

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Управління енергетичними та економічними процесами

Інтелектуальні системи енергопостачання

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
магістра

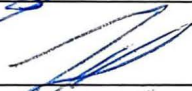
на тему: Аналіз показників надійності ТП Д
за освітньою програмою Енергетичні та електромеханічні системи на
транспорті
зі спеціальності: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Виконав: студент групи EE2221:



/ Денис ПАНАСЕНКО /

Керівник:



/ доцент Тетяна ДРУБЕЦЬКА /

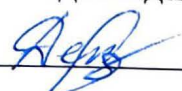
Нормоконтролер:



/ доцент Ірина ПОТАПЧУК /

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з
праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент



Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies

Energy and economic process management

Intellectual power supply systems

Explanatory Note
to Master's Thesis

on the topic: Analysis of reliability indicators of traction substation D

according to educational curriculum Energy and electromechanical systems in transport

in the Speciality: 141 Power engineering, electrical engineering and electromechanics

Done by the student of the group EE2221: / Panasenko Denys /

Scientific Supervisor: /Ass. Prof. Tetiana Drubetska /

Normative controller : / Ass. Prof. Iryna Potapchuk /

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Управління енергетичними та економічними процесами

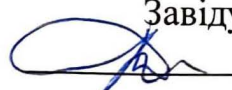
Кафедра: Інтелектуальні системи енергопостачання

Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)

Освітня програма: Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті

Спеціальність: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІСЕ
 Дмитро БОСИЙ

Дата 18.01.23

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу магістр з електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

студенту ПАНАСЕНКО Денису Костянтиновичу

1. Тема роботи: Аналіз показників надійності ТП Д

Керівник роботи: Друбецька Тетяна Ігорівна, к.т.н., доцент

затверджені наказом від

" 18 " 01 2023 р. № 56ст

2. Строк подання студентом роботи: 08.01.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи:

план об'єкту А.

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

4.1 Постановка задачі дослідження.

4.2 Існуючі та перспективні схемні рішення ТП.

4.3 Аналіз показників надійності прийнятої схеми

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Варіанти побудови РП підстанції 2. Показники теорії надійності

3. Сучасне обладнання ТП 4. Розрахунок надійності

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Постановка задачі дослідження	09.10.2023	
2	Існуючі та перспективні схемні рішення ТП	23.10.2023	
3	Аналіз показників надійності прийнятої схеми	04.12.2023	
4	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	08.01.2024	
5	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	16.01.2024	

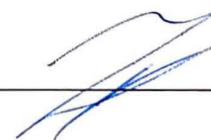
Студент

Денис ПАНАСЕНКО



Керівник роботи

Тетяна ДРУБЕЦЬКА



РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 64 сторінки, 3 частини, 25 рисунків, 6 таблиць, 16 використаних джерел.

Об'єкт дослідження – обладнання підстанцій.

Мета роботи – підвищення надійності тягових підстанцій шляхом заміни обладнання.

Методи дослідження. Основні теоретичні положення магістерської роботи отримані за допомогою математичного апарату теорії надійності та теорії графів.

Одержані результати:

- поставлені задачі дослідження;
- описані існуючі та перспективні схемні рішення ТП
- проведений аналіз показників надійності прийнятої схеми ;

Ключові слова: ТЯГОВА ПІДСТАНЦІЯ; ОБЛАДНАННЯ ПІДСТАНЦІЙ; ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ; МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ; ВІРОГІДНІСТЬ БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	9
2 ІСНУЮЧІ ТА ПЕРСПЕКТИВНІ СХЕМНІ РІШЕННЯ ТП	11
2.1 Основні відомості	11
2.2 Основні вимоги до розподільчих пристроїв	15
3 АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ПРИЙНЯТОЇ СХЕМИ	30
3.1 Огляд літературних джерел	30
3.2 Методики визначення показників надійності	33
3.3 Структурно-логічний аналіз технічних систем	36
3.4 Математична модель	51
3.5 Визначення ступеню зміни надійності при заміні обладнання ТП.....	59
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	63
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	62

					02.15.EE2221.KPM.20223.ПЗ			
Зм.	Арк	№ документа	Підпис	Дата	Аналіз показників надійності ТП Д	Літера	Аркуш	Аркушів
Розробник		Панасенко Д.К.		16.01.24		М	6	64
Консульт								
Керівник		Друбецька Т.І.		16.01.24				
Н.контр		Потапчук І.Ю.		16.01.24				
Зав.контр								
						МОНУ, УДУНТ, ІСЕ, зр. EE2221		

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 64 сторінки, 3 частини, 25 рисунків, 6 таблиць, 16 використаних джерел.

Об'єкт дослідження – обладнання підстанцій.

Мета роботи – підвищення надійності тягових підстанцій шляхом заміни обладнання.

Методи дослідження. Основні теоретичні положення магістерської роботи отримані за допомогою математичного апарату теорії надійності та теорії графів.

Одержані результати:

- поставлені задачі дослідження;
- описані існуючі та перспективні схемні рішення ТП
- проведений аналіз показників надійності прийнятої схеми ;

Ключові слова: ТЯГОВА ПІДСТАНЦІЯ; ОБЛАДНАННЯ ПІДСТАНЦІЙ; ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ; МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ; ВІРОГІДНІСТЬ БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ.

ВСТУП

Одним з найважливіших об'єктів залізничного транспорту є тягові підстанції від надійності і безперебійності роботи яких залежить перевізний процес. Тому необхідно досягти оптимального балансу між капітальними витратами на спорудження та реконструкцію електроенергетичних об'єктів, з одного боку, і експлуатаційними витратами на їх утримання з іншого боку.

Для вирішення цих завдань необхідний пошук нових резервів у вдосконаленні роботи, подальшого шляху розвитку технічних засобів, технологій обслуговування, підвищення надійності роботи пристроїв в умовах підвищення ваги і швидкості руху поїздів.

Існуючі типові схемні рішення розподільних пристроїв живлячої напруги ТП були розроблені з урахуванням надійності обладнання яке існувало в 70 – 80 ті роки ХХ століття (масляні вимикачі, роз'єднувачі РНДз, розрядники та подібне обладнання).

В кінці 90-х років як у нас в країні, так і за кордоном був освоєний випуск високонадійного електротехнічного обладнання. Це вакуумні (для середнього рівня напруги) і елегазові (для високого рівня напруги) вимикачі, конструктивно більш досконалі типи роз'єднувачів, сучасні обмежувачі перенапруг не мають обмежень по числу спрацьовувань, принципово нові пристрої для вимірювання струму (пояс Роговського) і напруги (ємнісний датчик).

Значний ривок в цьому напрямку було досягнуто розробкою інтегрального силового обладнання, тобто такого що містить в одному корпусі декілька комутаційних і вимірювальних апаратів. Таким прикладом можуть служити елегазові комірки PASS виробництва АВВ (Італія). Застосування такого обладнання в розподільних пристроях дозволяє практично на порядок збільшити надійність роботи підстанцій.

Однак вартість цих пристроїв досить велика. Тому установка перерахованих вище сучасних апаратів в існуючих схемах розподільчих пристроїв призведе до значного підвищення вартості підстанцій, що може стати перешкодою на шляху

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		7

впровадження нової техніки.

Таким чином, рішення про заміну обладнання повинно прийматися з урахуванням надійності та техніко-економічного розрахунку.

					02.15.ЕЕ2221.КРМ.2023.ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Тягові підстанції (ТП) – одні з найважливіших пристроїв системи тягового електропостачання. Вони здійснюють живлення як тягових споживачів, так і сторонніх споживачів що знаходяться поблизу залізниці. Проектування типових ТП здійснюється відповідно до типових матеріалів, розроблених інститутом «Енергомережпроект» Міненерго, правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕ та ПТБ), правил улаштування електроустановок (ПУЕ) [1].

Протягом останніх декількох років знос обладнання підстанцій знаходиться на критичному рівні (рис. 1.1). Це відноситься як до розподільних пристроїв змінного, так і постійного струму. На залізницях України з 307 стаціонарних та пересувних тягових підстанцій з терміном служби понад 30 років працюють 243 стаціонарних (82,09% від загальної кількості) та 10 пересувних тягових підстанцій. В експлуатації знаходиться 9 підстанцій з одним вводом живлення, що не відповідає вимогам Правил улаштування системи тягового електропостачання залізниць України.



Рисунок 1.1 – Розподіл тягових підстанцій за терміном експлуатації

Відсоток відмов технічних засобів на ряді залізниць через старіння досягає 35 - 45% від загальної кількості.

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		9

Кількість стаціонарних тягових підстанцій з напругою 220 кВ складає 1 підстанція, 154-110 кВ – 197 одиниць, 20-35 кВ – 80 одиниць, 16 тягових підстанцій постійного струму мають напругу 6-10 кВ. За типом приєднання (рис. 1.2) [2].

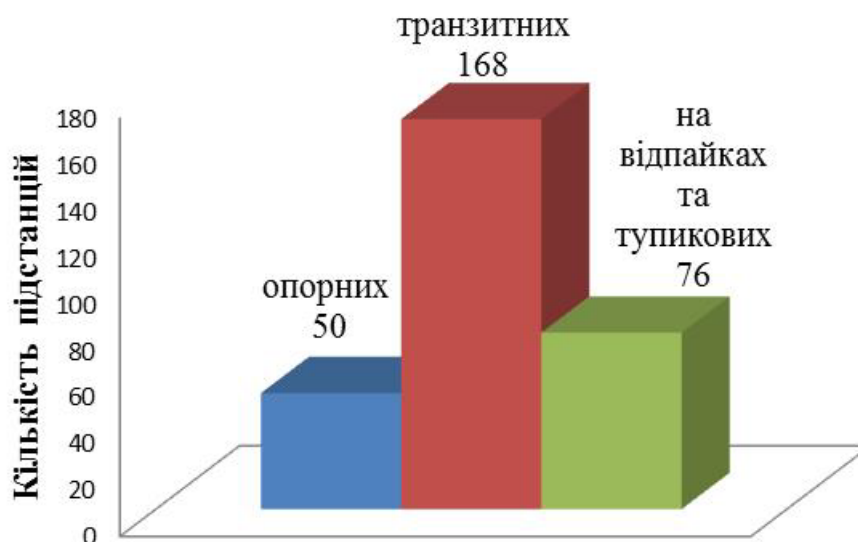


Рисунок 1.2 – Розподіл підстанцій за типом приєднання

Один з напрямів удосконалення господарства електропостачання – тягові підстанції нового покоління для живлення різних систем електричної тяги.

За останні 15 років промисловістю освоєно випуск високонадійного сучасного електротехнічного обладнання [4-13], яке практично не вимагає обслуговування (догляду) протягом усього терміну служби. Однак, застосування таких електроапаратів призводить не тільки до збільшення надійності РП підстанцій, а й до значного зростання їх вартості.

Правильно вибрати пріоритети досліджень в цій області дозволяє аналіз існуючих схемних рішень РП і методик оцінки показників надійності.

2 ІСНУЮЧІ ТА ПЕРСПЕКТИВНІ СХЕМНІ РІШЕННЯ ТП

2.1 Основні відомості

В процесі експлуатації підстанцій, виконаних по схемним рішенням наведених в [14-16], були виявлені як переваги, так і недоліки.

Схема головних електричних з'єднань тягової підстанції визначається місцем ТП в схемі зовнішнього електропостачання, типом ТП (постійного струму, змінного струму, стикова), призначенням кожного РП (живлення тягового навантаження, нетягових споживачів, власних потреб), кількістю понижуючих і перетворювальних трансформаторів.

До схем головних електричних з'єднань пред'являються наступні основні вимоги [2]:

а) схема повинна забезпечувати надійне живлення приєднаних споживачів в нормальному, ремонтному та після аварійному режимах відповідно до категорій навантаження з урахуванням наявності або відсутності незалежних резервних джерел живлення;

б) схема повинна забезпечувати надійність транзиту потужності через підстанцію в нормальному, ремонтному та після аварійному режимах відповідно до його значенням для даної ділянки мережі;

в) схема повинна бути по можливості простою, наочною, економічною і забезпечувати засобами автоматики відновлення живлення споживачів в після аварійній ситуації без втручання персоналу;

г) схема повинна допускати поетапний розвиток РП з переходом від одного етапу до іншого без значних робіт по реконструкції і перерв в живленні споживачів;

д) число вимикачів, що одночасно спрацювали в межах одного РП повинно бути не більше двох при пошкодженні лінії і не більше чотирьох при пошкодженні трансформатора.

Схема РП 110 кВ тягової підстанції на відпайках (рис. 2.1) аналогічна транзитній підстанції. Схема виконана на блоках 110 кВ виробництва ВАТ «Рівненський завод високовольної апаратури». Таку схему також називають

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		11

«схема два блоки з вимикачами та неавтоматичною перемичкою зі сторони лінії». Вона має лише одну перемичку з роз'єднувачами для виводу в ремонт вимикача або трансформатора. Наявність перемички з роз'єднувачами, що має дистанційне керування, дозволяє забезпечити живлення будь-якого трансформатора по будь-якому вводу або двох трансформаторів по одному вводу.

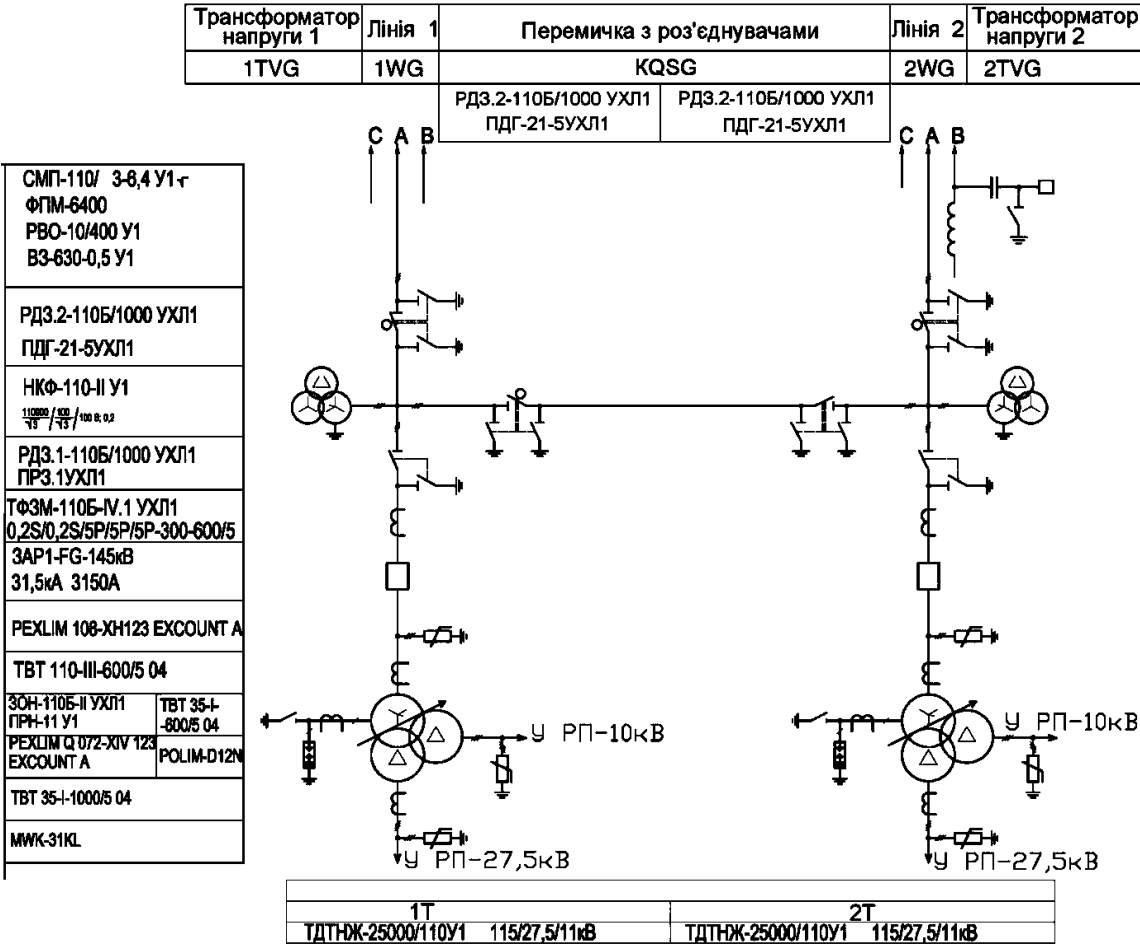


Рисунок 2.1 – Однолінійна схема РП 110 кВ тягової підстанції на відпайках

Наявність двох роз'єднувачів забезпечує можливість безпечного огляду та ремонту кожного з них. Таке спрощення схеми викликано наступними причинами. При двох працюючих трансформаторах, що живляться кожен від своєї лінії (так РП експлуатується на ТП змінного струму, що викликано особливостями виконання захистів підстанцій через підживлення місця к. з. на

стороні 110 кВ через контактну мережу), необхідність будь-якої перемички відпадає, оскільки і без неї забезпечується рівномірне завантаження ПЛ.

