобто час, необхідний для відновлення працездатності елемента. Елемент може бути виведений з експлуатації не лише через поломку, а й для проведення робіт на ньому або на пов'язаних елементах, наприклад, під час планових ремонтів чи усунення дефектів, які можуть призвести до відмови. Дані відключення називають навмисними, так як вони здійснюються персоналом для обслуговування обладнання. Для кожного елемента також характерна частота навмисних відключень ν , рік⁻¹, яка вказує на кількість таких відключень за рік, і середній час обслуговування η , год, який показує, скільки часу потрібно на його обслуговування[12].

Таблиця 3.1 – Показники надійності елементів існуючої схеми

Найменування елементів схеми	Познач. Елем.	ω , рік ⁻¹	τ , год	ν , рік ⁻¹	η , год	№ елемента
1	2	3	4	5	6	7
Шина 10кВ	Ш10	0,001	5	0,2	6	1,6
Шина 0,4 кВ	Ш0,4	0,002	5	0,2	6	11,13
Повітряна лінія на 3км10 кВ	Л10	0,75	18	0,75	17,4	2,7
Повітряна лінія на 1км 0,4 кВ	Л0,4	0,2	3	0,3	6	4,9

1	2	3	4	5	6	7
Вимикач 0,4 кВ	В0,4	0,015	6	0,25	7	5,10,12
Трансформатор 10/04 кВ	Т10/04	0,035	8	0,3	8	3,8

3.2 Аналіз надійності існуючої системи електропостачання

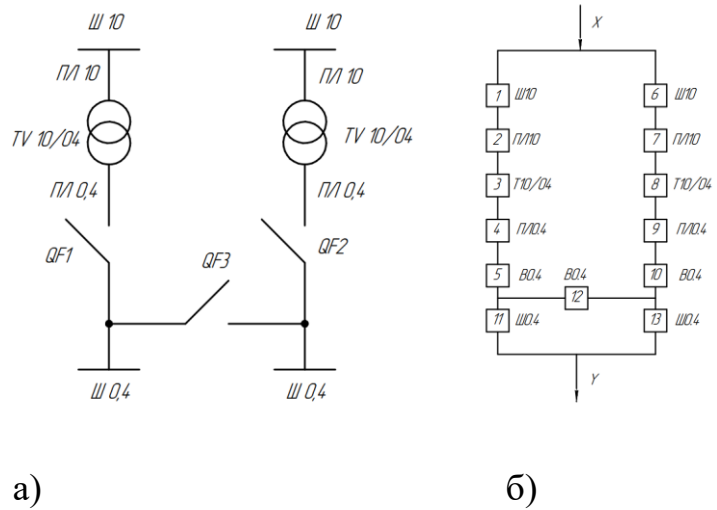


Рис. 3.1 Існуюча схема

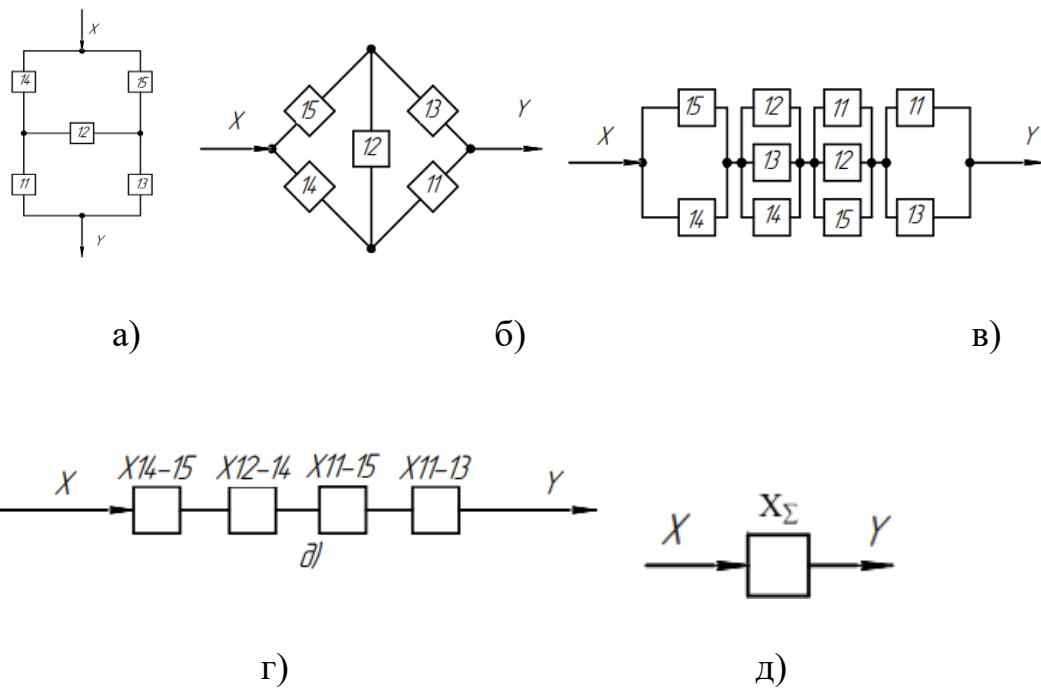


Рис. 3.2 Схема заміщення

Виконуємо еквівалентування існуючої схеми. Дані для розрахунку наведені в таблиці 3.1.

Розраховуємо частоту відмов для послідовно з'єднаних елементів схеми[12]:

$$\omega_i^{(n)} = \sum_1^n \omega_i \quad (3.1)$$

де $\sum_1^n \omega_i$ – сумарна частота відмов для елементів послідовного кола, рік⁻¹.

$$\omega_{14} = \omega_{15} = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 + \omega_5 \quad (3.2)$$

Послідовно з'єднані та рівні між собою елементи такі як 14=Σ(1,2,3,4,5) та 15=Σ(6,7,8,9,10) розраховуємо:

$$\omega_{14} = \omega_{15} = 0,001 + 0,075 + 0,035 + 0,2 + 0,015 = 1 \text{ рік}^{-1}$$

Середній час для відновлення розраховується за формулою:

$$\tau_i^{(n)} = \left(\omega_i^{(n)} \right)^{-1} \cdot \sum_1^n \omega_i \cdot \tau_i \cdot \text{рік}^{-1} \quad (3.3)$$

Для елементів 14 та 15 форма має наступний вигляд:

$$\tau_{14} = \tau_{15} = (\omega_{14})^{-1} \cdot (\omega_1 \cdot \tau_1 + \omega_2 \cdot \tau_2 + \omega_3 \cdot \tau_3 + \omega_4 \cdot \tau_4 + \omega_5 \cdot \tau_5) \quad (3.4)$$

$$\tau_{14} = \tau_{15} = (1)^{-1} \cdot (0,001 \cdot 5 + 0,75 \cdot 18 + 0,035 \cdot 8 + 0,2 \cdot 3 + 0,015 \cdot 6) = 14,420 \text{ год}$$

показник навмисних відключень розраховуємо за формулою:

$$v_c^{(n)} = v_{\bar{b}} + \sum_{i=1; i \neq \bar{b}}^n v_i \left(1 - g_{i\bar{b}} \right) \quad (3.5)$$

де $v_{\bar{b}}$ – частота навмисних відключень прийнятого базового елемента, рік⁻¹;

ν_i – частота навмисних відключень даного елемента, рік⁻¹;

$g_{i\bar{b}}$ – коефіцієнт збігу, в.о.

За базовий елемент прийнято Ш 0,4 кВ. Тоді $g=0,8$.

Для елементів 14 та 15:

$$\nu_{14} = \nu_{15} = \nu_1 + \nu_2(1-g) + \nu_3(1-g) + \nu_4(1-g) + \nu_5(1-g) \quad (3.6)$$

$$\nu_{14} = \nu_{15} = 0,2 + 0,75(1-0,8) + 0,3(1-0,8) + 0,3(1-0,8) + 0,25(1-0,8) = 0,52 \text{ рік}^{-1}$$

Розраховуємо середній необхідний для обслуговування $\eta_i^{(n)}$

$$\eta_i^{(n)} = \left(\nu_i^{(n)} \right)^{-1} \cdot \left[\nu_{\bar{b}} \cdot \eta_{\bar{b}} + \nu_{max} \cdot (\eta_{max} - \eta_{\bar{b}}) + \sum_{i=1; i \neq \bar{b}}^n \nu_i \cdot (1-g_i) \cdot \eta_i \right] \quad (3.7)$$

де $\eta_{\bar{b}}$ - час, який необхідний для обслуговування обраного елемента на схемі, год;

η_i - час, необхідний для обслуговування даного елемента, год;

ν_{max}, η_{max} - показник навмисних відключень та середній час обслуговування елемента схеми.

Для елементів 14 та 15:

$$\eta_{14} = \eta_{15} = (\nu)^{-1} \cdot [\nu_{\bar{b}} \cdot \eta_{max} + \nu_{\bar{b}} (\eta_{max} - \eta_{\bar{b}}) + \nu_2(1-g) \cdot \eta + \nu_3(1-g) \eta_3 + \nu_4(1-g) \cdot \eta_4 + \nu_5(1-g) \eta_5] \quad (3.8)$$

$$\eta_{14} = \eta_{15} = (0,52)^{-1} [0,2 \cdot 6 + 0,75(17,4 - 6) + 0,75(1-0,8) \cdot 17,4 + 0,3(1-0,8) \cdot 8 + 0,3(1-0,8) \cdot 6 + 0,25(1-0,8) \cdot 7] = 25,4 \text{ год}$$

Отримана схема (рис. 3.2, а) не піддається звичайному еквівалентуванню через те, що елементи з'єднані так, що наступне їх спрощення неможливе. За допомогою методу "мінімальних перерізів" можливо виявити всі можливі

перерізи та розрахувати їх надійність, можна визначити надійність всієї системи [12]

Складаємо таблицю безпосередніх зв'язків вершин між ребрами (див. рис.3.2,б).

