

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи магістра
зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
освітньо-професійна програма
«Системи електропостачання промислових підприємств, міст та локальних
об'єктів»

На тему: «ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ СХЕМ РОЗПОДІЛЬНИХ
ПРИСТРОЇВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПІДСТАНЦІЙ 330 КВ»

КНУ.МР.141.24.779с-10

Здобувач
групи СЕП-23м

/підпис/

Олександр РИБА

/ ім'я, прізвище /

Завідувач кафедри:
д.т.н., проф.

/підпис/

Олег СІНЧУК

/ ім'я, прізвище /

Керівник:
к.т.н., доц.

/підпис/

Олексій МИХАЙЛЕНКО

/ ім'я, прізвище /

Гарант ОП:
к.т.н., доц.

/підпис/

Олексій МИХАЙЛЕНКО

/ ім'я, прізвище /

Кривий Ріг – 2024

АНОТАЦІЯ

Об'єктом дослідження є процеси електропостачання на високовольтних підстанціях енергосистем.

Предметом дослідження є методи аналізу надійності схем розподільних пристроїв підстанцій 330 кВ.

Мета роботи полягає в оцінці надійності основних схем розподільних пристроїв високої напруги – полуторної схеми та схеми зі здвоєним вимикачем на приєднання з використанням аналізу дерева відмов, а також розробка рекомендацій щодо оцінки надійності схем вимикачів на підстанціях.

У розділі 1 представлено типові схеми розподільних пристроїв високої напруги з приділенням головної уваги полуторній схемі та схемі зі здвоєним вимикачем на приєднання. Описано нюанси їх роботи, переваги та недоліки.

У розділі 2 на базі аналізу дерева несправностей з використанням програм TopEvent FTA та GRIF TREE дано детальну оцінку надійності полуторної схеми та схеми зі здвоєним вимикачем на приєднання. Змодельовані дерева несправностей показали, що обидві схеми мають близькі показники надійності одна до одної. З точки зору витрат, полуторна схема коштує дешевше, вона потребує шість вимикачів, тоді як схема зі здвоєними вимикачами – вісім.

У розділі 3 розглядаються розширений аналіз надійності схем високовольтних розподільних пристроїв, а саме з врахування відмов з загальних причин, перевірка невизначеності, важливості та чутливості обох схем включення вимикачів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: розподільний пристрій, полуторна схема, схема зі здвоєним вимикачем на приєднання, надійність, моделювання.

ЗМІСТ

Анотація	2
Вступ.....	5
Розділ 1. Загальні відомості про аналіз надійності схем розподільних пристроїв високої напруги	6
1.1 Загальні відомості про автоматичні вимикачі для розподільних пристроїв високої напруги	6
1.1.1 Принципи функціонування високовольтних вимикачів	6
1.1.2 Сучасні високовольтні комутаційні пристрої	9
1.1.3 Типи відмов високовольтних вимикачів.....	11
1.2 Типи схем розподільних пристроїв	12
1.2.1 Полуторна схема розподільного пристрою	13
1.2.2 Схема розподільного пристрою з двома системами збірних шин і двома вимикачами на приєднання	16
1.2.3 Інші типи схем розподільних пристроїв	18
1.3 Вибір методу дослідження надійності схем розподільних пристроїв підстанцій.....	20
1.4 Загальні дані про метод дерева несправностей	22
1.4.1 Дерево несправностей з одним логічним блоком «І».....	25
1.4.2 Дерево несправностей з одним логічним блоком «АБО»	25
Висновки до розділу 1	26
Розділ 2. Модельний аналіз надійності схем розподільних пристроїв електричних підстанцій 330 кв	28
2.1 Програмні інструменти для моделювання надійності схем розподільних пристроїв.....	28
2.1.1 TopEvent FTA.....	28
2.1.2 GRIF TREE	29
2.2 Типові дані щодо надійності вимикачів.....	30
2.3 Валідація програмного забезпечення	31
2.4 Моделювання надійності схем розподільних пристроїв	34
2.4.1 Полуторна схема розподільного пристрою	34
2.4.2 Техніка моделювання.....	35

2.4.3	Аналіз дерева несправностей для спрощеної полуторної схеми розподільного пристрою	38
2.4.4	Полуторна схема розподільного пристрою з роз'єднувачами	50
2.5	Схема розподільного пристрою зі здвоєними вимикачами	52
2.5.1	Аналіз дерева несправностей для простої схеми зі здвоєним вимикачем на приєднання.....	52
2.6	Порівняння модельних даних з різних програмних продуктів.....	62
	Висновок до розділу 2	64
Розділ 3. Розширене моделювання надійності схем включення розподільних пристроїв		65
3.1	Полуторна схема розподільного пристрою	65
3.1.1	Поширені причини збоїв	65
3.1.2	Аналіз невизначеності	67
3.1.3	Аналіз важливості та чутливості	71
3.2	Схема зі здвоєним вимикачем на приєднання.....	75
3.2.1	Поширені причини збоїв	75
3.2.2	Аналіз важливості та чутливості	76
	Висновки до розділу 3	79
	Висновки	80

ВСТУП

Дослідження надійності схем розподільних пристроїв високої напруги є надзвичайно актуальним у сучасному світі, де електроенергія є одним з найважливіших ресурсів. Від безперебійної роботи цих пристроїв залежить стабільність енергопостачання промислових підприємств, житлових масивів та інших споживачів. Аварії на розподільних пристроях призводять до значних економічних втрат через простой виробництва, пошкодження обладнання та витрати на ремонтні роботи. Крім того, перебої в електропостачанні негативно впливають на життя людей, особливо в критичних ситуаціях, таких як погодні катаклізми.

Зростання споживання електроенергії, розвиток нових технологій та зростаючі вимоги до якості електропостачання ставлять підвищені вимоги до надійності енергетичних систем. Системи високої напруги відіграють ключову роль у забезпеченні стабільної роботи електромереж, тому їх надійність безпосередньо впливає на якість постачання електроенергії.

Зважаючи на старіння існуючих енергетичних інфраструктур і збільшення споживання, дослідження, спрямовані на оцінку та поліпшення надійності цих схем, стають особливо важливими. У разі відмови розподільних пристроїв високої напруги можуть виникати серйозні наслідки, включаючи енергетичні збої, матеріальні втрати і загрози для життя людей.

Основні напрямки досліджень в галузі підвищення надійності розподільних пристроїв включають аналіз причин відмов, розробку нових методів розрахунку надійності, оптимізацію схем розподільних пристроїв та створення систем моніторингу та діагностики.

Таким чином, дослідження надійності схем розподільних пристроїв високої напруги є багатогранним і має важливе значення для забезпечення стабільної та надійної роботи енергосистем. Результати таких досліджень можуть бути використані для розробки нових стандартів, правил експлуатації та проектування електроустановок.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ СХЕМ РОЗПОДІЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

1.1 Загальні відомості про автоматичні вимикачі для розподільних пристроїв високої напруги

1.1.1 Принципи функціонування високовольтних вимикачів

Для оцінки надійності конкретного розподільчого пристрою необхідно розумітися на принципах роботи високовольтних вимикачів. Вимикачі, що приводяться в дію різними механізмами, розміщуються в розподільчому пристрої для виконання комутаційних дій з метою подачі, підтримання та переривання потоку струму в нормальних або несправних умовах. Швидка реакція і повне переривання струму необхідні для захисту решти енергосистеми від несправного компонента і підтримки стабільності реконфігурованої системи та її нормальної роботи. Вимикачі повинні бути здатні перемикатися зі стану «холостого ходу» на повний номінальний струм несиметричного пошкодження. Під час процесу переривання струму короткого замикання вимикачі піддаються значним тепловим навантаженням, а діелектрики повинні витримувати навантаження [8, 12, 21]. Механічне напруження, як правило, пов'язане з високою швидкістю розмикання під час короткого замикання та за номінальним струмом, що також вимагає більших габаритів та ваги [8, 12, 21].

Загалом, вимикачі можна класифікувати за різними ознаками, наприклад, за типами ізоляції, приводів тощо. Наприклад, за типом ізоляції вимикачі зазвичай поділяються на чотири групи. Пневматичні вимикачі мають такі характеристики, як швидке спрацьовування, автоматичне повторне включення, простий монтаж, і широко використовуються на залізницях і в дугових печах, де повторювані операції є важливими, а також на важливих лініях, де швидке спрацьовування є вкрай необхідним. На відміну від повітряних вимикачів, які гасять дугу повітрям, маломасляні вимикачі гасять дугу трансформаторним маслом в ізольованому корпусі,

укладеному в керамічний кожух. Інший тип – вакуумні вимикачі, які використовують вакуум для гасіння дуги, коли вони розімкнуті, і для ізоляції контактів в якості діелектрика після переривання дуги. Останній тип за ізоляцією – це автоматичні вимикачі з гексафторидом сірки SF₆ (Sulphur Hexafluoride). SF₆, один з найбільш суперечливих матеріалів, коли-небудь використовуваних в електроенергетиці, має величезні переваги, такі як чудове поєднання високої молекулярної маси (що забезпечує високу ємність і високу щільність), високу внутрішню енергію зв'язку (що робить його дуже стабільним) і високу симетрію (що призводить до низької міжмолекулярної сили, яка дозволяє підтримувати SF₆ у газоподібному стані під технічним тиском) [8, 12], незаймистий, електронегативний (межа міцності на пробій в 3 рази вища, ніж у повітря). Таке поєднання робить SF₆ чудовим і високонадійним діелектриком, який широко використовується в конструкції вимикачів [12]. Вимикачі SF₆ широко застосовуються і замінюють старі масляні вимикачі в електроенергетиці багатьох країн [12].

Під час нормальної роботи контакти вимикача замкнуті, і струм проходить від верхнього струмоприймача до нижнього через рухомий і нерухомий головний контакт і дугогасильну камеру.

При відкриванні рухомі головні та дугові контакти, циліндр нагнітача і сопло тягнуться до відкритого положення. Всі чотири частини миттєво переміщуються в одне положення.

Коли рухомі частини втягуються у відкрите положення, клапан заправки примусово закривається, і газ SF₆ починає стискати рухомий циліндр нагнітача і нерухомий поршень. Першими роз'єднуються головні контакти. Роз'єднання головного контакту задовго до дугових контактів гарантує, що будь-яка дуга, що виникає, знаходиться між дуговими контактами і утримується соплом.

Коли дугові контакти розмикаються, між рухомим і нерухомим дуговими контактами виникає дуга. Коли дуга протікає, вона певною мірою блокує газ SF₆, що протікає через сопло. Таким чином, тиск газу в балоні

продовжує зростати, аж до моменту, коли крива струму перетинає нуль, де дуга є відносно слабкою. У цей момент газ SF₆ під тиском витікає з балона через сопло, гасячи дугу.

У відкритому положенні між рухомими і нерухомими контактами є достатня відстань, щоб витримати номінальний рівень діелектрика. При закритті клапан заправки відкривається, щоб газ SF₆ міг бути втягнутий в об'єм затяжки. Зауважимо, що тиск газу SF₆, необхідний для вимкнення, створюється механічним шляхом. Таким чином, вимикачі, що використовують плунжерний переривник, вимагають від виконавчого механізму достатньої енергії для подолання тиску, що створюється в циліндрі плунжера, а також підтримання швидкості контактів, необхідної для витримування напруги відновлення [21].

Наприклад, колонковий вимикач з компресійною дугогасильною камерою HPL-B (див. рис. 1.1) є одним з останніх досягнень в області елегазових вимикачів. Вимикач має ізоляцію SF₆ і приводиться в дію механізмом з пружинним приводом, що заряджається від електродвигуна [21].

Для розуміння можливої несправності вимикача необхідно знати його основні частини, вихід з ладу або несправність яких призведе до виходу вимикача з ладу:

- матеріал: алюміній та оцинкована сталь;
- ізолятор;
- робочий механізм;
- система ущільнення для об'єму SF₆;
- монітор щільності SF₆;
- структура підтримки;
- високовольтні клеми;
- резистори для повторної установки;
- керовані комутаційні пристрої;

- монітор стану.



Рисунок 1.1 – Елегазовий колонковий вимикач HPL В (Hitachi) для зовнішньої установки [22]

1.1.2 Сучасні високовольтні комутаційні пристрої

Роз'єднувачі традиційно призначені для відключення вимикача під час його технічного обслуговування. У перші роки винаходу вимикачів, через технологічні обмеження, операції з технічного обслуговування вимикачів були досить складними, і тому були введені роз'єднувачі, щоб ізолювати вимикач у разі технічного обслуговування. Однак, відповідно до специфікації технічного обслуговування від сучасних виробників автоматичних вимикачів, операція технічного обслуговування, необхідна для автоматичного вимикача, проводиться не частіше, ніж один раз на 10-15 років. На відміну від швидкого розвитку автоматичних вимикачів,

періодичність технічного обслуговування роз'єднувачів суттєво не зменшується. Типове технічне обслуговування вимикача, що працює в «досить хорошому» середовищі, проводиться приблизно раз на 5 років; інші суворі умови роботи, вимагають більш інтенсивного технічного обслуговування – приблизно раз на рік. Очевидно, що ці роз'єднувачі навколо вимикачів та вздовж ліній ставлять під загрозу доступність електропостачання.

Нова тенденція в проектуванні вимикачів полягає в об'єднанні роз'єднувачів і вимикачів в один компонент, який отримав назву роз'єднуючий вимикач. Ідея такого нового пристрою полягає в тому, щоб зменшити частоту технічного обслуговування роз'єднувачів, особливо системи з повітряною ізоляцією, так що час простою системи через технічне обслуговування роз'єднувачів може бути значно зменшений. Крім того, роз'єднуючий вимикач має такі переваги, як менша площа для монтажу, менший вплив на навколишнє середовище, менша вартість [21] тощо.



Рисунок 1.2 – Роз'єднуючий вимикач марки Siemens

З іншого боку, роз'єднуючі вимикачі мають такий самий рівень відмов, як і традиційні вимикачі, і підвищують надійність за рахунок інтеграції

роз'єднувачів у вимикачі. З обох боків роз'єднуючого вимикача використовуються два роз'єднувальні затискачі для фізичного відключення його від мережі, і, що найважливіше, ці затискачі не потребують обслуговування або частота обслуговування надзвичайно низька. Якщо порівнювати «полуторну» схему (буде розглядатися надалі в магістерській роботі) розподільного пристрою з роз'єднуючими вимикачами і схему з типовими вимикачами, то для першої схеми територія підстанції зменшується на 50% (див. рис. 1.3), на 90% зменшується недоступність через технічне обслуговування і на 50% зменшується недоступність через вихід з ладу компонентів [8].



Рисунок 1.3 – Компонування підстанції [23]

1.1.3 Типи відмов високовольтних вимикачів

Тринадцять різних режимів відмов визначено як основні, з яких деякі характеризуються як «відмова, що вимагає негайного вимкнення і ремонту», а решта може залишатися деякий час без вимкнення вимикача і ремонту.

Характеристики основних відмов [19]:

- не розмикається за командою;
- не замикається за командою;
- замикається без команди;

- розмикається без команди;
- не проводить струм;
- не розриває струм;
- не витримує струм;
- коротке замикання на землю;
- міжполюсне коротке замикання;
- пробій на розімкнений полюс (внутрішній);
- пробій через розімкнений полюс (зовнішній);
- блокування у відкритому або закритому положенні;
- інші.

Багато режимів відмов мають схожий вплив на систему, що вимагає негайного відключення вимикача і ремонту. Ці режими відмов відносяться до першої групи, а решта згруповані в другу групу – технічного обслуговування або подібних впливів, які не потребують негайної уваги.

Варто також зазначити, що деякі відмови вимикачів спричинені відмовами інших суміжних компонентів. Наприклад, у полуторній схемі, якщо виникає коротке замикання на вхідній лінії А і вимикач 2 не може усунути несправність, вимикач 3 повинен спрацювати як резервний захист. У цьому випадку відмова вимикача призводить до виведення з ладу всього містка.

1.2 Типи схем розподільних пристроїв

Підстанція – це «інтерфейс» в енергосистемі, де лінії електропередачі або розподільчі фідери з'єднуються з метою керування потоками потужності і загальних перемикачів для технічного обслуговування, і куди надходить енергія з генеруючих станцій і де, якщо треба, перетворюється в напругу для розподілу [15, 16]. Підстанція забезпечує доступність передачі електроенергії в навіть в умовах, таких як технічне обслуговування або несправності компонентів підстанції, змінюючи підключення вимикачів. Конфігурація шин і вимикачів має безпосередній вплив на надійність

системи [15, 16]. У цьому пункті представлені загальні дані роботи тих схем розподільних пристроїв, котрі будуть проаналізовані в магістерській роботі.

1.2.1 Полупторна схема розподільного пристрою

Першою подивимось «полупторну» схему розподільного пристрою або схему «3/2» (рис. 1.4). Завдяки своїй високій гнучкості та надійності, «полупторна» схема часто використовується на атомних електростанціях для підвищення надійності перетоку електроенергії на розподільчому пункті.

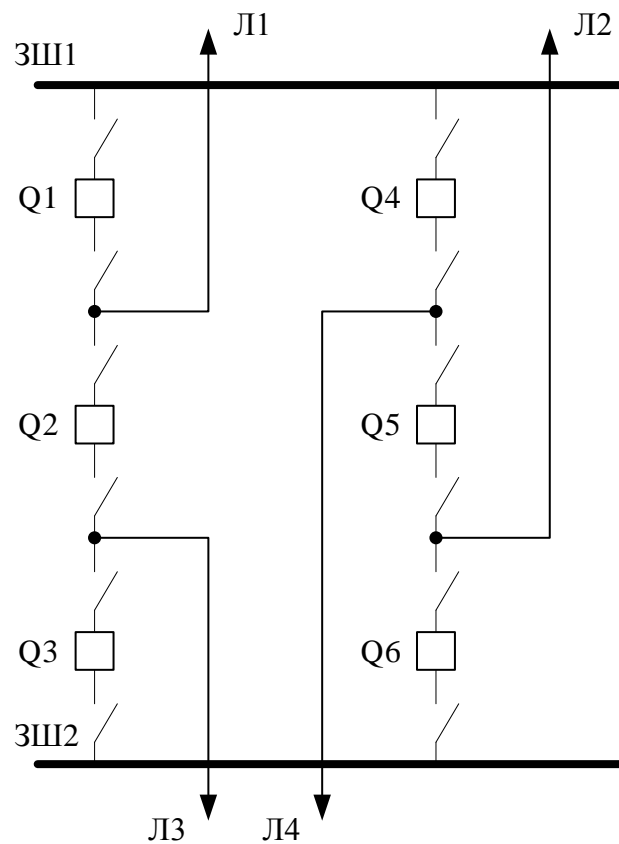


Рисунок 1.4 – Однолінійна схема розподільного пристрою за полупторною схемою

Під час нормальної роботи всі роз'єднувачі та вимикачі замкнуті [15, 16]. На дві шини подається напруга з метою резервування. Два джерела живлення підключаються до схеми, припускаючи, що один генератор має потужність, достатню для забезпечення обох навантажень, якщо інший генератор або вхідна лінія зазнають несправності.

Коли вимикач відмовляє, по-перше, спрацьовують два найближчі вимикачі, щоб усунути несправність. По-друге, сусідні роз'єднувачі відкриваються, щоб ізолювати несправний вимикач. По-третє, ці два відкриті вимикачі знову замикаються, щоб відновити потік електроенергії. Таким чином, підстанція змінює конфігурацію з ізольованим компонентом, що вийшов з ладу, для передачі потужності від генераторів до навантажень. Стандартна процедура усунення несправності [15, 16] виглядає наступним чином:

- виникла несправність компонента;
- вимикачі реагують на усунення несправності;
- роз'єднувачі розмикаються для ізоляції несправності;
- відновлення живлення якомога більшої кількості навантажень.

Найважливіша особливість «полупторної» схеми проявляється під час аварійних ситуацій та технічного обслуговування. Несправність однієї шини не перериває обслуговування обох навантажень. Технічне обслуговування одного вимикача не перериває подачу електроенергії. А у випадку пошкодження лінії, з експлуатації виводиться лише несправна вихідна лінія, не перериваючи обслуговування іншої справної вихідної лінії. Резервування такого розташування вимикачів забезпечує безперервність потоку електроенергії, що виходить з розподільчого пристрою. Інші переваги, такі як легке розширення і можливість застосування на всіх рівнях напруги, також роблять схему «3/2» переважною для топології підстанції, де надійність і експлуатаційна гнучкість є важливими. Про для такої схеми ускладнюється релейний захист, а додаткові витрати на введення в систему більшої кількості вимикачів зростають [15, 16]. Тут припускається, що ця схема розраховується зі звичайними схемами захисту, які чудово функціонують у разі усунення пошкодження.

Полупторна схема містить два містки, що з'єднують дві шини, і кожен місток складається з трьох вимикачів і двох ліній для живлення, що надходять на підстанцію і виходять з неї, як показано на рис. 1.5. На цьому

рисунку ЛА та ЛВ позначають вхідні лінії, а Ла та Лб – вихідні лінії підстанції.

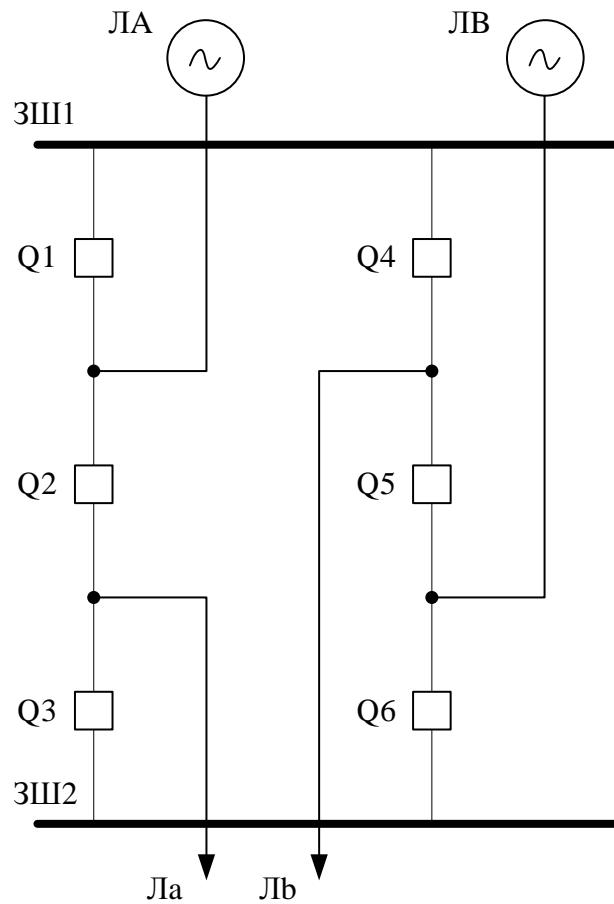


Рисунок 1.5 – Спрощена полуторна схема розподільного пристрою

У цій схемі, наприклад, у верхньому містку, середній вимикач 2 (позначений Q2 на рис. 1.5) встановлюється для усунення пошкодження на стороні ЛА або Ла, і, таким чином, утворюється схема «вимикач і половина вимикача», тобто кожна лінія захищається одним бічним вимикачем і половиною серединного вимикача. Під час нормальної роботи всі вимикачі закриті і обидві шини знаходяться під напругою, так що потужність з боку генератора ЛА і ЛВ подається на навантаження, Ла та Лб.

1.2.2 Схема розподільного пристрою з двома системами збірних шин і двома вимикачами на приєднання

Ще одним рішенням, яке забезпечує високу надійність підстанції, є схема з двома системами збірних шин і двома вимикачами на приєднання (рис. 1.6).