У режимі к. з. на одній з ПЛ, коли необхідно перевести обидва трансформатори на живлення від іншої ПЛ, цілком достатньо звичайної перемички з двома роз'єднувачами. Наявність двох роз'єднувачів забезпечує можливість безпечного огляду та ремонту кожного з них.

На підстанціях постійного струму обидва трансформатори звичайно живляться від однієї ПЛ при замкнутій перемичці, тобто так само, як у аварійному режимі на підстанціях змінного струму, тому тут також достатньо перемички з двома роз'єднувачами.

В обох розглянутих варіантах відпадає необхідність у визначенні напрямку потужності через перемичку, що на транзитній тяговій підстанції було необхідно для визначення пошкодженої ділянки ПЛ з метою відключення відповідного роз'єднувача. Тому підстанції на відпайках не мають дорогого трансформатора напруги на стороні 110 кВ [1].

В однолінійних схемах ТП на відпайках можна зустріти замість вимикача комбінацію короткозамикача та віддільника на вводах до знижувальних трансформаторів (рис. 2.2) [1]. Таке рішення здешевлює схему.

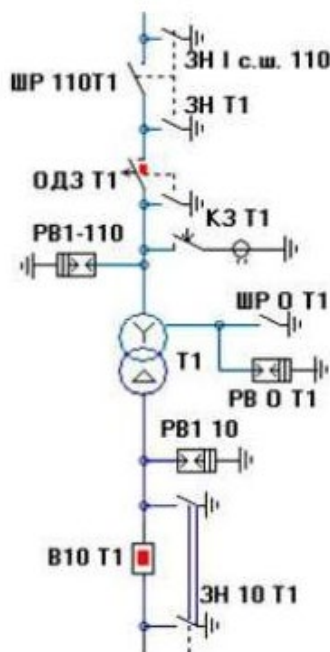


Рисунок 2.2 – Фрагмент схеми з віддільником і короткозамикачем

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		13

Віддільник відключається в безструмову паузу. Короткозамикачем включається тільки в аварійних ситуаціях (від захисту або примусово людиною). Віддільник пов'язаний з короткозамикачем по колах управління: при включенні короткозамикача завжди буде відключатися віддільник.

На підстанціях постійного струму з первинною напругою 35 кВ від таких РП здійснюється безпосередньо живлення перетворювальних агрегатів, а також трансформаторів власних потреб, трансформаторів підігріву та знижувальних районних трансформаторів. На транзитних підстанціях з первинною напругою 35 кВ від РП 35 кВ отримують живлення суміжні підстанції. Найпоширенішими є РП 35 кВ з однією робочою секціонованою вимикачем системою шин.

Розглянемо сучасні варіанти виконання РП-35 кВ. На рис. 2.3 [1] наведено однолінійну схему РП-35 кВ на блоках 35 кВ Рівненського заводу

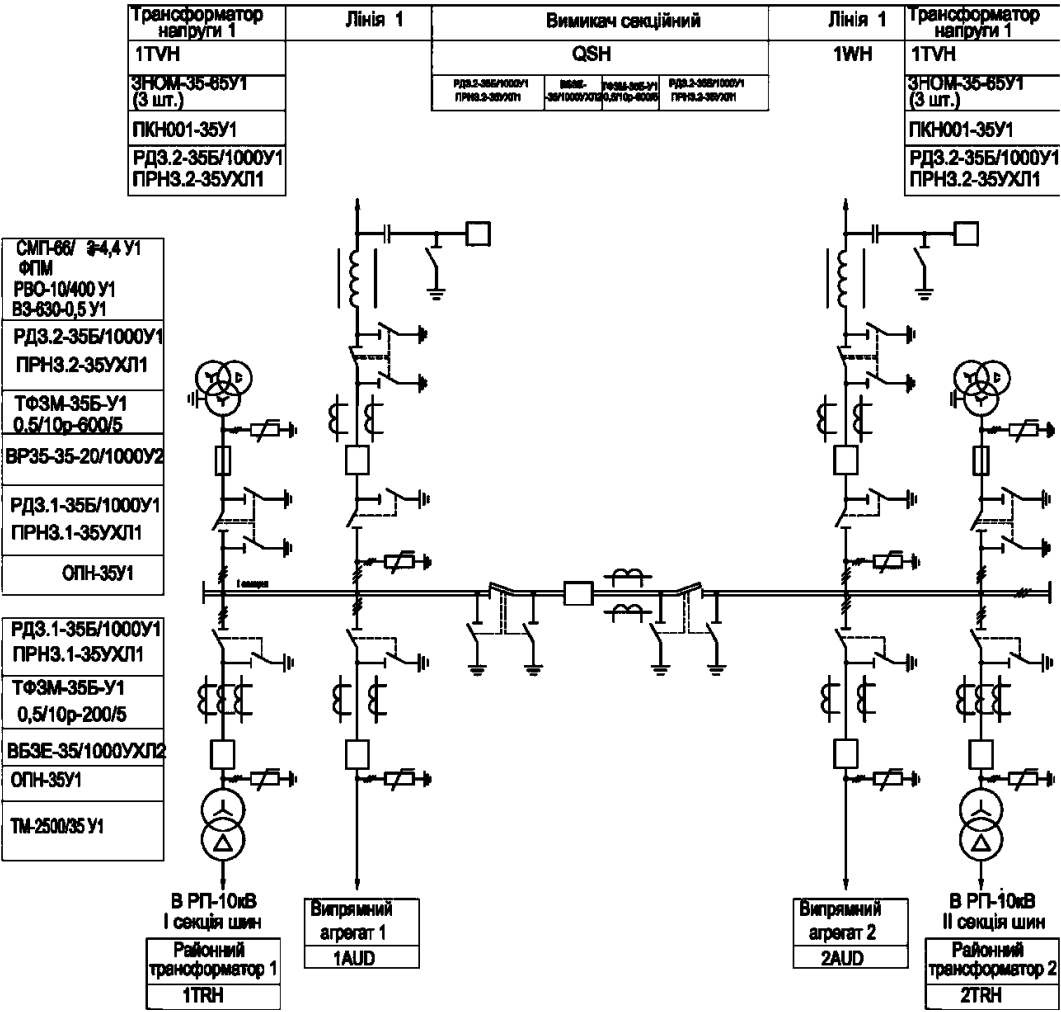


Рисунок 2.3 – Однолінійна схема РП 35 кВ для підстанції, що отримує живлення напругою 35 кВ

На рис. 2.4 [1] зображено однолінійну схему РП-35 кВ для ТП постійного струму з живильною напругою 35 кВ КРПЕ типу 8DA10 з елегазовою ізоляцією.

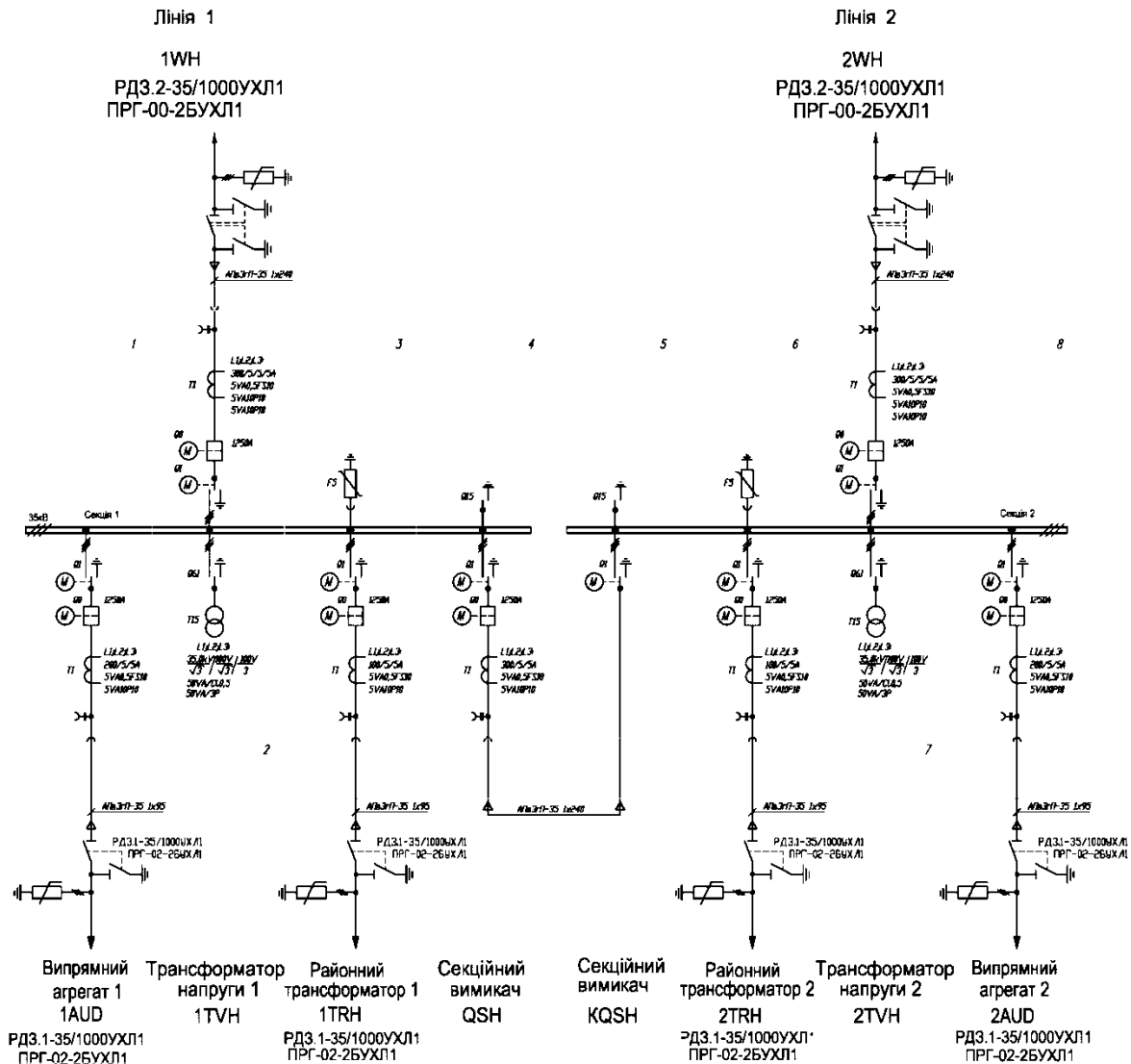


Рисунок 2.4 – Однолінійна схема РП 35 кВ з елегазовою ізоляцією

2.2 Основні вимоги до розподільчих пристроїв

Розподільчі пристрої (РП) тягових підстанцій виконують зовнішньої та внутрішньої установки.

При розташуванні обладнання на відкритому повітрі РП називають відкритими (ВРП), при розташування обладнання в будівлі закритими (ЗРП).

Закриті розподільчі пристрої (ЗРП) більш надійні, зручні, безпечні; їх експлуатація не залежить від погодних умов, за вартістю звичайно на 10-25% вище вартості відповідних ВРП.

Раніше РП 35-220 кВ тягових підстанцій постійного та змінного струмі, як правило, виконували відкритими (рис. 2.5). На ТП постійного струму закритими виконували РП тягового електропостачання 3,3 кВ та районного електропостачання 10 кВ. На ТП змінного струму закритими виконували лише РП власних потреб [2, 15, 16].

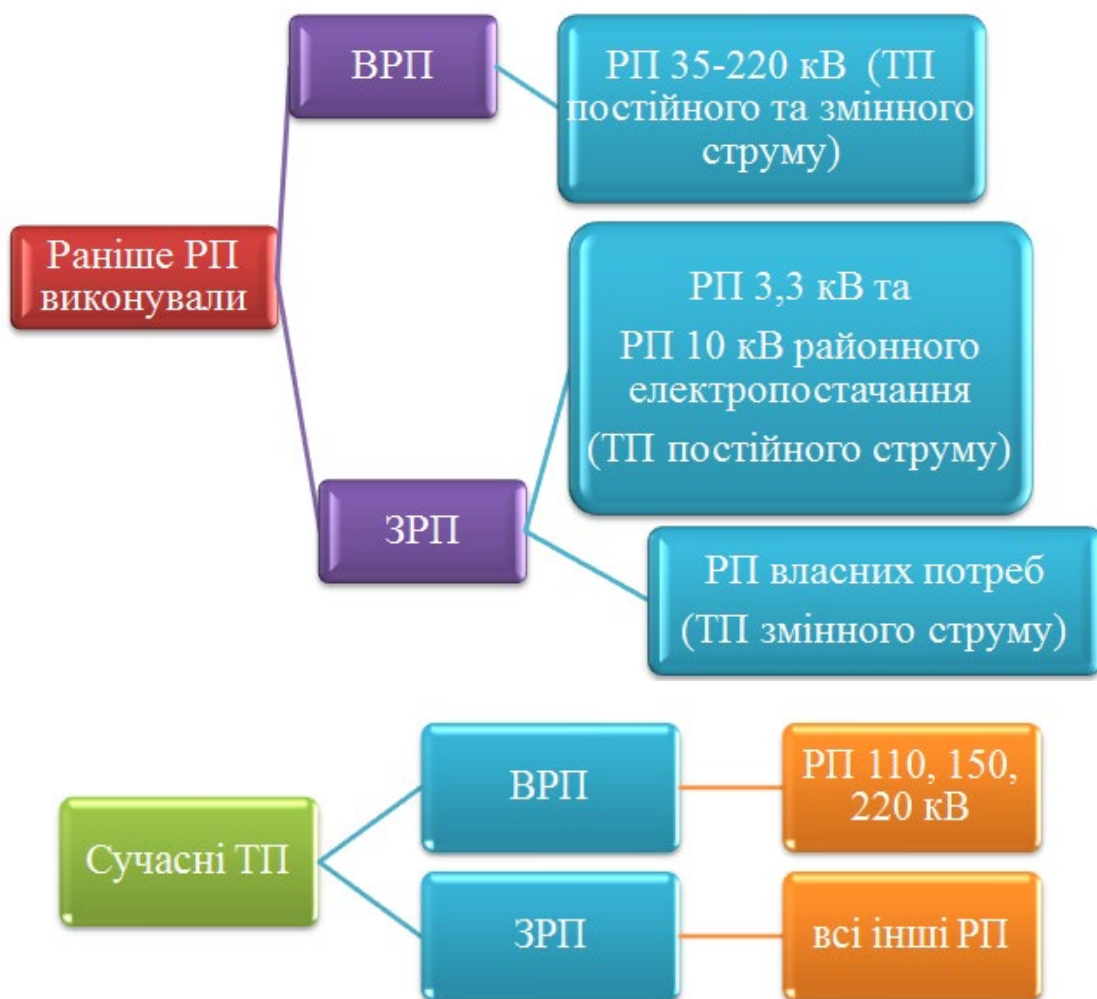


Рисунок 2.5 – Конструкція розподільчих пристроїв

На сучасних ТП намагаються всі РП зробити закритими (рис. 2.5). Зараз можна спостерігати тенденцію на ТП постійного та змінного струмів розміщення РП 110 (150) кВ на відкритій частині, а всі інші РП робити

закритими. При спорудженні ТП широко застосовуються комплектні РП, блоки, шафи, коміртки повного заводського виконання. Такі РП мають ряд переваг: зменшується площа підстанції, спрощується будівельна частина, скорочуються строки та вартість монтажних робіт.