Таблиця 3.2 – Матриця безпосередніх зв'язків вершин між ребрами

Вершини	Ребра
X	14, 15
A	15, 12, 13
B	14, 12, 11
Y	11, 13

Визначаємо з якими ребрами пов'язана кожна вершина графу. Вибираємо мінімальні перерізи. Вибір проводимо в табличній формі.

Таблиця 3.3 –Таблиця мінімальних перерізів

N	Знайдені ребра	Обрані Перерізи	Мінімальні перерізи	Кінцеві перерізи
X	14,15	14,15	14,15	14,15
XA	14,15,15,12,13	14,12,13	12,13,14	12,13,14
XB	14,15,14,12,11	15,12,11	11,12,15	11,12,15
XAB	14,15,15,12,13,14,12,11	13,11	11,13	11,13

Виявивши мінімальні перерізи створюємо схему заміщення (рис. 3.2,в).

Вихідні дані для о евівалентування схеми зведені в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Показники для розрахунку схеми (рис. 3.2, в)

Елемент	ω , рік ⁻¹	τ , год.	V , рік ⁻¹	η , год.
14,15	0,81	22	0,6	16
12	0,005	3	0,3	5
11,13	0,002	5	0,2	6

Визначаємо частоту відмов елементів, які з'єднанні паралельно $X_{14,15}$ (рис.3.2,г) по схемі рис.3.2, в.

$$\omega_{X_{14-15}}^0 = \omega_{14} \cdot \omega_{15} (\tau_{14} + \tau_{15}) \cdot 8760^{-1} \quad (3.9)$$

$$\omega_{X_{14-15}}^0 = 1 \cdot 1 (14,4 + 14,4) \cdot 8760^{-2} = 0,003 \text{ рік}^{-1}$$

$$\omega_{X_{14-15}}' = \omega_{X_{14-15}}'' = \nu_{14} \cdot \eta_{14} \cdot \omega_{15} \cdot 8760^{-1} \quad (3.10)$$

$$\omega_{X_{14-15}}' = \omega_{X_{14-15}}'' = 0,52 \cdot 25,4 \cdot 1 \cdot 8760^{-1} = 0,001 \text{ рік}^{-1}$$

$$\omega_{X_{14-15}} = \omega_{X_{14-15}}^0 + \omega_{X_{14-15}}' + \omega_{X_{14-15}}'' \quad (3.11)$$

$$\omega_{X_{14-15}} = 0,003 + 0,001 + 0,001 = 0,005 \text{ рік}^{-1}$$

Розрахуємо середній час відновлення для схеми з паралельним з'єднанням елементів. У даному випадку для системи з m з'єднаних елементів середній час відновлення визначається за відповідною формулою.

$$\tau^{(m)} = \left(\omega^{(m)} \right)^{-1} \left(\omega^0 \cdot \tau^0 + \sum_{r=1}^m \omega_r \tau_r \right) \quad (3.12)$$

Якщо в системі є два паралельно з'єднаних елемента, їх середній час відновлення розраховується за формулою:

$$\tau_{ij} = \frac{\omega_{ij}^0 \cdot \tau_{ij}^0 + \omega_{ij}' \cdot \tau_{ij}' + \omega_{ij}'' \cdot \tau_{ij}''}{\omega_{ij}} \quad (3.13)$$

$$\tau_{ij}^0 = \frac{\tau_i \cdot \tau_j}{\tau_i + \tau_j} \quad (3.14)$$

$$\tau'_{ij} = \frac{\tau \cdot \eta_j}{\tau_i + \eta_j} \quad (3.15)$$

$$\tau''_{ij} = \frac{\tau_j \cdot \eta_i}{\tau_j + \eta_i} \quad (3.16)$$

Тоді для елемента $X_{31,32}$:

$$\tau_{X_{14-15}}^0 = \frac{\tau_{14} \cdot \tau_{15}}{\tau_{14} + \tau_{15}} \quad (3.17)$$

$$\tau_{X_{14-15}}^0 = \frac{14,4 \cdot 14,4}{14,4 + 14,4} = 7,2 \text{ год}$$

$$\tau'_{X_{14-15}} = \frac{\tau_{14} \cdot \eta_{15}}{\tau_{14} + \eta_{15}} \quad (3.18)$$

$$\tau'_{X_{14-15}} = \frac{14,4 \cdot 25,4}{14,4 + 25,4} = 9,1 \text{ год}$$

$$\tau''_{X_{14-15}} = \frac{\tau_{15} \cdot \eta_{14}}{\tau_{15} + \eta_{14}} \quad (3.19)$$

$$\tau''_{X_{14-15}} = \frac{14,4 \cdot 25,4}{14,4 + 25,4} = 9,1 \text{ год}$$

$$\tau_{X_{14,15}} = \frac{\omega_{X_{14,15}}^0 \cdot \tau_{X_{14,15}}^0 + \omega'_{X_{14,15}} \cdot \tau'_{X_{14,15}} + \omega''_{X_{14,15}} \cdot \tau''_{X_{14,15}}}{\omega_{X_{14,15}}} \quad (3.20)$$

$$\tau_{X_{14,15}} = \frac{0,003 \cdot 7,2 + 0,001 \cdot 9,1 + 0,001 \cdot 9,1}{0,005} = 7,96 \text{ год}$$

Частота навмисних відключень та час необхідний для обслуговування при паралельному підключенні елементів дорівнюють нулю, оскільки навмисно відключити можна лише один елемент одночасно[12]. Тому

$$v_{X_{14-15}} = 0 \text{ рік}^{-1}; \quad \eta_{X_{14-15}} = 0 \text{ год}$$

Розрахунок заміщуючої схеми для трьох паралельно підключених елементів. В випадку, якщо система містить три елементи, з'єднані паралельно,

частота відмов складається з чотирьох компонентів: відмови кожного окремого елемента та їх спільних комбінацій, які впливають на загальну надійність системи[12].

$$\omega_x = \omega_x^0 + \omega'_x + \omega''_x + \omega'''_x$$

Кожен з показників розраховується [6]:

$$\omega_x^0 = \omega_i \tau_i \cdot \omega_j \tau_j \cdot \omega_k \tau_k \left(\frac{1}{\tau_i} + \frac{1}{\tau_j} + \frac{1}{\tau_k} \right) \cdot 8760^{-2} \quad (3.21)$$

де $\omega_i, \omega_j, \omega_k$ - частота відмов для елементів.

τ_i, τ_j, τ_k - середній час відновлення кожного із елементів.

$$\omega'_x = v_i \eta_i \cdot \omega_j \tau_j \cdot \omega_k \tau_k \left(\frac{1}{\tau_j} + \frac{1}{\tau_k} \right) \cdot 8760^{-2} \quad (3.22)$$

де $v_i \eta_i$ - частота навмисних відключень та середній час обслуговування елемента.

$$\omega''_x = v_j \eta_j \cdot \omega_i \tau_i \cdot \omega_k \tau_k \left(\frac{1}{\tau_i} + \frac{1}{\tau_k} \right) \cdot 8760^{-2} \quad (3.23)$$

де $v_j \eta_j$ - частота навмисних відключень та середній час обслуговування елемента.

$$\omega'''_x = v_k \eta_k \cdot \omega_i \tau_i \cdot \omega_j \tau_j \left(\frac{1}{\tau_i} + \frac{1}{\tau_j} \right) \cdot 8760^{-2} \quad (3.24)$$

де $v_k \eta_k$ - частота навмисних відключень та середній час обслуговування елемента.

Розрахуємо частоту відмов для елементів $X_{12-14} = \prod_1^n(12,13,14)$ та $X_{11-15} = \prod_1^n(11,12,15)$:

$$\omega_{X_{12-14}}^0 = \omega_{12} \cdot \tau_{12} \cdot \omega_{13} \cdot \tau_{13} \cdot \omega_{14} \cdot \tau_{14} \left(\frac{1}{\tau_{12}} + \frac{1}{\tau_{13}} + \frac{1}{\tau_{14}} \right) 8760^{-2} \quad (3.25)$$

$$\omega_{X_{12-14}}^0 = 0,015 \cdot 6 \cdot 0,002 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 14,4 \left(\frac{1}{6} \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{14,4} \right) 8760^{-2} = 7,3 \cdot 10^{-11} \text{ рік}^{-1}$$

$$\omega'_{X_{12-14}} = v_{12} \cdot \eta_{12} \cdot \omega_{13} \cdot \tau_{13} \cdot \omega_{14} \cdot \tau_{14} \left(\frac{1}{\tau_{13}} + \frac{1}{\tau_{14}} \right) \cdot 8760^{-2} \quad (3.26)$$

$$\omega'_{X_{12-14}} = 0,2 \cdot 7 \cdot 0,002 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 14,4 \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{14,4} \right) \cdot 8760^{-2} = 7,07 \cdot 10^{-10} \text{ рік}^{-1}$$

$$\omega''_{X_{12-14}} = v_{13} \cdot \eta_{13} \cdot \omega_{12} \tau_{12} \cdot \omega_{14} \tau_{14} \left(\frac{1}{\tau_{12}} + \frac{1}{\tau_{14}} \right) \cdot 8760^{-2} \quad (3.27)$$

$$\omega''_{X_{12-14}} = 0,2 \cdot 6 \cdot 0,0015 \cdot 6 \cdot 1 \cdot 14,4 \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{14,4} \right) \cdot 8760^{-2} = 5,4 \cdot 10^{-9} \cdot \text{рік}^{-1}$$

$$\omega'''_{X_{12-14}} = v_{14} \cdot \eta_{14} \cdot \omega_{12} \cdot \tau_{12} \cdot \omega_{13} \cdot \tau_{13} \left(\frac{1}{\tau_{12}} + \frac{1}{\tau_{14}} \right) \cdot 8760^{-2} \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned} \omega'''_{X_{12-14}} &= 0,52 \cdot 25,4 \cdot 0,015 \cdot 6 \cdot 0,002 \cdot 5 \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{14,4} \right) \cdot 8760^{-2} \\ &= 3,6 \cdot 10^{-12} \text{ рік}^{-1} \end{aligned}$$

$$\omega_{X_{12-14}} = \omega_{X_{12-14}}^0 + \omega'_{X_{12-14}} + \omega''_{X_{12-14}} + \omega'''_{X_{12-14}} \quad (3.29)$$

$$\omega_{X_{12-14}} = 7,3 \cdot 10^{-11} + 7,07 \cdot 10^{-10} + 5,4 \cdot 10^{-9} + 3,6 \cdot 10^{-12} = 6,1 \cdot 10^{-9} \text{ рік}^{-1}$$