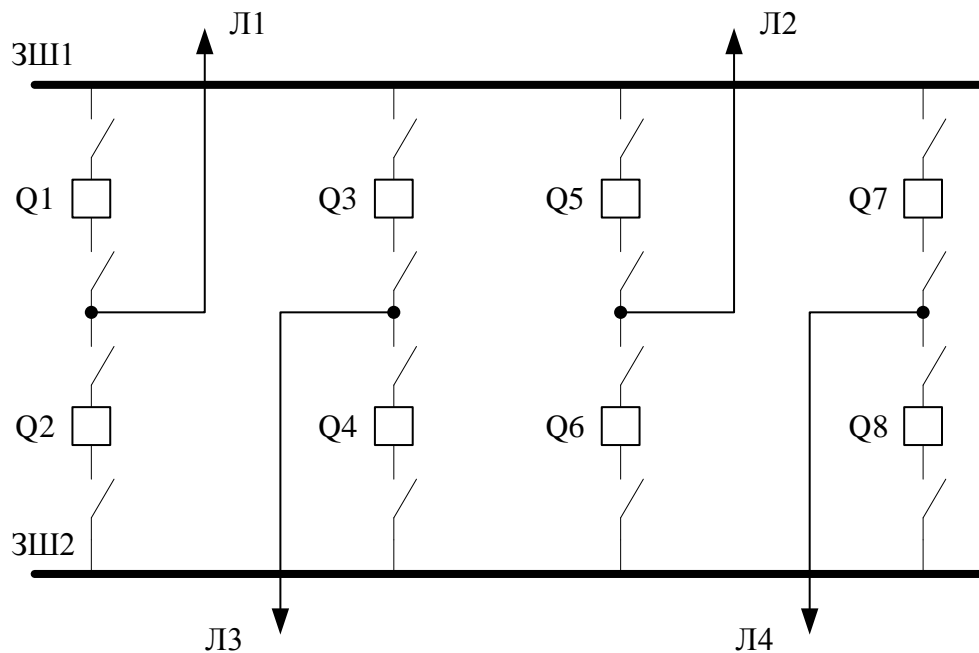


Рисунок 1.6 – Однолінійна схема з двома системами збірних шин і двома вимикачами на приєднання

Подібно до полуторної, схема зі здвоєними вимикачами на приєднання забезпечує високу експлуатаційна гнучкість під час несправностей або технічного обслуговування [15, 16]. У схемі зс здвоєними вимикачами – два вимикачі захищають одну лінію між двома шинами. У разі пошкодження лінії, тільки пошкоджена лінія відключається від мережі, а решта підстанції продовжує функціонувати. У разі пошкодження шин чотири бічні вимикачі розмикаються, щоб усунути несправність, не перериваючи подачу електроенергії до обох навантажень. Інші переваги, такі як легке розширення і можливість застосування на всіх рівнях напруги, також роблять схему цікавим варіантом підстанцій, особливо на атомних електростанціях, де надійність і експлуатаційна гнучкість є важливими [15, 16]. Порівняно з

полупторною, це схема, котра пропонує аналогічну експлуатаційну гнучкість і ремонтпридатність. Однак у простій схемі підстанції з двома вводами і двома виводами полупторна схема потребує шести вимикачів, тоді як схема зі здвоєними вимикачами потребує восьми вимикачів, що вимагає інвестицій у два додаткових вимикачі. Тут також припускається, що ця схема розраховується зі звичайними схемами захисту, які ідеально функціонують у разі усунення пошкодження. Тобто, для порівняння показників надійності умови оцінки схеми зі здвоєними вимикачами на приєднання ідентичні умовам для полупторної схеми.

Найпростіша схема зі здвоєними вимикачами містить чотири містки, що з'єднують дві шини, і кожен місток складається з двох вимикачів і однієї лінії для подачі або відведення електроенергії (рис. 1.7).

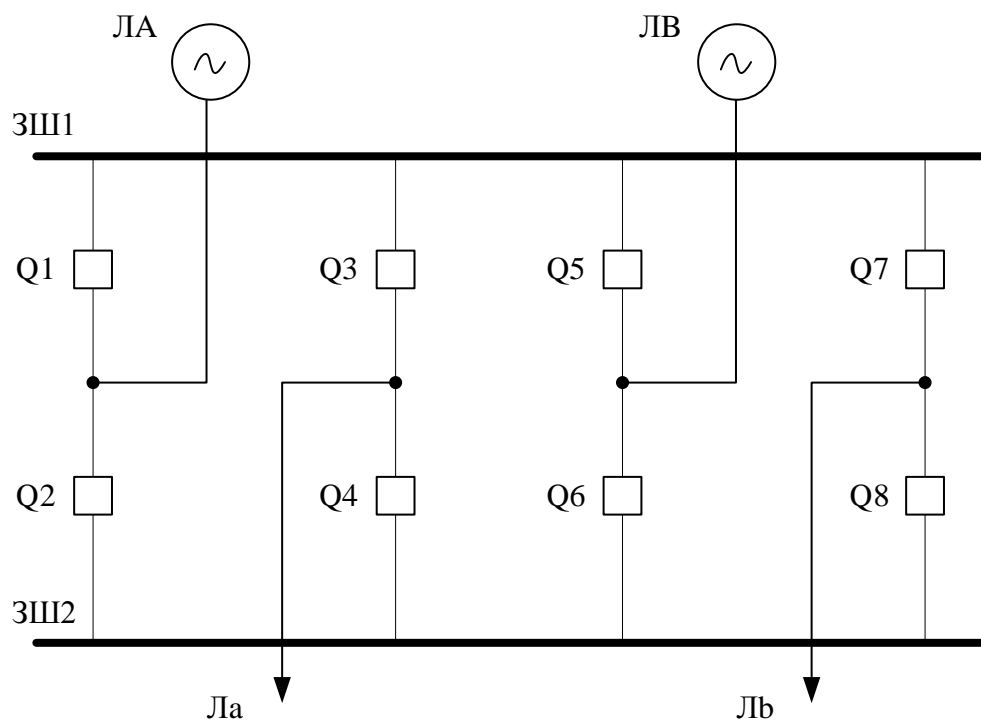


Рисунок 1.7 – Спрощена схема розподільного пристрою з двома системами збірних шин і двома вимикачами на приєднання

У цій схемі кожна вхідна і вихідна лінія захищається двома спеціальними автоматичними вимикачами, розташованими по обидва боки лінії, і тому така схема називається схемою з двома вимикачами на

приєднання. З додатковим вимикачем на кожен місток будь-який автоматичний вимикач може вийти з ладу і вплинути лише на один місток. Під час нормальної роботи всі вимикачі замкнуті, і обидві шини знаходяться під напругою, так що потужність з боку генератора ЛА і ЛВ надходить до навантажень Ла і Лб.

1.2.3 Інші типи схем розподільних пристроїв

1.2.3.1 Схема з однією шиною

На рис. 1.8 показано однолінійну діаграму спрощеної схеми з однією шиною. Це найпростіша схема з найгіршими показниками надійності. За такої схеми обслуговування вимикачів має проводитися при відключеній лінії, що відходить, і, таким чином, навантаження зазнає тривалої перерви в електропостачанні [15, 16].

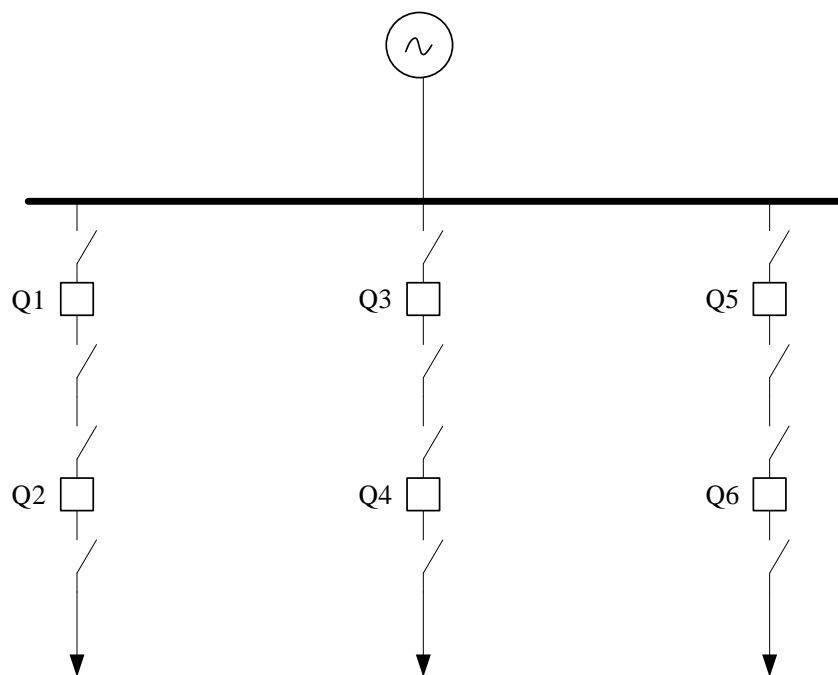


Рисунок 1.8 – Схема з однією шиною

1.2.3.2 Схема з головною та прохідною шинами

У схемі з головною і прохідною шинами (рис. 1.9) дві шини, головна і прохідна, встановлюються окремо і незалежно одна від одної. Під час нормальної роботи всі містки підключені до головної шини. У разі

технічного обслуговування або несправності вимикача, навантаження, пов'язане з конкретним вимикачем, переноситься на прохідну шину, а початковий вимикач ізолюється від містка [15, 16].

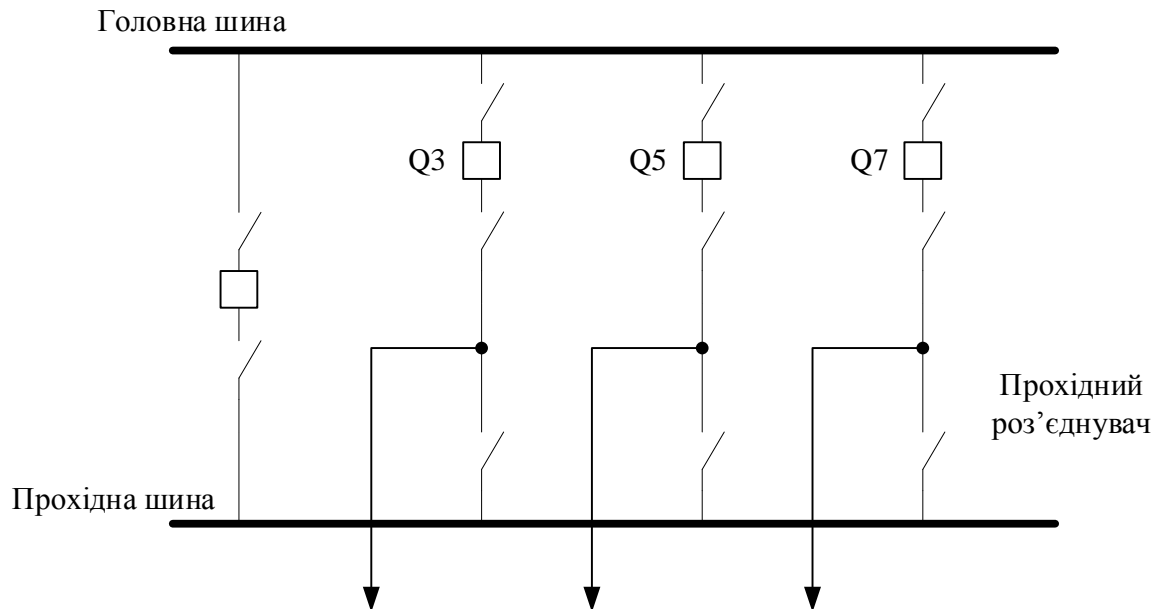


Рисунок 1.9 – Розташування головної та передавальної шин

1.2.3.3 Кільцева схема розподільного пристрою

Кільцева схема (рис. 1.10) складається з вимикачів і роз'єднувачів, розташованих у формі кільця для підвищення надійності.

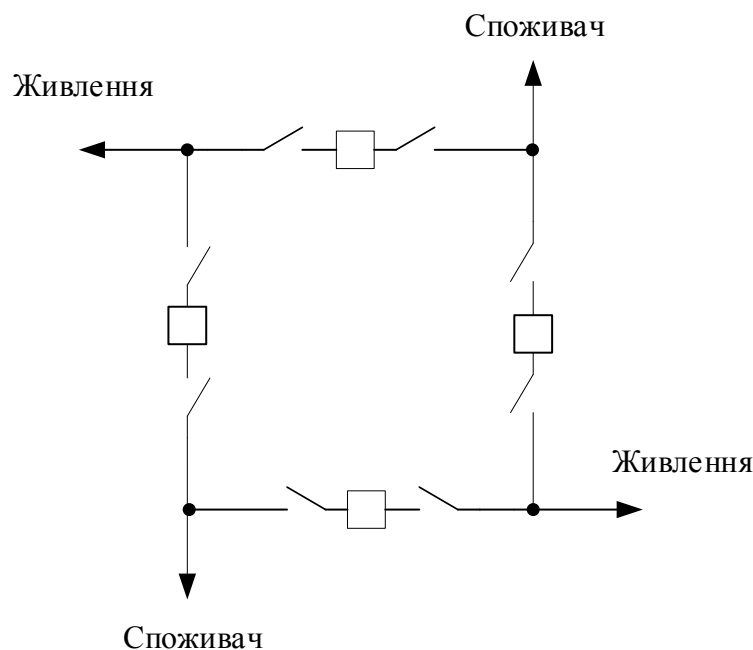


Рисунок 1.10 – Кільцева схема розподільного пристрою

Кожне навантаження має подвійне живлення. У разі пошкодження шини та/або лінії навантаження, завдяки швидкій реакції автоматичних вимикачів, з роботи виводиться лише несправна частина. Решта системи продовжує працювати без перерви. У разі відмови вимикача відключаються два сусідні вимикачі, щоб ізолювати несправність і запобігти подальшій втраті потужності всієї підстанції, як і в схемах з однією та двома головними і прохідними шинами [15, 16].

1.3 Вибір методу дослідження надійності схем розподільних пристроїв підстанцій

Дослідження надійності розподільних пристроїв на високовольтних станціях та підстанціях є важливим і з теоретичної, і з прикладної точки зору. Схеми «3/2» або «полуторна» та «з двома системами збірних шин і двома вимикачами на приєднання» (2СЗШ/2В) є доступними протягом декількох десятиліть і в основному використовуються в тих областях, де потрібна висока надійність. Обидві схеми вважаються високонадійними з технічної точки зору.

Однак не існує чіткого порівняння, яка з них є кращою, окрім інтуїтивного підрахунку інвестиційних витрат. Деякі дослідження були проведені з використанням методів теорії надійності [5, 7, 10, 19]. Широко визнаними методами аналізу надійності є метод перебору станів, метод мінімального перерізу множини та метод дерева несправностей [1–6, 11, 13, 14].

Метод перерахування станів – це процес відбору всіх можливих непередбачуваних ситуацій в даній системі для оцінки надійності, який здійснюється переважно за допомогою програмного забезпечення. Він починається зі станів несправностей першого порядку і переходить до більш високих порядків. Стан несправності першого порядку відноситься до стану, коли тільки один компонент виходить з ладу, а решта працює успішно. Аналогічно, стан несправності вищого порядку відноситься до стану, коли більше компонентів відмовляють одночасно, а решта працюють успішно. Загалом, стани відмов вищого порядку не вносять значного внеску в результати і зазвичай нехтуються.

Метод мінімального перерізу множини був широко прийнятий у промисловості завдяки своїй швидкості виявлення всіх слабких місць системи. Одним із способів використання методу мінімального перерізу є занесення всіх можливих причин відмови системи в таблицю на основі вивчення режимів відмов кожного компонента. Причиною може бути один режим відмови компонента або комбінація різних режимів відмов різних компонентів [5]. Потім можна розрахувати ймовірність відмови системи на основі всіх мінімальних наборів розрізів, які перераховані в таблиці.

При якісній оцінці мінімальні множини розрізів отримують шляхом булевої редукції дерева несправностей. Мінімальні розбиття, які містять лише один компонент, називаються мінімальними розбиттями першого порядку. Ті, що містять два компоненти, називаються мінімальними множинами другого порядку, які представляють дві події, які повинні відбутися одночасно, щоб призвести до головної події. Аналогічна

термінологія застосовується і до мінімальних розбиттів вищого порядку. Недоступність, пов'язана з мінімальними розбиттями, часто зменшується на порядки зі збільшенням розміру мінімального розбиття; ранжування відповідно до їх розмірів дає грубе уявлення про важливість мінімального розбиття. Основні події не обов'язково є незалежними, оскільки відмова з загальної причини також відіграє дуже важливу роль у дослідженні надійності.

Метод дерева несправностей використовується для оцінки більшості проблем розподілу електроенергії, включаючи ті, що пов'язані з системами захисту. Системи захисту містять реле, які виявляють несправність, а потім відключають вимикачі для усунення несправності. Сценарій, так званий «ініціювання/включення несправності», вимагає спеціальних методів аналізу, які важко змоделювати за допомогою інших методів, таких як блок-схема надійності. Ініціююча подія відноситься до несправності, яка виникає на одному компоненті, що може призвести до відключення електроенергії. Дозволяюча подія відноситься до відмови захисної системи, яка не в змозі виявити та ізолювати ініціюючу подію [6].

На сьогодні більш якісним вважають останній. По-перше, він пропонує новий підхід до вирішення проблеми оцінки надійності обладнання підстанцій. По-друге, він не тільки перевіряє результати, отримані за допомогою інших методів, але й може виконувати більше аналізів, таких як моделювання за методом Монте-Карло, які не можуть бути виконані іншими інструментами. Методика моделювання дерева несправностей, представлена у магістерській роботі, може бути надалі застосована для аналізу надійності інших складних систем.

1.4 Загальні дані про метод дерева несправностей

Аналіз ризиків – це важлива діяльність, яка гарантує, що критично важливі об'єкти, як-то електроенергосистеми, працюють безпечно і надійно. Метод дерева несправностей (МДН) є одним з найвідоміших методів, який

використовується в широкому спектрі галузей. Дерева несправностей (ДН) – це графічний метод, який моделює, як несправності поширюються в системі, тобто, як відмови компонентів призводять до відмов системи. Завдяки надмірності та резервному управлінню, не всі відмови компонентів призводять до відмови системи. МДН досліджує, чи є дизайн системи достатньо надійним. Він надає методи та інструменти для обчислення широкого спектру властивостей і показників. ДН – це дерева, або в більш загальному випадку спрямовані ациклічні графи, листя яких моделюють відмови компонентів, а логічні блоки – розповсюдження відмов [11].

Що стосується методів аналізу, розрізняють якісний МДН, який розглядає структуру ДН; і кількісний МДН, який обчислює такі величини, як ймовірності відмов для ДН. У якісній сфері важливим показником є набори відмов, які вказують на те, які комбінації відмов компонентів призводять до відмов системи. Якщо набір відмов містить занадто мало елементів, це може свідчити про вразливість системи. Іншою якісною мірою, яку обговорюють, є множини шляхів та загальні причини відмов.

Кількісні показники системи здебільшого стосуються обчислення ймовірностей відмов. Якщо припустити, що відмова компонентів системи підпорядковується розподілу ймовірностей, то кількісний МДН обчислює ймовірність відмови для системи. Тут розрізняють дискретні та неперервні ймовірності. Для обох варіантів розглядаються наступні ДН. Надійність системи – це ймовірність того, що система вийде з ладу на заданому часовому горизонті t ; доступність системи – це відсоток часу, протягом якого система функціонує; середній час напрацювання на відмову – це середній час до першої відмови, а середній час між відмовами – це середній час між двома наступними відмовами. Такі показники є життєво важливими для визначення того, чи відповідає система вимогам надійності, або чи потрібні додаткові заходи. Крім того, ми обговоримо методи аналізу чутливості, які визначають, наскільки чутливим є аналіз до значень (тобто ймовірностей відмов) в елементах; ми також обговоримо міри важливості, які дають змогу

визначити, наскільки різні елементи вносять вклад в загальну надійність системи.

Загальний підхід до побудови дерева несправностей [14] складається з трьох етапів: попередній аналіз, характеристика та побудова.

Попередній аналіз:

- декомпозиція системи;
- ідентифікація компонентів;
- визначення режимів відмов компонентів;
- відновлення системи за допомогою компонентів.

Характеристики:

- фази;
- граничні умови;
- конкретні гіпотези;
- початкові умови.

Побудова

- визначення небажаної події
- розв'язка подій
- кінець побудови

Деякі блоки для побудови дерев несправностей показані далі:

Головна подія (TOP) – це ретельно визначена подія, яка представляє кінцеву небажану подію, що потребує оцінки надійності. Вона визначає ступінь ризику для системи.

Проміжні події (INTERMEDIATE) описують стан системи, спричинений попередніми подіями.

Базові події (BASIC) є основними причинами головної і всіх проміжних подій і не потребують подальшого розвитку, а отже, вони визначають роздільну здатність МДН.

Перенесення (TRANSFER) вказує на подальший розвиток події. Корисно скорочувати великі системи до менших ДН, не впливаючи на

вихідні дані. Існує два типи переходів: вхідний і вихідний. Різниця полягає в тому, що перенесення назовні означає, що вихід цього дерева несправностей використовується для інших дерев несправностей. Тоді як перенесення всередину означає, що виходи деяких інших дерев несправностей використовуються як вхідні дані.

Всі події логічно пов'язані за допомогою логічних блоків. Найчастіше використовуються блок «І», які ініціюють вихідну подію, якщо відбуваються всі вхідні події, і блок «АБО», які ініціюють вихідну подію, якщо відбувається одна або багато вхідних подій.

1.4.1 Дерево несправностей з одним логічним блоком «І»

У цьому дереві відмов (рис. 1.11) подія TOP відбувається тоді і тільки тоді, коли всі базові події B_1, B_2, \dots, B_n відбуваються одночасно.

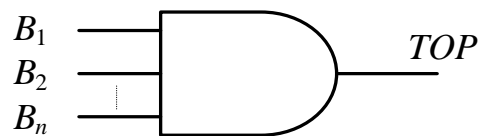


Рисунок 1.11 – Дерево несправностей логічного блоку «І»

Припускається, що основні події є незалежними. Відсутність TOP $Q_0 t$, можна визначити безпосередньо за допомогою алгебраїчної операції. Нехай $B_i(t)$ позначає, що базова подія B_i не відбудеться в момент часу t ; $i = 1, 2, 3, \dots, n$. Pr позначає ймовірність події.

$$\begin{aligned}
 Q_0 t &= Pr B_1 t \cap B_2 t \cap \dots B_n t \\
 &= Pr B_1 t \cdot Pr B_2 t \cdots Pr B_n t = \\
 &= q_1 t \cdot q_2 t \cdots q_n t = \prod_{i=1}^n q_i t .
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

1.4.2 Дерево несправностей з одним логічним блоком «АБО»

Розглянемо дерево несправностей на рис. 1.12, подія TOP відбувається, якщо відбувається хоча б одна з базових подій B_1, B_2, \dots, B_n .