В загальному випадку до РП пред'являються наступні вимоги: надійність роботи, зручність та безпека обслуговування та ремонту, пожежна безпека, економічність, можливість розширення. Дотримання цих вимог при спорудженні РП тягових підстанцій дозволяє забезпечити безперебійне електропостачання.

При компоновці на плані підстанції розподільчих пристроїв, трансформаторів, будівлі, прожекторних мачт, блисковкозахисту та інших споруд керуються мінімально допустимими відстанями між ними відповідно до ПУЕ, мінімальної витрати кабелів, зручності та безпеки обслуговування.

Для доставки обладнання на підстанцію передбачають залізничні під'їзні колії – одна або дві в залежності від маси знижувальних трансформаторів. Всі трансформатори розташовують вздовж залізничної колії та встановлюють краном.

Для спорудження ВРП підготовлюють площадку з деяким ухилом в сторону від будівлі ЗРП, для відводу води. Площадку ВРП покривають шаром гравію або ракушки для забезпечення фільтрації води та попередження появи трави.

Огородження підстанції робиться висотою 2,4 м.

Опорні конструкції для кріплення шин розраховують на одностороннє тяжіння проводів.

З точки зору безпеки повинні огорожуватись струмоведучі частини, якщо вони знаходяться відносно рівня планування нижче відстаней наведених в ПУЕ для різних напруг.

Трансформатори огорожуються, якщо висота від рівня планування до нижньої кромки фарфору вводних ізоляторів менше 2,5 м. Огороджують сіткою 2 м.

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		17

Відстань між трансформаторами залежить від їх потужності та допускається не менше 1,25 м.

Для попередження розтікання масла під трансформаторами та маслonaповненою апаратурою з кількістю масла 1000 кг і більше необхідно робити маслоприймачі у вигляді ями захищеною ґравієм глибиною 250 мм та площею нормованою ПУЕ. У ВРП повинен бути проїзд 4 м шириною та 4 м висотою.

Трансформатори та апарати не огорожуються якщо нижня кромка ізолятора знаходиться на висоті не менше 2,5 м.

На сучасних ТП введення робляться за допомогою кабелів, що прокладаються в кабельних каналах.

ВРП ТП на відпайках виконують рамного типу. Встановлені в 2 ряди опори, поєднують залізобетонними та металевими поперечинами. Утворюється жорстка рама, на якій розташовують все обладнання ВРП, за виключенням вимикачів, які розташовують на низьких фундаментах.

План ВРП 35 кВ ТП з входною напругою 35 кВ представлений на рис. 2.6.

На рис. 2.6 прийняті наступні позначення:

- 1 – трансформатор трифазний силовий масляний двох обмотковий 35/10
- 2 – трансформатор трифазний з розщепленою обмоткою для живлення напівпровідникових перетворювачів за 12-пульсовою схемою випрямлення;
- 4 – трансформатор трифазний силовий масляний двох обмотковий 35/0,4 кВ
- 6, 7 – блок вимикача 35 кВ з роз'єднувачами;
- 8, 9 – блок вимикача 35 кВ з роз'єднувачами та розрядниками;
- 10 – блок прийому ПЛ 35 кВ;
- 11 – блок шинних апаратів;
- 12 – шафа автоматики підігріву приводів 35 кВ;
- 26, 27 – провід сталевалюмінієвий;
- 28 – канат;
- 29 – гірлянда натяжна подовжена з 5 ізоляторів на 35 кВ;

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		18



37 – епоксидна кінцева муфта.

2 – пристрій тягового трансформатора ТРДП;

- 17, 18, 19 – пристрій триполюсного роз'єднувача;
- 22 – обмежувач перенапруг;
- 24 – ізолятор полімерний опорний 35 кВ;
- 30 – провід сталевалюмінієвий;
- 31, 32 – кабель силовий одножильний;
- 34 – гірлянда ізоляторів 35 кВ натяжна нормальна;
- 52 – кабель АВВГ;
- 61 – шина.

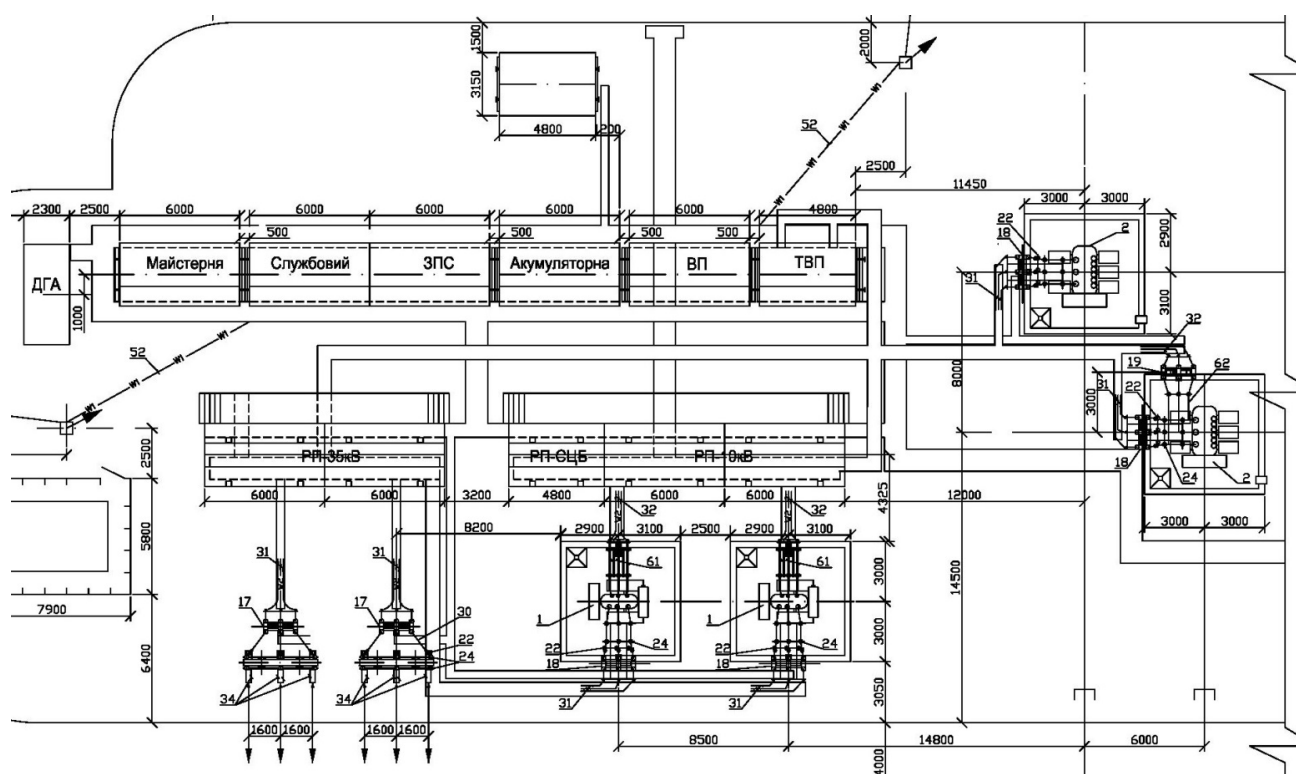


Рисунок 2.7 – План РП 35 кВ ТП з вхідною напругою 35 кВ та елегазовою ізоляцією

Виконання компактного розподільного пристрою для напруги 110 кВ на прикладі КРП ЗАР1 DTC

Сімейство пристроїв DTC (табл. 2.1) розраховане для напруги до 145 кВ. DTC є компактним пристроєм, об'єднуючим в собі кілька функцій, необхідних для роботи підстанції.

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		20

Елементами даного нового пристрою фірми Siemens є:

- високовольний вимикач бакового типу, оснащений прохідними трансформаторами струму;
- один або більше роз'єднувачів з заземлювачами;
- вводи для приєднань до повітряних лініях і систем шин.

У вузлах DTC застосовані:

- дугогасна автокомпресійна камера вимикачів типу ЗАР;
- пружинний привід вимикачів типу ЗАР
- секційний вузол з роз'єднувачем / заземлювачем, застосовуваний у КРУ типу 8DN8
- заземлювач відкритої установки, застосовуваний на роз'єднувачах сімейства Siemens / Ruhrtal

Таблиця 2.1 – Технічні дані високовольного компактного розподільного пристрою ЗАР1 DTC

Номінальна напруга	123 кВ	145 кВ
Номінальний струм	2500 А	2500 А
Номінальна частота	50/60 Гц	50/60 Гц
Номінальна напруга грозового імпульсу, що витримується	550 кВ	650 кВ
Номінальна напруга промислової частоти, що витримується	230 кВ	275 кВ
Номінальний струм термічної стійкості (3 с.)	40 кА	40 кА
Номінальне пікове значення допустимого крізного струму	108 кА	108 кА

Завдяки компактній конструкції, а також гнучкості і різноманіттю можливих варіантів розміщення модулів DTC при розробці проектів можуть бути реалізовані різні схеми підстанцій з мінімальними витратами.

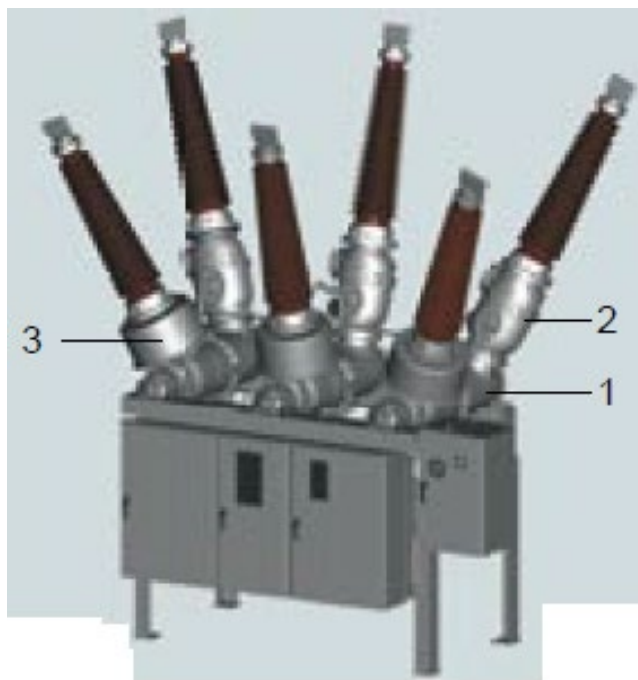
Варіанти виконання:

1. Ввід / Вивід (рис. 2.8);

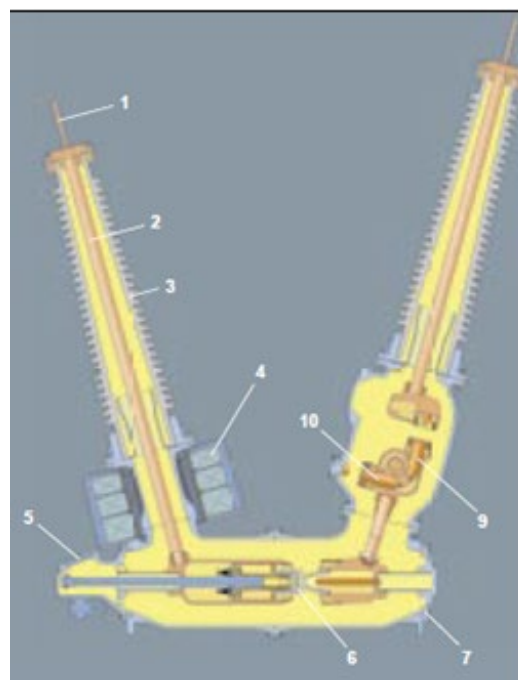
					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		21

2. Приєднання до одиночної системи шин;
3. Приєднання до подвійної системи шин;
4. Вимикач з комбінованою функцією і зовнішнім заземлювачем.

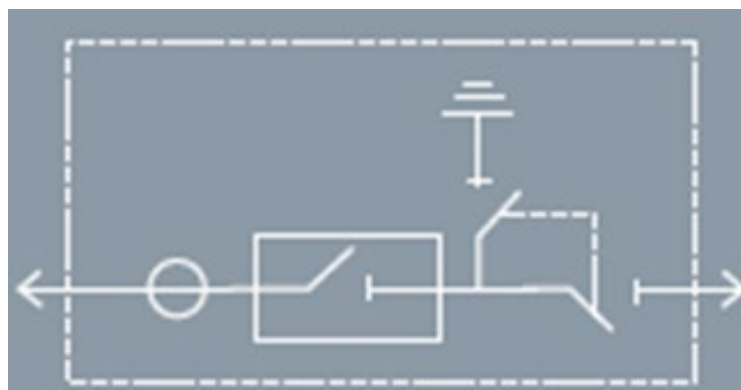
а)



б)



в)



1 – вимикач; 2 – роз'єднувач / заземлювач; 3 – трансформатори струму;

1 – апаратний вивід; 2 – провідник; 3 – введення; 4 – трансформатори струму; 5 – розривний диск; 6 – дугогасильна камера; 7 – металевий корпус; 8 – роз'єднувач; 9 – заземлювач; 10 – уголковий кожух

а – зовнішній вигляд; б – у розрізі; в – електрична схема

Рисунок 2.8 – Варіанти виконання 3AP1 DTS ввід / вивід

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		22

Всі функціональні елементи, за винятком трансформаторів струму, розміщені всередині заземлених корпусів з литого алюмінію. Високовольтний вимикач пристрою DTC - це практично добре відомий баковий вимикач. Зібрані полюса пристрою DTC наповнені елегазом і закріплені на загальній станині.

Вимикач пристрою обладнаний стандартним пружинним приводом. Шафи зі схемами управління вимикача і роз'єднувачів / заземлювачів, а також клемними зажимами з виведеними вторинними висновками трансформаторів струму розташовані в передній частині пристрою DTC. Системою сполучних штанг роз'єднувачі / заземлювачі відповідно пов'язані між полюсами і відповідними приводами.

Вимикач

У вимикачах пристроїв DTC використовується авто компресорний принцип гасіння дуги, при якому відключення струмів короткого замикання відбувається за рахунок енергії дуги, не вимагаючи енергії з боку приводу. Таким чином в пристрої DTC використовуються компоненти сімейства вимикачів ЗАР: дугогасильні камери і пружинний привід.

Трансформатори струму

У пристроях типу DTC використовуються стандартні прохідні трансформатори струму. При цьому, за аналогією з Баковим вимикачем, є можливість розміщення в корпусі декількох сердечників (в т. ч. для вимірювання та захисту) трансформатора струму з параметрами, такими, що підлягають узгодженню при замовленні. Трансформатори струму розташовані між вимикачем і роз'єднувачем / заземлювачем, що еквівалентно розташуванню трансформатора струму у відкритих РП.

Повітряні / Елегазові вводи

Для з'єднання пристрою DTC з повітряною лінією або системою шин служать елегазові вводи. Провідник і захисний електрод для екранування зафіксовані всередині введення. Високовольтні вводи можуть бути порцеляновими або полімерними (скловолоконний просочений епоксидною смолою циліндр, з нанесеним шаром і юбками з кремнійорганічної гуми).

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		23

У варіанті компонування з зовнішнім заземлювачем застосовуються тільки порцелянові вводи.

Ввід / Вивід

Модульна концепція конструкції пристрою DTC робить можливим їх гнучке застосування на підстанціях різної компоновки. Наявність трансформаторів струму а також роз'єднувачів / заземлювачів на входній та на відхідній сторонах DTC являє собою нову технологію, що сприяє безперечного підвищенню оперативності.

Варіант приєднання до одиночної системи шин

Даний варіант компоновки вимикача доцільно застосовувати, коли роз'єднувач / заземлювач необхідний на стороні лінії або системи шин. Можлива також комбінація заземлювач / роз'єднувач / заземлювач. Вони розташовуються в одному загальному корпусі.

Приєднання до подвійної системи шин

Пристрій DTC може також бути застосований в схемах з двома системами шин. За запитом можливе здійснення поділу непроникними перегородками елегазових порожнин окремих модулів (вимикача та секції роз'єднувача / заземлювача). Щільність елегазу в окремих відсіках контролюється за допомогою приладів контролю щільності. Будь-яке відхилення параметрів від норми негайно сигналізується. У разі несправності всередині одного з відсіків, несправність не може поширюватися в інші відсіки. Високовольтні вводи при даному варіанті виконання пристрою DTC можуть бути порцеляновими або полімерними.