Розрахуємо час відновлення для X_{12-14} та X_{11-15}

$$\tau_{X_{12-14}}^0 = \left(\frac{1}{\tau_{12}} + \frac{1}{\tau_{13}} + \frac{1}{\tau_{14}} \right)^{-1} \quad (3.30)$$

$$\tau_{X_{12-14}}^0 = \left(\frac{1}{26} + \frac{1}{5} + \frac{1}{14,4} \right)^{-1} = 2,2 \text{ год}$$

$$\tau_{X_{12-14}}^I = \left(\frac{1}{\eta_{12}} + \frac{1}{\tau_{13}} + \frac{1}{\tau_{14}} \right)^{-1} \quad (3.31)$$

$$\tau_{X_{12-14}}^I = \left(\frac{1}{7} + \frac{1}{5} + \frac{1}{14,4} \right)^{-1} = 2,48 \text{ год}$$

$$\tau_{X_{12-14}}^{II} = \left(\frac{1}{\eta_{13}} + \frac{1}{\tau_{12}} + \frac{1}{\tau_{14}} \right)^{-1} \quad (3.32)$$

$$\tau_{X12-14}^{II} = \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{6} + \frac{1}{14,4}\right)^{-1} = 2,48 \text{ год}$$

$$\tau_{X12-14}^{III} = \left(\frac{1}{\eta_{14}} + \frac{1}{\tau_{12}} + \frac{1}{\tau_{13}}\right)^{-1} \quad (3.33)$$

$$\tau_{X12-14}^{III} = \left(\frac{1}{25,4} + \frac{1}{6} + \frac{1}{5}\right)^{-1} = 2,46 \text{ год}$$

Визначаємо час відновлення для трьох паралельно з'єднаних елементів:

$$\tau_{X12-14} = \frac{\omega_{X12-14}^0 \cdot \tau_{X12-14}^0 + \omega'_{X12-14} \cdot \tau'_{X12-14} + \omega''_{X12-14} \cdot \tau''_{X12-14} + \omega'''_{X12-14} \cdot \tau'''_{X12-14}}{\omega_{X12-14}} \quad (3.34)$$

$$\tau_{X12-14} = \frac{7,3 \cdot 10^{-11} \cdot 2,2 + 7,07 \cdot 10^{-10} \cdot 2,48 + 5,4 \cdot 10^{-9} \cdot 2,48 + 3,6 \cdot 10^{-12} \cdot 2,46}{6,1 \cdot 10^{-9}} = 2,5 \text{ год}$$

Для елементів X12-14 та X11-15 показники частоти навмисних відключень та частоти обслуговування беруться показникам, які дорівнюють самого елементу[12]:

$$v_{X12-14} = v_{X11-15} = 0,25 \text{ рік}^{-1};$$

$$\eta_{X12-15} = \eta_{X11-15} = 7 \text{ год}$$

Частота відмов при паралельному з'єднанні для елементу X₁₁₋₁₅ (рис.3.2,в) по схемі (рис.3.2,б). Визначається за формулою:

$$\omega_{X11-13}^0 = \omega_{11} \cdot \omega_{13} (\tau_{11} + \tau_{13}) \cdot 8760^{-1} \quad (3.35)$$

$$\omega_{X11-13}^0 = 0,002 \cdot 0,002 (5 + 5) \cdot 8760^{-1} = 4,5 \cdot 10^{-9} \text{ рік}^{-1}$$

$$\omega'_{X11-13} = \omega''_{X11-13} = v_{11} \cdot \eta_{13} \cdot \omega_{13} \cdot 8760^{-1} \quad (3.36)$$

$$\omega'_{X11-13} = \omega''_{X11-13} = 0,2 \cdot 6 \cdot 0,002 \cdot 8760^{-1} = 2,7 \cdot 10^{-7}$$

$$\omega_{X11-13} = \omega_{X11-13}^0 + \omega'_{X11-13} + \omega''_{X11-13} \quad (3.37)$$

$$\omega_{X11-13} = 4,5 \cdot 10^{-9} + 2,7 \cdot 10^{-10} + 2,7 \cdot 10^{-10} = 5,4 \cdot 10^{-9}$$

Розраховуємо середній час відновлення $X_{34,35}$:

$$\tau_{X_{11-13}}^0 = \frac{\tau_{11} \cdot \tau_{13}}{\tau_{11} + \tau_{13}} \quad (3.38)$$

$$\tau_{X_{11-13}}^0 = \frac{5 \cdot 5}{5 + 5} = 2,5 \text{ год}$$

$$\tau'_{X_{11-13}} = \frac{\tau_{11} \cdot \eta_{13}}{\tau_{11} + \eta_{13}} \quad (3.39)$$

$$\tau'_{X_{11-13}} = \frac{5 \cdot 6}{5 + 6} = 2,7 \text{ год}$$

$$\tau''_{X_{11-13}} = \frac{\tau_{13} \cdot \eta_{11}}{\tau_{13} + \eta_{11}} \quad (3.40)$$

$$\tau''_{X_{11-13}} = \frac{5 \cdot 6}{5 + 6} = 2,7 \text{ год}$$

$$\tau_{X_{11-13}} = \frac{\omega_{X_{11-13}}^0 \cdot \tau_{X_{11-13}}^0 + \omega'_{X_{11-13}} \cdot \tau'_{X_{11-13}} + \omega''_{X_{11-13}} \cdot \tau''_{X_{11-13}}}{\omega_{X_{11-13}}} \quad (3.41)$$

$$\tau_{X_{11-13}} = \frac{4,5 \cdot 10^{-9} \cdot 2,5 + 2,7 \cdot 10^{-7} \cdot 2,7 + 2,7 \cdot 10^{-7} \cdot 2,7}{5,4 \cdot 10^{-7}} = 2,87 \text{ год}$$

Показники Частоти навмисних відключень та середнього часу обслуговування при паралельному з'єднанні елементів дорівнюють нулю, оскільки навмисно відключити можна лише один елемент одночасно [12]. Тому:

$$\nu_{X_{14-15}} = 0 \text{ рік}^{-1}; \quad \eta_{X_{14-15}} = 0 \text{ год}$$

Отримані дані всіх розрахованих елементів зводимо в таблицю 3.5

Таблиця 3.5 – Показники надійності елементів.

Елементи схеми	Показники			
	$\omega, \text{рік}^{-1}$	$\tau, \text{ГОД}$	$\nu, \text{рік}^{-1}$	$\eta, \text{ГОД}$
X_{14-15}	0,005	7,96	0	0

X_{12-14}	$6,1 \cdot 10^{-9}$	2,5	0,25	7
X_{11-15}	$6,1 \cdot 10^{-9}$	2,5	0,25	7
X_{11-13}	$5,4 \cdot 10^{-7}$	2,87	0	0
X_{Σ}	0,05	7,9	0,5	7

Визначаємо частоту відмов $x_{\Sigma i}$:

$$\omega_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \omega_i \quad (3.43)$$

$$\omega_{\Sigma} = (0,005 + 6,1 \cdot 10^{-9} + 6,1 \cdot 10^{-9} + 5,4 \cdot 10^{-7}) = 0,5 \text{ рік}^{-1}$$

Визначаємо час відновлення:

$$\tau_{\Sigma} = \omega_{\Sigma}^{-1} \left(\sum_{i=1}^7 \omega_i \cdot \tau_i \right) \quad (3.44)$$

$$\tau_{\Sigma} = \frac{1}{0,005}^{-1} (0,005 \cdot 7,96 + 6,1 \cdot 10^{-9} \cdot 2,5 + 6,1 \cdot 10^{-9} \cdot 2,5 + 5,4 \cdot 10^{-7} \cdot 2,87) = 7,9 \text{ год}$$

Частота навмисних відключень:

$$\nu_{\Sigma} = \sum_{i=1}^7 \nu_i \quad (3.45)$$

$$\nu_{\Sigma} = 0 + 0,25 + 0,25 + 0 = 0,5 \text{ рік}^{-1}$$

Визначаємо весь час який необхідний на обслуговування:

$$\eta_{\Sigma} = \left(\nu_{\Sigma} \right)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^7 \nu_i \cdot \eta_i \quad (3.46)$$

$$\eta_{\Sigma} = (0,5)^{-1} \cdot (0 \cdot 0 + 0,25 \cdot 7 + 0,25 \cdot 7 + 0 + 0) = 7 \text{ год}$$

Час безвідмовної роботи знаходиться за формулою:

$$T_c = \omega_{\Sigma}^{-1} \quad (3.47)$$

Для існуючої схеми:

$$T_c = (0,05)^{-1} = 20 \text{ років}$$

Імовірність відмови системи протягом одного року

$$F_c(1) = 1 - e^{-\omega_{\Sigma} \cdot t} \quad (3.48)$$

Для існуючої схеми:

$$F_c(1) = 1 - e^{-0,05 \cdot 1} = 0,04$$

3.3 Аналіз надійності запропонованої системи електропостачання

Так як в пункті 3.2 було вже розраховано елементи $\Sigma 14 = 1,2,3,4,5$ та $\Sigma 15 = 6,7,8,9,10$. Відомо, що елемент запропонованої схеми $\Sigma 19 = \Sigma 14$, відповідно елемент $\Sigma 20 = \Sigma 15$.