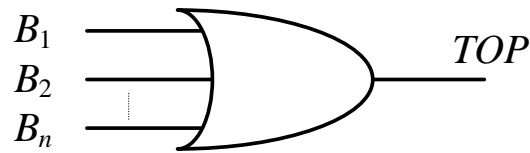


Рисунок 1.12 – Дерево несправностей логічного блоку «АБО»

Базові події вважаються незалежними. Нехай $B_i(t)$ позначає, що базова подія відбувається в момент часу t , а $B_i^*(t)$ означає, що основна подія не відбувається в момент часу t . Ці наведені вище рівняння можна виразити в булевій алгебрі.

$$\Pr B_i^* t = 1 - \Pr B_i t = 1 - q_i t \quad \text{для } i=1,2,\dots,n \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} Q_0 t &= \Pr B_1 t \cup B_2 t \cup \dots \cup B_n t = \\ &= 1 - \Pr B_1^* t \cap B_2^* t \cap \dots \cap B_n^* t = \\ &= 1 - \Pr B_1^* t \cdot \Pr B_2^* t \cdot \dots \cdot \Pr B_n^* t = \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n 1 - q_i t . \end{aligned} \quad (1.3)$$

Співвідношення між частотою відмов і середніми значеннями часу безвідмовної роботи та часу простою є коефіцієнтом відмов [19]:

$$\lambda = \frac{1}{MTTF}.$$

Коефіцієнт відновлення [19]:

$$\mu = \frac{1}{MTTR}.$$

Висновки до розділу 1

У цьому розділі охарактеризовано принцип дії високовольтних вимикачів, головні схеми розподільних пристроїв високої напруги та виділено основні методи аналізу надійності цих схем. Для майбутнього аналізу показників надійності взято полуторну схему розподільного

пристрою і схему зі здвоєним вимикачем на приєднання. Аналіз дерева несправностей прийнято, як основний для порівняння надійності схем.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ СХЕМ РОЗПОДІЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПІДСТАНЦІЙ 330 КВ

2.1 Програмні інструменти для моделювання надійності схем розподільних пристроїв

2.1.1 TopEvent FTA

TopEvent FTA [17] є програмним забезпеченням для аналізу надійності. Воно може виконувати розрахунки на основі різних показників надійності, наприклад, інтенсивності відмов (частоти відмов) і часу ремонту або недоступності.

Базові події в TopEvent FTA не містять даних про надійність. Замість цього використовуються посилання на параметри надійності. Залежно від того, яку модель надійності вибрали для базових подій.

Існує кілька моделей надійності, які можна вибрати для базової події:

- ремонтпридатний (компонент, що підлягає ремонту і моніторингу);
- тестується (компонент, що періодично тестується);
- ймовірність (компонент з фіксованою недоступністю);
- час місії (компонент з обмеженим часом дії);
- частота (ініціатор, подія з фіксованою частотою);
- не підлягає ремонту.

При створенні базових подій в якості шаблонів використовуються шаблонні події, які призначають дані групам базових подій. Шаблон може містити такі дані, як модель надійності, параметри надійності, опис тощо.

Дерево несправностей створюється в редакторі дерев несправностей – діалоговому вікні зі сторінкою дерева несправностей. Дерево несправностей буде побудовано на сторінці дерева несправностей шляхом вибору відповідних подій і логічних блоків. Кількісний аналіз включає в себе аналіз

набору мінімального розрізу, аналіз важливості та чутливості, а також моделювання методом Монте-Карло.

2.1.2 GRIF TREE

Програмне забезпечення GRIF TREE [18] може розрахувати надійність різних топологій підстанцій, визначити вартість цих топологій і допомогти знайти найбільш економічно ефективний проект.

GRIF TREE використовує динамічний перебір станів для обчислення надійності кожного компонента системи. GRIF TREE моделює кожну можливу непередбачувану ситуацію, визначає частоту кожної непередбачуваної ситуації і підсумовує вплив усіх непередбачуваних ситуацій для загальної оцінки надійності.

Перше, що робить GRIF TREE, це визначає кількість часу, протягом якого підстанція перебуває в нормальному робочому стані. Це дорівнює кількості часу протягом одного року за вирахуванням часу, проведеного в стані технічного обслуговування: $\% \text{Витрати в нормальному робочому стані} = \frac{\% \text{Витрати в нормальному робочому стані} ((8760 \text{ годин}) - (\text{години, витрачені на обслуговування}))}{8760} * 100$.

Програма змодельовала всі несправності, які виникають на компонентах (в той час як система знаходиться в нормальному робочому стані). Для кожного несправного компонента GRIF TREE виконує наступну послідовність подій:

1. У компоненті виникла несправність.
2. Спрацьовують найближчі пристрої захисту на всіх шляхах, що знаходяться під напругою до несправного компонента (система захисту вважається ідеальною).
3. Після затримки (визначається середнім часом перемикання точок секціонування) несправність ізолюється, а система переналаштовується, щоб відновити живлення якомога більшої кількості споживачів.

4. Після закінчення середнього часу ремонту ($T_{від\ cер}$) несправність усувається, і система повертається до нормального робочого стану.

Кожна з цих несправностей по-різному впливає на надійність різних компонентів підстанції. GRIF TREE відстежує внесок кожної несправності в частоту і тривалість відключення кожного компонента. Ці значення потім зважуються на основі частоти відмов компонента, що вийшов з ладу, і ймовірності того, що система перебуває в нормальному робочому стані.

Після імітації несправностей у нормальному робочому стані GRIF TREE імітує всі стани технічного обслуговування і всі несправності, які виникають під час цих станів. Під час обслуговування компонента GRIF TREE автоматично ізолює компонент за допомогою секційних пристроїв і реконфігурує систему так, щоб відновити живлення якомога більшої кількості навантажень. Такий стан обслуговування, звичайно, призведе до відключення компонента, який обслуговується. Це також може призвести до відключення сусідніх компонентів.

Після того, як GRIF TREE визначить стан технічного обслуговування підстанції для певного компонента, він імітує несправності в цьому стані для всіх компонентів, що перебувають під напругою. Ця симуляція несправностей ідентична методу, що використовується під час нормального стану, за винятком того, що система запускається в іншій конфігурації.

2.2 Типові дані щодо надійності вимикачів

Вхідні дані для основних подій дерева несправностей взяті з ABB/STRI. Оскільки оцінка схем вимикачів в основному зосереджена на розробці прототипу методики моделювання, спрощені схеми без роз'єднувачів розглядаються з налаштуваннями показаними в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Дані щодо надійності

Компонент	λ (TopEvent)	λ (GRIF TREE)	Середній час
-----------	----------------------	-----------------------	--------------

	FTA)		ремонту ($T_{від\ сеп}$)
Автоматичний вимикач високої напруги	10^{-6} відмов/год	$88 \cdot 10^{-4}$ відмов/рік	12 год
Шина	$2,05 \cdot 10^{-7}$ відмов /год	$18 \cdot 10^{-4}$ відмов/рік	12 год
Вхідна лінія (10 км)	$9,13 \cdot 10^{-6}$ відмов /год	$8 \cdot 10^{-3}$ відмов/рік/км	8 год
Вихідна лінія (0,1 км)	$9,13 \cdot 10^{-8}$ відмов /год	$8 \cdot 10^{-3}$ відмов/рік/км	8 год

Оскільки вхідні лінії безпосередньо під'єднані до енергосистеми, їхня довжина становить приблизно 10 км. Вихідні лінії підключаються біля розподільчої станції, тому їх довжина приймається приблизно 100 м. Довжина лінії впливає на частоту відмов. Також варто зазначити, що частота відмов λ в TopEvent FTA розраховується на основі годин, тоді як в GRIF TREE – на основі років. Умовне позначення одиниць виміру:

Погодинна = Річна / 8760 год/рік, де 8760 – кількість годин на рік

При моделюванні допускається, що система захисту [13], а також джерело додаткового живлення [13, 14] та система керування [13, 14] є 100% надійними. Ці пристрої є дуже важливими для надійності підстанції. Однак, в магістерській роботі в основному оцінюється надійність схем включення вимикачів, тому дослідження означених пристроїв виходить за рамки поточної роботи.

2.3 Валідація програмного забезпечення

З метою валідації модельних результатів проста радіальна схема електромережі (рис. 2.1) буде проаналізована в TopEvent FTA і в GRIF TREE. Електромережа складається з чотирьох компонентів: генератор і вимикач

підключаються безпосередньо до шини, а навантаження підключається послідовно до вимикача. Припустимо, що генератор працює ідеально.

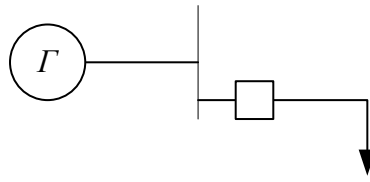


Рисунок 2.1 – Радіальна схема електричної мережі

Дерево несправностей показано нижче.

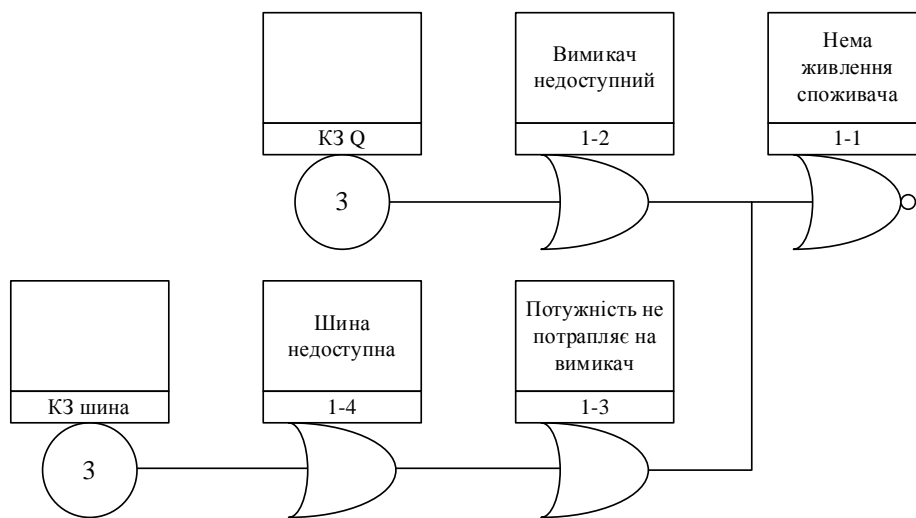


Рисунок 2.2 – Дерево несправностей радіальної схеми

Верхня подія визначається як «відключення споживача», що являє собою випадок, коли потік потужності не надходить до електроприймача. Це може статися через недоступність вимикача або відсутність потоку потужності на вимикач, що в даному випадку може статися через несправність шини. Стратегія полягає в тому, щоб відстежити напрямок потоку потужності, щоб можна було оцінити кожен компонент системи. Ремонтна модель використовується для всіх компонентів у схемі. Два вхідні параметри є важливими для моделі, що підлягає ремонту, а саме частота відмов і середній час напрацювання на відмову.

У TopEvent FTA розраховуються середній час безвідмовної роботи та інтенсивність безумовних відмов. Операції з технічного обслуговування в

даному випадку не розглядаються. Однак це можна зробити, додавши базову подію, що представляють технічне обслуговування з частотою та тривалістю технічного обслуговування. Частота технічного обслуговування може бути представлена коефіцієнтом відмов, а тривалість технічного обслуговування може бути представлена $T_{від\ сеп}$.

У GRIF TREE передбачається, що модель є ремонтпридатною. Для оцінки надійності системи в робочій області GRIF TREE будується схема. Після того, як модель завершено, вхідні дані отримуються з внутрішньої бібліотеки GRIF TREE. У GRIF TREE загальна тривалість відключень (ЗТВ) і загальна частота відключень (ЗЧВ) відображаються при натисканні на компонент, що цікавить.

Для того, щоб порівняти результати обох інструментів, вхідні дані були обрані з проектів ABB, і є ідентичними в TopEvent FTA та GRIF TREE після перерахунку одиниць виміру. Слід пам'ятати про різницю в одиницях виміру між вхідними параметрами TopEvent FTA та GRIF TREE. В TopEvent FTA частота відмов вимірюється в часах на годину, тоді як в GRIF TREE частота відмов вимірюється в часах на рік. Припустимо, що в календарному році 365 днів, і таким чином отримуємо рівняння перерахунку.

Таблиця 2.2 – Вхідні параметри

Параметри	TopEvent FTA		GRIF TREE	
	Вимикач	Шина	Вимикач	Шина
Частота відмов	10^{-6} (відмов /год)	$2,05 \cdot 10^{-7}$ (відмов/год)	$88 \cdot 10^{-4}$ (відмов /рік)	$18 \cdot 10^{-4}$ (відмов /рік)
$T_{від\ сеп}$ (год)	12	12	12	12

Таблиця 2.3 – Результати моделювання

Сценарій	TopEvent FTA середня	GRIF TREE тривалість	TopEvent FTA	GRIF TREE Частота
----------	----------------------	----------------------	--------------	-------------------

	недоступність	відключення	Інтенсивність відмов	відключень
Відключення споживача	$1,45 \cdot 10^{-5}$ (год/год)	0,1272 (год/рік)	$1,2 \cdot 10^{-6}$ (відмов/год)	0,0106 (відмов/рік)

$$Q_{сер} = \frac{ЗТВ}{8760 \frac{год}{рік}}, W = \frac{ЗЧВ}{8760 \frac{год}{рік}}.$$

Застосовуючи два інструменти моделювання до однієї системи, можна очікувати схожих результатів. Тобто, два різні методи, прийняті в цих інструментах, можуть мати розбіжності через відмінності в алгоритмах, різницю у спрощенні рівнянь тощо. Однак у цій простій схемі результати після переведення одиниць виміру є ідентичними. Після цього методика моделювання перевіряється, і вона готова до оцінки набагато складнішої системи з використанням як методу дерева несправностей, так і методу перебору станів за допомогою TopEvent FTA і GRIF TREE.

Слід також звернути особливу увагу на дані, відібрані з різних джерел. Ідея моделювання полягає в тому, щоб спрогнозувати майбутні відключення на основі знань і даних, зібраних у минулому. Порядки величин у результатах є більш інформативними, ніж значущі цифри результатів.

2.4 Моделювання надійності схем розподільних пристроїв

2.4.1 Полуторна схема розподільного пристрою

Аналіз дерева несправностей проводиться за допомогою TopEvent FTA для оцінки найпростішої полуторної схеми. Основні режими відмов ліній та шин згруповані до короткого замикання, на яке припадає більшість їхніх основних відмов, на основі даних з [9]. Крім того, зазвичай працюють з так званими «основними режимами відмов» для високовольтних вимикачів, які вимагають негайної ізоляції та ремонту. Коротке замикання вимикача не є

причиною високого відсотка відмов [19]. Однак, через його серйозність та вплив на систему, під час аналізу дерева відмов розглядається лише коротке замикання. Аналогічно з таких самих причин, тільки коротке замикання також розглядається при пошкодженнях на шинах і лініях.

Варто також зазначити, що у спрощеній схемі (радіальній) вимикач не має функції АПВ, а це означає, що вимикачі виконують функції як захисту, так і ізоляції, коли поблизу виникає пошкодження. У більш складній полуторній схемі ізоляція пошкодження зазвичай реалізується шляхом встановлення двох роз'єднувачів з обох боків вимикача, які не показані в найпростішій моделі (рис. 4.5).

2.4.2 Техніка моделювання

Метод моделювання при розробці дерева несправностей полягає у відстеженні всіх компонентів у розташуванні відповідно до напрямку потоку потужності. Кожен компонент може бути як у робочому, так і в неробочому стані. Для ілюстрації базової техніки моделювання наведено два приклади.

На рис. 2.3 компоненти А і Б розміщені послідовно, а три контрольні точки показані вздовж напрямку потоку потужності. Дерево несправностей, котре оцінює середню ймовірність відмови системи (рис. 2.2). В цьому випадку, головною подією є оцінка відсутності потужності в контрольній точці 1.

Можливою причиною є або «компонент Б не функціонує», що блокує потік потужності через нього, або «потужність не надходить до компонента Б», що на схемі представлено тим, що в точці 2 потужність не надходить. «Відсутність потоку потужності в точці 2» можна розділити на дві причини. Одна з них – недоступність компонента А, а інша – відсутність потужності в точці 3.

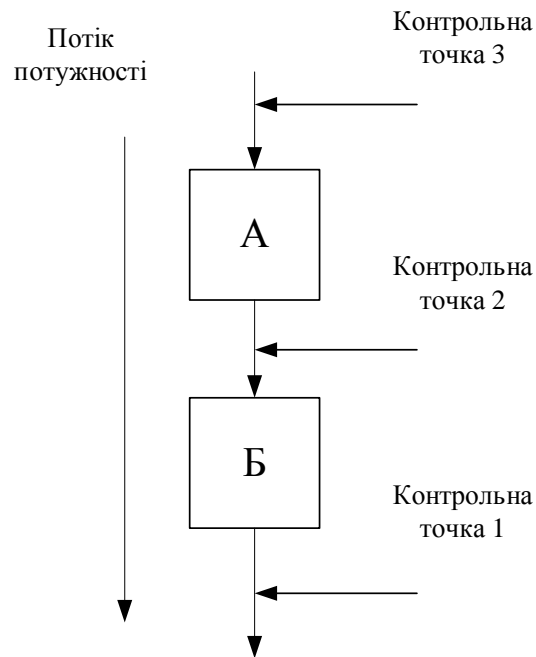


Рисунок 2.3 – Ілюстрація техніки моделювання

У прикладі 2, показаному на рис. 2.5, компоненти Г і Д з'єднані паралельно, тоді послідовно з компонентом В.

Верхньою подією є оцінка події відсутності перетоку потужності в точці 4, яка може статися через те, що або якщо «компонент В недоступний», або «перетоки потужності відсутні одночасно в точках 5 і 7». Це розділяє аналіз на дві гілки. Одна гілка відстежує потік потужності через компонент Г від точки 5, а інша – потік потужності через компонент Д від точки 8. ДН представлено на рис. 2.6.

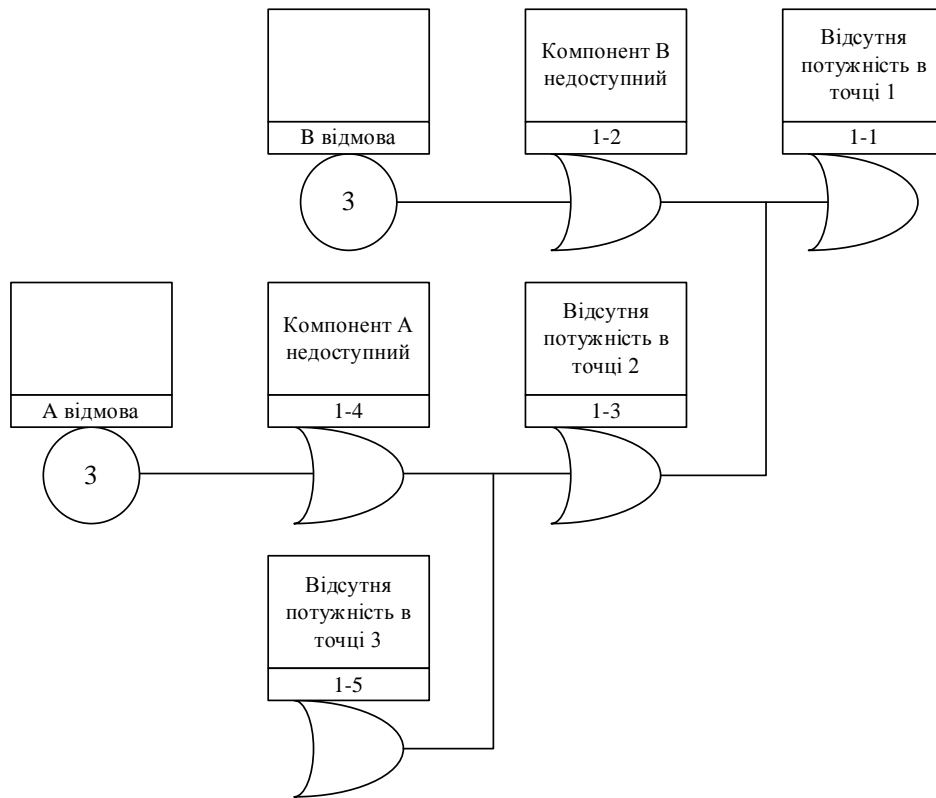


Рисунок 2.4 – Аналіз дерева несправностей для прикладу 1

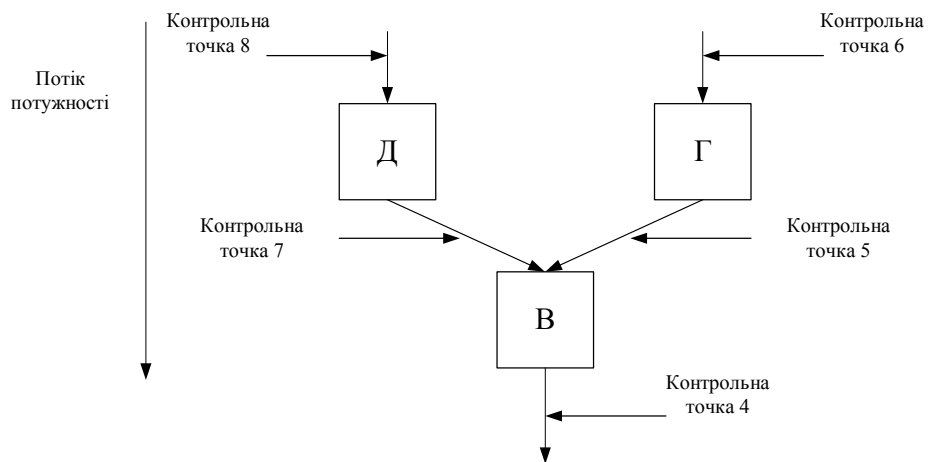


Рисунок 2.5 – Ілюстрація техніки моделювання

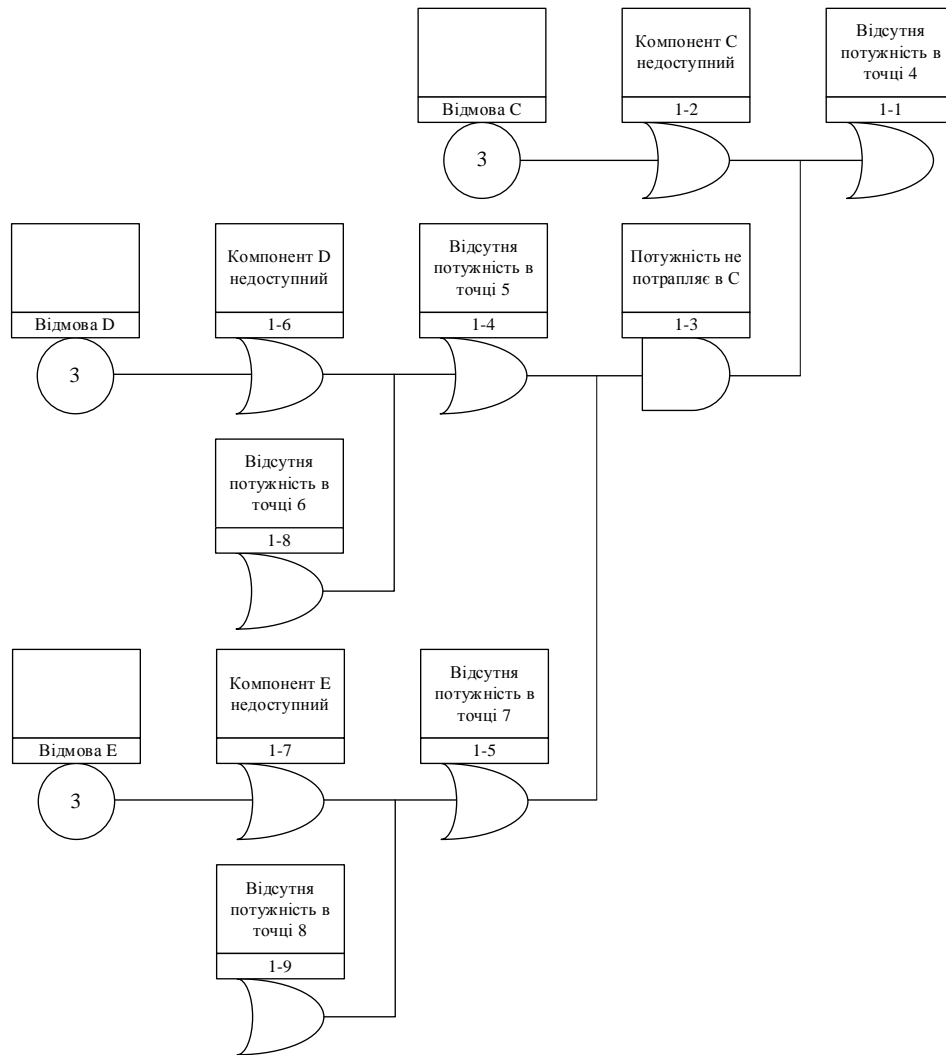


Рисунок 2.6 – Дерево несправностей прикладу 2

2.4.3 Аналіз дерева несправностей для спрощеної полупотурної схеми розподільного пристрою

Тепер застосуємо методику моделювання до спрощеної полупотурної схеми високовольтного розподільного пристрою (рис. 1.5), котра не включає роз'єднувачі.