Вимикач з комбінованою функцією і зовнішнім заземлювачем. Даний варіант пристрою DTC передбачає додаткову функцію роз'єднувача до функції вимикача. Відмінною особливістю цього варіанту компоновки є наявність зовнішніх заземлювачів з обох боків пристрою. Перевагою, крім цього, є видимість їх положення.

Перевагою крім цього є:

- проста і компактна компоновка підстанції;

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		24

- видиме положення заземлювачів;
- використання стандартних трансформаторів струму;

Заземлювач

Заземлителі можуть бути встановлені на обох сторонах. Вони запозичені з сімейства роз'єднувачів і заземлювачів виробництва АТ Siemens. Роз'єднувачі можуть приводитися в дію за допомогою моторного або ручного приводів. Заземлювачі і їх приводи встановлюються на загальну опорну раму.

Виконання елегазової комірки для напруги 110 кВ на прикладі ПАСС М0 (рис. 2.9).

Основні переваги комірки ПАСС – модульна конструкція та компактність, що дозволяють поєднати в одному модулі наступні апарати:

- силовий вимикач;
- один або декілька роз'єднувачів і заземлювачів;
- трансформатор струму;
- вводи що під'єднуються до однієї або двом системам збірних шин, що реалізовані в середині комірки.

При застосуванні для управління коміркою ПАСС М0 електронного блоку додатково може бути реалізована функція вимірювання високої напруги.

Всі елементи комірки, що знаходяться під напругою, поміщені в заземлений алюмінієвий корпус, який заповнений елегазом або сумішшю елегазу з азотом. Елементи кожної фази знаходяться в окремому корпусі.

На рис. 2.9 наведена схема комірки ПАСС М0 стандартної конфігурації з однією системою збірних шин. За необхідності в комірці ПАСС М0 можуть бути реалізовані дві системи збірних шин.

Як видно з рис. 2.9 на підстанції, створеної на її основі, відсутні традиційні збірні шини, так як вони реалізовані в середині комірки.

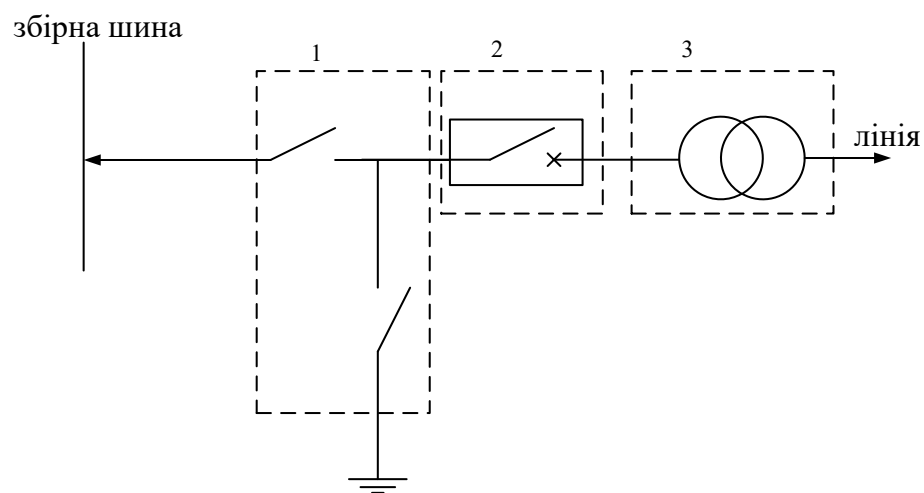
Розглянемо елементи комірки детальніше. В комірках ПАСС М0 використовуються вимикачі типу LTB-D (табл. 2.2, рис. 2.10) з однією дугогасною камерою, що діє на основі добре відпрацьованого принципу само погашення дуги.

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		25

а)



б)



а – зовнішній вигляд; б – електрична схема

Рисунок 2.9 – Комірка ПАСС М0 стандартної конфігурації з однією системою збірних шин

Таблиця 2.2 – Основні характеристики вимикача LTB-D

Параметр	Значення
Номінальний струм відключення	40 кА
Номінальний струм включення	100 кА
Номінальний струм що відключається заряду повітряної лінії	63 А
Номінальний струм що відключається заряду кабельної лінії	160 А
Привід	пружинний,
Тип	загальний на 3 фази
Власний час відключення	BLK222
Повний час відключення	≤ 25 мс
Час включення	≤ 47 мс
Номінальна напруга кіл управління	≤ 42 мс
	≤ 42 мс
	$=110$ В

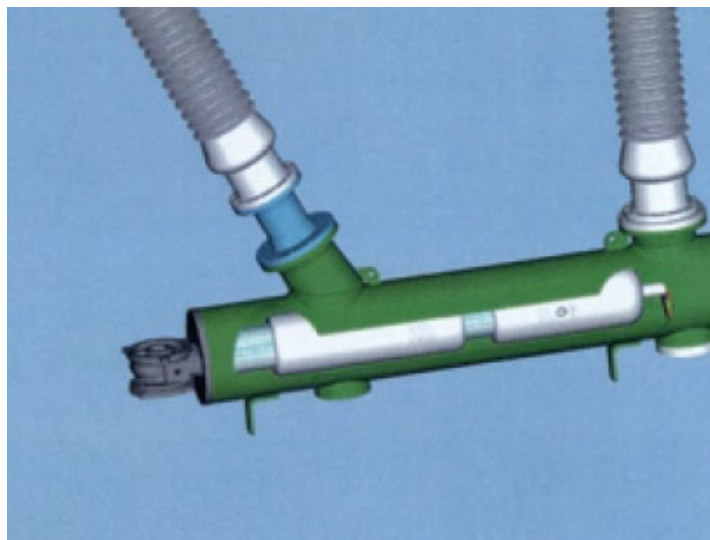


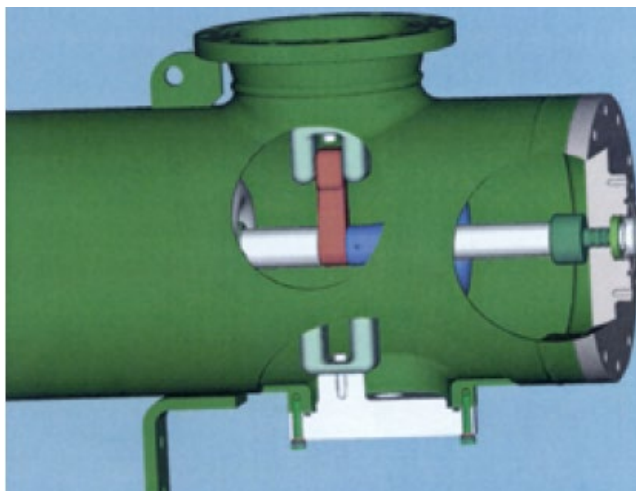
Рисунок 2.10 – Зовнішній вигляд вимикача типу LTB-D

Для відключення струму к. з. використовується, в тому числі, і енергія самої дуги. За рахунок цього потужність, що споживається механізмом приводу складає приблизно 50% від потужності, що споживається традиційними

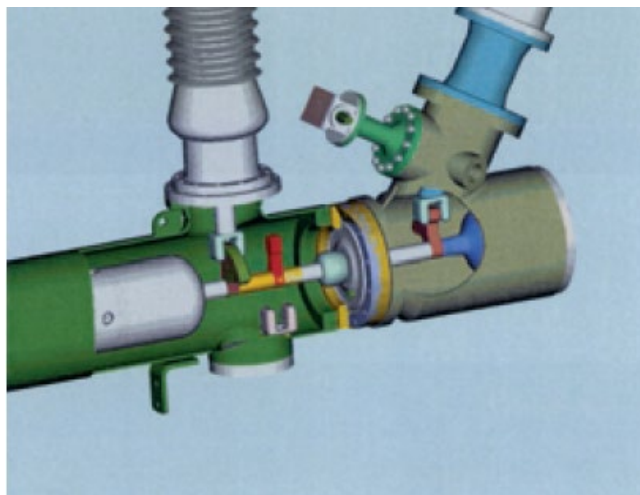
вимикачами. Вимикач управляється пружинним приводом. В аварійних ситуаціях можливе ручне управління приводом.

Комірка укомплектована триполюсним комбінованим роз'єднувачем-заземлювачем (рис. 2.11).

а)



б)



а - з однією системою збірних шин (рухомий контакт підключений до збірної шини); б – подвійний комбінований роз'єднувач-заземлювач для застосування з подвійною системою збірних шин (на рис. обидва роз'єднувачі підключені до різних збірних шин)

Рисунок 2.11 – Комбінований роз'єднувач-заземлювач комірки ПАСС М0

Принцип дії заснований на круговому русі контакту. За бажанням замовника рухомий контакт може мати три фіксованих положення (підключений до збірної шини комірки, відключений та заземлений) або лише два (підключений до збірної шини та відключений з одночасним заземленням). Заземлювач складається з мінімальної кількості деталей, що забезпечує його високу надійність.

При всіх варіантах виконання положення всіх роз'єднувачів однозначно визначається за зовнішніми показниками, що механічно пов'язані з валами роз'єднувачів. Крім того, в корпусі комірки наявні спеціальні вікна, що дозволяють візуально спостерігати положення контактів роз'єднувачів.

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		28

Роз'єднувачі управляються моторними приводами. При відсутності оперативного струму можливе ручне управління роз'єднувачами.

Комірка ПАСС М0 укомплектована традиційними трансформаторами струму на кільцевих магнітопроводах, що встановлені на вводах. На кожному вводі може бути розміщено до 5 сердечників.

Зовнішні лінії та силові трансформатори приєднуються до комірок ПАСС М0 через полімерні вводи. Основою вводів служить скляно-пластикова труба, на яку нанесена оболонка з кремнійорганічної резини, що має ребра та утворює зовнішню ізоляцію. Внутрішній об'єм вводів сполучається з корпусом комірки, тобто заповнений елегазом. Алюмінієві фланци насаджуються на трубу в гарячому стані та додатково кріпляться за допомогою спеціального клею, що забезпечує механічне з'єднання. Основні переваги таких вводів: відносно мала маса, відсутність необхідності технічного обслуговування, висока стійкість до будь-якого агресивного середовища, висока безпека (в тому числі - вибухобезпека).

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		29

3 АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ПРИЙНЯТОЇ СХЕМИ

3.1 Огляд літературних джерел

Проблеми надійності розкриті в публікаціях наступних вчених: Воропай Н.І., Галкін А.Г., Глазунов Л.П., Гук Ю.Б., Дедков В.К., Дружинін Г.В., Єфімов О.В., Кузнецов В.Г., Матусевич О.О., Северцев Н. А., Сердинов С.М., Сіньчугов Ф.І та ін..

Вибір методів вирішення завдання надійності в енергетиці пов'язаний з наступними особливостями [6]:

а) відсутністю можливості натурних випробувань на надійність установок в цілому з причин технічного та економічного характеру;

б) відсутністю можливості заводських випробувань на надійність всіх елементів установок з тих же причин;

в) неможливістю оцінювати надійність нового обладнання і нових установок за існуючою експлуатаційною статистикою, яка відноситься до установок і обладнання старих типів;

г) вимогою в більшості випадків для відповідальних установок впевненого вибору рішень з більшою надійністю;

д) необхідністю в разі великих витрат на підвищення надійності економічно обґрунтовувати вибір варіантів;

е) обмеженими можливостями «тренування» або обкатки елементів установок в заводських і експлуатаційних умовах;

ж) необхідністю враховувати вплив на надійність великого числа різних факторів.

Розрахунок надійності установки можна виконати [6]:

а) за допомогою основних теорем теорії ймовірностей;

б) шляхом складання і рішення системи диференціальних рівнянь, що описують марковський процес переходу установки зі стану в стан;

в) шляхом еквівалентних перетворень розрахункової схеми з використанням формул теорії ймовірностей і марковських моделей;

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		30

- г) на основі топологічного аналізу електричної схеми на зв'язність;
- д) на основі формування логічної функції відмови за допомогою діаграми, званої деревом відмов;
- е) шляхом статичного моделювання випадкового процесу переходу установки від стану до стану (метод Монте-Карло).

В основі наведених методик оцінки надійності лежать показники надійності електротехнічного обладнання схем електроустановок, що характеризують кількісну оцінку одного або декількох властивостей, складових обладнання. Основний показник, що характеризує пошкоджуваність електротехнічного обладнання – параметр потоку відмов – використовується при вирішенні щодо різнопланових завдань. До них можна віднести:

- 1) вдосконалення конструкцій електротехнічного обладнання;
- 2) планування їх ремонтно-експлуатаційного обслуговування;
- 3) обґрунтування і вибір структурних схем і схем електричних з'єднань електроустановок.

Аналіз показує, що практично ні в одному з джерел не наводяться розрахункові умови, при яких отримано шуканий параметр. Тому не представляється можливим співвіднести значення параметра потоку відмов вимикача. Даний параметр має багатокомпонентну багатофакторну структуру і це необхідно брати до уваги при проектуванні та експлуатації електроустановок. Огляд і порівняння статичних даних по відмовах показує, що діапазон змін параметра потоку відмов в деяких випадках досягає більше одного порядку.

Показники надійності обладнання використовуються з 30-их років минулого століття [6]. На першому етапі вони враховувалися укрупнено і лише при виборі резервних генеруючих агрегатів. Публікації по надійності схем комутації з'явилися значно пізніше.

При аналізі видів ушкоджень (рис. 3.1 - 3.3) можна відзначити, що далеко не всі відмови комутаційного обладнання призводять до відключення суміжних елементів.

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		31

В подальшому вони ідентифіковані як відмови двох типів [14-16]:

- 1) відмови типу «Розрив» або «Обрив»;
- 2) відмови типу «Коротке Замикання (КЗ)» («КЗ в одну (кожну) сторону», «КЗ в обидві сторони») або «відключення суміжних елементів».

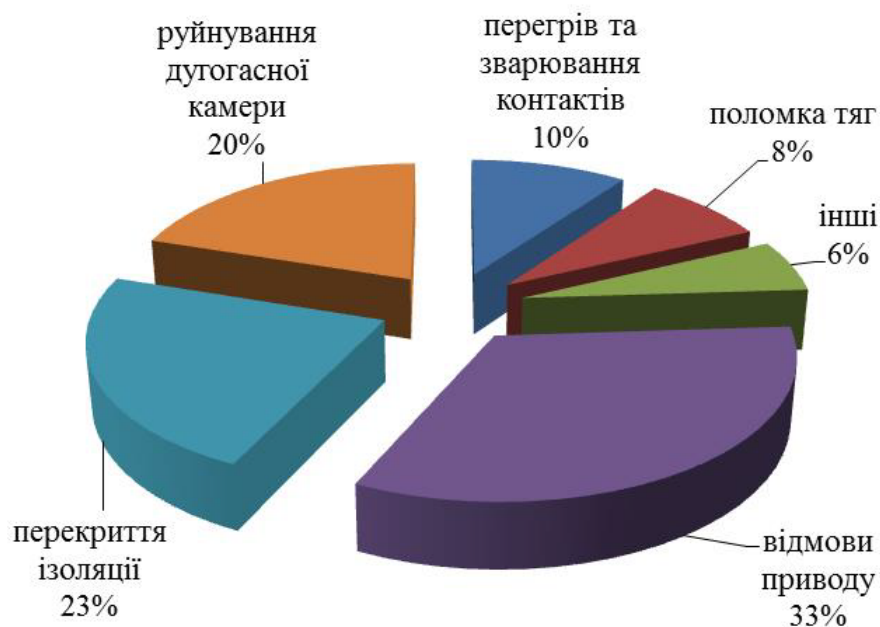


Рисунок 3.1 – Діаграма причин відмов масляних вимикачів



Рисунок 3.2 – Діаграма причин відмов роз'єднувачів

Тут під відмовою типу «Обрив» маються на увазі відмови, що вимагають виведення комутаційного апарату в позаплановий ремонт, тобто призводять до розриву кола, в якому знаходиться комутаційний апарат, що відмовив без порушення технологічного процесу (рис. 3.3).