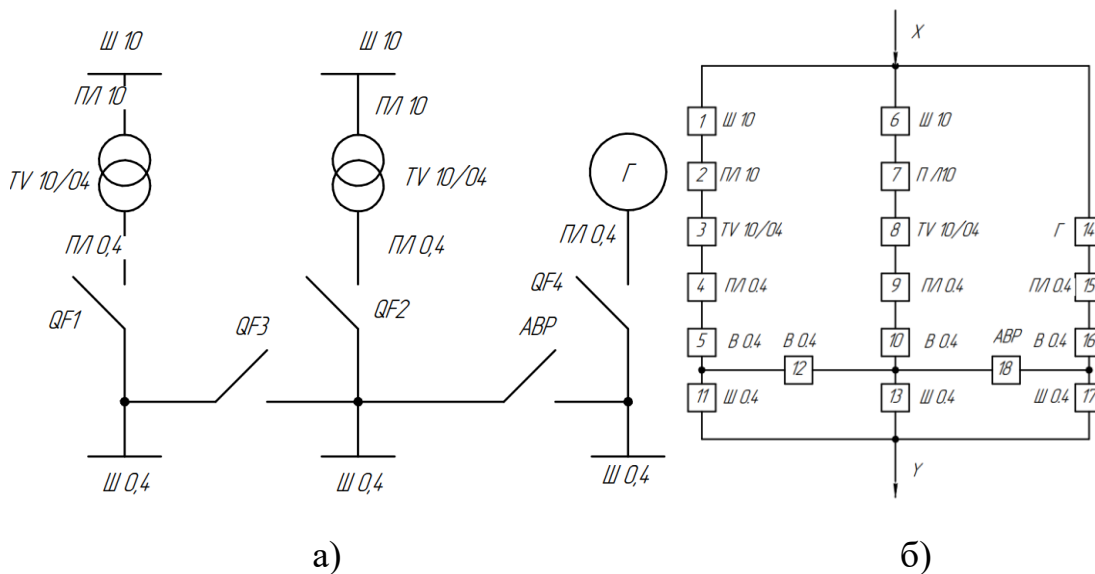


Рис. 3.3 Запропонована схема

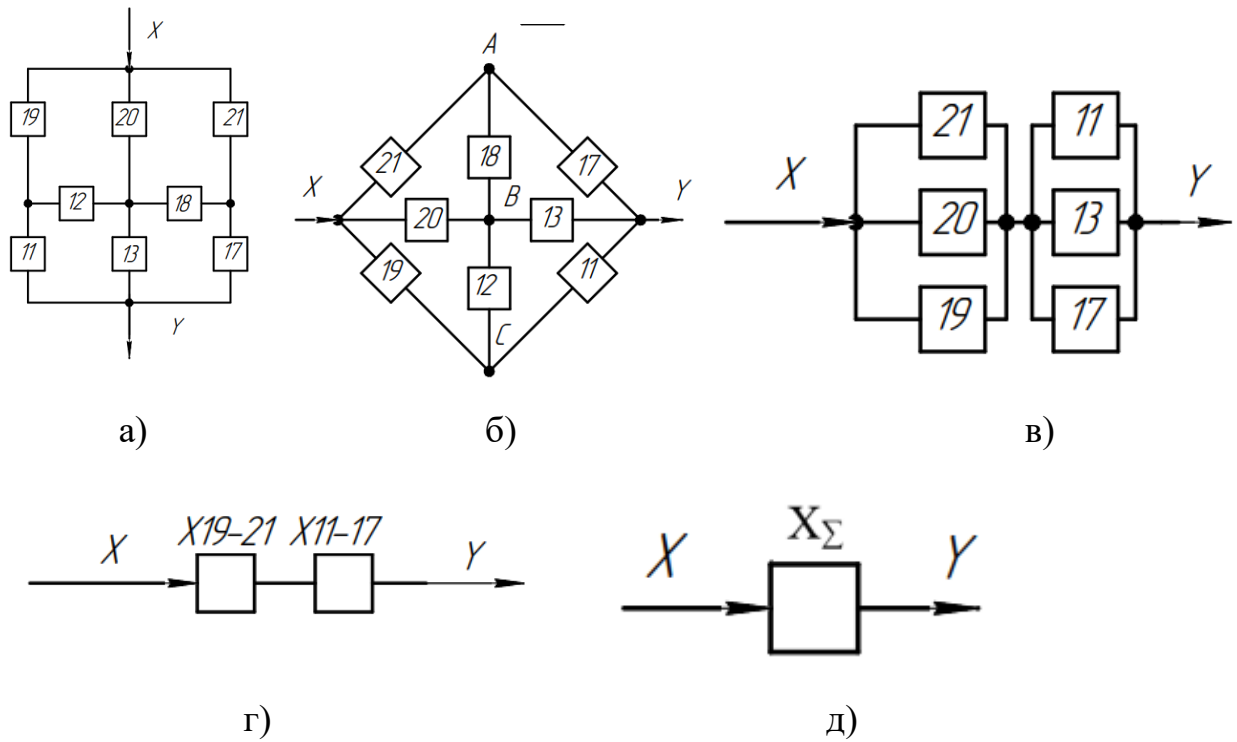


Рис.3.4 Схема заміщення

Необхідні дані для виконання еквівалентування запропонованої схеми наведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Показники надійності елементів існуючої схеми

Найменування елементів схеми	Познач. Елем.	ω , рік ⁻¹	τ , год	ν , рік ⁻¹	η , год	№ елементу
1	2	3	4	5	6	7
Шина 10кВ	Ш10	0,001	5	0,2	6	1,6
Шина 0,4 кВ	Ш0,4	0,002	5	0,2	6	11,13,17
Повітряна лінія на 3км10 кВ	Л10	0,75	18	0,75	17,4	2,7
Повітряна лінія на 1км 0,4 кВ	Л0,4	0,2	3	0,3	6	4,9,15

Вимикач 0,4 кВ	В0,4	0,015	6	0,25	7	5,12,16
Трансформатор 10/04 кВ	Т10/04	0,035	8	0,3	8	3,8
Генератор	Г	0,015	4	0,02	5	14
АВР	АВР	0,005	2	0,2	5	18

Розраховуємо частоту відмов для послідовно з'єднаних елементів схеми $\Sigma 21$:

$$\omega_i^{(n)} = \sum \omega_i \quad (3.49)$$

$$\omega_{21} = \omega_{14} + \omega_{15} + \omega_{16} \quad (3.50)$$

$$\omega_{21} = 0,015 + 0,2 + 0,016 = 0,23 \text{ рік}^{-1}$$

Середній час для відновлення розраховуємо за формулою:

$$\tau_{21} = (\omega_{21})^{-1} \cdot (\omega_{14} \cdot \tau_{14} + \omega_{15} \cdot \tau_{15} + \omega_{16} \cdot \tau_{16}) \quad (3.51)$$

$$\tau_{21} = (0,23)^{-1} \cdot (0,015 \cdot 4 + 0,2 \cdot 3 + 0,016 \cdot 6) = 3,2 \text{ год}$$

Показник навмисних відключень розраховуємо за формулою:

$$v_c^{(n)} = v_{\bar{\sigma}} + \sum_{i=1; i \neq \bar{\sigma}}^n v_i \cdot (1 - g_{i\bar{\sigma}}) \quad (3.52)$$

За базовий елемент прийнято ПЛ 0,4 кВ. Тоді $g=0,8$.

$$v_{21} = v_{15} + v_{14}(1 - g_{14}) + v_{16}(1 - g_{16}) \quad (3.53)$$

$$v_{21} = 0,3 + 0,002(1 - 0,8) + 0,025(1 - 0,8) = 0,35 \text{ рік}^{-1}$$

Розраховуємо середній необхідний для обслуговування $\eta_i^{(n)}$:

$$\eta_i^{(n)} = \left(v_i^{(n)} \right)^{-1} \cdot \left[v_{\bar{\sigma}} \cdot \eta_{\bar{\sigma}} + v_{max} \cdot (\eta_{max} - \eta_{\bar{\sigma}}) + \sum_{i=1; i \neq \bar{\sigma}}^n v_i \cdot (1 - g_i) \cdot \eta_i \right] \quad (3.54)$$

Для елемента 21:

$$\eta_{21} = (v_{21})^{-1} \cdot [v_{15} \cdot \eta_{15} + v_{16}(\eta_{14} - \eta_{15}) + v_{14}(1 - g_{14}) \cdot \eta_{14} (1 - g_{16}) \cdot \eta_{16}] \quad (3.55)$$

$$\eta_{21} = (0,35)^{-1} \cdot [0,3 \cdot 6 + 0,3(7 - 6) + 0,02(1 - 0,8) \cdot 5(1 - 0,8) \cdot 7] = 11,9 \text{ год}$$

Отримана схема (рис. 3.4, а) не піддається звичайному еквівалентуванню через те, що елементи з'єднані так, що наступне їх спрощення неможливе. За допомогою методу "мінімальних перерізів" можливо виявити всі можливі перерізи та розрахувати їх надійність, можна визначити надійність всієї системи [12]

Складаємо таблицю безпосередніх зв'язків вершин та їх ребер (див. рис.3.4,б).