Дерево несправностей для полупотурної схеми показано на рис. 2.7. Верхня подія визначається як «відсутність живлення обидвох навантажень», в результаті чого блок «I» розділяє дві причини: «відсутність живлення на лінії а» і «відсутність живлення на лінії б», які відображають той факт, що вихід з ладу обох відхідних ліній призводить до верхньої події.

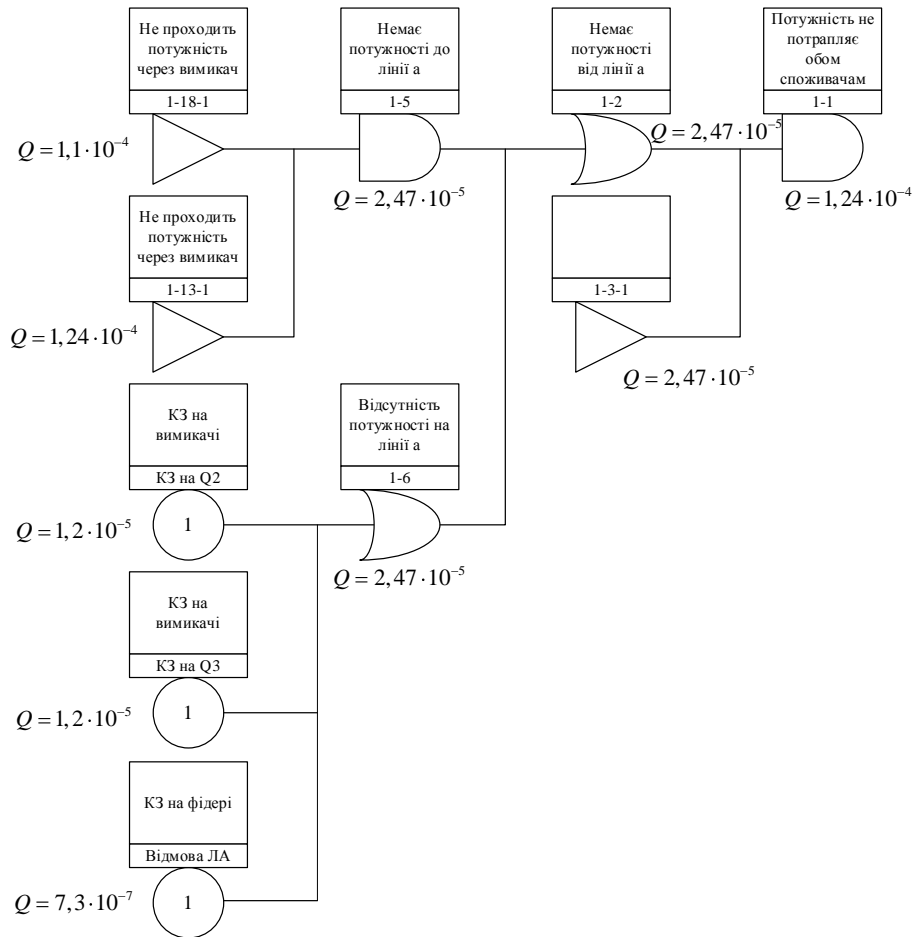


Рисунок 2.7 – Дерево несправностей верхньої події

Оскільки дві вихідні лінії розташовані симетрично, дерево несправностей, представлене на рис. 2.7, показує лише випадок відключення вихідної лінії а. Метод моделювання полягає в тому, щоб розділити відмову на дві прямі причини, а саме: «компонент недоступний» або «потужність не надходить до компонента, коли він доступний», відповідно до напрямку потоку потужності. У цьому випадку, два фактори безпосередньо спричиняють «відсутність живлення від лінії а», що теж саме що і «відсутність живлення до лінії а», або «компонент недоступний». Недоступність компонента вказує або на сам компонент у стані несправності, або на несправність суміжних компонентів, що спричиняє його недоступність. «На лінію а не надходить живлення» вказує на те, що на вихідну лінію а не надходить живлення, навіть якщо вона перебуває у справному стані. Оскільки потік потужності на вихідну лінію а можна

простежити в обох напрямках через автоматичні вимикачі 2 і 3, використовується блок «I». Це подібно до прикладу з рис. 2.6.

Напрямок потоку потужності через Q2 від обох джерел показано на рис. 2.8.

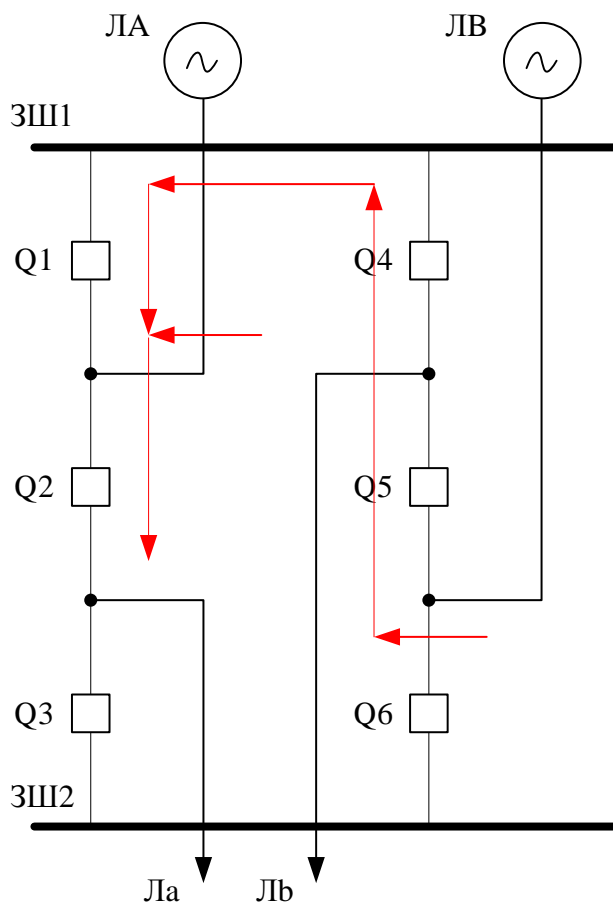


Рисунок 2.8 – Напрямок потоку потужності від обох вхідних ліній через Q2

Продовжуючи аналіз безпосередніми причинами «відсутності потужності через Q2» є або «недоступність Q2» (рис. 2.9), яка складається з п'яти основних подій, включаючи як дії захисту, так і коротке замикання самого Q2 (рис. 2.10), або «потужність не надходить до Q2», що відноситься до ситуації, коли «потужність не надходить як від вхідної лінії А, так і від Q1» одночасно.

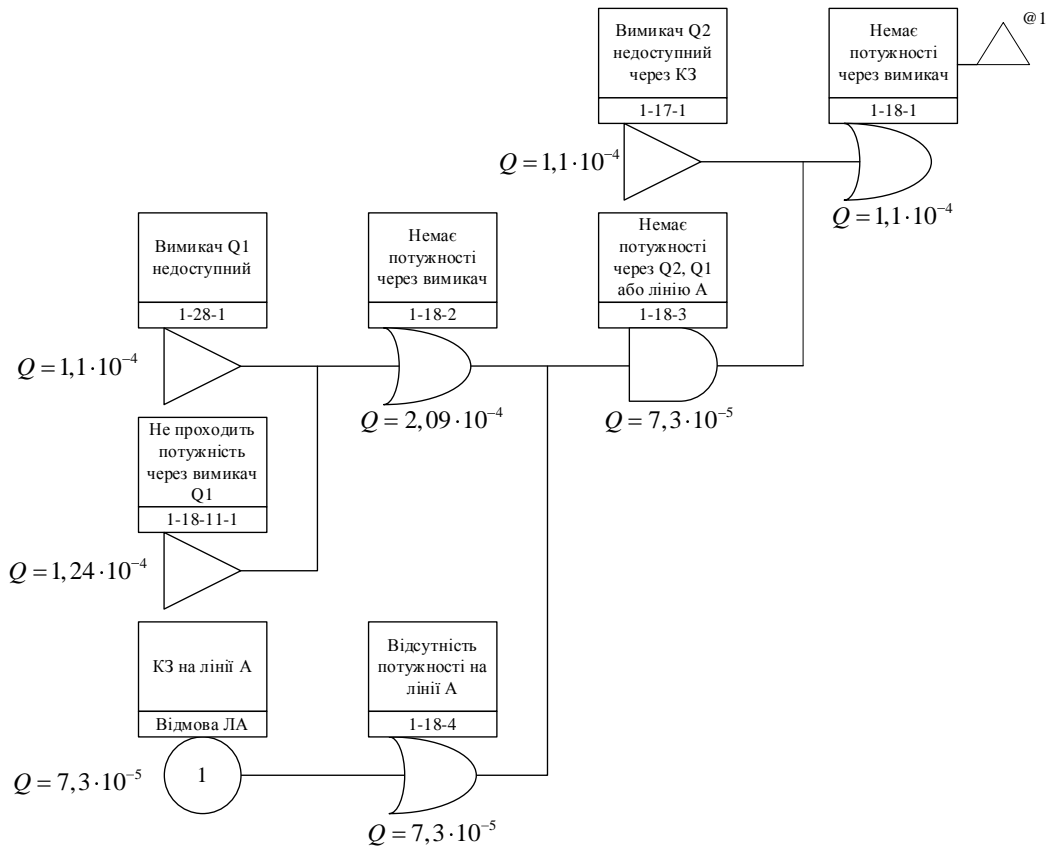


Рисунок 2.9 – Дерево несправностей при відсутності перетоків потужності через Q2

Зауважу, що під блоком «не надходить потужність на Q2» розглядаються тільки потоки потужності з боку вхідної лінії А та з боку Q1. Коротке замикання вхідної лінії А, яке викликає спрацювання захисту як Q1, так і Q2, обробляється проміжною подією «Q2 недоступний» (рис. 2.10), що безпосередньо призводить до відключення живлення на Q2.

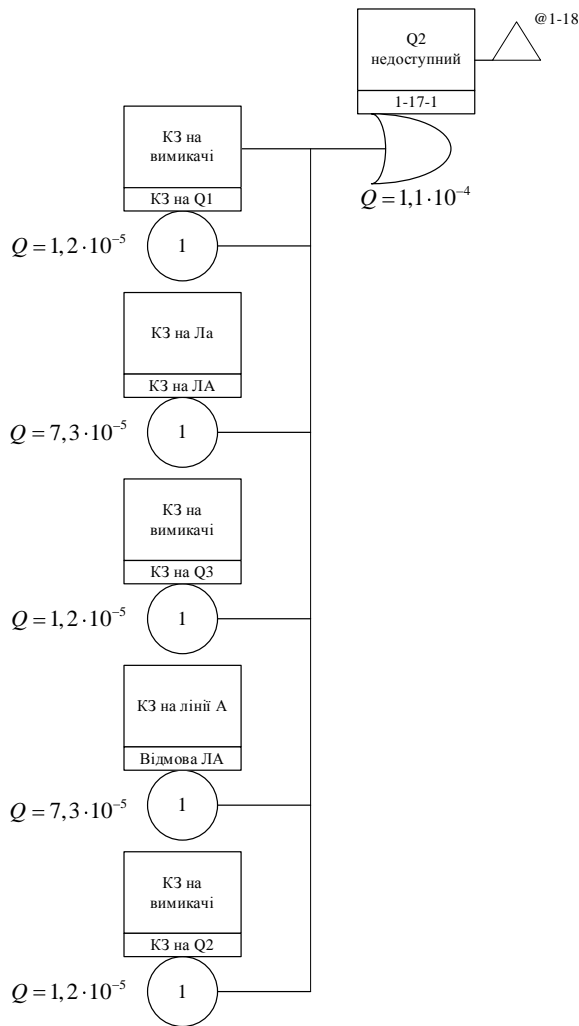


Рисунок 2.10 – Дерево несправностей недоступного Q2

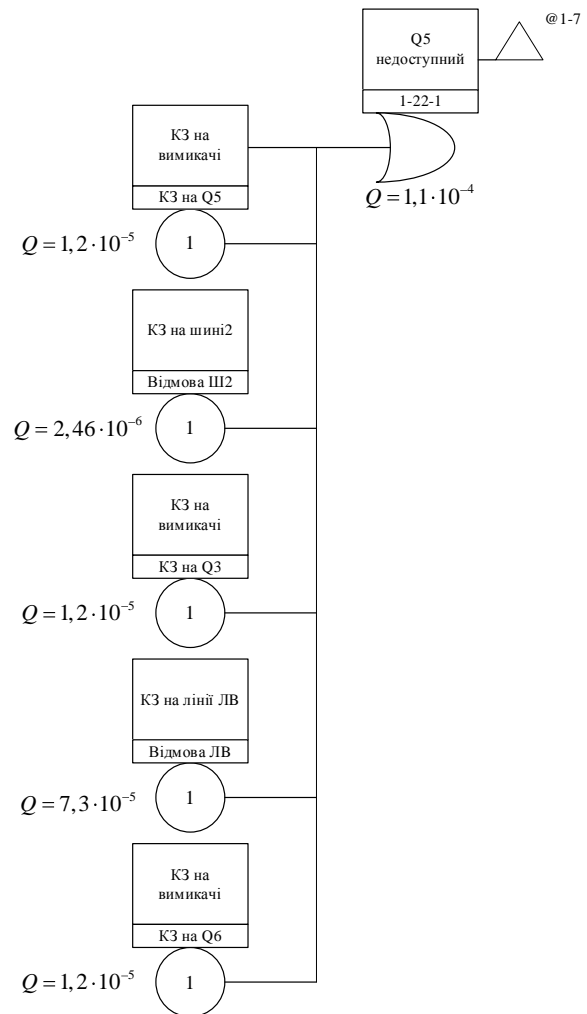


Рисунок 2.11 – Дерево несправностей недоступного Q1

Проміжна подія «вимикач Q2 недоступний», показана на рис. 2.10, розбивається на п'ять різних основних подій, перші чотири з яких розглядаються як «відключення на вимогу» вимикача Q2 з метою захисту від пошкоджень суміжних компонентів, а остання основна подія – як його власне коротке замикання. Аналогічно, всі інші вимикачі розглядаються так само.

Потім дерево несправностей повертається на один компонент назад до аналізу «відсутність живлення в Q1» (рис. 2.12). Дотримуючись подібного підходу, причинами такої небажаної проміжної події є або «шина 1 недоступна», що є несправністю компонента, або «живлення не надходить на

шину 1», що є сценарієм відсутності живлення, навіть якщо компонент перебуває у справному стані.

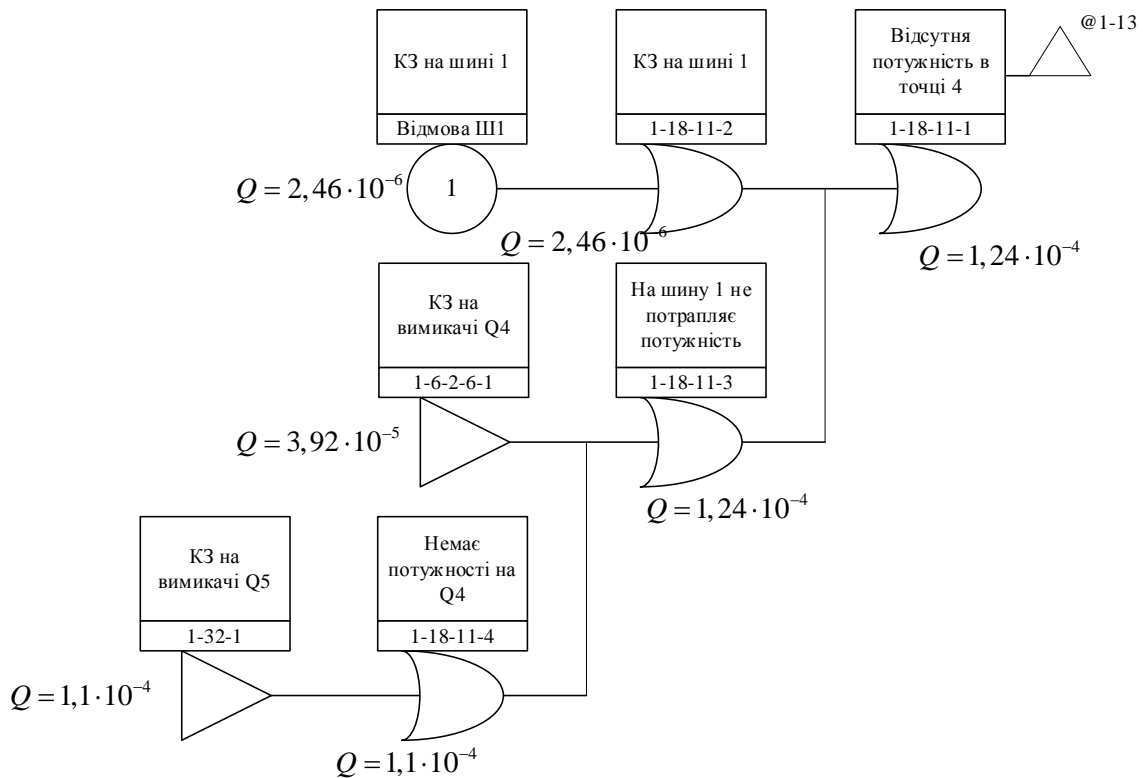


Рисунок 2.12 – Дерево несправностей за відсутності надходження потужності до Q1

Аналіз продовжується на основі напрямку потоку потужності і закінчується, поки не досягне відсутності потужності, що надходить з боку генерації на лінії В, яка обробляється блоком «недоступність Q5» (рис. 2.12 і рис. 2.14). Причина того, що «потужність не надходить до Q5, коли вона доступна», потенційно паралельно з «недоступністю Q5», може бути проігнорована в нижній частині дерева несправностей, полягає в тому, що всі можливі причини, які призводять до «відсутності потоку потужності до Q5», включені в проміжну подію «недоступність Q5», і вони не будуть повторятися.

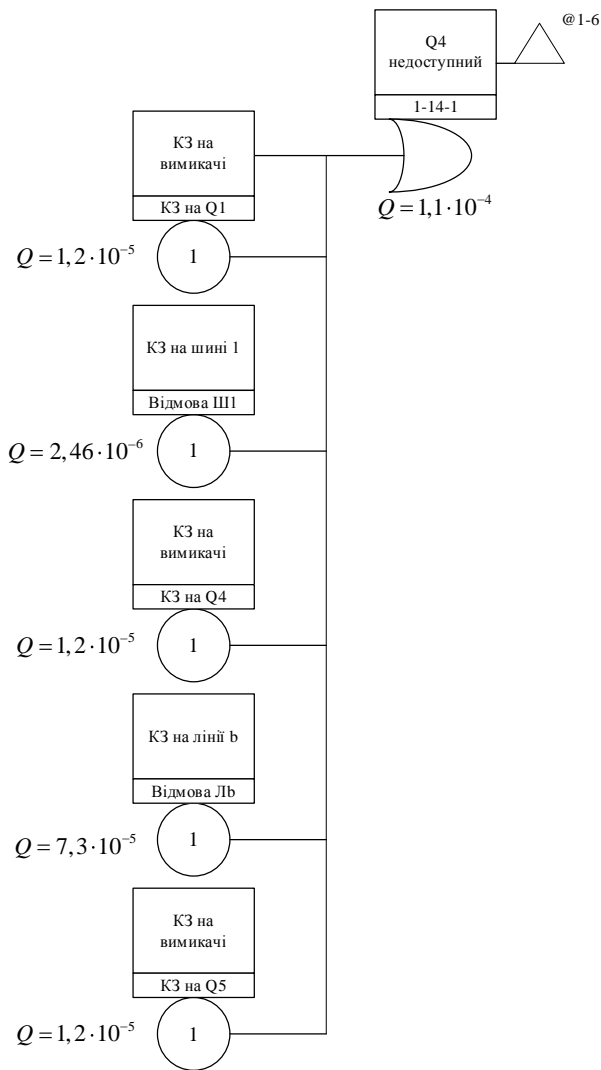


Рисунок 2.13 – Дерево несправностей недоступного Q4

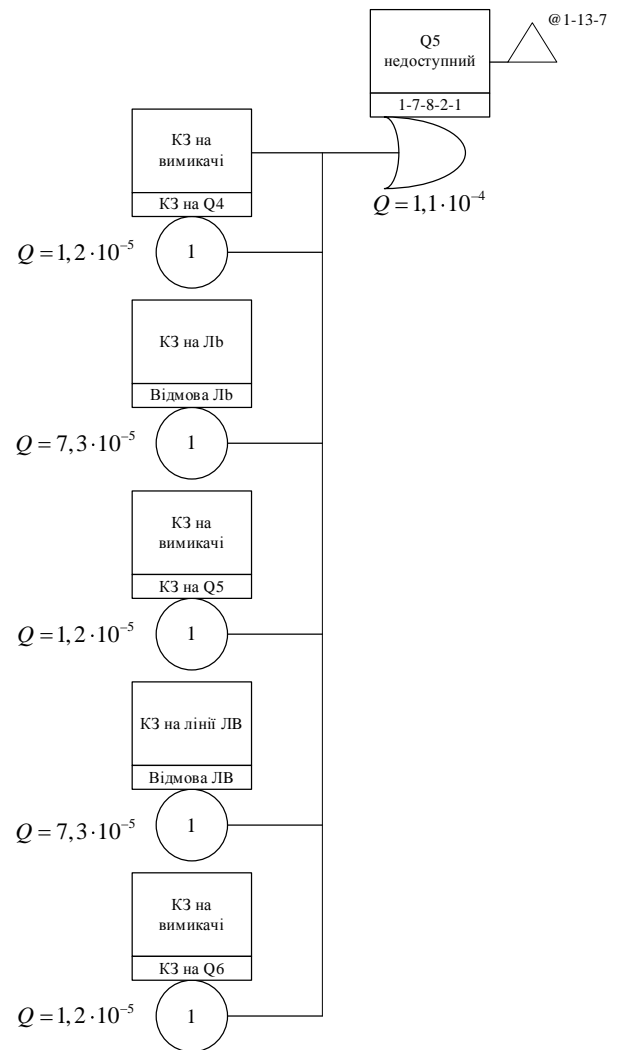


Рисунок 2.14 – Дерево несправностей недоступного Q5

Зауважте, що у випадку «потужність не надходить до лінії а», показаному на рис. 2.7, дві проміжні події «потужність не надходить через Q2» та «потужність не надходить через Q3» з'єднані між собою за допомогою блоку «І». Проаналізуємо проміжну подію «відсутність перетоків потужності через Q3». Вона аналізується за тією ж схемою, що й у випадку «відсутність живлення через Q2», яка розглядалася вище, з урахуванням того, що в цьому випадку потік живлення спрямований проти годинникової стрілки. Дерево несправностей для Q3 також було розроблено і показано на рис. 2.15 та рис. 2.16.