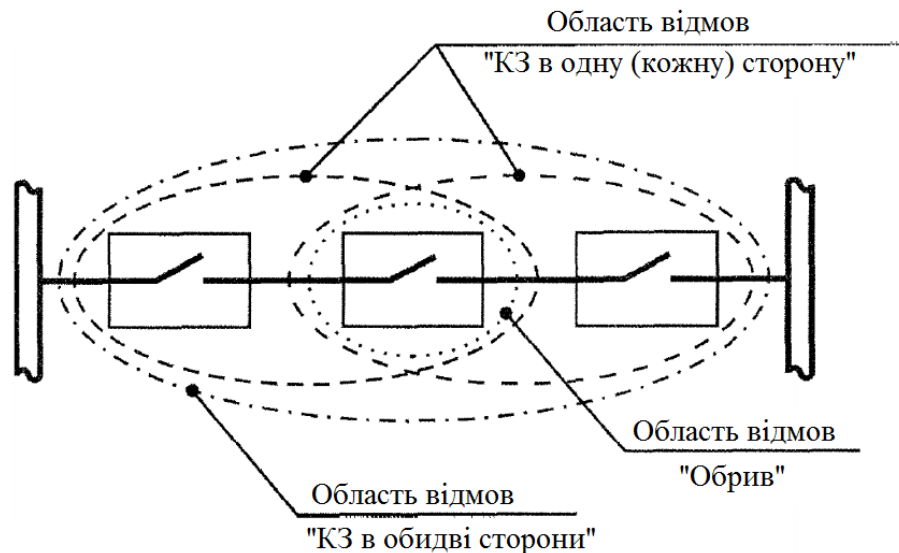


Рисунок 3.3 – Діаграма різних типів відмов за наслідками

Відмова типу «КЗ в одну сторону» супроводжується відключенням, як самого апарату, що відмовив, так і всіх комутаційних апаратів з одного боку від нього. При відмові типу «КЗ в обидві сторони» відключаються всі комутаційні апарати по обидві сторони від апарату, що відмовив.

Аналогічні підходи є і за кордоном [15]. До уваги приймаються два види відмов: типу «КЗ»; типу «Обрив» або помилкове відключення вимикача (через неправильні дії релейного захисту та автоматики (РЗА) або приводу). Таким чином, в порівнянні з аналогічною моделлю відмови [16] враховується вплив пристроїв РЗА на надійність вимикачів.

3.2 Методики визначення показників надійності

Аналітичний розрахунок надійності електропостачання на основі імовірнісних моделей.

Для визначення показників надійності електропостачання споживача в будь-якій мережі необхідно скласти розрахункову схему в сенсі надійності для

						Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	33

елементів електроустановок цієї мережі, звану структурною схемою надійності. Ця схема повинна відображати логіку зв'язків елементів з точки зору перерви або обмеження електропостачання. При використанні логіко-імовірнісних методів розрахункова схема записується в символах алгебри логіки як умова працездатності або відмови [15].

Якщо схема складається з ряду послідовних і паралельних елементів, аналітичний розрахунок показників надійності може бути виконаний шляхом послідовного еквівалентування, тобто заміни паралельних і послідовних кіл еквівалентними елементами.

Аналітичний розрахунок при всій своїй наочності є дуже трудомісткою операцією. Для установок, які в ході експлуатації змінюють схему електричних з'єднань для проведення ремонтних і профілактичних робіт або відповідно до вимог режиму, більш зручною з обчислювальної точки зору є таблично-логічна методика.

Таблично-логічна методика розроблена Ю. Б. Гуком на основі методик наведених в [14-16] і табличного методу В. В. Таривердієва. Вона дає можливість визначити середні частоти аварій різного виду, середній час відновлення роботи після аварій, зниження об'ємів вироблення електроенергії станцією або недовідпуск енергії споживачам. Методика дозволяє враховувати інженерний досвід проектувальника, конкретні умови даної станції або підстанції, нестаціонарність потоку ушкоджень, відмови пристроїв РЗА і розвиток аварій, планові і аварійні ремонти обладнання.

Слід зауважити, що при застосуванні даного методу величина збитку визначається менш точно і менш достовірно.

Марковські процеси.

Випадковий процес, що протікає в системі називається марковським, якщо для будь-якого моменту часу t_0 імовірнісні характеристики процесу в майбутньому залежать тільки від його стану в даний момент t_0 і не залежать від того, коли і як система прийшла в цей стан [15]. При розрахунках зазвичай вводять такі припущення:

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		34

1) потоки відмов і відновлень прості, тобто в кожен момент часу може відмовляти або закінчуватися відновлення не більше одного елемента;

2) процес функціонування стаціонарний, тобто інтенсивності переходів між станами постійні в часі;

3) процес ергодичний, тобто система з будь-якого стану може потрапити в будь-який інший за кінцевий проміжок часу.

При аналізі випадкових процесів з дискретними станами використовують граф станів і переходів.

Перехід системи з одного стану в інший може бути викликаний відмовою, розвитком відмови або відновленням. Кожен стан характеризується ймовірністю знаходження в ньому системи $p_i(t)$ в момент часу t .

При використанні даного методу для складних систем необхідно вирішувати велику систему диференціальних рівнянь, що іноді викликає ускладнення.

Метод статистичного моделювання (метод Монте-Карло).

Метод Монте-Карло як метод розрахунку надійності систем докорінно відрізняється від усіх аналітичних методів. Застосування методики для вивчення систем передачі електроенергії було запропоновано ще в 1964 р [15].

У той час як у всіх інших методах процес роботи елемента або системи описується за допомогою деякої математичної моделі і необхідні показники надійності обчислюються на основі цієї моделі, в методі Монте-Карло на обчислювальній машині моделюється дійсний хід процесу і, після того як над цим процесом проведені досить тривалі спостереження, робляться оцінки необхідних показників надійності. Таким чином, в цьому методі моделювання розглядається як послідовність реальних експериментів. В ході цих «експериментів» відбуваються «події», причому відбуваються вони в моменти, які визначаються випадковими процесами з заданими розподілами ймовірностей.

У багатьох випадках переваги методу Монте-Карло, зокрема здатність правильно відобразити в ньому складні взаємозалежності і довільні тимчасові

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		35

функції розподілу подій, можуть послужити достатньою компенсацією за збільшену витрату машинного часу.

3.3 Структурно-логічний аналіз технічних систем

Вже на ранніх стадіях проектування важливо оцінити надійність об'єкта, виявити найбільш ненадійні вузли і деталі, визначити найбільш ефективні міри підвищення показників надійності. Рішення цих задач можливо після попереднього структурно-логічного аналізу системи.

Більшість технічних об'єктів, у тому числі пристроїв електропостачання залізниць, є складними системами, що складаються з окремих вузлів, деталей, пристроїв контролю, управління і т. д. Технічна система (ТС) – це сукупність технічних пристроїв (елементів), призначених для виконання визначеної функції або функцій. Відповідно елемент – складова частина системи.

Розчленовування ТС на елементи досить умовно і залежить від постановки задачі розрахунку надійності.

Визначаючи структуру ТС, в першу чергу необхідно оцінити вплив кожного елемента та його працездатності на працездатність системи в цілому. Із цієї позиції доцільно розділити всі елементи на чотири групи:

1. Елементи, відмова яких практично не впливає на працездатність системи (наприклад, деформація кожуха, знос пофарбованості поверхні і т. п.).

2. Елементи, працездатність яких за час експлуатації практично не змінюється та їхня імовірність безвідмовної роботи близька одиниці (корпусні деталі, елементи з великим запасом міцності).

3. Елементи, для яких можливо виконувати ремонт або відновлення ресурсу у разі роботи пристрою або під час планового технічного обслуговування.

4. Елементи, відмова яких сама по собі, або в сполученні з відмовами інших елементів приводить до відмови системи.

Для розрахунків параметрів надійності зручно використовувати структурно-логічні схеми надійності ТС, що графічно відображають взаємозв'язок елементів та їх вплив на працездатність системи в цілому. Структурно-логічна схема являє собою сукупність раніше виділених елементів, з'єднаних один з

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		36

одним послідовно, паралельно або змішано. Критерієм для визначення виду з'єднання елементів під час побудови схеми є вплив їхньої відмови на працездатність ТС.

Послідовним (з погляду надійності) вважається з'єднання, при якому відмова будь-якого елемента призводить до відмови всієї системи.

Паралельним (з погляду надійності) вважається з'єднання, при якому відмова будь-якого елемента не спричиняє відмову системи, поки не відмовлять усі з'єднані елементи.

Тут простежується аналогія з колом, складеним з провідних елементів (справний елемент пропускає струм, а той, що відмовив, – не пропускає): працездатному стані ТС відповідає можливість протікання струму від входу до виходу кола.

Прикладом послідовного з'єднання елементів структурно-логічної схеми може бути контактна мережа. У ній відмова кожного елемента (контактного проводу, несучого тросу, опори) призводить до відмови контактної мережі в цілому. Прикладом паралельного з'єднання елементів є, наприклад, з'єднання силових трансформаторів на тяговій підстанції.

Однак, не завжди структурна схема надійності аналогічна конструктивній або електричній схемі розташування елементів. Наприклад, підшипники на валу редуктора працюють конструктивно паралельно один з одним, однак вихід з ладу кожного з них призводить до відмови системи. Зазначені елементи з погляду надійності утворюють послідовне з'єднання.

Крім того, на структуру схеми надійності може впливати і вид виникаючих відмов. Наприклад, в електричних системах для підвищення надійності в ряді випадків застосовують паралельне або послідовне з'єднання комутаційних елементів. Відмова таких систем може відбуватися за двох умов: обриві (тобто неможливості замикання кола) і замикання (тобто неможливості розриву з'єднання). У випадку відмови типу «обрив» схема надійності відповідає електричній схемі системи (при «обриві» будь-якого комутатора у разі послідовного з'єднання виникає відмова, при паралельному – усі функції

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		37

управління буде виконувати справний комутатор). У випадку відмови типу «замикання» схема надійності протилежна електричній (при паралельному включенні втрається можливість відключення струму, а в послідовному загальна відмова не відбувається).

У цілому, аналіз структурної надійності ТС, як правило, включає такі операції:

1. Аналізуються пристрої і виконувані системою та її складовими частинами функції, а також взаємозв'язок складових частин.

2. Формується зміст поняття «безвідмовної роботи» для даної конкретної системи.

3. Визначаються можливі відмови складових частин і системи, їх причини і можливі наслідки.

4. Оцінюється вплив відмов складових частин системи на її працездатність.

5. Система розділяється на елементи, показники надійності яких відомі.

6. Складається структурно-логічна схема надійності технічної системи, що є моделлю її безвідмовної роботи.

7. Складаються розрахункові вирази для визначення показників надійності ТС із використанням даних надійності її елементів і з урахуванням структурної схеми.

В залежності від поставленої задачі, на підставі результатів розрахунку характеристик надійності ТС формулюються висновки і приймаються рішення про необхідність зміни або доробки елементної бази, резервування окремих елементів або вузлів, профілактичного обслуговування, про номенклатуру і кількість запасних елементів для ремонту і т. д [6].

Розрахунки структурної надійності систем

Розрахунки показників безвідмовності технічних систем (ТС) звичайно проводяться за припущення, що вся система і будь-який її елемент можуть бути тільки в одному з двох можливих станів – працездатному і непрацездатному, а відмова елементів системи – незалежні події. Стан системи визначається станом елементів та їх сполученням. Тому, теоретично розрахунок

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		38

безвідмовної роботи будь-якої ТС можливо звести до перебору всіх можливих комбінацій станів елементів, до визначення імовірності кожного з них і додавання ймовірностей працездатних станів системи.

Такий метод практично універсальний і може використовуватися при розрахунку будь-яких ТС. Однак, у разі великої кількості елементів системи n такий шлях стає нереальним через великий обсяг обчислень (наприклад, при $n=10$ число можливих станів системи складає $2^n = 1024$; при $n=20$ перевищує 10^6 , при $n=30$ – більш 10^9). Тому на практиці використовують більш ефективні та економічні методи розрахунку, не пов'язані з великим обсягом обчислень. Можливість застосування таких методів пов'язана зі структурою ТС [6].

Системи з послідовним з'єднанням елементів

Системою з послідовним з'єднанням елементів називається система, у якій відмова будь-якого елемента приводить до відмови всієї системи. Таке з'єднання елементів у техніці зустрічається найбільш часто, тому його називають основним з'єднанням.

У системі з послідовним з'єднанням для безвідмовної роботи під час деякого наробітку t необхідно і досить, щоб кожний з її n елементів працював безвідмовно. Вважаючи відмову елементів незалежною, імовірність одночасної безвідмовної роботи n елементів визначається за теоремою множення ймовірностей: імовірність спільної появи незалежних подій дорівнює добутку ймовірностей цих подій

$$P(t) = p_1(t)p_2(t)\dots p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - q_i(t))$$

Відповідно імовірність відмови такої ТС

$$Q = 1 - P = 1 - \prod_{i=1}^n p_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i).$$

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		39

Якщо система складається з рівно надійних елементів ($p_i = p$), то

$$P = p_i^n, \quad Q = 1 - (1 - q)^n.$$

Очевидно, що навіть за високої надійності елементів надійність системи у разі послідовного з'єднання тим нижча, чим більше число елементів (наприклад, при $p = 0,95$ і $n = 10$ маємо $P = 0,60$, при $n = 15$ $P = 0,46$, а при $n = 20$ $P = 0,36$). Крім того, оскільки всі співмножники в правій частині виразу не перевищують одиниці, імовірність безвідмовної роботи ТС за умови послідовного з'єднання не може бути вище імовірності безвідмовної роботи самого ненадійного з її елементів (принцип «гірше гіршого») і з малонадійних елементів не можна створити надійну ТС із послідовним з'єднанням.

Якщо всі елементи системи працюють у періоді нормальної експлуатації і має місце найпростіший потік відмов, наробіток на відмову елементів і системи підпорядковується експонентному розподілові і тоді можна записати

$$P = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) = \exp \left[- \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \right) t \right] = \exp(-\Lambda t),$$

$$\text{де, } \Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \text{const}$$

є інтенсивність відмов системи. Таким чином, інтенсивність відмов системи у разі послідовного з'єднання елементів і найпростішого потоку відмов дорівнює сумі інтенсивностей відмов елементів. За допомогою виразів, можуть бути визначені середній і γ – відсотковий наробіток.

Впливає, що для системи з n рівно надійних елементів ($\lambda_i = \lambda$)

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		40

$$\Lambda = n\lambda, \quad T_0 = \frac{T_{0i}}{n}.$$

Таким чином, інтенсивність відмов у n разів більша, а середній наробіток у n раз менший, ніж в одного елемента [6].

Системи з паралельним з'єднанням елементів

Системою з паралельним з'єднанням елементів називається система, відмова якої відбувається тільки у випадку відмови всіх її елементів. Такі схеми надійності характерні для ТС, у яких елементи дублюються або резервуються, тобто паралельне з'єднання використовується як метод підвищення надійності. Однак, такі системи зустрічаються і як самостійні (наприклад, паралельне включення діодів у силових випрямляючих пристроях).

Для відмови системи з паралельним з'єднанням елементів протягом наробітку t необхідно і досить, щоб усі її елементи відмовили протягом цього наробітку. Так що відмова системи полягає в спільній відмові всіх елементів, імовірність чого (за умови допущення незалежності відмов) може бути знайдена за теоремою множення ймовірностей, як добуток імовірностей відмови елементів

$$Q = q_1 q_2 \dots q_n = \prod_{i=1}^n q_i = \prod_{i=1}^n (1 - p_i).$$

Відповідно імовірність безвідмовної роботи

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i).$$

Для систем з рівнонадійних елементів ($p_i = p$)

$$Q = q^n, \quad P = 1 - (1 - p)^n,$$

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		41

Таким чином, надійність системи з паралельним з'єднанням підвищується із збільшенням числа елементів (наприклад, при $p = 0,9$ і $n = 2$ $P = 0,99$, а при $n = 3$ $P = 0,999$).