Таблиця 3.7 – Матриця безпосередніх зв'язків вершин та їх ребер

Вершини	Ребра
X	19, 20, 21
A	21, 18, 17
B	20, 12, 13, 18
C	19, 12, 11
Y	11, 13, 17

Визначивши зв'язки, знаходимо мінімальні перерізи та зводимо до таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 –Таблиця мінімальних перерізів

N	Знайдені ребра	Обрані Перерізи	Мінімальні перерізи	Кінцеві перерізи
X	19, 20, 21	19, 20, 21	19, 20, 21	19, 20, 21
XA	19, 20, 21, 19, 12, 11	20,21,12,11	11,12,20,21	-
XB	19, 20, 21, 20, 12, 13, 18	19,21,12,13,18	12,13,18,19,21	-
XC	19, 20, 21, 21, 18, 17	19,20,18,17	17,18,19,20	-
XAB	19, 20, 21, 19, 12, 11, 20, 12, 13, 18	21,11,13,18	11,13,18,21	-
XAC	19, 20, 21, 19, 12, 11, 21, 18, 17	19, 18, 17	17, 18, 19	-
XBC	19, 20, 21, 20, 12, 13, 18, 21, 18, 17	19,21,12,18,13	12,13,18,19	-
XABC	19, 20, 21, 19, 12, 11, 20, 12, 13, 18, 21, 18, 17	11, 13, 17	11, 13, 17	11, 13, 17

Виявивши мінімальні перерізи створюємо схему заміщення (рисунок 3.4, в).

Вихідні дані для подальших розрахунків зведені в таблицю 3.9.

Таблиця 3.9 - Показники для розрахунку схеми (рис. 0.0, в)

Елемент	ω , рік ⁻¹	τ , год.	V , рік ⁻¹	η , год.
19,20	0,74	13	0,47	10,8
21	0,22	47	$1,8 \cdot 10^{-1}$	11,9
18	0,005	2	0,2	5
11,13,17	0,002	5	0,2	6

Визначаємо частоту відмови елемента $X_{19-21}(19,20,21)$ (рис.3.4,г) по схемі рис.3.4, в.

$$\omega^{(m)} = \left(\omega^0 + \sum_{i=1}^m \omega_i \right) \cdot 8760^{1-m} \quad (3.56)$$

$$\omega_{X19-21}^0 = \omega_{19} \cdot \tau_{19} \cdot \omega_{20} \cdot \tau_{20} \cdot \omega_{21} \cdot \tau_{21} \left(\frac{1}{\tau_{19}} \cdot \frac{1}{\tau_{20}} \cdot \frac{1}{\tau_{21}} \right) 8760^{-2} \quad (3.57)$$

$$\omega_{X19-21}^0 = 1 \cdot 14,4 \cdot 1 \cdot 14,4 \cdot 0,23 \cdot 3,2 \left(\frac{1}{14,4} \cdot \frac{1}{14,4} \cdot \frac{1}{3,2} \right) 8760^{-2} = 8,9 \cdot 10^{-7} \text{ рік}^{-1}$$

$$\omega'_{X19-21} = v_{19} \eta_{19} \cdot \omega_{20} \tau_{20} \cdot \omega_{21} \tau_{21} \left(\frac{1}{\tau_{20}} + \frac{1}{\tau_{21}} \right) \cdot 8760^{-2} \quad (3.58)$$

$$\begin{aligned} \omega'_{X19-21} &= 0,52 \cdot 25,4 \cdot 1 \cdot 14,4 \cdot 0,23 \cdot 3,2 \left(\frac{1}{14,4} + \frac{1}{3,2} \right) \cdot 8760^{-2} \\ &= 6,9 \cdot 10^{-7} \text{ рік}^{-1} \end{aligned}$$

$$\omega''_{X19-21} = v_{20} \eta_{20} \cdot \omega_{19} \tau_{19} \cdot \omega_{21} \tau_{21} \left(\frac{1}{\tau_{19}} + \frac{1}{\tau_{21}} \right) \cdot 8760^{-2} \quad (3.59)$$

$$\begin{aligned} \omega''_{X19-21} &= 0,52 \cdot 25,4 \cdot 1 \cdot 14,4 \cdot 0,23 \cdot 3,2 \left(\frac{1}{14,4} + \frac{1}{3,2} \right) \cdot 8760^{-2} \\ &= 6,9 \cdot 10^{-7} \text{ рік}^{-1} \end{aligned}$$

$$\omega'''_{X19-21} = v_{21} \eta_{21} \cdot \omega_{19} \tau_{19} \cdot \omega_{20} \tau_{20} \left(\frac{1}{\tau_{19}} + \frac{1}{\tau_{20}} \right) \cdot 8760^{-2} \quad (3.60)$$

$$\omega'''_{X19-21} = 0,32 \cdot 6,1 \cdot 1 \cdot 14,4 \cdot 1 \cdot 14,4 \left(\frac{1}{14,4} + \frac{1}{14,4} \right) \cdot 8760^{-2} = 7,3 \cdot 10^{-7} \text{ рік}^{-1}$$

$$\omega_{X19-21} = \omega_{X19-21}^0 + \omega'_{X19-21} + \omega''_{X19-21} + \omega'''_{X19-21} \quad (3.61)$$

$$\omega_{X19-21} = 8,9 \cdot 10^{-7} + 6,9 \cdot 10^{-7} + 6,9 \cdot 10^{-7} + 7,3 \cdot 10^{-7} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ рік}^{-1}$$

Розрахуємо середній час відновлення для X_{19-21} :

$$\tau_{X19-21}^0 = \left(\frac{1}{\tau_{19}} + \frac{1}{\tau_{20}} + \frac{1}{\tau_{21}} \right)^{-1} \quad (3.62)$$

$$\tau_{X19-21}^0 = \left(\frac{1}{14,4} + \frac{1}{14,4} + \frac{1}{3,2} \right)^{-1} = 2,2 \text{ год}$$

$$\tau_{X19-21}^I = \left(\frac{1}{\eta_{19}} + \frac{1}{\tau_{20}} + \frac{1}{\tau_{21}} \right)^{-1} \quad (3.63)$$

$$\tau_{X19-21}^I = \left(\frac{1}{25,4} + \frac{1}{14,4} + \frac{1}{3,2} \right)^{-1} = 2,3 \text{ год}$$

$$\tau_{X19-21}^{II} = \left(\frac{1}{\eta_{20}} + \frac{1}{\tau_{19}} + \frac{1}{\tau_{21}} \right)^{-1} \quad (3.64)$$

$$\tau_{X_{19-21}}^{II} = \left(\frac{1}{25,4} + \frac{1}{14,4} + \frac{1}{3,2} \right)^{-1} = 2,3 \text{ год}$$

$$\tau_{X_{19-21}}^{III} = \left(\frac{1}{\eta_{21}} + \frac{1}{\tau_{19}} + \frac{1}{\tau_{20}} \right)^{-1} \quad (3.65)$$

$$\tau_{X_{19-21}}^{III} = \left(\frac{1}{6,1} + \frac{1}{14,4} + \frac{1}{14,4} \right)^{-1} = 3,3 \text{ год}$$

Визначаємо середній час відновлення для трьох паралельно з'єднаних елементів:

$$\tau_{X_{19-21}} = \frac{\omega_{X_{19-21}}^0 \cdot \tau_{X_{19-21}}^0 + \omega'_{X_{19-21}} \cdot \tau'_{X_{19-21}} + \omega''_{X_{19-21}} \cdot \tau''_{X_{19-21}} + \omega'''_{X_{19-21}} \cdot \tau'''_{X_{19-21}}}{\omega_{X_{19-21}}} \quad (3.66)$$

$$\tau_{X_{19-21}} = \frac{8,9 \cdot 10^{-7} \cdot 2,2 + 6,9 \cdot 10^{-7} \cdot 2,3 + 6,9 \cdot 10^{-7} \cdot 2,3 + 7,3 \cdot 10^{-7} \cdot 3,3}{3 \cdot 10^{-6}} = 2,5 \text{ год}$$

Для елемента X_{19-21} показники частоти навмисних відключень та частоти обслуговування беруться показникам, які дорівнюють самого елемента

$$\nu_{X_{19-21}} = \nu_{21} = 0,52$$

$$\eta_{X_{19-21}} = \eta_{21} = 25,4$$

Визначаємо частоту відмови елемента $X_{11-17}(11,13,17)$ (рис.3.4,г) по схемі рис.3.4, в.