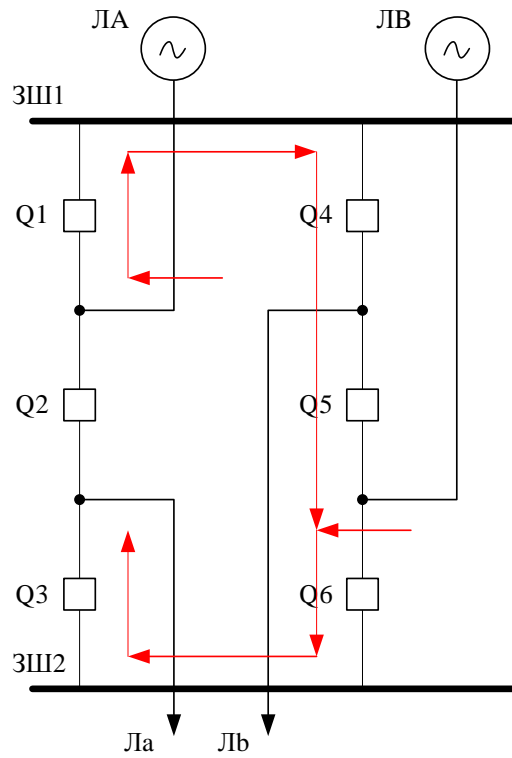


Рисунок 2.15 – Напрямок потоку потужності від обох вхідних ліній через Q3

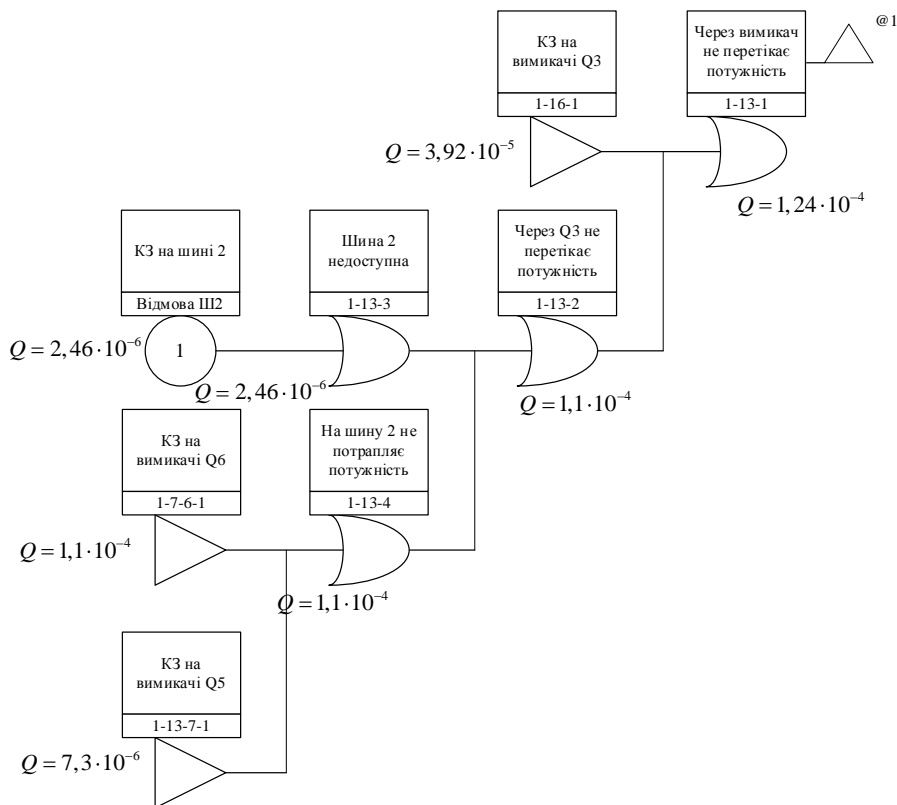


Рисунок 2.16 – Дерево несправностей при відсутності перетоків потужності через Q3

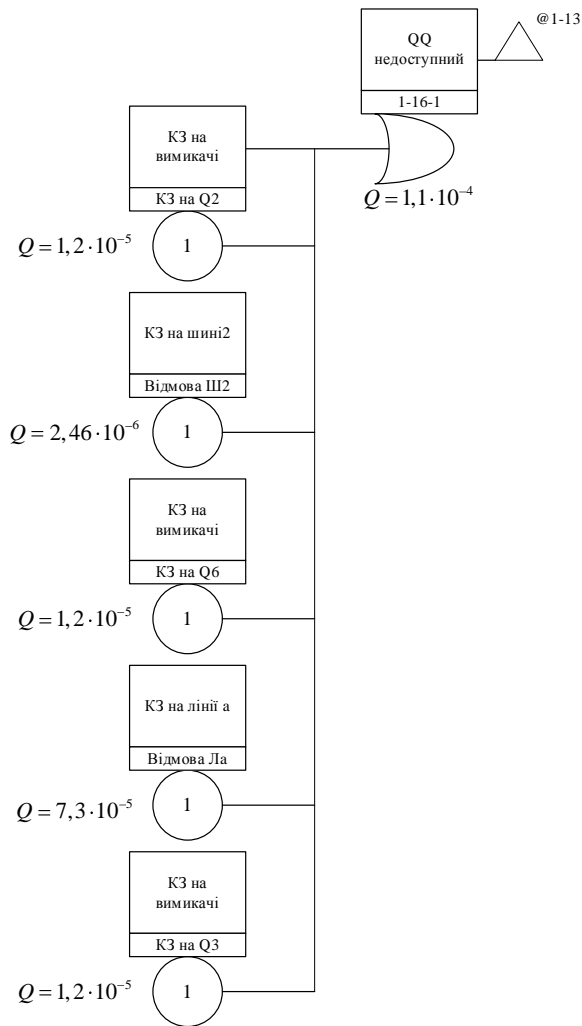


Рисунок 2.17 – Дерево несправностей недоступного Q3

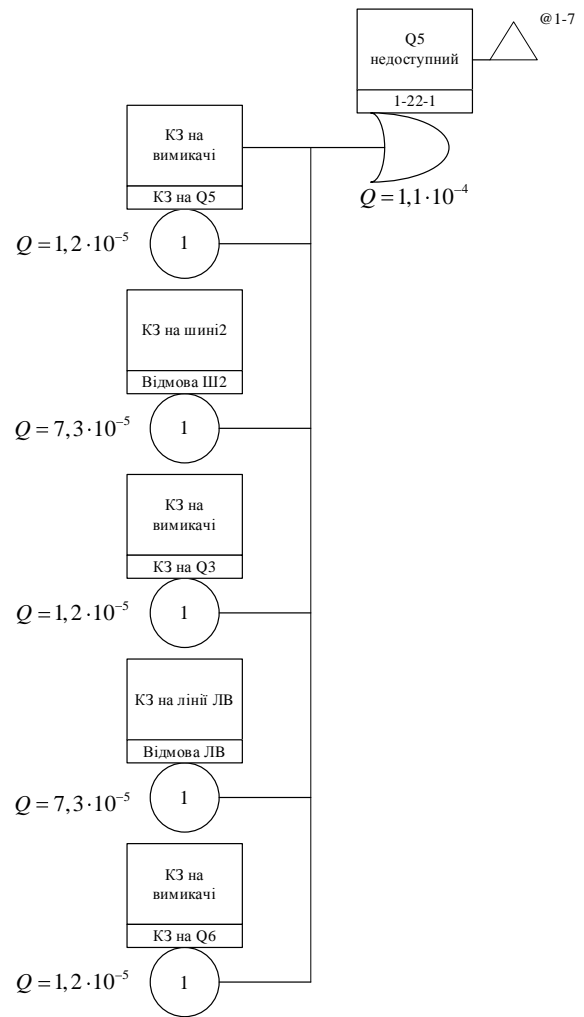


Рисунок 2.18 – Дерево несправностей недоступного Q6

Такий самий підхід було застосовано до іншої вихідної лінії b (рис. 2.20).

У цій схемі кожна з двох вхідних ліній має довжину 10 км, що є прийнятною відстанню від електростанції до підстанції. Припускається, що кожна з вихідних ліній має довжину 100 метрів, що також є прийнятною відстанню від підстанції до підземних ліній електропередачі. Причиною визначення довжини ліній є те, що частота відмов ліній пропорційна їх довжині. Дані є наступними вибрані з проекту АВВ/STRI. Детальні вхідні параметри наведені в табл. 2.4.

Результати TopEvent FTA узгоджуються з результатами GRIF TREE з незначною різницею через конвертацію одиниць виміру. Узгодженість результатів обох інструментів моделювання підтверджує логіку побудови дерева відмов для оцінки надійності полуторної полуторної схеми. Таку техніку моделювання дерева несправностей «компонент недоступний» і «живлення не надходить до компонента, коли він доступний» можна розширити, щоб оцінити більш складну структуру системи, наприклад, полуторна схема з роз'єднувачами або перетворювачами.

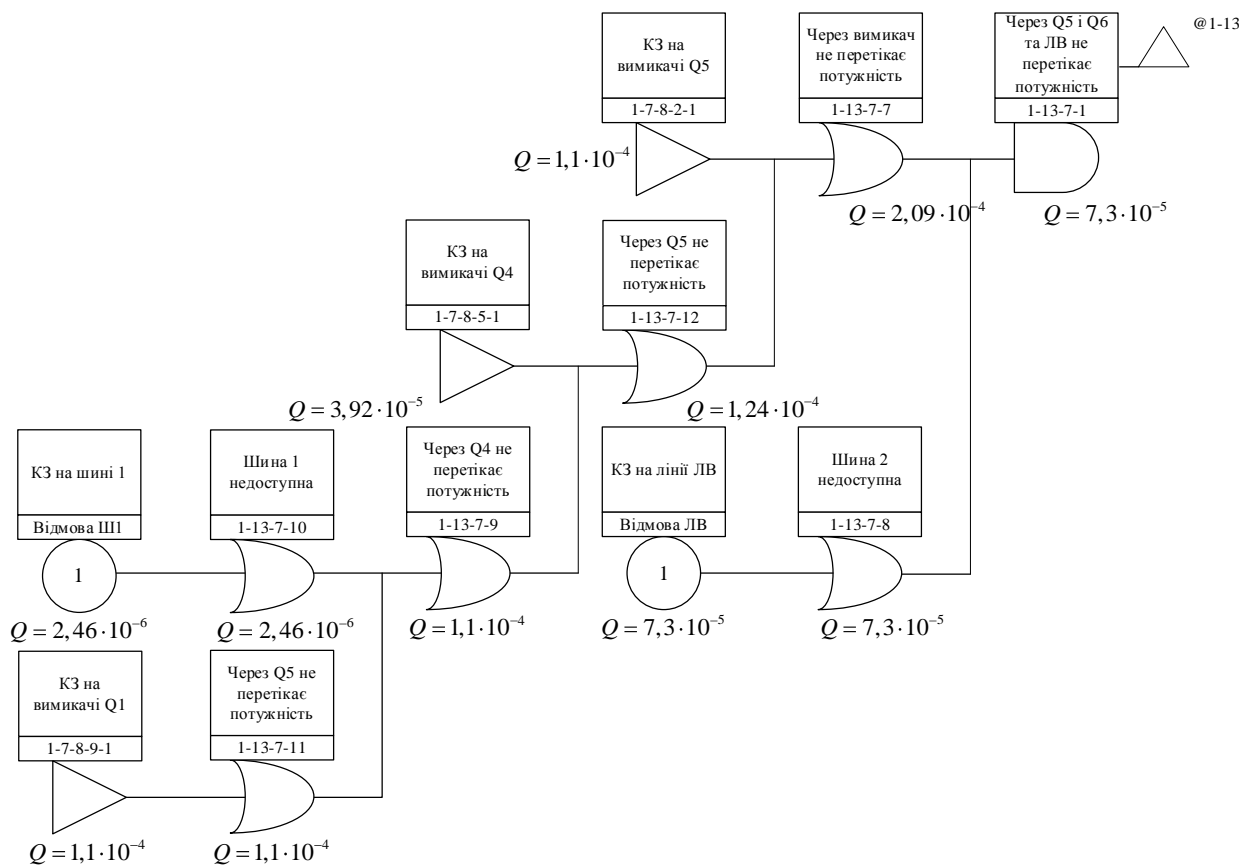


Рисунок 2.19 – Дерево несправностей при відсутності перетікання потужності на Q6

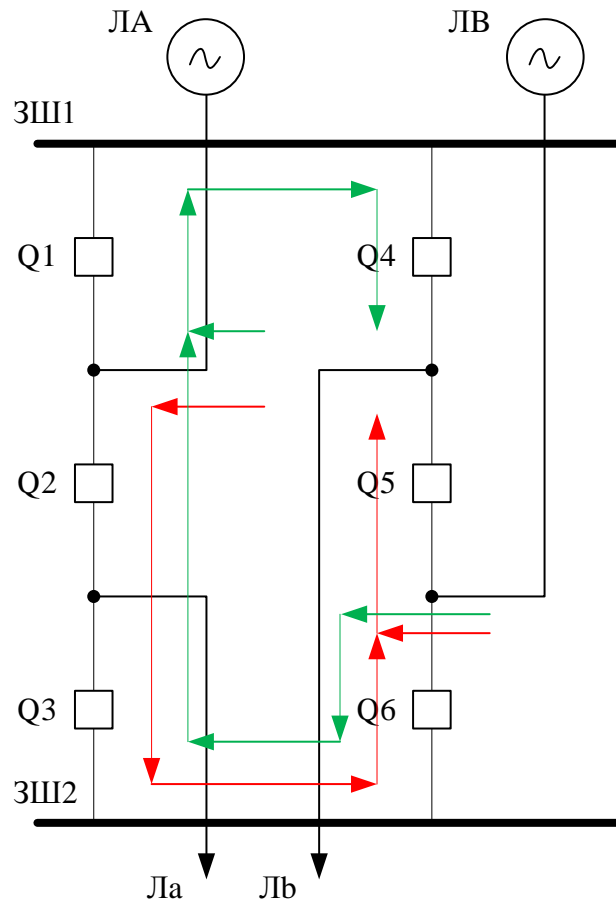


Рисунок 2.20 – Напрямок потоку потужності вихідної лінії Лб

Таблиця 2.4 – Вхідні параметри

Параметри	TopEvent FTA		GRIF TREE	
	Частота відмов, відмов/ГОД	$T_{від\ сеп}$, ГОД	Частота відмов	$T_{від\ сеп}$, ГОД
Вимикач	10^{-6}	12	$88 \cdot 10^{-4}$ (відмов/рік)	12
Шина	$2,05 \cdot 10^{-7}$	12	$18 \cdot 10^{-4}$ (відмов/рік)	12
Вхідна лінія	$9,13 \cdot 10^{-6}$	8	$8 \cdot 10^{-3}$ (відмов/рік/км)	8
Вихідна лінія	$9,13 \cdot 10^{-8}$	8	$8 \cdot 10^{-3}$ (відмов/рік/км)	8

Таблиця 2.5 – Результати моделювання полуторної схеми розподільного пристрою

	TopEvent FTA		GRIF TREE	
	Середня недоступність ($Q_{сер}$)	Безумовна інтенсивність відмов (W)	Загальна тривалість відключення (TOD, год/рік)	Загальна частота відключень (TOF відмов/рік)
Відсутність перетікання потужності з лінії а	$2,47 \cdot 10^{-5}$	$2,093 \cdot 10^{-6}$	0,2176 $Q_{сер} = 2,48 \cdot 10^{-5}$	0,0184 $W = 2,1 \cdot 10^{-6}$
Відсутність перетікання потужності з лінії б	$2,47 \cdot 10^{-5}$	$2,093 \cdot 10^{-6}$	0,2176 $Q_{сер} = 2,48 \cdot 10^{-5}$	0,0184 $W = 2,1 \cdot 10^{-6}$

$$* Q_{сер} = \frac{ЗТВ}{8760 \text{ год/рік}}; W = \frac{ЗЧВ}{8760 \text{ год/рік}}.$$

Крім того, TopEvent FTA дає мінімально скорочені набори всіх подій, визначених у дереві несправностей, при цьому спостерігається, що найбільш значущими факторами, які спричиняють «відсутність перетікання потужності з лінії а», є «коротке замикання Q2», «коротке замикання Q3» і «відключення лінії а».

При побудові дерева пошкоджень у GRIF TREE зроблено кілька припущень, які можуть вплинути на фактичний вибір проєкту підстанції. Наприклад, потужність вимикача вважається достатньою для відключення одного вимикача у випадку усунення пошкодження або передачі всього потоку потужності у випадку технічного обслуговування. Крім того, при фактичному проєктуванні необхідно враховувати теплове навантаження шин.

Розглянемо випадок, коли всі середні вимикачі знаходяться в стані технічного обслуговування, і вся вхідна потужність надходить на шину 1 через бічні вимикачі, що призводить до їх жорсткого нагрівання. Однак у нашому аналізі передбачається, що вимикачі та шини мають достатню потужність для передачі потоку потужності, так що основні особливості полуторної схеми можуть бути використані у випадку несправності або технічного обслуговування. З іншого боку, може статися так, що система, яка містить вимикачі, підключені паралельно до шини, може вийти з ладу, якщо певна кількість вимикачів вийде з ладу в умовах сильного перегріву, і це можна змодельовати за допомогою логіки K-out-of-N в дереві несправностей.

Технічне обслуговування полуторної схеми в цій роботі не передбачено. Однак його можна змодельовати, додавши базову подію ремонтної моделі, яка представляє операцію технічного обслуговування під тими засувками, що представляють “компонент недоступний”. У випадку, якщо існують певні правила в реальних операціях технічного обслуговування, наприклад, два вимикачі однакового містку не можуть виконувати операцію технічного обслуговування одночасно тощо, для моделювання правил технічного обслуговування можна використати вентиля XOR або NOT.

2.4.4 Полуторна схема розподільного пристрою з роз'єднувачами

Більш реалістичним варіантом полуторної схеми є розміщення двох роз'єднувачів з обох боків кожного вимикача для виконання технічного обслуговування та ізоляції несправностей.

Всі вхідні параметри залишаються незмінними, за винятком додавання вхідних даних роз'єднувачів: $\lambda = 53 \cdot 10^{-4}$, $T_{\text{від сер}} = 24 \text{ год}$ години. Результати як TopEvent FTA, так і GRIF TREE наведені в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Результати моделювання повної полуторної схеми розподільного пристрою

	TopEvent FTA		GRIF TREE	
	Середня недоступність ($Q_{сер}$)	Безумовна інтенсивність відмов (W)	Загальна тривалість відключення (ЗТВ, год/рік)	Загальна частота відключень (ЗЧВ відмов/рік)
Відсутність перетікання потужності з лінії а	$2,98 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	0,2608 $Q_{сер} = 2,98 \cdot 10^{-5}$	0,029 $W = 3,3 \cdot 10^{-6}$
Відсутність перетікання потужності з лінії б	$2,98 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	0,2608 $Q_{сер} = 2,98 \cdot 10^{-5}$	0,029 $W = 3,3 \cdot 10^{-6}$

Середній коефіцієнт недоступності Q та загальна тривалість відключень ЗТВ збігаються з невеликими розбіжностями через перерахунок одиниць виміру. Основні відмінності між двома методами полягають у результатах моделювання інтенсивності безумовних відмов W та загальної частоти відключень ЗЧВ. Щоб порівняти W з ЗЧВ переведемо одиницю виміру в ЗТВ. $W = 1,3 \cdot 10^{-6} \rightarrow ЗЧВ = 0,0114$. Вважаючи вихідну лінію відключеною, GRIF TREE розглядає коротке переривання потоку потужності, коли вимикач Q2 або Q3 зазнає пошкодження. Зокрема, у випадку, коли вимикач Q2 зазнає пошкодження, вимикачі Q1 і Q3 відключаються, щоб запобігти подальшому поширенню замикання на підстанцію. Перед тим, як роз'єднувачі Q3 і Q4 розімкнуться, щоб ізолювати вимикач, що вийшов з ладу, лінія а зазнає короткого переривання.

Аналогічний аналіз може бути застосований до випадку, коли вимикач Q3 зазнає пошкодження. Однак, через відсутність занепокоєння щодо короткочасного переривання, метод моделювання в аналізі дерева пошкоджень розглядає лише тривалі переривання, яких зазнає лінія, що відходить. Тим не менш, як ми бачимо в таблиці, Q без роз'єднувачів має той самий порядок величини, що і з роз'єднувачами. W мають таку саму тенденцію – вони мають однаковий порядок величини в обох випадках.

2.5 Схема розподільного пристрою зі здвоєними вимикачами

Одне із завдань дослідження – порівняти надійність полуторної схеми зі здвоєним вимикачем. Аналіз схеми зі здвоєним вимикачем на приєднання проводиться за аналогічною схемою з використанням як TopEvent FTA, так і GRIF TREE. Перш за все, всі припущення, зроблені при аналізі полуторної схеми, залишаються дійсними і для аналізу схеми зі здвоєним вимикачем на приєднання. У схемі зі здвоєним вимикачем дві шини з'єднують чотири містки, що утворює аналогічну схему з двома входами і двома виходами, як і в попередній полуторній схемі. Однолінійна схема такої схеми показана на рис. 1.7.

2.5.1 Аналіз дерева несправностей для простої схеми зі здвоєним вимикачем на приєднання

Верхня подія (рис. 2.21) аналізу дерева несправностей у схемі зі здвоєним вимикачем визначається як «відсутність подачі живлення на обидва споживача». Це значить, що відключення живлення відбувається одночасно на обох лініях a і b, що відходять. Оскільки лінії a і b розташовані в схемі симетрично, детально аналізується лише вихідна лінія a.

Стратегія залишається незмінною, оскільки причиною відключення живлення є або «компонент недоступний», або «живлення не надходить до компонента, навіть якщо він знаходиться в робочому стані».