Оскільки $q_i < 1$, добуток у правій частині рівняння завжди менше кожного зі співмножників, тобто імовірність відмови системи може бути вище імовірності самого надійного її елемента («краще кращого») і навіть з порівняно ненадійних елементів можна побудувати цілком надійну систему.

При експонентному розподілі наробітку попередній вираз приймає вигляд

$$P = 1 - [1 - \exp(-\lambda t)]^n,$$

звідки, після інтегрування і перетворень середній наробіток системи визначається як

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} = T_{0i} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i},$$

де, $T_{0i} = 1/\lambda_i$ – середній наробіток елемента. У разі великих значень n справедлива наближена формула

$$T_0 = T_{0i} \left(\ln n + \frac{1}{2n} + 0,577 \right).$$

Таким чином, середній наробіток системи з паралельним з'єднанням більше середнього наробітку її елементів (наприклад, при $n = 2$ $T_0 = 1,5T_{0i}$; при $n = 3$ $T_0 = 1,83T_{0i}$) [6].

Системи типу «m із n»

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		42

Систему типу « m із n » можна розглядати як варіант системи з паралельним з'єднанням елементів, відмова якої відбудеться, якщо з n елементів, з'єднаних паралельно, працездатними виявляться менше m елементів ($m < n$).

На рис. 3.4 показана система «2 з 5», яка працездатна, якщо з п'яти її елементів працюють будь-які два, три, чотири або всі п'ять (на схемі пунктиром обведені функціонально необхідні два елементи, причому виділення елементів 1 і 2 зроблено умовно, у дійсності всі п'ять елементів рівнозначні).

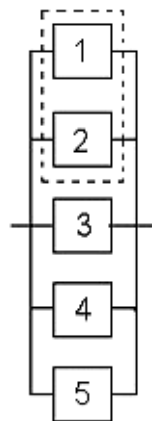


Рисунок 3.4 – Система «2 з 5»

Для розрахунку надійності систем типу « m із n » з порівняно невеликою кількістю елементів можна скористатися методом прямого перебору. Він полягає у визначенні працездатності кожного з можливих станів системи, що визначаються різними співвідношеннями працездатних і непрацездатних станів елементів.

Усі стани системи «2 з 5» занесено в табл. 3.1 (у таблиці працездатні стани елементів і системи відзначені знаком «+», непрацездатні – знаком «-»). Для даної системи працездатність визначається лише кількістю працездатних елементів. За теоремою множення ймовірностей, імовірність будь-якого стану визначається як добуток ймовірностей станів, у яких перебувають елементи. Наприклад, у рядку 9 описаний стан системи, у якій відмовили елементи 2 і 5, а інші працездатні. При цьому умова «2 з 5» виконується, так що система в

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		43

цілому працездатна. Імовірність такого стану $P_9 = p_1q_2p_3p_4q_5 = p^3q^2$ (передбачається, що всі елементи рівнонадійні). Імовірність безвідмовної роботи системи може бути знайдена за теоремою додавання ймовірностей усіх працездатних з'єднань. Оскільки в табл. 3.1 кількість непрацездатних станів менша, ніж працездатних, простіше обчислити імовірність відмови системи. Для цього додаються імовірності непрацездатних станів (де не виконується умова «2 з 5»)

Таблиця 3.1 – Таблиця станів системи «2 з 5»

№ стану	Стан елементів					Стан системи	Імовірність стану системи
	1	2	3	4	5		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	+	+	+	+	+	+	p^5
2	+	+	+	+	–	+	$p^4q^1 = p^4(1-p)$
3	+	+	+	–	+	+	
4	+	+	–	+	+	+	
5	+	–	+	+	+	+	
6	–	+	+	+	+	+	
7	+	+	+	–	–	+	$p^3q^2 = p^3(1-p)^2$
8	+	+	–	+	–	+	
9	+	–	+	+	–	+	
10	–	+	+	+	–	+	
11	+	+	–	–	+	+	
12	+	–	+	–	+	+	
13	–	+	+	–	+	+	
14	+	–	–	+	+	+	
15	–	+	–	+	+	+	
16	–	–	+	+	+	+	
17	+	+	–	–	–	+	$p^2q^3 = p^2(1-p)^3$
18	+	–	+	–	–	+	
19	–	+	+	–	–	+	

Продовження таблиці 3.1

№ стану	Стан елементів					Стан системи	Імовірність стану системи
	1	2	3	4	5		
20	+	–	–	–	+	+	
21	–	+	–	–	+	+	
22	–	–	–	+	+	+	
23	+	–	–	+	–	+	
24	–	+	–	+	–	+	
25	–	–	+	–	+	+	
26	–	–	+	+	–	+	
27	+	–	–	–	–	–	$p^1 q^4 = p^1 (1-p)^4$
28	–	+	–	–	–	–	
29	–	–	+	–	–	–	
30	–	–	–	+	–	–	
31	–	–	–	–	+	–	
32	–	–	–	–	–	–	$q^5 = (1-p)^5$

$$Q = P_{32} + P_{27} + P_{28} + P_{29} + P_{30} + P_{31} = q^5 + 5pq^4 = (1-p)^5 + 5p(1-p)^4 = 1 - 10p^2 + 20p^3 - 15p^4 + 4p^5.$$

Тоді імовірність безвідмовної роботи системи:

$$P = 1 - q = 10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5.$$

Розрахунок надійності системи « m із n » може проводитись комбінаторним методом, в основі якого лежить формула біноміального розподілу. Біноміальному розподілові підпорядковується дискретна випадкова величина k – число появ деякої події в серії з n дослідів, якщо в окремому досліді імовірність появи події складає p . При цьому імовірність появи події рівна k раз визначається

$$P_k = C_n^k p^k (1-p)^{n-k},$$

де C_n^k – біноміальний коефіцієнт, що називається «числом сполучень по k з n »,

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}.$$

Оскільки для відмови системи « m із n » досить, щоб кількість справних елементів була менше m , імовірність відмови може бути знайдена за теоремою додавання ймовірностей для $k = 0, 1, \dots, (m-1)$:

$$Q = \sum_{k=0}^{m-1} P_k = \sum_{k=0}^{m-1} C_n^k p^k (1-p)^{n-k}.$$

Аналогічно можна знайти імовірність безвідмовної роботи як суму для $k = m, m+1, \dots, n$:

$$P = \sum_{k=m}^n P_k = \sum_{k=m}^n C_n^k p^k (1-p)^{n-k}.$$

Очевидно, що $Q+P=1$, тому в розрахунках варто вибирати ту з формул, що у даному конкретному випадку містить менше доданків [6].

Для системи «2 з 5» одержимо:

$$P = C_5^2 p^2 (1-p)^3 + C_5^3 p^3 (1-p)^2 + C_5^4 p^4 (1-p) + C_5^5 p^5 = 10p^2(1-p)^3 + 10p^3(1-p)^2 + 5p^4(1-p) + p^5 = 10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5.$$

Імовірність відмови тієї ж системи:

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		46

$$Q = C_5^0(1-p)^5 + C_5^1p(1-p)^4 = (1-p)^5 + 5p(1-p)^4 = \\ = 1 - 10p^2 + 20p^3 - 15p^4 + 4p^5,$$

У табл. 3.2 наведені формули для розрахунку імовірності безвідмовної роботи систем типу « m із n » при $m \leq n \leq 5$. Очевидно, при $m=1$ система перетворюється в звичайну систему з паралельним з'єднанням елементів, а при $m = n$ – з послідовним з'єднанням.

Таблиця 3.2 – Формули для розрахунку імовірності безвідмовної роботи систем типу « m з n »

m	Загальне число елементів, n				
	1	2	3	4	5
1	p	$2p - p^2$	$3p - 3p^2 + p^3$	$4p - 6p^2 + 4p^3 - p^4$	$5p - 10p^2 + 10p^3 - 5p^4 + p^5$
2	–	p^2	$3p^2 - 2p^3$	$6p^2 - 8p^3 + 3p^4$	$10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5$
3	–	–	p^3	$4p^3 - 3p^4$	$10p^3 - 15p^4 + 6p^5$
4	–	–	–	p^4	$5p^4 - 4p^5$
5	–	–	–	–	p^5

Мостові схеми

Мостова структура (рис. 3.5, а, б) не зводиться до паралельного або послідовного типу з'єднання елементів, а являє собою паралельне з'єднання послідовних кіл елементів з діагональними елементами, включеними між вузлами різних паралельних відгалужень. Працездатність такої системи визначається не тільки кількістю елементів, що відмовили, але і їхнім положенням у структурній схемі.

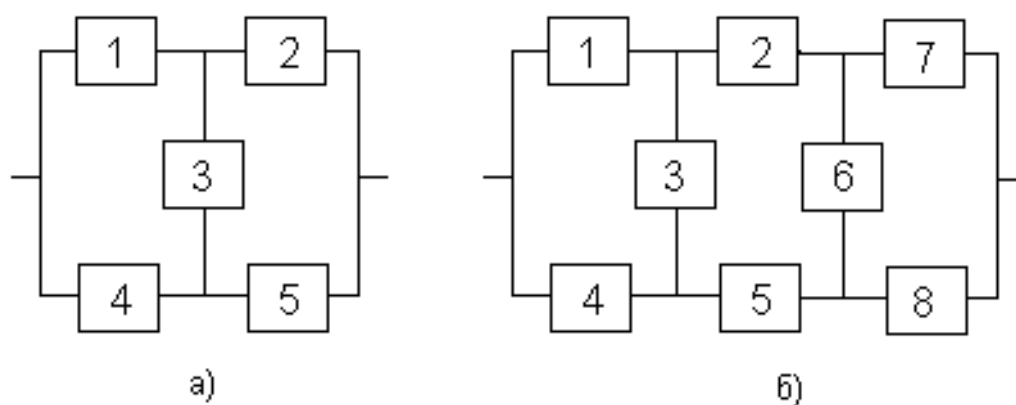


Рисунок 3.5 – Мостові схеми

Для розрахунку надійності мостових систем можна скористатися методом прямого перебору, як це було зроблено для систем « m із n », але аналізуючи працездатність кожного стану системи, необхідно враховувати не тільки кількість елементів, що відмовили, але і їх положення в схемі. Імовірність безвідмовної роботи системи визначається як сума ймовірностей усіх станів:

$$\begin{aligned}
 P = & p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 p_3 p_4 q_5 + p_1 p_2 p_3 q_4 p_5 + p_1 p_2 q_3 p_4 p_5 + \\
 & + p_1 q_2 p_3 p_4 p_5 + q_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 q_3 p_4 q_5 + p_1 q_2 p_3 p_4 q_5 + \\
 & + q_1 p_2 p_3 p_4 q_5 + p_1 p_2 q_3 q_4 p_5 + p_1 q_2 p_3 q_4 p_5 + q_1 p_2 p_3 q_4 p_5 + \\
 & + p_1 q_2 q_3 p_4 p_5 + q_1 p_2 q_3 p_4 p_5 + q_1 q_2 q_3 p_4 p_5 + p_1 q_2 q_3 p_4 q_5.
 \end{aligned}$$

У випадку рівнонадійних елементів

$$P = p^5 + 5p^4q + 8p^3q^2 + 2p^2q^3 = 2p^5 - 5p^4 + 2p^3 + 2p^2.$$

Метод прямого перебору ефективний тільки для малої кількості елементів n , оскільки число станів системи складає 2^n . Деяке спрощення досягається, якщо в таблицю станів включати тільки сполучення, що відповідають працездатному (або тільки непрацездатному) станів системи в цілому.

У ряді випадків аналізу надійності ТС можливо скористатися методом розкладання щодо особливого елемента, який засновано на відомій у математичній логіці теоремі про розкладання функції логіки за будь-яким аргументом.

$$P = p_i P(p_i = 1) + q_i P(p_i = 0),$$

де, p_i і $q_i = 1 - p_i$ – імовірності безвідмовної роботи і відмови i -го елемента,

$P(p_i = 1)$ і $P(p_i = 0)$ – імовірності працездатного стану системи за умови, що i -й елемент абсолютно надійний і що i -й елемент відмовив.

Для мостової схеми як особливий елемент доцільно вибрати діагональний елемент 3.

При $p_3 = 1$ мостова схема перетворюється в паралельно-послідовне з'єднання, а при $p_3 = 0$ – у послідовно-паралельне.

Для перетворених схем можна записати:

$$P(p_3 = 1) = [1 - (1 - p_3)(1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_4)(1 - p_5)],$$

$$P(p_3 = 0) = 1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5).$$

Тоді на підставі попередньої формули одержимо:

$$P = p_3 [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_4)(1 - p_5)] + (1 - p_3) [1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5)].$$

Таблиця 3.3 – Таблиця станів мостової системи

Номер стану	Стан елементів					Стан системи	Імовірність стану	
	1	2	3	4	5		у загальному випадку	у разі рівнонадійних елементів
1	+	+	+	+	+	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	p^5
2	+	+	+	+	-	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 q_5$	$p^4 q = p^4 (1 - p)$
3	+	+	+	-	+	+	$p_1 p_2 p_3 q_4 p_5$	
4	+	+	-	+	+	+	$p_1 p_2 q_3 p_4 p_5$	
5	+	-	+	+	+	+	$p_1 q_2 p_3 p_4 p_5$	
6	-	+	+	+	+	+	$q_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
7	+	+	+	-	-	-	$p_1 p_2 p_3 q_4 q_5$	$p^3 q^2 = p^3 (1 - p)^2$
8	+	+	-	+	-	+	$p_1 p_2 q_3 p_4 q_5$	
9	+	-	+	+	-	+	$p_1 q_2 p_3 p_4 q_5$	
10	-	+	+	+	-	+	$q_1 p_2 p_3 p_4 q_5$	
11	+	+	-	-	+	+	$p_1 p_2 q_3 q_4 p_5$	
12	+	-	+	-	+	+	$p_1 q_2 p_3 q_4 p_5$	
13	-	+	+	-	+	+	$q_1 p_2 p_3 q_4 p_5$	
14	+	-	-	+	+	+	$p_1 q_2 q_3 p_4 p_5$	
15	-	+	-	+	+	+	$q_1 p_2 q_3 p_4 p_5$	
16	-	-	+	+	+	-	$q_1 q_2 p_3 p_4 p_5$	
17	+	+	-	-	-	-	$p_1 p_2 q_3 q_4 q_5$	$p^2 q^3 = p^2 (1 - p)^3$
18	+	-	+	-	-	-	$p_1 q_2 p_3 q_4 q_5$	
19	-	+	+	-	-	-	$q_1 p_2 p_3 q_4 q_5$	
20	+	-	-	-	+	-	$p_1 q_2 q_3 q_4 p_5$	
21	-	+	-	-	+	+	$q_1 p_2 q_3 q_4 p_5$	
22	-	-	-	+	+	-	$q_1 q_2 q_3 p_4 p_5$	
23	+	-	-	+	-	+	$p_1 q_2 q_3 p_4 p_5$	
24	-	+	-	+	-	-	$q_1 p_2 q_3 p_4 q_5$	
25	-	-	+	-	+	-	$q_1 q_2 p_3 q_4 p_5$	
26	-	-	+	+	-	-	$q_1 q_2 p_3 p_4 q_5$	
27	+	-	-	-	-	-	$p_1 q_2 q_3 q_4 q_5$	$p q^4 = p (1 - p)^4$
28	-	+	-	-	-	-	$q_1 p_2 q_3 q_4 q_5$	

Продовження таблиці 3.3

Номер стану	Стан елементів					Стан системи	Імовірність стану	
	1	2	3	4	5		у загальному випадку	у разі рівнонадійних елементів
29	–	–	+	–	–	–	$q_1q_2p_3q_4q_5$	
30	–	–	–	+	–	–	$q_1q_2q_3p_4q_5$	
31	–	–	–	–	+	–	$q_1q_2q_3q_4p_5$	
32	–	–	–	–	–	–	$q_1q_2q_3q_4q_5$	$q^5 = (1 - p)^5$

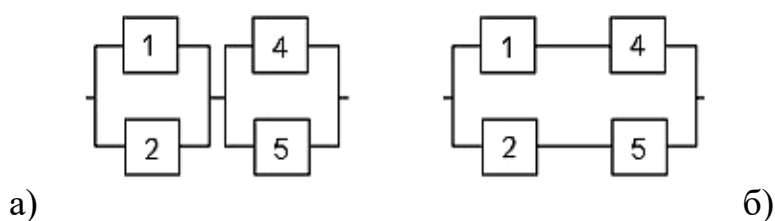


Рисунок 3.6 – Перетворення мостової схеми за умови абсолютно надійного особливого елемента (а) та відмови особливого елемента (б)

Цим методом можна скористатися і при розкладанні щодо декількох «особливих» елементів. Наприклад, для двох елементів (i, j)

$$P = p_i p_j P(p_i = 1, p_j = 1) + p_i q_j P(p_i = 1, p_j = 0) + q_i p_j P(p_i = 0, p_j = 1) + q_i q_j P(p_i = 0, p_j = 0).$$

Імовірність безвідмовної роботи мостової схеми у разі розкладання щодо діагональних елементів 3 і 6 визначиться як

$$P = p_3 p_6 P(p_3 = 1, p_6 = 1) + p_3 q_6 P(p_3 = 1, p_6 = 0) + q_3 p_6 P(p_3 = 0, p_6 = 1) + q_3 q_6 P(p_3 = 0, p_6 = 0).$$

Імовірності $P(p_3 p_6)$ легко обчислити, виконавши попередні перетворення схем [15].