$$\omega^{(m)} = \left(\omega^0 + \sum_{i=1}^m \omega_i \right) \cdot 8760^{1-m} \quad (3.67)$$

$$\omega_{X_{11-17}}^0 = \omega_{11} \cdot \tau_{11} \cdot \omega_{13} \cdot \tau_{13} \cdot \omega_{17} \cdot \tau_{17} \left(\frac{1}{\tau_{11}} \cdot \frac{1}{\tau_{13}} \cdot \frac{1}{\tau_{17}} \right) 8760^{-2} \quad (3.68)$$

$$\omega_{X_{11-17}}^0 = 0,002 \cdot 5 \cdot 0,002 \cdot 5 \cdot 0,002 \cdot 5 \left(\frac{1}{5} \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{5} \right) 8760^{-2} = 7,8 \cdot 10^{-15} \text{ рік}^{-1}$$

$$\omega'_{X_{11-17}} = \nu_{11} \eta_{11} \cdot \omega_{13} \tau_{13} \cdot \omega_{17} \tau_{17} \left(\frac{1}{\tau_{13}} + \frac{1}{\tau_{17}} \right) \cdot 8760^{-2} \quad (3.69)$$

$$\omega'_{X_{11-17}} = 0,2 \cdot 6 \cdot 0,002 \cdot 5 \cdot 0,002 \cdot 5 \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{5} \right) \cdot 8760^{-2} = 6,2 \cdot 10^{-13} \text{ рік}^{-1}$$

$$\omega''_{X_{11-17}} = \nu_{13} \eta_{13} \cdot \omega_{11} \tau_{11} \cdot \omega_{17} \tau_{17} \left(\frac{1}{\tau_{11}} + \frac{1}{\tau_{17}} \right) \cdot 8760^{-2} \quad (3.70)$$

$$\omega''_{X_{11-17}} = 0,2 \cdot 6 \cdot 0,002 \cdot 5 \cdot 0,002 \cdot 5 \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{5} \right) \cdot 8760^{-2} = 6,2 \cdot 10^{-13} \text{ рік}^{-1}$$

$$\omega_{X_{11-17}}''' = v_{17} \eta_{17} \cdot \omega_{11} \tau_{11} \cdot \omega_{13} \tau_{13} \left(\frac{1}{\tau_{11}} + \frac{1}{\tau_{13}} \right) \cdot 8760^{-2} \quad (3.71)$$

$$\omega_{X_{11-17}}''' = 0,2 \cdot 6 \cdot 0,002 \cdot 5 \cdot 0,002 \cdot 5 \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{5} \right) \cdot 8760^{-2} = 6,2 \cdot 10^{-13} \text{ рік}^{-1}$$

$$\omega_{X_{11-17}} = \omega_{X_{11-17}}^0 + \omega'_{X_{11-17}} + \omega''_{X_{11-17}} + \omega'''_{X_{11-17}} \quad (3.72)$$

$$\omega_{X_{11-17}} = 7,8 \cdot 10^{-15} + 6,2 \cdot 10^{-13} + 6,2 \cdot 10^{-13} + 6,2 \cdot 10^{-13} = 1,8 \cdot 10^{-12} \text{ рік}^{-1}$$

Розрахуємо середній час відновлення для X_{11-17} :

$$\tau_{X_{11-17}}^0 = \left(\frac{1}{\tau_{11}} + \frac{1}{\tau_{13}} + \frac{1}{\tau_{17}} \right)^{-1} \quad (3.73)$$

$$\tau_{X_{11-17}}^0 = \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{5} + \frac{1}{5} \right)^{-1} = 1,6 \text{ год}$$

$$\tau_{X_{11-17}}^I = \left(\frac{1}{\eta_{11}} + \frac{1}{\tau_{13}} + \frac{1}{\tau_{17}} \right)^{-1} \quad (3.74)$$

$$\tau_{X_{11-17}}^I = \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{5} + \frac{1}{5} \right)^{-1} = 1,7 \text{ год}$$

$$\tau_{X_{11-17}}^{II} = \left(\frac{1}{\eta_{20}} + \frac{1}{\tau_{19}} + \frac{1}{\tau_{21}} \right)^{-1} \quad (3.75)$$

$$\tau_{X_{11-17}}^{II} = \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{5} + \frac{1}{5} \right)^{-1} = 1,7 \text{ год}$$

$$\tau_{X_{11-17}}^{III} = \left(\frac{1}{\eta_{21}} + \frac{1}{\tau_{19}} + \frac{1}{\tau_{20}} \right)^{-1} \quad (3.76)$$

$$\tau_{X_{11-17}}^{III} = \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{5} + \frac{1}{5} \right)^{-1} = 1,7 \text{ год}$$

Визначаємо середній час відновлення для трьох паралельно з'єднаних елементів:

$$\tau_{X_{11-17}} = \frac{\omega_{X_{11-17}}^0 \cdot \tau_{X_{11-17}}^0 + \omega'_{X_{11-17}} \cdot \tau'_{X_{11-17}} + \omega''_{X_{11-17}} \cdot \tau''_{X_{11-17}} + \omega'''_{X_{11-17}} \cdot \tau'''_{X_{11-17}}}{\omega_{X_{11-17}}} \quad (3.77)$$

$$\tau_{X_{11-17}} = \frac{7,8 \cdot 10^{-15} \cdot 1,6 + 6,2 \cdot 10^{-13} \cdot 1,7 + 6,2 \cdot 10^{-13} \cdot 1,7 + 6,2 \cdot 10^{-13} \cdot 1,7}{1,8 \cdot 10^{-12}} = 1,72 \text{ год}$$

Для елемента X_{19-21} показники частоти навмисних відключень та частоти обслуговування беруться показникам, які дорівнюють самого елемента

$$\nu_{X_{11-17}} = \nu_{17} = 0,2$$

$$\eta_{X_{11-17}} = \eta_{17} = 6$$

Отримані дані всіх розрахованих елементів зводимо в таблицю 3.10

Таблиця 3.10 – Показників надійності елементів.

Елементи схеми	Показники			
	ω , рік ⁻¹	τ , ГОД	ν , рік ⁻¹	η , ГОД
X ₁₉₋₂₁	$3 \cdot 10^{-6}$	2,5	0,52	25,4
X ₁₁₋₁₇	$1,8 \cdot 10^{-12}$	1,72	0,2	6
X _{Σ}	$3 \cdot 10^{-6}$	2,25	0,72	10,3

Визначаємо частоту відмов $\sum^x i$:

$$\omega_{\Sigma} = \sum \omega \quad (3.78)$$

$$\omega_{\Sigma} = (3 \cdot 10^{-6} + 1,8 \cdot 10^{-12} + 6,1 \cdot 10^{-9}) = 3 \cdot 10^{-6} \text{ рік}^{-1}$$

Визначаємо час відновлення:

$$\tau_{\Sigma} = \omega_{\Sigma}^{-1} \left(\sum_{i=1}^7 \omega_i \cdot \tau_i \right) \quad (3.79)$$

$$\tau_{\Sigma} = 3 \cdot 10^{-6} (3 \cdot 10^{-6} \cdot 2,5 + 1,8 \cdot 10^{-12} \cdot 1,7) = 2,25$$

Частота навмисних відключень:

$$\nu_{\Sigma} = \sum_{i=1}^7 \nu_i \quad (3.80)$$

$$\nu_{\Sigma} = 0 + 0,52 + 0,2 + 0 = 0,72 \text{ рік}^{-1}$$

Визначаємо весь час який необхідний на обслуговування:

$$\eta_{\Sigma} = \left(\nu_{\Sigma} \right)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^7 \nu_i \cdot \eta_i \quad (3.81)$$

$$\eta_{\Sigma} = (0,72)^{-1} \cdot (0,52 \cdot 25,4 + 0,2 \cdot 6) = 10,3 \text{ год}$$

Час безвідмовної роботи знаходиться за формулою:

$$T_c = \omega_{\Sigma}^{-1} \quad (3.82)$$

Для запропонованої схеми:

$$T_c = (3 \cdot 10^{-6})^{-1} = 33 \text{ років}$$

Імовірність відмови системи протягом одного року

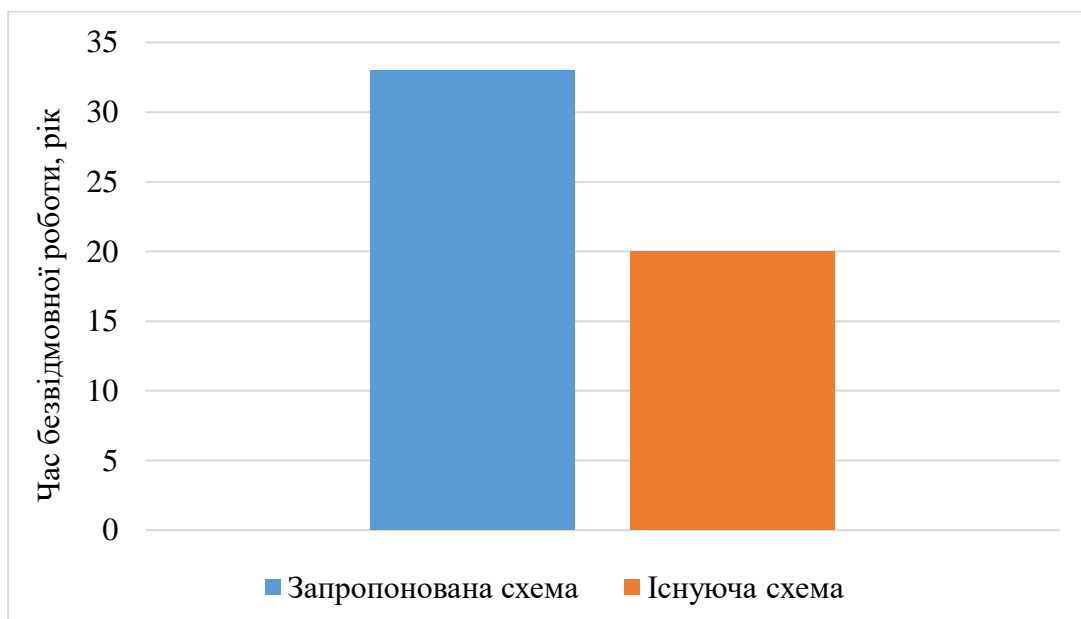
$$F_c(1) = 1 - e^{-\omega_{\Sigma} \cdot t} \quad (3.83)$$