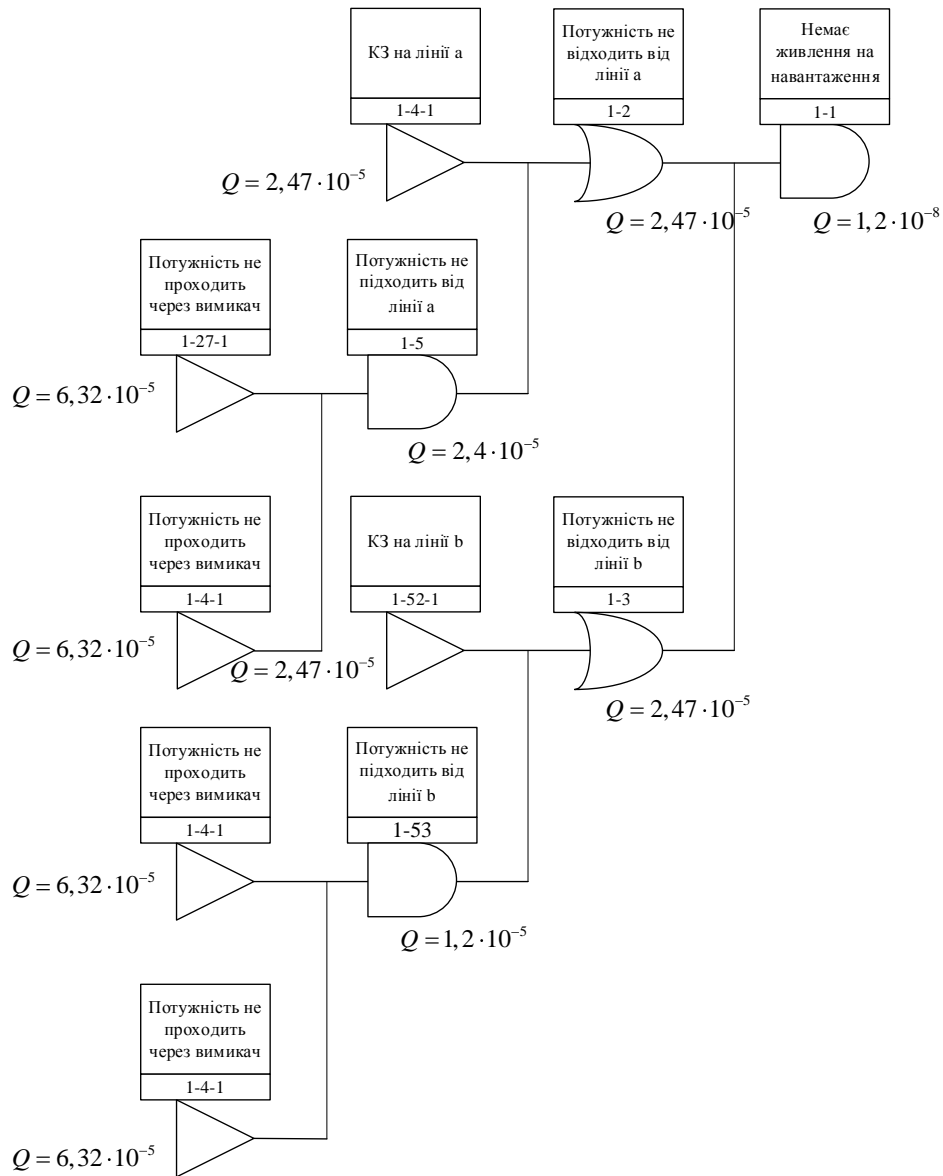


Рисунок 2.21 – Дерево несправностей верхньої події

Дві причини спричиняють відсутність живлення на лінії a, а саме: «КЗ лінії a (коротке замикання) або несправність суміжних компонентів» або «живлення не надходить на лінію a».

Першу причину можна уточнити наступним чином, як показано на рис. 2.22.

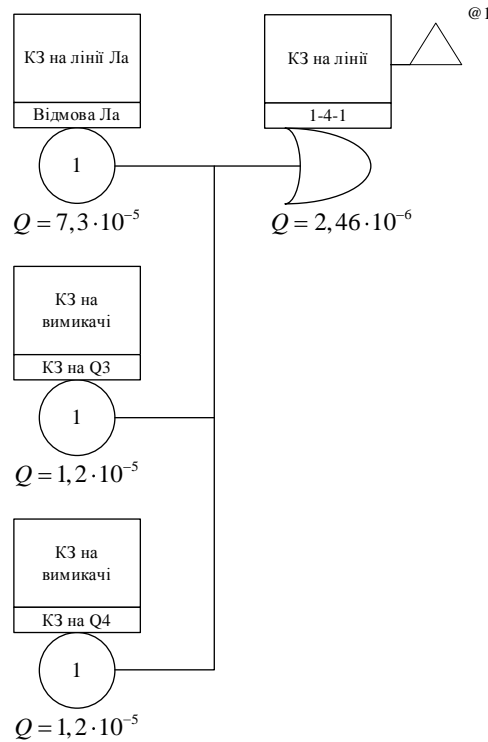


Рисунок 2.22 – Дерево несправностей несправності лінії, що відходить, або несправності суміжних компонентів

Остання причина поділяється на дві підкатегорії. З точки зору перетоків потужності «відсутність перетоків потужності у вихідну лінію а» – це або «відсутність перетоків потужності через Q3», або «відсутність перетоків потужності через Q4». Знову ж таки, тільки один випадок розглядається детально через дуже симетричну структуру схеми. Візьмемо для прикладу випадок «відсутність потоків потужності через Q3». Напрямок потоку потужності показано на рис. 2.23. Дерево пошкоджень показано на рис. 2.24.

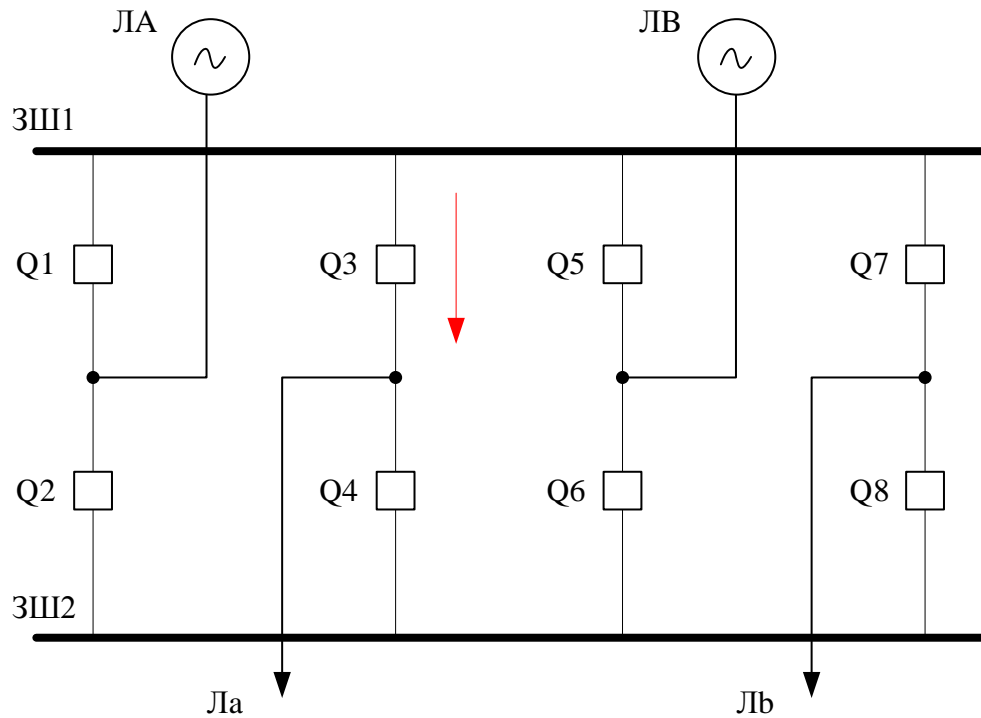


Рисунок 2.23 – Напрямок потоку потужності через Q3

Подія «відсутність перетоку потужності через Q3» може бути спричинена лише «недоступністю Q3» або «відсутністю перетоку потужності до Q3». Якщо простежити напрямок потоку потужності, то «шина ЗШ1 недоступна» або «потужність не надходить на шину ЗШ1» стають лише двома причинами, які спричиняють відключення живлення, що перетікає на Q3. Електроенергія може надходити трьома шляхами через Q1, Q5 або Q7. Для того, щоб оцінити виникнення відключення живлення на шині 1, всі потоки живлення від Q1, Q5 та Q7 повинні одночасно зазнати відключення, як показано на рис. 2.25, і, таким чином, для представлення логіки моделювання використовується блок логічного «І».

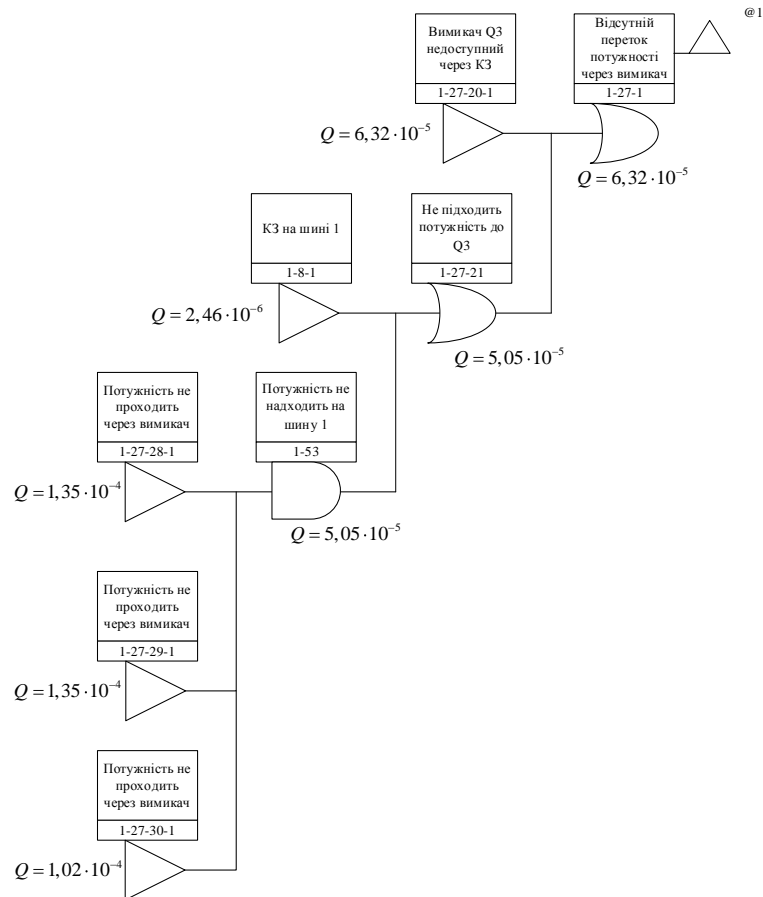


Рисунок 2.24 – Дерево несправностей при відсутності перетоків потужності через Q3

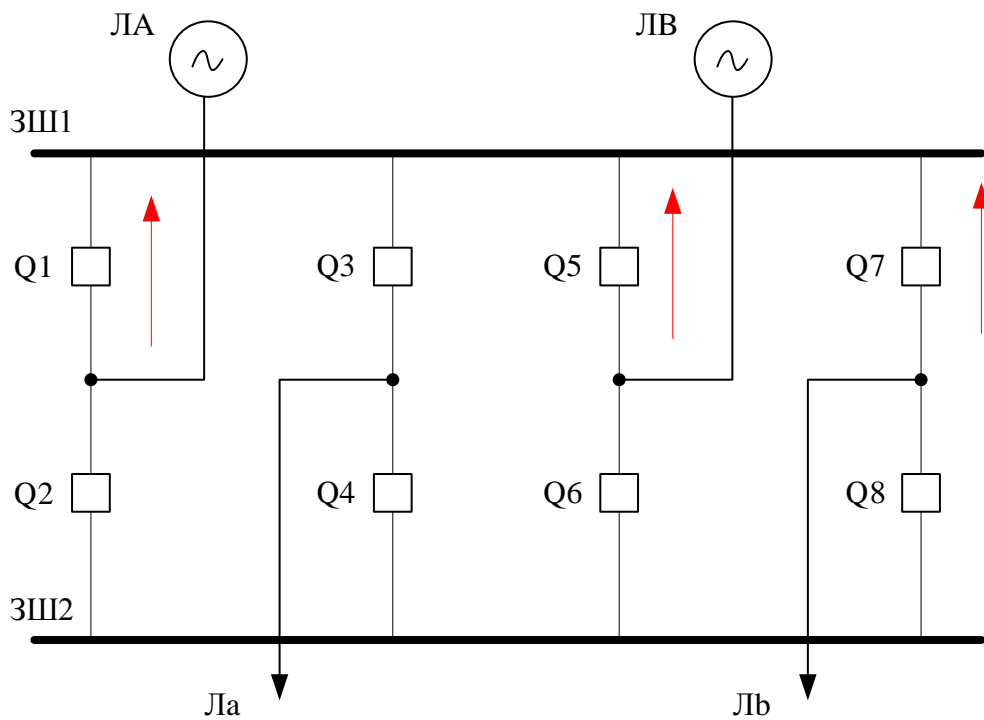


Рисунок 2.25 – Напрямок потоку потужності на шину ЗШ1

Щоб оцінити відключення електроенергії через Q1, як показано на рис. 2.26, можна простежити напрямок потоку потужності, відстеживши всі компоненти, через які проходить потужність. Зосередимося, наприклад, на «відсутності потоку потужності через Q1». Проміжною подією може бути виникають, тому що або Q1 знаходиться в недоступному стані, або живлення, що подається на Q1, може бути відключено. Остання подія уточнюється як «відсутність потоку потужності, що надходить на лінію А від генерації» та «відсутність потоку потужності через Q2» одночасно.

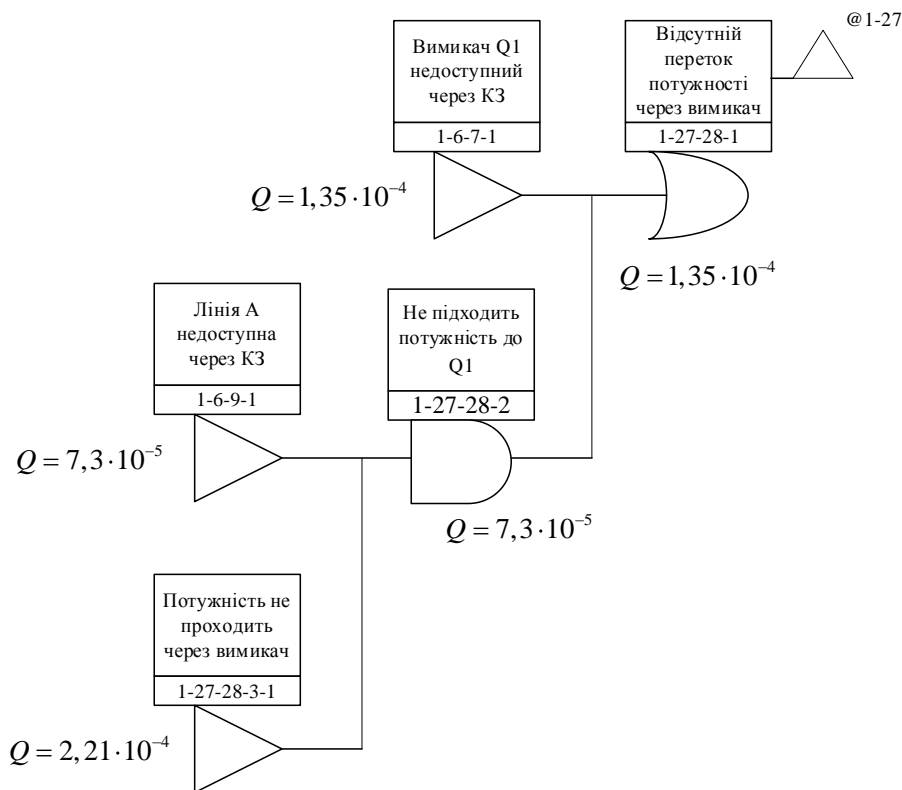


Рисунок 2.26 – Дерево несправностей при відсутності потоків потужності через Q1

Продовжуючи відстежувати напрямок потоку потужності, показаний на рис. 2.27, відключення живлення на Q2 може бути або власною недоступністю, або відключенням живлення від шини ЗШ2. Дерево несправностей представлено на рис. 2.28. Остання подія визначається як «шина ЗШ2 недоступна» або «живлення не надходить на шину ЗШ2». До цього моменту єдиною причиною відсутності потоку потужності на шині 2

було те, що Q6 перебуває в недоступному стані, що безпосередньо вказує на можливу причину відмови вхідної лінії В або короткого замикання Q5.

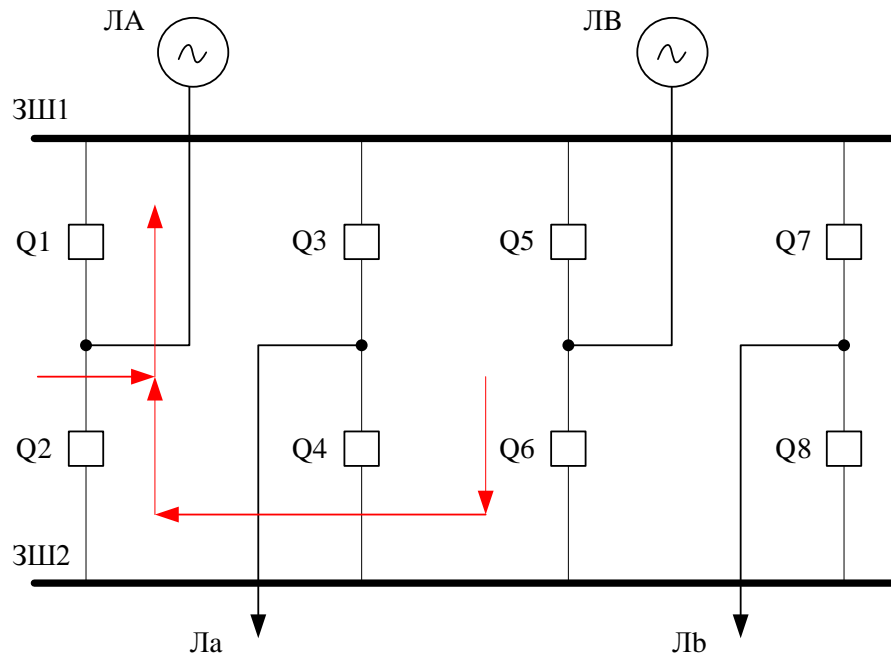


Рисунок 2.27 – Напрямок потоку потужності від обох вхідних ліній до шини ЗШ1

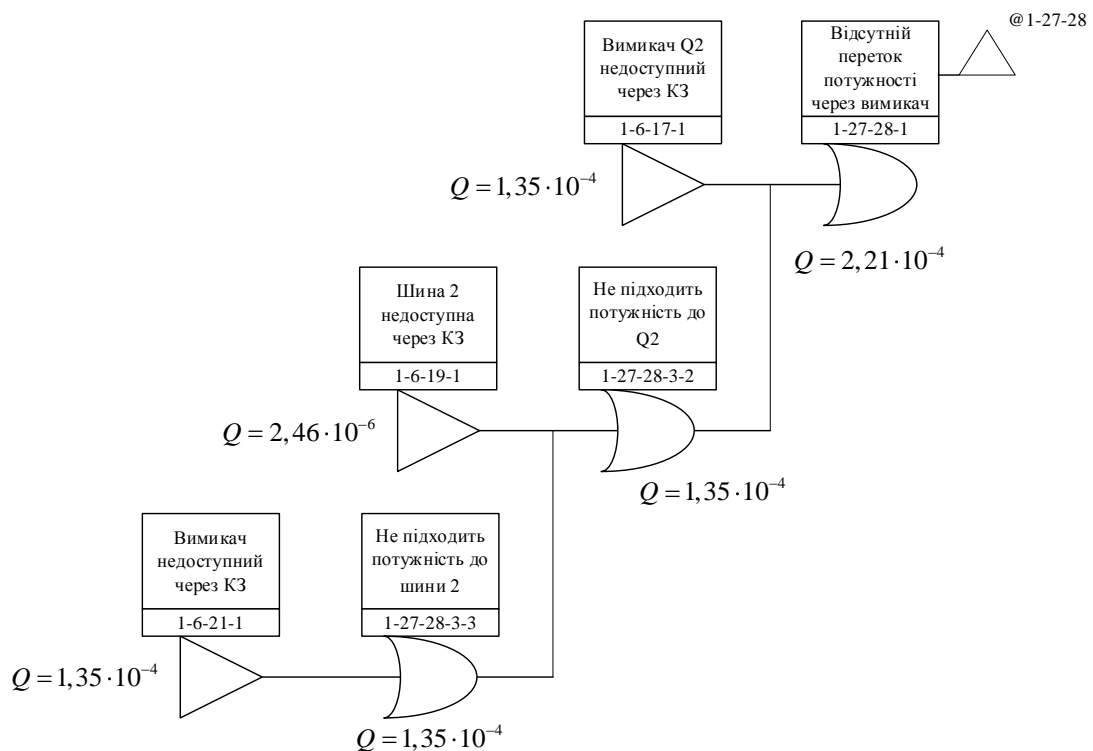


Рисунок 2.28 – Дерево несправностей за відсутності перетоків потужності через Q2

Повернемося до проміжних подій «відсутність перетоків потужності через Q5» та «відсутність перетоків потужності через Q7», показаних на рис. 2.24, а детальний графік перетоків потужності показано на рис. 2.29 і рис. 2.30, а дерева несправностей, що відповідають «відсутність потоків потужності через Q5» (рис. 2.31) та «відсутність потоків потужності через Q7», показано на рис. 2.32.

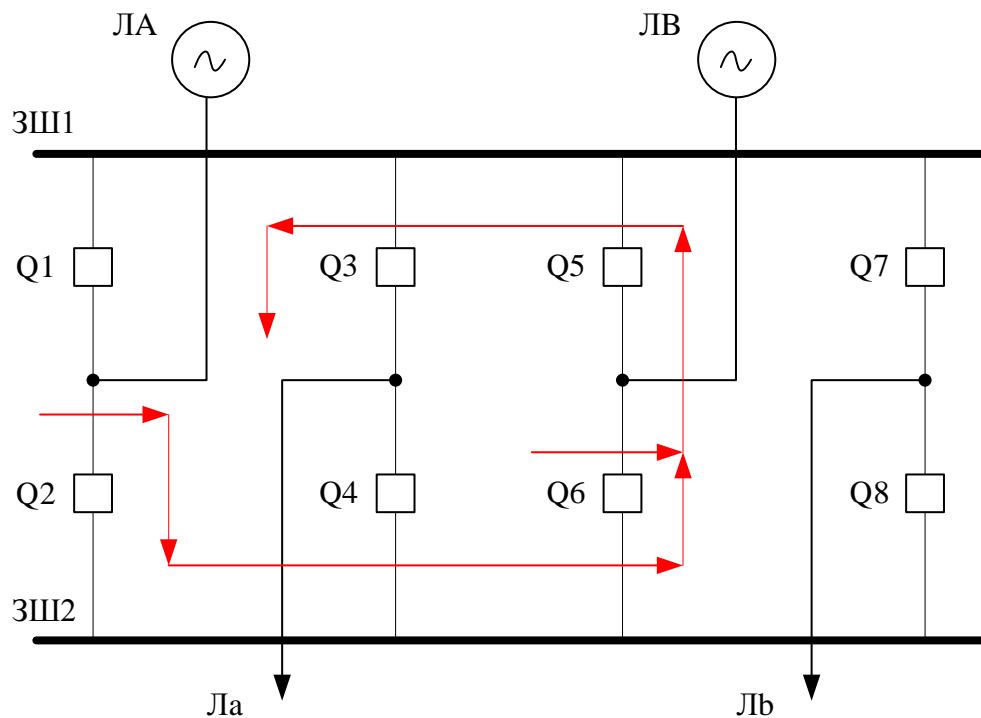


Рисунок 2.29 – Напрямок потоку потужності від обох вхідних ліній через Q6, Q5 та Q3 (альтернативний шлях)

Для того, щоб порівняти результати з TopEvent FTA та GRIF TREE, а також між полуторною схемою та схемою зі здвоєним вимикачем, вхідні дані були обрані з одних і тих самих джерел для цілей порівняння.