3.4 Математична модель

Оцінити надійність схемних рішень розподільчих пристроїв живлячої напруги для тягових підстанцій на відпайках практично неможливо за допомогою загальної аналітичної моделі. З огляду на вищесказане, зробимо це за допомогою теорії графів [14-16].

Будь-яку електричну систему можна представити у вигляді структурної схеми надійності, на якій обладнання замінюють елементом з певними параметрами надійності. У свою чергу, структурну схему надійності можна співставити графу, в якому один або декілька послідовно з'єднаних елементів представлені ребрами графа ($e_{12} \dots e_{mv}$), а вузли схеми – вершинами графа ($1 \dots M$) (рис. 3.7).

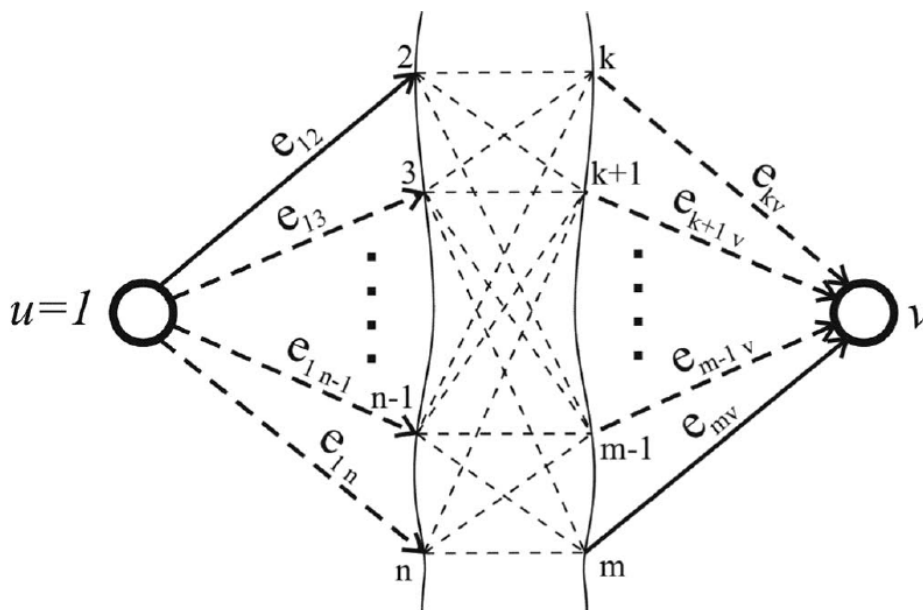


Рисунок 3.7 – Граф системи

Для аналізу досліджуваних систем скористаємося теорією шляхів і перетинів.

Введемо поняття структурної функції ϕ , яка характеризує систему і визначається з виразу

$$\varphi = \begin{cases} 1, & \text{якщо система працездатна,} \\ 0, & \text{якщо система відмовила.} \end{cases}$$

Будь-який вектор стану $\vec{z} = \{z_i\}$ називається вектором шляху, якщо $\varphi(\vec{z}) = 1$ Причому

$$z_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо елемент працездатний,} \\ 0, & \text{якщо елемент відмовив.} \end{cases}$$

Наявність хоча б одного робочого вектора шляху у всій системі рівнозначно задається структурною функцією φ .

Вектор шляху $\vec{z}$ називається мінімальним, якщо для всіх $\vec{y}$, що відповідають умові $\vec{y} < \vec{z}$, виконується рівність $\varphi(\vec{y}) = 0$. Домовимося, що $\vec{y} < \vec{z}$, якщо $y_i \leq z_i$, $i = \{1, 2, \dots, n\}$ та $y_j < z_j$ принаймні для одного j з множини $\{1, 2, \dots, n\}$. Мініальному вектору шляху відповідає мінімальна множина елементів шляху. Тобто функціонування елементів, що належать до мінімальної множини елементів шляху, забезпечує працездатність системи. Якщо відмовить принаймні один елемент в кожній з цих множин, то відмовить вся система.

Кожному вектору шляху $\vec{z}$ поставимо у відповідність множину тих k -х елементів, для яких $z_k = 1$, тобто $M(\vec{z}) = \{k : z_k = 1\}$. Множина елементів шляху $M(\vec{z})$ характеризує ті елементи, які працездатні.

Для подальших міркувань скористаємося теорією графів. Припустимо, що для структурної схеми надійності, отриманої по довільній електричній системі, складений спрямований граф $G = \langle V; E; p \rangle$, де V – множина вершин графа G (зазвичай занумерованих натуральними числами); $E = \{e_{ij}\}$ – множина ребер графа G ; p – параметр, який присвоюється кожному ребру $E_{ij} \in E$, що з'єднує вершини i та j , як деяке невід'ємне число. Виділимо дві вершини (рис. 3.7): вхідну u і вихідну v . Очевидно, що система працездатна тоді і тільки тоді, коли

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		53

в графі існує принаймні один шлях від вершини u до вершини v , що містить лише ребра працездатних елементів.

Зробимо припущення, які зазвичай приймаються при подібному аналізі:

1. Всі вершини графа абсолютно надійні.
2. Ребра знаходяться або в «працездатному», або в «непрацездатному» стані.
3. Стани ребер є взаємно незалежними випадковими величинами.
4. Досліджувані системи суть спрямовані p -графи.

Граф називається p -графом щодо вершин u і v , якщо:

- а) кожне ребро міститься принаймні в одному шляху з вузла u у вузол v ;
- б) база (антибаза) складається тільки з вузла u (v).

Для отримання мінімальних шляхів можна скористатися способом потенціонування матриці інцидентності ребер, а також за допомогою зниження рангу матриці інцидентності ребер або методом визначників.

Розглянемо отримання мінімальних шляхів способом потенціонування матриці інцидентності ребер.

Якщо кожен елемент в матриці інцидентності $R = ((K_{ij}))$ замінити символом відповідного ребра e_{km} , то отримаємо матрицю інцидентності ребер

$$R = ((K_{ij})) = \begin{cases} e_{km}, & \text{якщо ребро } e_{km} \text{ існує,} \\ 0, & \text{якщо ребро } e_{km} \text{ не існує.} \end{cases}$$

Матриця $R^{(r)}$ має наступну важливу властивість: доданки, з яких складається елемент $K_{ij}^{(r)}$, взаємно однозначно відповідають шляхам довжини r з вузла i у вузол j .

Матриця $R^{(r)} = ((K_{ij}^{(r)}))$ отримується в результаті $(r - 1)$ – кратного множення матриці R самої на себе, причому з елементами e_{km} формально обходяться як з числами. Очевидно, що $R^{(r)} = R$.

Знаючи мінімальні шляхи для системи, можна обчислити вірогідність повної парної зв'язності (ймовірність безвідмовної роботи системи),

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		54

застосовуючи метод включення-виключення.

$$P(u, v) = \sum_i P(A_i) - \sum_{i \leq j} P(A_i \cap A_j) + \sum_{i \leq j \leq k} P(A_i \cap A_j \cap A_k) - \dots \\ \dots + (-1)^{w-1} P(A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_w)$$

де індекси підсумовування $i, j, k, \dots$, задовольняючи зазначеним обмеженням, набувають значень від 1 до w . Випадкова подія A рівносильна існуванню принаймні одного справного шляху від вузла u до вузла v .

На основі вищесказаного можна побудувати математичну модель визначення параметрів надійності складних електричних систем.

Застосуємо дану методику для визначення імовірності безвідмовної роботи розподільчого пристрою підстанції на відпайках, схема якого зображена на рис. 3.8.

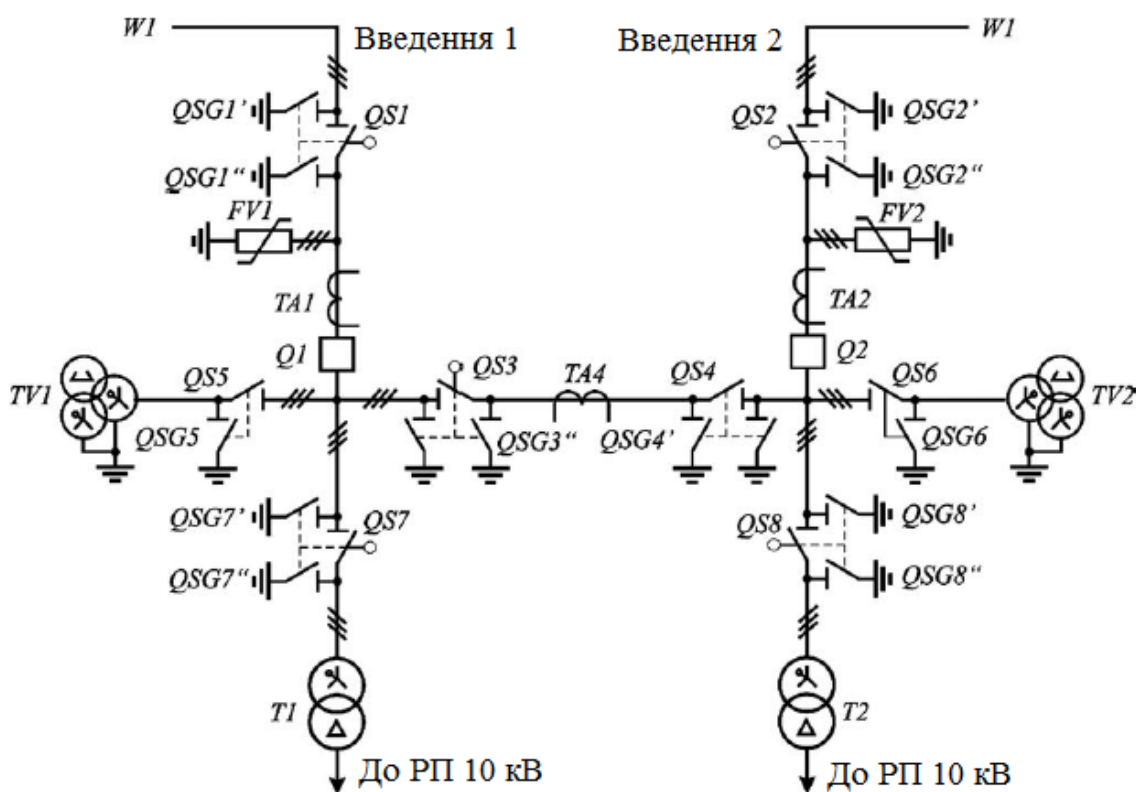


Рисунок 3.8 – Однолінійна схема розподільчого пристрою вводу підстанції на відпайках

Електропостачання споживачів по рис. 3.2 здійснюється від вводів при

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		55

замкнутій перемичці за двома трансформаторам. Складемо структурну схему надійності, що відповідає схемі на рис. 3.2, за умови, що врахована надійність тільки комутаційного обладнання. Решту обладнання вважатимемо абсолютно надійним. Розглянемо відмова типу «електричний обрив», а значить, схема відповідає колу з послідовним з'єднанням електротехнічного обладнання. Результати перетворень представлені на рис. 3.9.

Перетворимо структурну схему надійності (рис. 3.9) в p -граф щодо вузлів $u=1$ і $v=4$ і покажемо його на рис. 3.10.

Визначимо мінімальні шляхи способом потенціонування матриці інцидентності ребер.

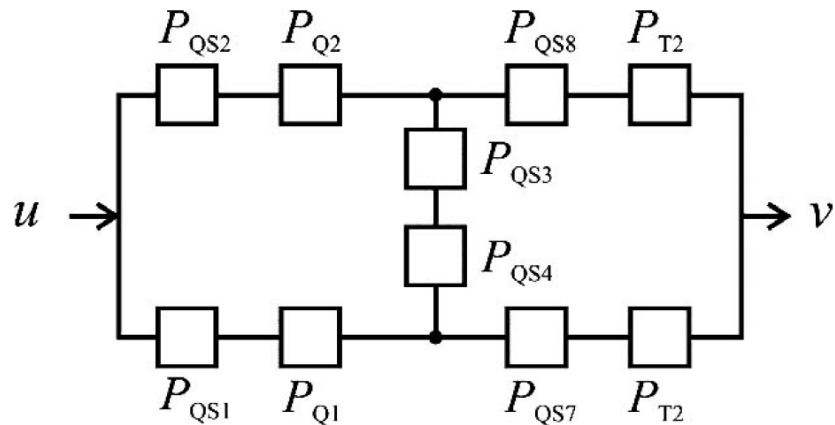


Рисунок 3.9 – Структурна схема надійності розподільчого пристрою вводу підстанції на відпайках

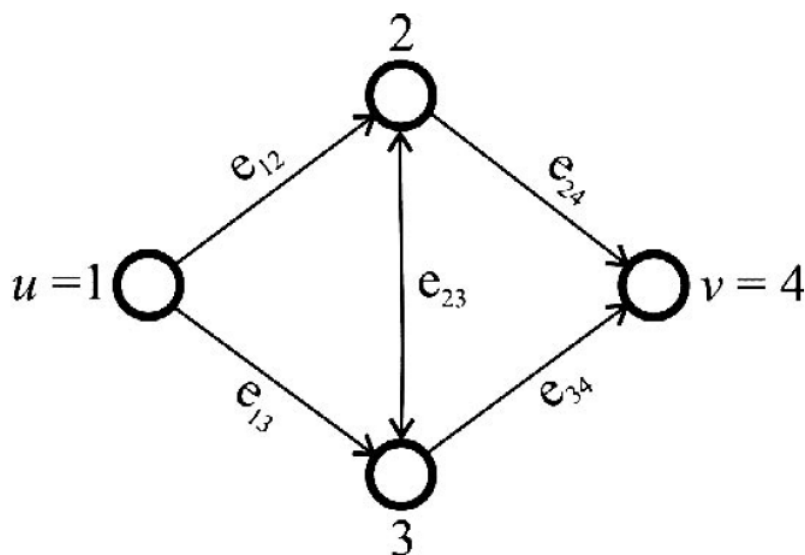


Рисунок 3.10 – Граф розподільчого пристрою вводу підстанції на відпайках

$$R = \begin{pmatrix} 0 & e_{12} & e_{13} & 0 \\ 0 & 0 & e_{23} & e_{24} \\ 0 & e_{23} & 0 & e_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Матриці $R^{(2)}$ та $R^{(3)}$ мають наступний вигляд:

$$R^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & e_{13}e_{23} & e_{12}e_{23} & e_{12}e_{24} + e_{13}e_{34} \\ 0 & 0 & 0 & e_{23}e_{34} \\ 0 & 0 & 0 & e_{23}e_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$R^{(3)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & e_{12}e_{23}e_{34} + e_{13}e_{23}e_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Оскільки $K_{14}^{(2)} = e_{12}e_{24} + e_{13}e_{34}$ та $K_{14}^{(3)} = e_{12}e_{23}e_{34} + e_{13}e_{23}e_{24}$, то маємо по два мінімальних шляхи довжини 2 та 3 від вузла $u=1$ та $v=4$:

$$M_1 = (e_{12}e_{24}),$$

$$M_2 = (e_{13}e_{34}),$$

$$M_3 = (e_{12}e_{23}e_{34}),$$

$$M_4 = (e_{13}e_{23}e_{24}).$$

Розв'язуючи сумісно два останні вирази отримаємо

$$\begin{aligned}
P(1,4) = & P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) + P(A_4) - P(A_1 \cap A_2) - P(A_1 \cap A_3) - \dots \\
& \dots - P(A_1 \cap A_4) - P(A_2 \cap A_3) - P(A_2 \cap A_4) - P(A_3 \cap A_4) + \dots \\
& \dots + P(A_1 \cap A_2 \cap A_3) + P(A_1 \cap A_2 \cap A_4) + P(A_1 \cap A_3 \cap A_4) + \dots \\
& \dots + P(A_2 \cap A_3 \cap A_4) - P(A_1 \cap A_2 \cap A_3 \cap A_4)
\end{aligned}$$