Для запропонованої схеми:

$$F_c(1) = 1 - e^{-0,03 \cdot 1} = 0,029$$

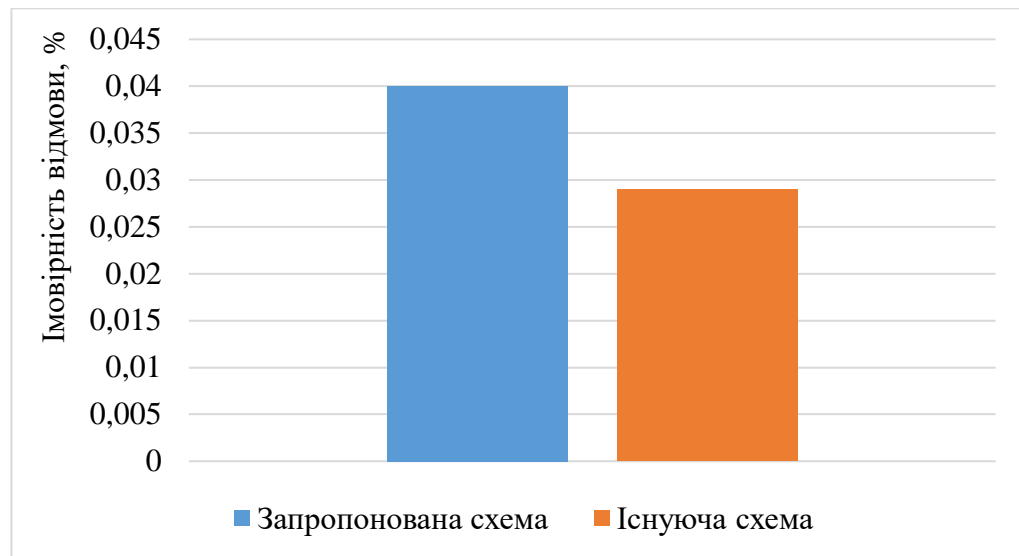
3.4 Порівняння отриманих показників надійності

Для порівняння показників отриманої та запропонованої схеми, гарним вибором буде гістограма, оскільки вона дозволить наочно побачити різницю в часі безвідмовної роботи та імовірності відмови між існуючою та запропонованою схемами.



Гістограма 3.1 Порівняння безвідмовної роботи схем

По гістограмі (3.1) видно значно більший час безвідмовної роботи 33 роки проти 20 років, що свідчить про її більшу стійкість до відмов.



Гістограма 3.2 Порівняння імовірності відмови систем

Імовірність відмови запропонованої схеми показано на гістограмі (3.2) 0,029 є меншою, що означає меншу вірогідність виникнення збоїв протягом одного року в порівнянні з існуючою схемою 0,04. Це робить запропоновану схему кращою альтернативою в довгостроковій перспективі.

3.5 висновок до розділу

1. Проведено розрахунки показників існуючої схеми електропостачання, час безвідмовної роботи складає 20 років, а імовірність відмови – 0,04.

2. Проведено розрахунки показників запропонованої схеми електропостачання, час безвідмовної роботи складає 33 роки, а імовірність відмови – 0,029.

3. Виконано порівняння обох схем у вигляді гістограм, які підтвердили, що запропонована схема покращить надійність системи електропостачання.

4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

4.1 Розрахунок недовідпуску електроенергії

Для того, щоб оцінити які збитки отримує підприємство маючи поточний метод електропостачання, необхідно розрахувати втрати електроенергії, а потім підрахувати збитки від недовідпуску електроенергії.

Для розрахунку Недовідпуску електроенергії при відключеннях використовуємо наступні формули[12]:

$$W_{ав} = S_n \cdot \cos \varphi \cdot \left(\frac{T_{\max}}{S_{зод}}\right) \cdot \omega \cdot \tau \quad (4.1)$$

$$W_{np} = S_n \cdot \cos \varphi \cdot \left(\frac{T_{\max}}{S_{зод}}\right) \cdot \nu \cdot \eta \quad (4.2)$$

$$W_{ав} = 400 \cdot 0,92 \cdot \left(\frac{5320}{8760}\right) \cdot 0,05 \cdot 7,9 = 911 \text{ кВтгод} / \text{рік}$$

$$W_{np} = 400 \cdot 0,92 \cdot \left(\frac{5320}{8760}\right) \cdot 0,5 \cdot 7 = 782,2 \text{ кВтгод} / \text{рік}$$

4.2 Збитки від недовідпуску

Збитки при відмовах розраховуємо за формулою[12]:

$$Y_{ав} = y_{ав} \cdot W_{ав} \quad (4.3)$$

де $y_{ав}$ – збитки підприємства від недовідпуску електроенергії при відмові, 195 грн/кВт год

$$Y_{ав} = 195 \cdot 911 = 177645 \text{ грн}$$

Збитки при відмовах розраховуємо за формулою:

$$Y_{np} = y_{np} \cdot W_{np} \quad (4.4)$$

де y_{np} – збитки підприємства від недовідпуску електроенергії при навмисних відключеннях, 0,6 грн/кВт год

$$Y = 0,6 \cdot 782,2 = 469,2 \text{ грн}$$

Всі розраховані показники зводимо до таблиці 4.1

Таблиця 4.1 Результати розрахованої схеми

Показники	Значення
Збитки від відмов, грн	177645
Збитки від навмисних відключень, грн	469,2
Частота відмов, рік ⁻¹	0,05
Час відновлення, год	7,9
навмисні відключень, рік ⁻¹	0,5
час обслуговування, год	7
Імовірність відмови системи F_c	0,04
Збитки від відмов запропонованої схеми, грн	0
Збитки від навмисних відключень запропонованої схеми, грн	0
Частота відмов запропонованої схеми, рік ⁻¹	$3 \cdot 10^{-6}$
Час відновлення запропонованої схеми, год	2,5
навмисні відключень запропонованої схеми, рік ⁻¹	0,72
час обслуговування запропонованої схеми, год	10,3
Імовірність відмови системи запропонованої схеми F_c	0,029

З метою мінімізації збитків від відмов, запропонована схема з автоматичним введенням резерву у вигляді дизельного генератора є доцільною. В умовах частих віялових та аварійних відключень дана резервна система стане правильним рішенням, так як забезпечить мінімальні простої на підприємстві, зменшивши втрати. Впровадження генератора підвищить стійкість та надійність системи електропостачання.

4.3 Висновок до розділу

1. Розраховано втрати електроенергії підприємством через відключення та відмови системи. Втрати в електропостачанні складають 911кВт.

2. Проведено розрахунки збитків, яких зазнає підприємство, дана сума становить 177645грн.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Організація заходів безпеки під час експлуатації дизельного генератора

Під час роботи з резервним живленням у вигляді дизельного генератора слід дотримуватись правил техніки безпеки, оскільки є шанс отримати удар електричним струмом, отримати механічні ушкодження та пожежа.

Передусім важливо забезпечити правильне розміщення генератора. Його слід встановлювати в приміщенні з гарною вентиляцією території для запобігання накопиченню вихлопних газів. Вимоги щодо цього можна знайти в Правилах улаштування електроустановок (ПУЕ), де йдеться про безпечні відстані між обладнанням і можливі шляхи евакуації у разі небезпеки.

Не менш важливою умовою є заземлення генератора. Згідно з ПУЕ, усі металеві частини обладнання, які можуть опинитися під напругою у випадку пошкодження ізоляції, повинні бути заземлені. Це запобігає виникненню електричного удару та знижує ризик пошкодження інших пристроїв.

Ще одним важливою вимогою є регулярне обслуговування і перевірка стану дизельного генератора. В ПУЕ зазначено необхідність періодичного контролю ізоляції, справності електричних з'єднань, а також механічних компонентів. Своєчасна заміна мастил і фільтрів, а також перевірка паливної системи допоможуть уникнути аварій через несправності обладнання.

Оператор дизельного генератора повинен мати відповідну кваліфікацію та пройти інструктаж з охорони праці. Це необхідно для того, щоб він розумів ризики, пов'язані з роботою генератора, та міг оперативно реагувати на аварійні ситуації.

Крім того, важливо мати в розпорядженні засоби пожежогасіння. Дизельне паливо та мастила є пожежонебезпечними матеріалами, тому на території, де працює генератор, мають бути розміщені вогнегасники або інші засоби для швидкої ліквідації вогню.

5.2 Небезпечні фактори при роботі з дизельним генератором

Робота з дизельними генераторами пов'язана з рядом шкідливих і небезпечних факторів, які можуть впливати на безпеку працівників та загальний робочий процес. Одним із основних факторів є ризик ураження електричним струмом, що виникає через високі напруги, з якими працює обладнання. Контакт з частинами генератора під напругою може призвести до серйозних травм або навіть летальних випадків. Для зменшення цього ризику важливо забезпечити правильне заземлення генератора, яке відповідає вимогам Правил улаштування електроустановок. Крім того, слід регулярно перевіряти ізоляцію кабелів та електричних з'єднань, аби уникнути пошкоджень, які можуть призвести до витoku електроенергії[17].

Ще одним небезпечним фактором є вплив вихлопних газів, які утворюються під час роботи дизельного генератора. Викиди в повітря оксидів вуглецю, азоту та сірки можуть мати негативний вплив на здоров'я працівників, якщо не дотримуватися належної вентиляції. Вихлопні гази здатні викликати задуху, отруєння і тривалі проблеми з дихальними шляхами. Тому генератори необхідно розташовувати в добре провітрюваних приміщеннях або на відкритих майданчиках, щоб уникнути накопичення шкідливих речовин. Крім того, важливо забезпечити регулярну перевірку технічного стану генератора, зокрема вихлопної системи, аби мінімізувати шкідливі викиди.

Механічні пошкодження також становлять небезпеку під час експлуатації дизельного генератора. Рухомі частини обладнання, як-от ремені, вентилятори та інші елементи, можуть спричинити травми у разі недотримання заходів безпеки. Для мінімізації цього ризику слід використовувати захисні кожухи і огороження, які перешкоджають безпосередньому контакту з рухомими деталями. Оператор повинен бути навченим безпечній роботі з таким обладнанням і дотримуватися заходів обережності під час технічного обслуговування або ремонту генератора.