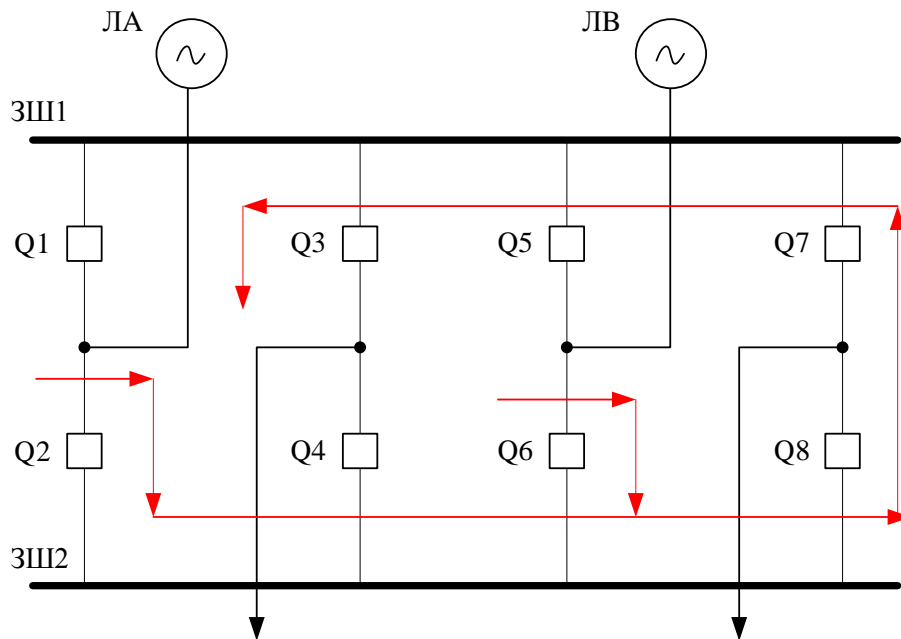


Рисунок 2.30 – Напрямок потоку потужності від обох вхідних ліній через Q8, Q7 та Q3 (альтернативний шлях)

Таблиця 2.7 – Результати моделювання спрощеної схеми зі здвоєним вимикачем

	TopEvent FTA		GRIF TREE	
	Середня недоступність ($Q_{сер}$)	Безумовна інтенсивність відмов (W)	Загальна тривалість відключення (TOD, год/рік)	Загальна частота відключень (TOF відмов/рік)
Відсутність перетікання потужності з лінії а	$2,47 \cdot 10^{-5}$	$2,093 \cdot 10^{-6}$	0,2176 $Q_{сер} = 2,48 \cdot 10^{-5}$	0,0184 $W = 2,1 \cdot 10^{-6}$
Відсутність перетікання потужності з лінії б	$2,47 \cdot 10^{-5}$	$2,093 \cdot 10^{-6}$	0,2176 $Q_{сер} = 2,48 \cdot 10^{-5}$	0,0184 $W = 2,1 \cdot 10^{-6}$

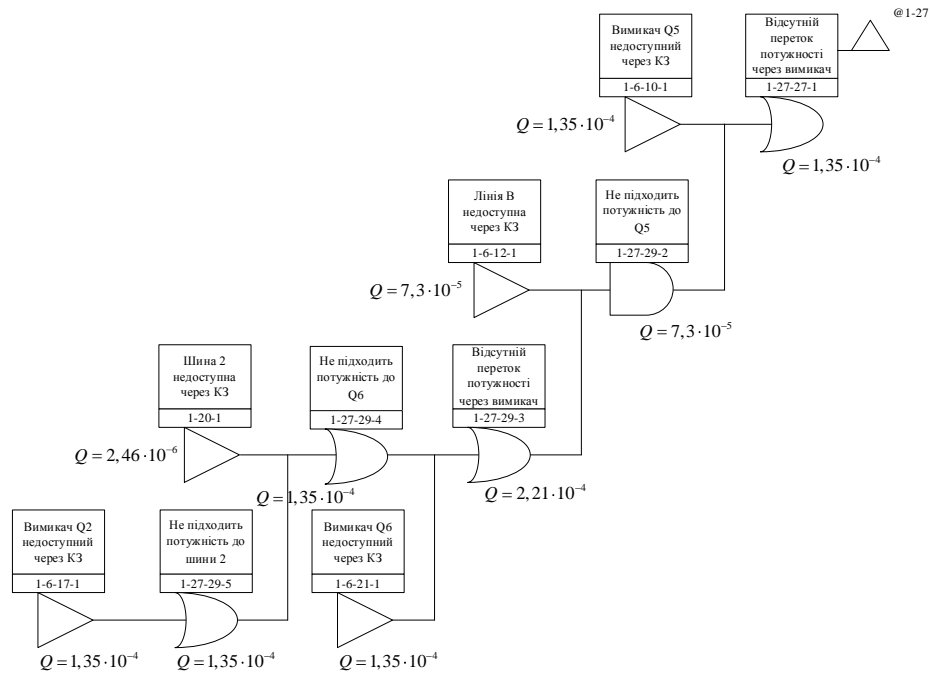


Рисунок 2.31 – Дерево несправностей за відсутності перетоків потужності через Q5 (альтернативний шлях)

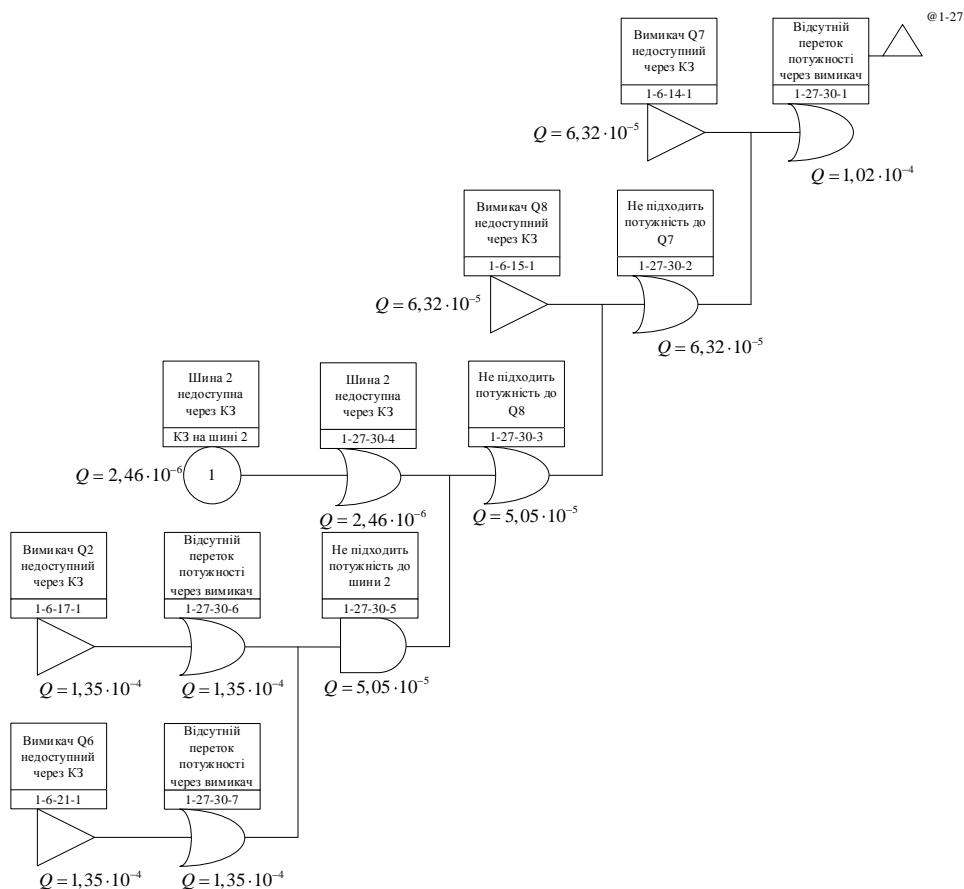


Рисунок 2.32 – Дерево несправностей за відсутності перетоків електроенергії через Q7 (альтернативний шлях)

2.6 Порівняння модельних даних з різних програмних продуктів

Результати TopEvent FTA та GRIF TREE для відключення однієї вихідної лінії порівнюються для перевірки методу моделювання. Крім того, порівняння проводиться між схемою з полуторною схемою та схемою зі здвоєними вимикачами, щоб оцінити більш надійне рішення з цих двох альтернатив. Для порівняння двох схем всі вхідні параметри схеми зі здвоєним вимикачем на приєднання залишаються такими ж, як і у випадку з полуторною схемою.

Вхідні параметри та результати моделювання для схеми зі здвоєними вимикачами та полуторним вимикачем є ідентичними. Ідентичні результати обох інструментів ще раз підтверджують правильність методики моделювання.

Більш того, як показано в табл. 2.4 і табл. 2.7, результати обох інструментів вказують на той факт, що обидві схеми розподільних пристроїв підстанцій підстанцій мають однакову надійність, враховуючи випадок відключення лише однієї лінії, що відходить, за певних припущень, які були зроблені перед оцінкою:

- довжина вхідних та вихідних ліній становить 10 км та 0,1 км відповідно.
- усі компоненти стикаються лише з найсерйознішими несправностями, такими як коротке замикання, що вимагає негайного переривання та ремонту;
- система захисту функціонує бездоганно, оскільки вона налаштована за замовчуванням в GRIF TREE [18] та логічно змодельована в TopEvent FTA [17];
- окремий компонент має достатню теплову та інші види витривалості, щоб впоратися з потоками електроенергії під час технічного обслуговування та ізоляції несправностей;
- технічне обслуговування не моделюється в цій роботі.

У реальній схемі підстанції відмова лінії становить понад 90% від загального числа причин відмов підстанції, а захист не функціонує ідеально, тому вимикач може зіткнутися з первинними відмовами, такими як «не розмикається за командою», «не вимикає струм» тощо. У полуторній схемі, наприклад, коли вхідна лінія А зазнає пошкодження, вимикачі Q1 і Q2 повинні розмикатися. Однак вимикач Q2 не розмикається за командою, тому вимикач Q3, як резервний захист, розмикається для усунення несправності вхідної лінії, в результаті чого вихідна лінія А зазнає переривання обслуговування. Такої ситуації можна уникнути за допомогою схеми зі здвоєним вимикачем на приєднання. Аналогічна ситуація виникає, коли пошкодження вхідної лінії викликає спрацьовування обох вимикачів, але один з них не розмикається за командою. Всі вимикачі з боку несправного вимикача вмикаються для усунення несправності як резервний захист. Однак у схемі зі здвоєним вимикачем обслуговування обох навантажень не переривається через таку подію.

Частота технічного обслуговування роз'єднувачів останнім часом стає все більш актуальною проблемою порівняно з технічним вдосконаленням вимикачів. Спочатку роз'єднувачі були розроблені для ізоляції вимикача під час технічного обслуговування. І можна було б очікувати, що вимикачі потребували більш інтенсивного технічного обслуговування, тому роз'єднувачі необхідно розміщувати навколо вимикачів з метою обслуговування. Однак, завдяки швидкому розвитку технології виробництва, сучасні вимикачі потребують технічного обслуговування рідше, ніж раз на 15 років, і, таким чином, роз'єднувачі не обов'язково мають бути розміщені навколо вимикачів.

Необхідність роз'єднувачів в схемі підстанції потребує перегляду, оскільки технічне обслуговування роз'єднувачів іноді вимагає перерви в обслуговуванні навантаження. Тобто, частота технічного обслуговування роз'єднувачів може суттєво впливати на недоступність навантаження, і до цього питання слід поставитися серйозно і детально дослідити. З іншого

боку, існує альтернативне рішення для мінімізації впливу роз'єднувача шляхом інтеграції функції відключення в автоматичні вимикачі.

Щоб оцінити загальну вартість обох схем підстанцій, слід також врахувати вартість цивільного будівництва, земельних ділянок, систем захисту, технічного обслуговування тощо.

Висновок до розділу 2

У цьому розділі проаналізовано методом дерева несправностей показники надійності полуторної схеми високовольтного розподільного пристрою та схеми зі здвоєним вимикачем на приєднання. Для того було використано програмне забезпечення TopEvent FTA і GRIF TREE. Змодельовані дерева несправностей показали, що обидві схеми мають близькі показники надійності одна до одної. З точки зору витрат, полуторна схема коштує дешевше, ніж схема зі здвоєним вимикачем на приєднання, якщо враховувати лише капітальну вартість усіх компонентів. Наприклад, типова полуторна схема з двома входами і двома виходами потребує шість вимикачів, тоді як схема зі здвоєними вимикачами – вісім.

РОЗДІЛ 3. РОЗШИРЕНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ СХЕМ ВКЛЮЧЕННЯ РОЗПОДІЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

3.1 Полуторна схема розподільного пристрою

3.1.1 Поширені причини збоїв

Досі вважалося, що інтенсивність відмов різних компонентів системи є незалежною одна від одної. Однак на практиці існують залежні відмови, в яких два або більше станів несправності компонентів існують одночасно або протягом короткого інтервалу часу і є прямим наслідком спільної причини [19]. Такі основні події, як висока робоча температура, землетрус та інші подібні фактори можуть призвести до одночасного виходу з ладу двох або більше компонентів підстанції. Тому важливо визначити потенційні відмови з загальних причини (ВЗП) і вжити необхідних заходів для запобігання таким відмовам.

Найбільш часто використовуваною (неявною) моделлю відмов із загальних причин є модель β -фактора. У цій моделі передбачається, що певний відсоток усіх відмов є відмовами із загальних причин, які призводять до того, що відповідні елементи виходять з ладу одночасно або протягом короткого інтервалу часу [19].

Таким чином, частота відмов повинна бути записана як:

$$\lambda = \lambda_i + \lambda_c, \quad (3.1)$$

де λ_i – інтенсивність незалежних відмов, які впливають лише на певний компонент;

λ_c – інтенсивність відмов від загальних причин, які спричиняють відмови всіх відповідних компонентів.

Фактор загальної причини:

$$\beta = \frac{\lambda_c}{\lambda_i}. \quad (3.2)$$

Коефіцієнт поширеності – це відсоток відмов з поширених причин серед усіх відмов компонента.

Відповідне дерево несправностей наведеної вище моделі показано вище на рис. 3.1. Відмова по загальній причині виводить з ладу компоненти 1 і 2 одночасно і, отже, призводить до верхньої події.

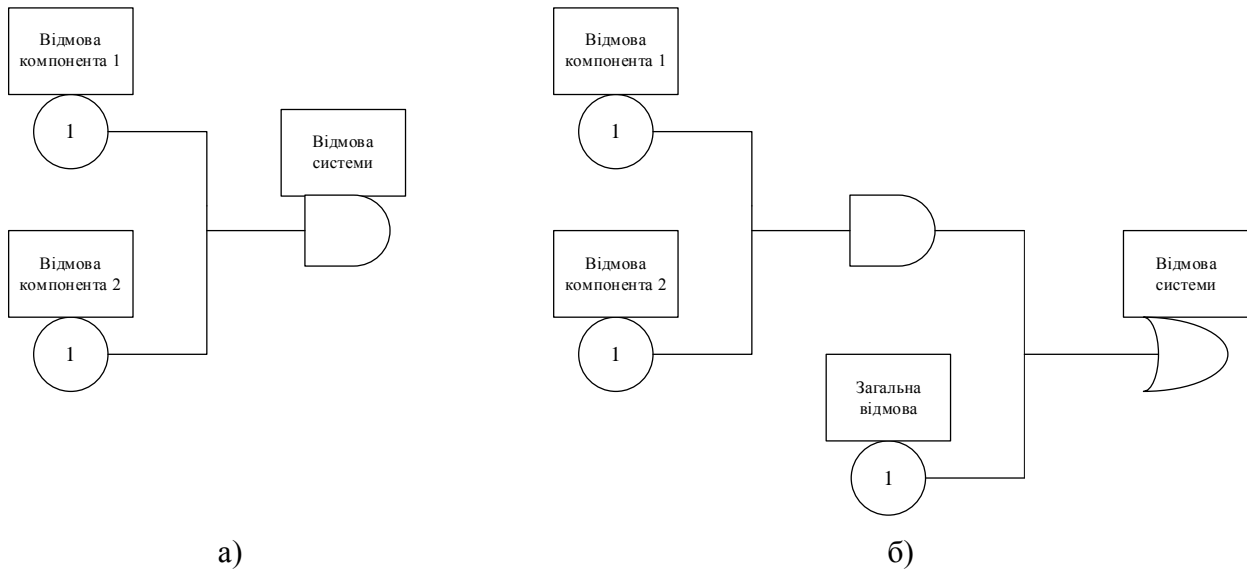


Рисунок 3.1 – а) дерево несправностей без ВЗП, б) дерево несправностей з ВЗП

Перше дерево несправностей, рис. 3.1 (а), побудовано без урахування ВЗП. Дерево відмов призводить до неточної оцінки ймовірності. Щоб оцінити різницю між рис. 3.1 (а) і (б), визначимо Q_c як ймовірність відмови з загальної причини та $Q_i, i = 1, 2, \dots, n$ як ймовірність відмови компонента i , ймовірність відмови системи в (а) становить:

$$Q'_s = Q_1 + Q_2, \quad (3.3)$$

а в (б):

$$Q_s = Q_c + Q_1Q_2 - Q_cQ_1Q_2 \quad (3.4)$$

Оскільки $Q_s > Q'_s$, введення відмов із загальних причин є більш реалістичним, а ймовірність відмови верхньої події є більш консервативною, ніж без аналізу ВЗП [25].

У наступній симуляції бета-фактор встановлено на рівні 30% для всіх компонентів у полуторній схемі.

Таблиця 3.1 – Вплив відмов із загальної причини (ВЗП)

Оцінені сценарії	Без ВЗП	З ВЗП
Відключення однієї лінії	$Q = 2,47 \cdot 10^{-5};$ $W = 2,09 \cdot 10^{-6}$	$Q = 2,88 \cdot 10^{-5};$ $W = 2,4 \cdot 10^{-6}$
Відключення обох ліній	$Q = 9,88 \cdot 10^{-9};$ $W = 2,24 \cdot 10^{-9}$	$Q = 3,6 \cdot 10^{-6};$ $W = 3 \cdot 10^{-7}$

Враховуючи, що 30% відмов стається із загальних причин, середній час недоступності Q однієї лінії збільшується на 16,6%, в той час як інтенсивність відмов W також збільшується на 14,8%. Зростання Q та W означає, що ВЗП робить значний внесок у відмову вихідної лінії. Розглядаючи сценарій, коли обидві лінії зазнають відключень, середній показник недоступності Q , який враховує ВЗП, на 3 порядки вищий, ніж у випадку без урахування ВЗП, в той час як інтенсивність відключень W на 2 порядки вища.

З іншого боку, порівнюючи результати по вертикалі, Q та W відключень обох ліній на 4 та 3 порядки вищі, ніж при відключенні однієї лінії, без врахування ВЗП. Однак, якщо врахувати ВЗП, Q та W для обох відключень лінії зменшуються лише на 1 порядок. Тобто, Q та W схеми не набагато покращуються за рахунок встановлення додаткового містку та вихідної лінії.

3.1.2 Аналіз невизначеності

Дотепер середній час безвідмовної роботи Q розраховувався за всіма вхідними параметрами частоти відмов і середнього часу на ремонт з використанням середніх арифметичних значень в TopEvent FTA. Однак, програма пропонує інший спосіб обчислення Q , використовуючи функції

щільності ймовірності для представлення частоти відмов і середнього часу на ремонт. Для того, щоб врахувати невизначеність даних про надійність, середні значення кожного вхідного параметра можуть бути представлені функціями щільності ймовірності. Моделювання за методом Монте-Карло використовується для випадків, коли дані про надійність вибираються випадковим чином відповідно до щільності розподілу ймовірності кожного параметра.

TopEvent FTA пропонує різні функції розподілу, такі як нормальний, логнормальний та гамма-розподіл [20]. У цій роботі гамма-розподіл (рис. 3.2) використовується для моделювання невизначеності даних про надійність усіх компонентів підстанції. Гамма-розподіл є додатним, і тому від'ємні значення частоти відмов та середнього часу до ремонту у функції розподілу за замовчуванням уникаються.

$$f(x, k, \theta) = \frac{1}{\Gamma(k) \theta^k} x^{k-1} \exp\left(-\frac{x}{\theta}\right). \quad (3.5)$$

Гамма-розподіл є несиметричним і позитивно зміщеним. Для того, щоб точно налаштувати гамма-функцію кожного параметра, беруться до уваги наступні аспекти.

По-перше, добре відомо, що мале середньоквадратичне відхилення означає меншу дисперсію в розподілі, тобто значення групуються біля середнього значення. По-друге, гамма-розподіл у TopEvent FTA потребує лише одного параметра форми, який називається k , оскільки параметр швидкості θ оцінюється за середнім значенням, а k – за середнім значенням, яке визначається за [31].

$$M = \frac{k}{\theta}. \quad (3.6)$$

По-третє, k – це дійсне число, більше нуля, яке змінює форму функції. TopEvent FTA обмежує $k = 0,1 \dots 20$. Вище значення k означає меншу дисперсію у функції розподілу, тоді як значення, що наближається до

одиниці, означає більшу дисперсію. Форма розподілу зміщується до експоненціального розподілу для значень α , менших або рівних одиниці.

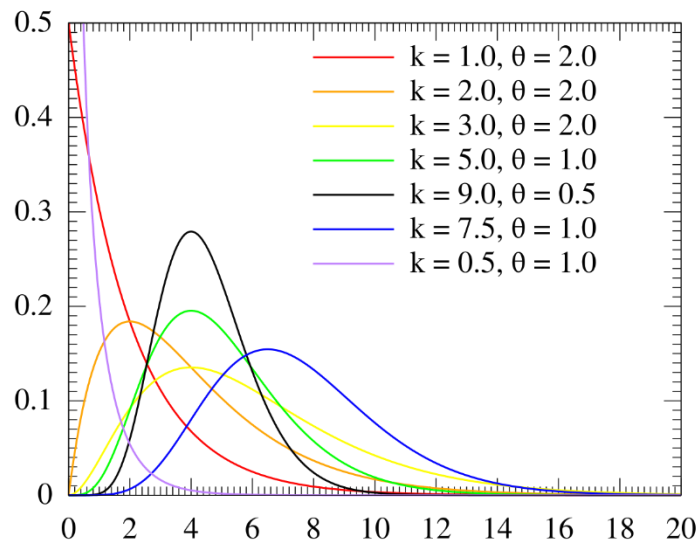


Рисунок 3.2 – Гамма-розподіл з різними k і θ

У цьому дослідженні середні значення інтенсивності відмов кожного компонента приймаються на порядок більшими, ніж значення режиму. Наприклад, середнє значення інтенсивності відмов одного вимикача становить 10^{-6} разів на годину, а режим приймається рівним 10^{-7} .

$$M_d = \frac{k-1}{\theta}. \quad (3.7)$$

Середній час до ремонту також розглядається аналогічно. Для розрахунку параметра форми k як вхідні дані, значення режиму приймається на 2 години меншим за середнє значення.