Графічне пояснення останньої формули показано у вигляді діаграми напіврешітки перетинів на рис. 3.5

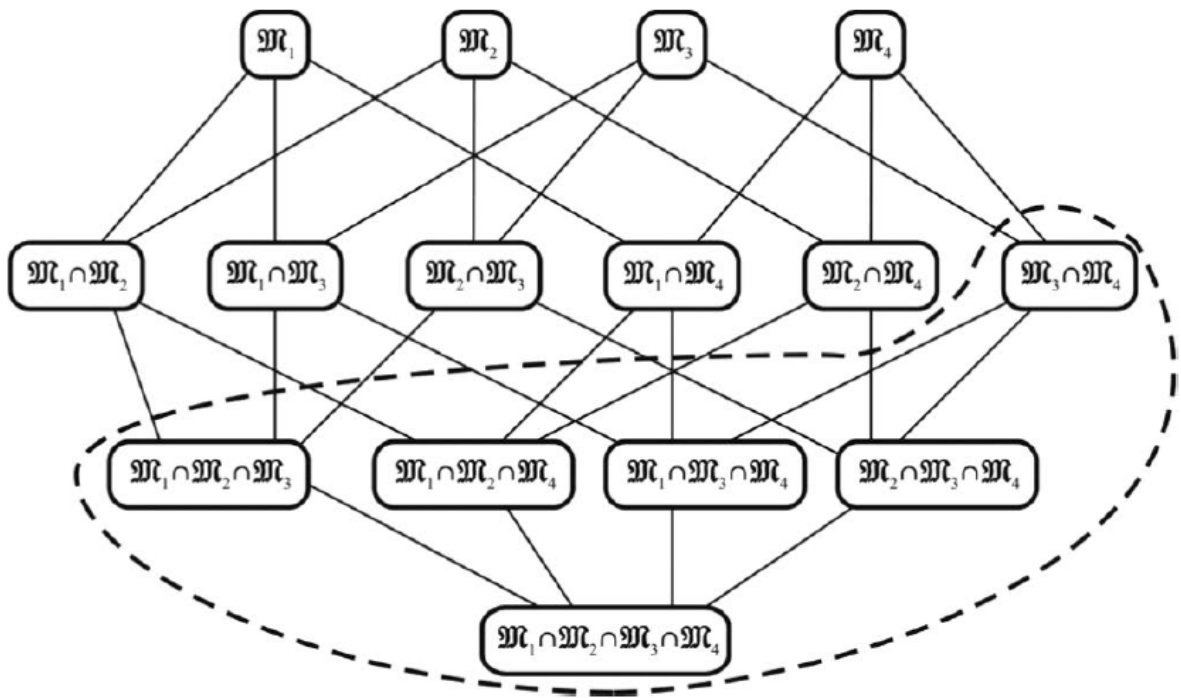


Рисунок 3.11 – Діаграми напіврешітки перетинів

Припустимо, що $P[e_{ij}] = p_n$. Тоді вирішуючи сумісно два останніх вирази, визначимо вірогідність безвідмовної роботи системи.

$$\begin{aligned}
P_c = & p_1 p_4 + p_2 p_5 + p_1 p_3 p_5 + p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_4 p_5 - p_1 p_3 p_4 p_5 - \dots \\
& \dots - p_1 p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_5 - p_2 p_3 p_4 p_5 - \underline{p_1 p_2 p_3 p_4 p_5} + \underline{p_1 p_2 p_3 p_4 p_5} + \dots \\
& \dots + \underline{p_1 p_2 p_3 p_4 p_5} + \underline{p_1 p_2 p_3 p_4 p_5} + \underline{p_1 p_2 p_3 p_4 p_5} - \underline{p_1 p_2 p_3 p_4 p_5} = \dots \\
& \dots = p_1 p_4 + p_2 p_5 + p_1 p_3 p_5 + p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_4 p_5 - p_1 p_3 p_4 p_5 - \dots \\
& \dots - p_1 p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_5 - p_2 p_3 p_4 p_5 + 2 p_1 p_2 p_3 p_4 p_5
\end{aligned}$$

Рівняння містить 15 доданків, проте з виразу видно, що після скорочення їх залишається тільки 10.

Дана операція спрощення називається гомоморфізмом, внаслідок якої область, показана на рис. 3.5 пунктирною лінією, об'єднується в один стан.

Зробимо припущення, що на розглянутій підстанції встановлено однотипне комутаційне обладнання. Тоді, опираючись на рис. 3.10 та рис. 3.11, отримуємо наступні рівності: $p_1 = p_2$ і $p_4 = p_5$. З урахуванням отриманих рівностей запишемо вираз наступним чином

$$P_c = 2p_1p_4 + 2p_1p_3p_4 - p_1^2p_4^2 - 2p_1p_3p_4^2 - 2p_1^2p_3p_4 + 2p_1^2p_3p_4^2$$

Для кількісної оцінки задамося рівнями надійності всіх елементів, що приймають участь в розрахунках:

$$P_{QS} = 0,9767,$$

$$P_Q = 0,9665,$$

$$P_T = 0,86.$$

Зазначимо, що

$$p_1 = P_{QS} \cdot P_Q,$$

$$p_3 = P_{QS} \cdot P_{QS},$$

$$p_4 = P_{QS} \cdot P_T.$$

Перетворимо формулу з урахуванням рівностей, що записані вище

$$P_c = 2P_{QS}^2 \cdot P_Q \cdot P_T + 2P_{QS}^4 \cdot P_Q \cdot P_T - P_{QS}^4 \cdot P_Q^2 \cdot P_T^2 - 2P_{QS}^5 \cdot P_Q \cdot P_T^2 - \dots \\ \dots - 2P_{QS}^5 \cdot P_Q^2 \cdot P_T + 2P_{QS}^6 \cdot P_Q^2 \cdot P_T^2$$

Після підстановки цифрових даних, в, отримуємо значення $P_C = 0,9706$.

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		59

3.5 Визначення ступеню зміни надійності при заміні обладнання ТП

Оцінимо ступінь зміни надійності при заміні того чи іншого типу електротехнічного обладнання в РП живлячої напруги типових схем. При цьому будемо вважати, що заміні підлягають всі елементи одного і того ж типу, а інші апарати залишаються незмінними.

Розрахунок надійності будемо проводити для чотирьох варіантів:

- 1) установка тільки обмежувачів перенапруг натомість розрядників;
- 2) установка тільки сучасних роз'єднувачів замість застарілих;
- 3) установка тільки елегазових вимикачів замість масляних;
- 4) одночасна заміна всіх вище перерахованих апаратів.

Здамося наступними припущеннями:

1. Параметр потоку відмов основного електротехнічного обладнання являє собою усереднене значення параметрів.

2. В даному часовому інтервалі етап підробітки закінчено, а етап старіння ще не почався. Тому можна прийняти параметр потоку відмов постійним.

3. Закон розподілу – експонентний, що найближче до дійсності для великих і складних систем. Так як основна його властивість полягає в тому, що ймовірність безвідмовної роботи не залежить від тривалості попередньої роботи, а залежить тільки від тривалості аналізованого інтервалу часу, то і майбутня поведінка об'єкта не залежить від минулого, якщо в даний момент він працездатний, а значить потік відмов – найпростіший.

Виконаємо розрахунок ступеня зміни надійності при заміні того чи іншого типу електротехнічного обладнання в РП живлячої напруги типових схем ТП (табл 3.4).

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку зміни надійності електропостачання ТП

Показник	Варіанти заміни обладнання				
	Все старе	ОПНи	Роз'єднувачі	Елегазові вимикачі	Все сучасне
P_c	0,8834	0,9088	0,8873	0,9575	0,9767

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		60

Результати розрахунків зміни ймовірності безвідмовної роботи представлено на рис. 3.12.

З рисунка 3.12 видно, що перехід на сучасне обладнання дозволяє підвищити показники надійності майже на 10%. З них заміна вимикачів дозволяє підвищити надійність електропостачання споживачів на 8,39%, а заміна розрядників на ОПН – 2,9%. При цьому заміна роз'єднувачів практично не призводить до зміни надійності.

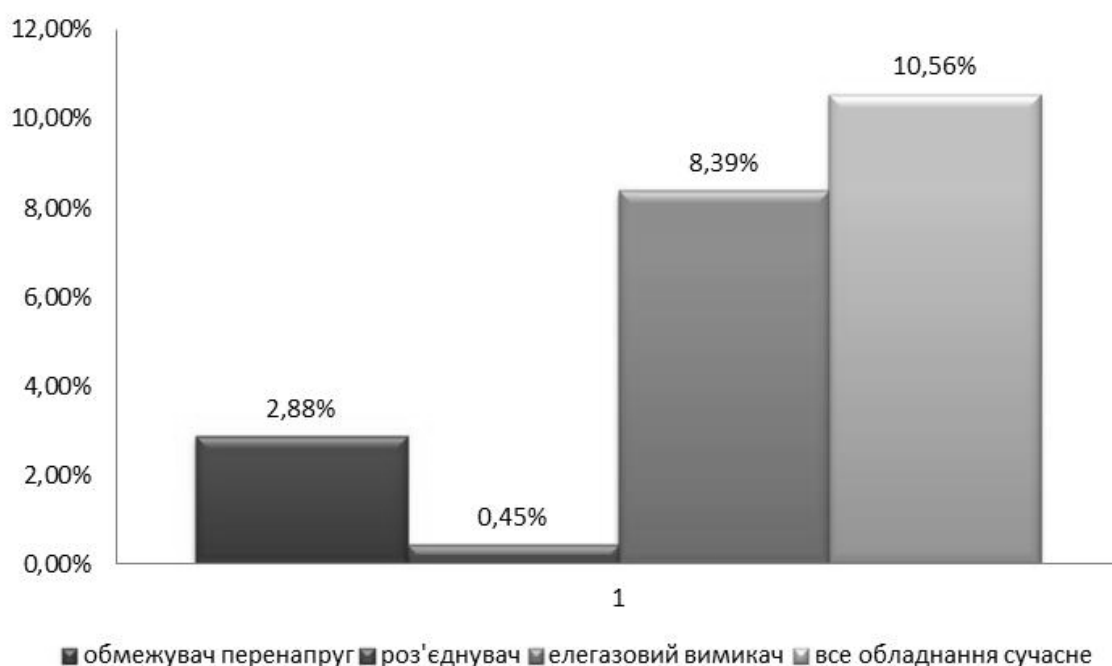


Рисунок 3.12 – Результати розрахунків зміни ймовірності безвідмовної роботи

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В магістерській роботі були поставлені задачі дослідження, розглянуті та описані існуючі та перспективні схемні рішення ТП, проведений аналіз показників надійності прийнятої схеми.

Використані такі методи дослідження, як математичний апарат теорії надійності та теорії графів.

Описані методи розрахунку показників надійності. Досліджені нові схемні рішення розподільчих пристроїв живлячої напруги для тягових підстанцій. Проведений аналіз дозволив зробити наступні висновки:

1. Проаналізовані варіанти виконання однолінійної схеми для тягової підстанції. Кожна з представлених схем має свої переваги та недоліки. Рішення про використання тієї чи іншої схеми повинно прийматись після техніко-економічного розрахунку та визначення надійності схеми.
2. Виконане порівняння параметрів надійності запропонованих схем розподільних пристроїв живлячої напруги для тягових підстанцій на відпайках показало, що їх показники надійності не нижче показників типових схем. Так при реалізації запропонованих схем на сучасному окремому обладнанні, в порівнянні з типовими схемами, ймовірність відмови зменшується в 2,13 рази. Це підтверджує зроблене раніше припущення про те, що деяке спрощення складних електричних схем, при підвищенні надійності їх окремих елементів, не призводить до зниження, а в більшості випадків веде до збільшення показників надійності всієї системи в цілому. Реалізація запропонованих схем на інтегральному силовому обладнанні зменшує ймовірність відмови в порівнянні зі схемами на окремому обладнанні в 2,61 рази.

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		62

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Тягові підстанції електрифікованих залізниць: навч. посіб. / Т.І. Друбецька, А.М. Бойко. Київ: ФОП Піча Ю.В, 2022. – 338 с.
2. Рішення АББ для розподільчих мереж. Каталог. АББ, 2012. – 108 с.
3. Реконструкція підстанцій. Світові тенденції., Ю.М. Бондаренко, В.М. Гомонай. URL: <https://cigre.org.ua/wp-content/uploads/2021/02/Реконструкція-підстанцій.-Світові-тенденції.pdf> (дата звернення: 09.10.2023).
4. Сухі трансформатори. EcoDry: надефективний трансформатор сухого типу. Скорочує витрати за мінімальної дії на довкілля. Каталог. Технічна інформація. АББ. 1LDE000076 rus Видання, 2015. – 8 с.
5. Шумаков К.Г. Удосконалення схемних рішень розподільчих пристроїв напруги живлення тягових підстанцій: дис. ... канд. тех. наук: 05.22.07.Єкатеринбург, 2012. 163с.
6. Надійність і діагностика пристроїв тягового електропостачання: Навч. посібник / В. Г. Кузнецов, О. Г. Галкін, О. В. Єфімов, О. О. Матусевич. - Дніпропетровськ : Маковецкий, – 2009. – 248 с.
7. Каталог. Високовольтний компактний розподільчий пристрій 3AP1 DTS для напруги 145 кВ. Siemens – 2001. – 8 с.
8. Каталог. PASS M0 Елегазові комірки серії ПАСС M0 для сучасних підстанцій на класи напруги 110 та 150 кВ. АББ. – 2001. – 18 с.
9. Каталог. Стаціонарні РП з силовими вимикачами, тип 8DA / 8DB до 40,5 кВ, з елегазовою ізоляцією. Siemens – 2010. – 64 с.
10. Кириленко О.В. Математичне моделювання в електроенергетиці: Підручник / О.В. Кириленко, М.С. Сегеда, О.Ф. Буткевич, Т.А. Мазур. - Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. – 608 с.
11. Математичні задачі електроенергетики/ В.С. Перхач, Вид. 3, прероб. та допов. – Львів: Вища школа, Вид-во при Львов. ун-ті, 1989 - 464 с.
12. Основи технічної експлуатації енергетичного обладнання АПК.:

					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		63

Підручник для студентів ВНЗ. / Лут М.Т., Мірошник О.В., Трунова І.М. – Харків: Факт, 2008. - 438 с. ISBN 978-966-637-575-2

13. Експлуатація електроустановок: Навч. посібник / Г.Г. Півняк, А.В. Журахівський, Г.А. Кігель, Б.М. Кінаш, А.Я. Рибалко, Ф.П. Шкрабець, З.М. Бахор: За ред. академіка НАН України Г.Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2005. – 445 с.

14. Посібник з вивчення Правил технічної експлуатації електричних станцій і мереж. Електротехнічне устаткування електричних станцій та мереж, оперативно-диспетчерське керування / Баженов О.Г. та інші. – К.: ДП НТУКЦ «Аселенерго», 2004. – 800 с.

15. Болтянська Н.І. Надійність технологічних систем : посібник-практикум / Н.І. Болтянська. – Мелітополь: Люкс, 2019. – 162 с.

16. Кустов В.Ф. Основи теорії надійності та функційної безпечності систем залізничної автоматики: навчальний посібник / В.Ф. Кустов. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. - 218 с.



					02.15.EE2221.KPM.2023.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		64