Окрему увагу необхідно приділити пожежній безпеці. Дизельне паливо, яке використовується для роботи генератора, є легкозаймистим і може

призвести до виникнення пожежі в разі витоку або неправильного зберігання. Поруч із генератором завжди мають бути наявні засоби пожежогасіння, такі як вогнегасники або інші системи для ліквідації займання. Також необхідно забезпечити належне зберігання палива у спеціально відведених і захищених місцях.

Крім того, варто звернути увагу на шум, який супроводжує роботу дизельних генераторів. Високий рівень шуму може негативно впливати на слух працівників, а також викликати стресові стани і зниження продуктивності праці. Для зниження цього впливу рекомендується використовувати захисні навушники, а також забезпечити встановлення генераторів на відстані від робочих зон.

5.3 Індивідуальні заходи безпеки для працюючого персоналу

Індивідуальні заходи безпеки під час роботи з дизельними генераторами є ключовими для захисту працівників від різних небезпек. Оскільки робота з таким обладнанням пов'язана з низкою потенційних ризиків, працівники повинні дотримуватися вимог і використовувати засоби індивідуального захисту, щоб мінімізувати ці загрози.

Працівники повинні бути забезпечені спеціальним захисним одягом, який ізолює їх від можливих механічних та електричних ушкоджень. Для захисту від ураження електричним струмом особливо важливо використовувати діелектричні рукавички, взуття та килимки. Ці засоби запобігають прямому контакту з електричними частинами генератора та знижують ризик ураження струмом[13].

Використання захисних окулярів, під час технічного обслуговування генератора допоможе захистити очі від можливих осколків, пилу або інших часток, які можуть потрапити в очі працюючи з механічними частинами або паливною системою.

В наслідок роботи генератора виникає велика кількість шкідливих шумів, тому необхідно використовувати навушники або беруші для зменшення впливу

на слух. Тривале перебування в зоні гучних звуків може призвести до погіршення слуху, тому важливо забезпечити належний захист органів слуху.

Для захисту від шкідливих газів, які виходять з вихлопних газів, рекомендується використовувати респіратори або маски. Робота з генераторами, особливо в закритих приміщеннях з недостатньою вентиляцією, може викликати вдихання токсичних речовин, що негативно впливають на органи дихання. Тому використання захисних респіраторів є необхідним для уникнення отруєння газами[13].

Також варто зазначити важливість правильного поводження з дизельним паливом. Під час його заправки працівники повинні використовувати рукавички, щоб уникнути контакту шкіри з паливом, яке може мати шкідливий вплив. Крім того, необхідно стежити за тим, щоб паливо не потрапляло на одяг чи відкриті ділянки тіла, оскільки це може спричинити подразнення шкіри[13].

Регулярне проходження інструктажів і навчання з охорони праці також є важливою частиною індивідуальних заходів безпеки. Працівники повинні бути добре обізнані про потенційні ризики, знати, як діяти в аварійних ситуаціях, і володіти навичками першої допомоги. Ці знання допоможуть мінімізувати наслідки у разі небезпеки та забезпечити оперативну реакцію на позаштатні ситуації.

5.4 Висновок до розділу

В даному розділі було детально розглянуто безпеку під час роботи з дизельними генераторами, з наведенням небезпечних факторів які впливають на здоров'я працівників.

1. Запропоновано рекомендації щодо умов праці при роботі з дизельним генератором.
2. Запропоновано індивідуальні засоби безпеки, такі як респіратори, шумоподавляючі навушники, діелектричні рукавички, взуття та килимки.

ВИСНОВКИ

1. У Кваліфікаційній роботі було проведено аналіз методів підвищення надійності електропостачання для промислових споживачів. Основна мета полягала у забезпеченні стабільного та надійного електропостачання шляхом застосування резервування системи, що було реалізовано через впровадження резервного джерела живлення у вигляді дизельного генератора.

2. Розраховано та обрано обладнання марки Chint. Для живлення системи обрано дизельний генератор PROFI-TEC WDSG125-3 Power MAX з номінальною потужністю 100 кВт. Для автоматичного вводу резерву за розрахунками було обрано АВР 200А NZ7-250S Chint 422159. Для захисту обладнання було обрано автоматичний вимикач типу NM1-250S/3300 160А CHINT. Для керування обладнанням було обрано контактор типу NC2-150 400V 50Hz 150A AC 3NO 671691 CHINT

3. Виконано розрахунки показників надійності для існуючої системи та запропонованої схеми, після розрахунків було підтвердження, що нова схема більш надійніша та стійка до відмов.

4. Розглянуто технічні фактори, що впливають на надійність системи, такі як стан обладнання, навантаження на систему, а також використання сучасних технологій для оптимізації роботи мереж.

5. Виконано порівняльний аналіз показників надійності та економічної ефективності існуючої та запропонованої схем. Аналіз показав, що запропонована схема має більші показники надійності, а саме 33 роки безвідмовної роботи та 0,029 імовірності відмови.

6. Техніко-економічні розрахунки показали, що наявна система електропостачання приносить збитки підприємству на суму 177645грн, доцільність використання дизельного генератора в якості резервного джерела живлення, так як він забезпечує живлення під час аварійних ситуацій.

Список використаних джерел

1. Використання показників saidi, saifi для економічної оцінки надійності електропостачання промислових підприємств / Б. М. Сердюк, А. А. Ліщук. // Ефективна економіка. - 2012. - № 2.
2. Bilgen, M., & Altın, N. (2021). *An Overview on Reliability Analysis and Evaluation Methods Applied to Smart Grids*. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 9(4), 645-660.
3. Обершка Н. В., Мицишин І. В. Коливання надійності системи електропостачання // International scientific journal "Grail of Science". – № 23, грудень 2022. – DOI: 10.36074/grail-of-science.23.12.2022.26.
4. Голумбйовський Р. Б. Підвищення надійності розподільних мереж 10-35 кВ: кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю „141 — електроенергетика, електротехніка та електромеханіка“ / Р. Б. Голумбйовський. — Тернопіль: ТНТУ, 2023. — 66 с.
5. <https://chint.ua/uk-ua/avtomat-vvodu-rezervu-nz7-250s3p-200a>
6. <https://electro-market.com.ua/ctproduct/kontaktor-nc2-150-400v-50hz-150a-3-poljysa-ac-3no-671691-chint-77258-1.html>
7. Поліщук А. Л., Казьмірук О. І., Лесько В. О., Німа Н. І. Аналіз існуючих показників оцінювання надійності роботи електричних мереж з врахуванням ВДЕ // Вінницький національний технічний університет.
8. Шкрабець Ф. П. Основи електропостачання. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2012.
9. <https://studfile.net/preview/9181585/page:7/>
10. Rausand, M., & Høyland, A. (2004). *System Reliability Theory: Models and Statistical Methods* (2nd ed.). Hoboken, NJ: Wiley-Interscience. <https://art-svit.com.ua>
11. <https://chint.ua/uk-ua/avt-vimikach-nm1-250s3300-160a>
12. Методичні до виконання курсового проекту з дисципліни «Надійність систем електропостачання» для студентів ОС «Магістр» денної та дистанційної форм навчання зі спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка» к.т.н., професор Яковлев Валерій Федорович, Ст. викладач Савойський Олександр Юрійович

13. Охорона праці та цивільний захист: Підручник для студентів, які навчаються за спеціальностями галузей знань «Автоматизація та приладобудування» / О. Г. Левченко, О. І. Полукаров, В. В. Зацарний, Ю. О. Полукаров, О. В. Землянська. За ред. О. Г. Левченка. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 420 с.

14. Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2013. – 533 с

15. <https://generator.ua/ru/dizelnye-generatory/7792-generator-dizelnyj-profitec-wdsg125-3-power-max.html>

16. Li, C., He, J., Zhang, P., & Xu, Y. (2017). A novel sectionalizing method for power system parallel restoration based on minimum spanning tree. *Energies*, 10(7), 948.

17. Marqusee, J., & Jenket II, D. (2020). Reliability of emergency and standby diesel generators: Impact on energy resiliency solutions. *Applied Energy*, 268, 114918.

18. Bayati, N., Hejazi, M. A., & Marqusee, J. (2019). A comparative study between traditional backup generator systems and renewable energy-based microgrids for power resilience enhancement of a local clinic. *Electronics*, 8(12), 1485

19. Wang, K., & Li, W. (2019). Research on Reliability of Relaying Protection in Smart Substation. *World Journal of Engineering and Technology*, 07(02), 333–338. <https://doi.org/10.4236/wjet.2019.72024>.

20. Wang, J., Kirtley, J. L., & Carvalho, P. (2013). Improving transformer's utilization under customer reliability requirements. *Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE*. <https://doi.org/10.1109/pesmg.2013.6672530>.

21. Zhan, M., Li, H., Zhang, C., Chen, M., & Chen, Q. (2019). Research on the reliability of capacitor voltage transformers calibration results. *Measurement*, 146, 770–779. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.07.011>.
22. Bouchaoui, L., Hemsas, K. E., Mellah, H., & Benlahneche, S. (2021). Power transformer faults diagnosis using undestructive methods (Roger and IEC) and artificial neural network for dissolved gas analysis applied on the functional transformer in the Algerian north-eastern: a comparative study. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (4), 3–11. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.01>.
23. Demirci, M., Gözde, H., & Taplamacıoğlu, M. C. (2023). Improvement of power transformer fault diagnosis by using sequential Kalman filter sensor fusion. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 149, 109038. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109038>.
24. Безбородько В. В., Савойський, О. Ю. (2024). АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ. Збірник тез за матеріалами 30-ої міжнародної науково-практичної конференції. Ч.2., Суми: СНАУ, 168.
25. Безбородько В. В., Савойський, О. Ю. (2024). СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ СПОЖИВАЧІВ. Матеріали науково-практичної конференції викладачів, аспірантів та студентів Сумського НАУ (14-16 травня 2024 р.). – Суми, 2024. с 545.

ДОДАТКИ