Таблиця 3.2 – Параметри частоти відмов в аналізі невизначеності

Компонент	Середнє значення частоти відмов	Режим частоти відмов	k	θ
вимикач	10^{-6}	10^{-7}	1,11	$1,11 \cdot 10^6$
шина	$2,05 \cdot 10^{-7}$	$2,05 \cdot 10^{-8}$	1,11	$5,41 \cdot 10^6$

вхідна лінія	$9,13 \cdot 10^{-6}$	$9,13 \cdot 10^{-7}$	1,11	$1,22 \cdot 10^5$
вихідна лінія	$9,13 \cdot 10^{-8}$	$9,13 \cdot 10^{-9}$	1,11	$1,22 \cdot 10^7$

Таблиця 3.3 – Параметри $T_{від\ сер}$ в аналізі невизначеності

Компонент	Середній час ремонту ($T_{від\ сер}$, год)	Режим часу ремонту, год	k	θ
вимикач	12	10	6	0,5
шина	12	10	6	0,5
вхідна лінія	8	6	4	0,5
вихідна лінія	8	6	4	0,5

Зауважте, що коли вибрано параметр форми k, а також задано середнє значення щільності ймовірності гамма-розподілу, то обчислюється параметр θ . Після визначення цих трьох параметрів можна побудувати графік гамма-розподілу. Важливо, щоб на графіку щільності ймовірності гамма-розподілу було показано, чи існує ймовірність того, що середнє значення буде меншим за модальне значення. Іншими словами, середнє значення, яке ми використовуємо у вхідних даних TopEvent FTA, є меншим, ніж значення, яке зустрічається найчастіше. З точки зору аналізу недоступності, це означає, що результат, розрахований за допомогою TopEvent FTA, може бути занадто оптимістичним щодо реальності, оскільки вхідне середнє значення менше, ніж фактична мода в гамма-розподілі. Порівнюючи середнє значення з модою, середнє значення в $1/\theta$ разів більше за моду. Інтерпретоване в аналізі середньої недоступності, середнє значення, яке використовують як вхідні дані в TopEvent FTA, дає відносно більшу середню недоступність, що є бажаним результатом.

Для обробки вихідних даних з TopEvent FTA було використано MATLAB. По осі x відкладено недоступність однієї вихідної лінії, а по осі y –

щільність розподілу ймовірностей. Форма графіка подібна до форми типового гамма-розподілу, оскільки кожен вхідний параметр рандомізується на основі гамма-розподілу, і тому очікується, що вихідні дані матимуть характеристики гамма-розподілу.

Припускаючи, що вихідний графік є гамма-розподілом, мода дорівнює $4,81 \cdot 10^{-6}$, а середнє значення – $2,47 \cdot 10^{-5}$. Середнє значення недоступності, на порядок більше, ніж мода, тобто число, яке трапляється найчастіше. Тому середнє значення є бажаною величиною, яку слід використовувати.

3.1.3 Аналіз важливості та чутливості

Важливість компонентів у підстанції не є однаково зваженою, тобто компоненти, показані в наборах мінімального розрізу (НМР) першого порядку, є більш важливими, ніж ті, що показані в наборах мінімального розрізу вищих порядків. Аналіз важливості використовується для того, щоб визначити, який відсоток кожен компонент вносить у головну або будь-яку проміжну подію. Аналіз чутливості використовується для оцінки поведінки системи при зміні вхідних параметрів кожного компонента. Іншими словами, система є більш чутливою до одних компонентів, ніж до інших, і аналіз може перерахувати показники чутливості в порядку зменшення або збільшення. Результати аналізу важливості та чутливості дають уявлення про те, як кожен компонент впливає на надійність системи

3.1.3.1 Аналіз важливості Фусселя-Веселі [32]

Важливість Фусселя-Веселя (ФВ) для базової події розраховується наступним чином:

- обчислити недоступність верхньої події лише на основі всіх НМР, до яких включено базову подію (це те саме, що встановити недоступність на нуль для всіх НМР, які не містять базової події);
- значення ФВ – це співвідношення між недоступністю за пунктом 1 та номінальною недоступністю топ-події:

$$I_i^{\Phi B} = \frac{Q_{TOP+HMP}}{Q_{TOP}}. \quad (3.8)$$

3.1.3.2 Аналіз чутливості

Аналіз чутливості показує, наскільки чутливою буде надійність системи до змін надійності компонентів.

Спочатку встановіть значення показників надійності в дереві відмов (недоступність, частота відмов або інтенсивність відмов), що розглядаються, рівним номінальному значенню, поділеному на коефіцієнт чутливості. Цей коефіцієнт може бути будь-яким значенням, більшим за 1. Потім обчисліть новий результат верхньої події індексів надійності системи (недоступність, частота відмов). Цей новий результат повинен бути нижчим за номінальний результат, оскільки частота відмов та недоступності зменшується, а надійність збільшується. Цей новий результат позначається як $Q_{TOP.L}$.

Другий крок – встановити значення показників надійності, що розглядаються, рівними номінальному значенню, помноженому на той самий коефіцієнт чутливості. Якщо після множення якесь значення вийде за межі допустимого діапазону, то воно стане максимально допустимим. Ймовірність стане рівною 1. Обчисліть цей новий результат верхньої події. Зі збільшенням недоступності, частоти відмов або інтенсивності відмов ненадійність системи збільшується, а надійність системи зменшується. Тоді новий результат позначимо як $Q_{TOP.L}$.

Тоді чутливість системи можна розрахувати за формулою нижче.

$$S = \frac{Q_{ЗТВ.U}}{Q_{ЗТВ.L}}. \quad (3.9)$$

Таблиця 3.4 – Важливість та чутливість

№	Несправність	ФВ	Коефіцієнт чутливості
1	КЗ на Q3	0,485	9,52

2	КЗ на Q2	0,485	9,52
3	Відключення Ла	$2,95 \cdot 10^{-2}$	1,3
4	Відключення ЛА	$2,94 \cdot 10^{-4}$	1
5	Відключення ЛВ	$2,51 \cdot 10^{-4}$	1
6	КЗ на Q1	$4,83 \cdot 10^{-5}$	1
7	КЗ на Q6	$4,12 \cdot 10^{-5}$	1
8	КЗ на Q5	$4,12 \cdot 10^{-5}$	1
9	Відключення ЗШ2	$8,46 \cdot 10^{-6}$	1

Згідно з індексом Фусселя-Веселя, найбільший вплив на аналіз важливості мають пошкодження на вимикачах Q2 і Q3. Це цілком обгрунтовано, оскільки вони, разом з коротким замиканням на самій лінії, що відходить, є двома основними подіями першого порядку, які призводять до відключення однієї лінії, що відходить. Показник частки чутливості також вказує на те, що несправності КЗ на Q2 і КЗ на Q3 дуже чутливі до середнього часу відсутності, так що Q може бути значно змінений шляхом зміни індексу надійності КЗ на Q2 і КЗ на Q3. Графічні ілюстрації показані нижче на рис. 3.3 та рис. 3.4.

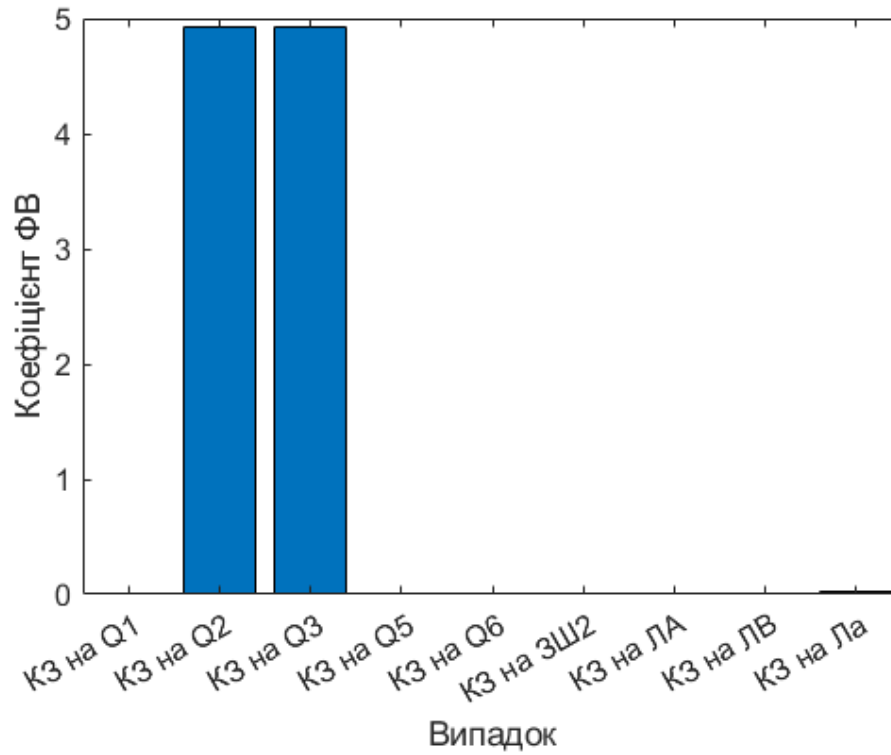


Рисунок 3.3 – Розподіл важливості недоступності однієї вихідної лінії

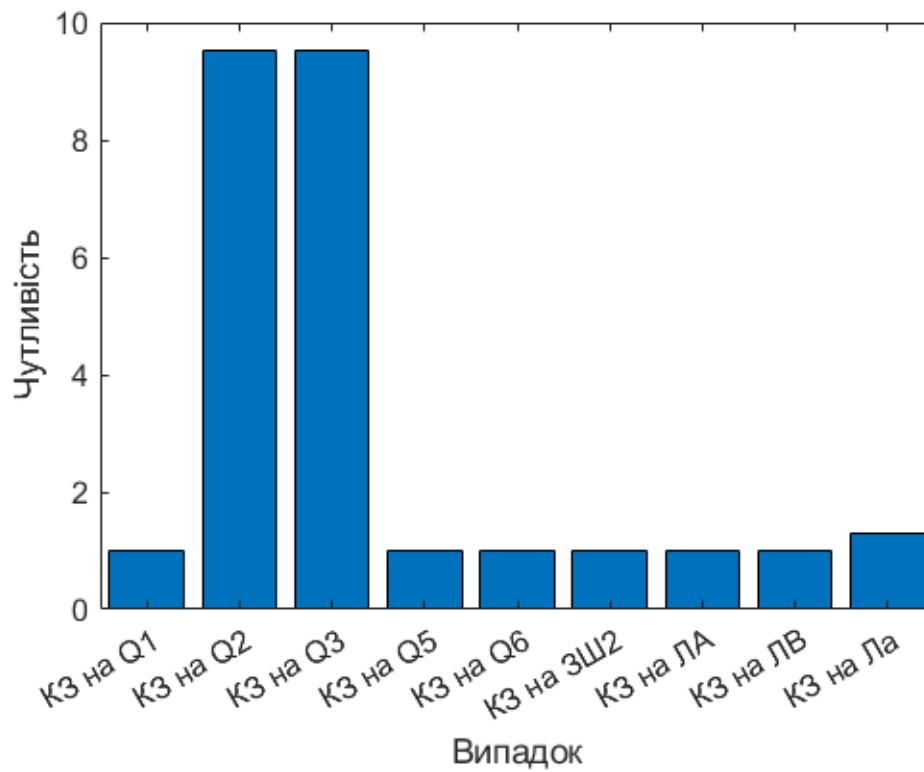


Рисунок 3.4 – Розподіл чутливості при недоступності однієї вихідної лінії

3.2 Схема зі здвоєним вимикачем на приєднання

3.2.1 Поширені причини збоїв

Щоб дослідити вплив ВЗП на схему зі здвоєним вимикачем на приєднання, бета-фактор встановлюється на рівні 30% від частоти відмов усіх компонентів.

Таблиця 3.5 – Вплив ППГ на розташування схеми зі здвоєним вимикачем на приєднання

Оцінені сценарії	Без ВЗП	З ВЗП
Відключення однієї лінії	$Q = 2,47 \cdot 10^{-5};$ $W = 2,09 \cdot 10^{-6}$	$Q = 2,88 \cdot 10^{-5};$ $W = 2,4 \cdot 10^{-6}$
Відключення обох ліній	$Q = 1,2 \cdot 10^{-9};$ $W = 2,59 \cdot 10^{-9}$	$Q = 3,6 \cdot 10^{-6};$ $W = 3,01 \cdot 10^{-7}$

Враховуючи 30% відмов з'являється із загальних причин, середня недоступність однієї лінії збільшується на 16,6% порівняно з відключенням без урахування ВЗП, тоді як інтенсивність відмов зростає на 14,8%. Однак, якщо розглядати відключення одночасно обох ліній, що відходять, то Q з урахуванням ВЗП зростає на два порядки, при цьому W також зростає на два порядки. Тобто, на Q та W впливає наявність відмов із загальної причини. Це особливо актуально у випадку, коли обидві вихідні лінії зазнають пошкоджень одночасно.

Порівнюючи відключення однієї вихідної лінії з відключенням обох ліній, Q та W відключення обох ліній покращуються не набагато, лише на один порядок величини. Тобто, якщо відключення однієї лінії може призвести до виходу розподільного пристрою підстанції з ладу, то додавання ще однієї вихідної лінії не набагато підвищує надійність підстанції, якщо брати до уваги відключення з загальних причин.

Давайте зробимо остаточне порівняння полуторної схеми та схеми зі здвоєним вимикачем на приєднання, порівнявши дані з табл. 3.1 та табл. 3.5. По-перше, давайте порівняємо схеми без урахування ВЗП. Обидві схеми мають однакові значення Q та W при відключенні однієї вихідної лінії. Тобто, якщо одна вихідна лінія може призвести до відмови підстанції, обидві схеми мають однакову надійність. Однак, Q і W полуторної схеми приблизно на 20% менші, ніж у схемі зі здвоєними вимикачами, коли йдеться про відключення обох ліній. Це робить полуторну схему кращою альтернативою в цьому конкретному порівнянні.

По-друге, візьмемо до уваги ВЗП. Коефіцієнти Q та W майже однакові як у випадку відключення однієї лінії, так і у випадку відключення обох ліній. Це робить полуторну схему порівнянною зі схемою зі здвоєним вимикачем з точки зору аналізу надійності.

Визначимо Q_a, Q_b, W_a, W_b як середню доступність та інтенсивність відмов вихідної лінії a та b у полуторній схемі, а Q'_a, Q'_b, W'_a, W'_b – у схемі зі здвоєним вимикачем відповідно. Q_{ab} та W_{ab} представляють Q та W обох відключень лінії у полуторній схемі, а Q'_{ab} та W'_{ab} представляють те ж саме у схемі зі здвоєним вимикачем.

3.2.2 Аналіз важливості та чутливості

Подібно до того, як це було виявлено в полуторній схемі, два вимикачі, найближчі до лінії, що відходить, є найбільш важливими і чутливими до відключення однієї лінії, що відходить. Несправність на самій лінії, що відходить, також робить невеликий внесок в обох аналізах. Для покращення безперервності електропостачання з однієї лінії негайної уваги потребують два вимикачі, що примикають до лінії, оскільки надійність цих двох вимикачів має дуже сильний вплив на живлення споживачів.

Проект має дві основні цілі. Одна з них полягає в розробці рекомендацій щодо побудови дерев пошкоджень для оцінки полуторної схеми та схеми зі здвоєним вимикачем, які в подальшому мають бути

використані для інших схем вимикачів підстанцій. Методика моделювання розроблена на основі того, що відключення компонента відбувається через «недоступність компонента» або «відсутність потоків потужності до компонента», і методика моделювання була перевірена GRIF TREE – ще одним інструментом моделювання, який використовує метод динамічного перебору станів для розрахунку індексу надійності.

Таблиця 3.6 – Вплив ВЗП на схему зі здвоєним вимикачем на приєднання

№	Несправність	ФВ	Коефіцієнт чутливості
1	КЗ на Q4	0,485	9,52
2	КЗ на Q3	0,485	9,52
3	КЗ на ЛА	$2,95 \cdot 10^{-2}$	1,3
4	КЗ на ЛА	$2,86 \cdot 10^{-4}$	1
5	КЗ на ЛВ	$2,86 \cdot 10^{-4}$	1
6	КЗ на Q1	$5,99 \cdot 10^{-5}$	1
7	КЗ на Q6	$5,99 \cdot 10^{-5}$	1
8	КЗ на Q2	$5,99 \cdot 10^{-5}$	1
9	КЗ на Q5	$5,99 \cdot 10^{-5}$	1
10	КЗ на Q8	$1,87 \cdot 10^{-5}$	1
11	КЗ на Q7	$1,87 \cdot 10^{-5}$	1
12	КЗ на ЗШ2	$3,82 \cdot 10^{-6}$	1
13	КЗ на ЗШ1	$3,82 \cdot 10^{-6}$	1

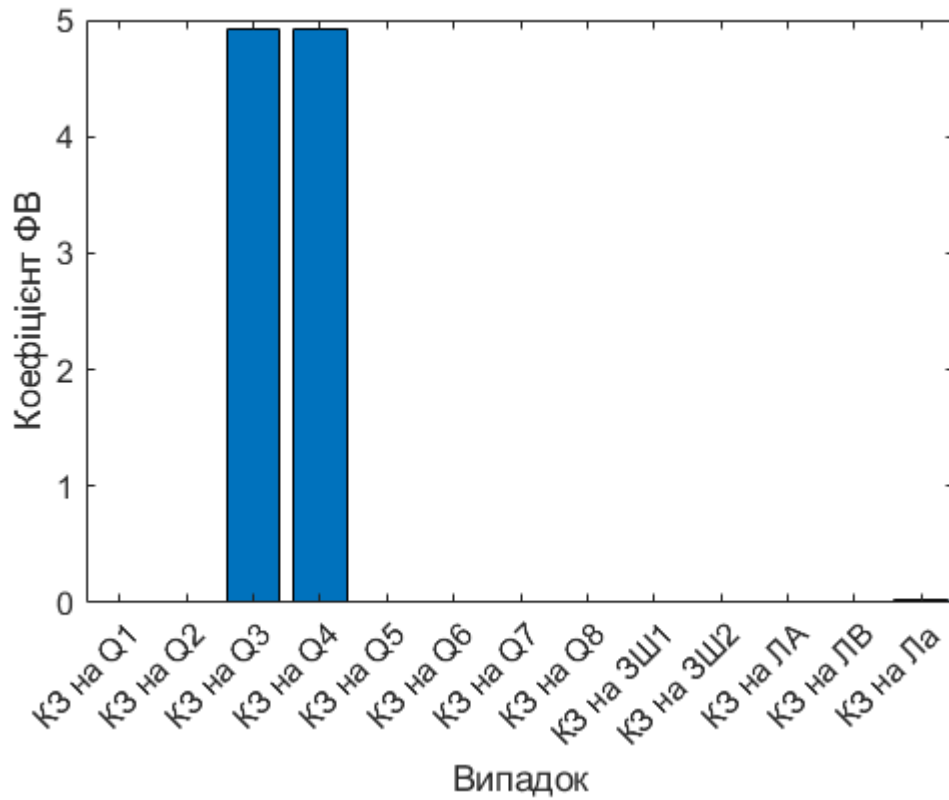


Рисунок 3.5 – Розподіл важливості недоступності однієї вихідної лінії

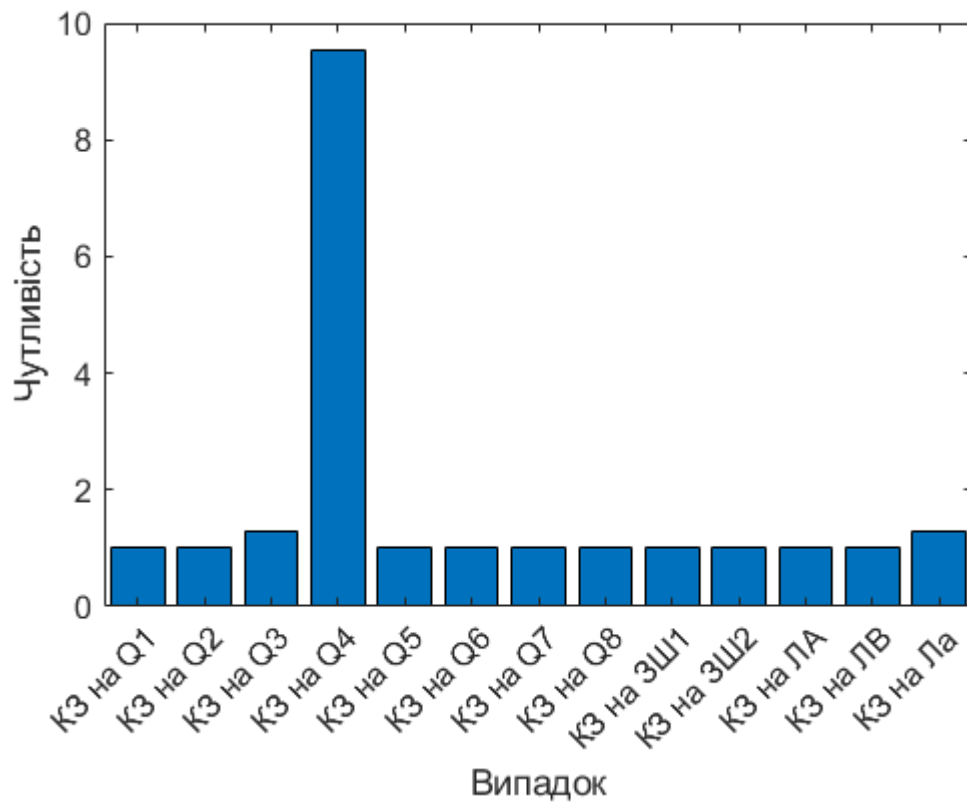


Рисунок 3.6 – Розподіл важливості недоступності однієї вихідної лінії

Інша мета – порівняти дві схеми підстанцій з точки зору аналізу надійності. Результати, отримані за допомогою двох інструментів моделювання, вказують на те, що обидві схеми – полуторна та зі здвоєним вимикачем – мають однаковий показник надійності, враховуючи наявність відмов із загальних причин та за певних припущень, зроблених до початку дослідження. Для отримання більш точних і обґрунтованих результатів для обох схем також були застосовані деякі додаткові функції, які пропонує TopEvent FTA, такі як аналіз відмов із загальної причини, невизначеності, важливості та чутливості, для отримання більш точних і обґрунтованих результатів.

Результати частоти відключень та частоти відмов однієї вихідної лінії для обох програм є однаковими. Однак, враховуючи відмову підстанції, представлену відключенням обох вихідних ліній одночасно, схема з полуторним вимикачем має приблизно на 20% меншу недоступність, ніж схема зі здвоєним вимикачем, а інтенсивність відмов полуторної схеми на 15,6% менша, ніж схеми зі здвоєним вимикачем, без урахування відмов із загальних причин. У цьому випадку полуторна схема є більш надійною, ніж схема зі здвоєним вимикачем. Однак, якщо врахувати наявність відмов із загальних причин, то підстанції з обома схемами мають однаковий середній час неготовності та частоту відмов. Звідси випливає висновок, що полуторна схема та схема з двома вимикачами на приєднання забезпечує однакову або дуже близьку надійність. Перед аналізом зроблено декілька припущень і пояснено незначні розбіжності. Крім того, також проводиться аналіз невизначеності, важливості та чутливості з обговоренням результатів.

Висновки до розділу 3

У цьому розділі розглядався розширений аналіз надійності схем високовольтних розподільних пристроїв, а саме з врахування відмов з загальних причин, перевірка невизначеності, важливості та чутливості обох схем включення вимикачів..

ВИСНОВКИ

У роботі показане дослідження надійності основних схем високовольтних розподільних пристроїв:

1. Використовуючи метод аналізу дерева несправностей з точки зору надійності порівняні дві основні схеми розподільних пристроїв високої напруги – полуторна та зі здвоєним вимикачем на приєднання. Модельні результати вказують на те, що обидві схеми мають приблизний або однаковий показник надійності, враховуючи наявність відмов із загальних причин та за певних припущень, зроблених до початку дослідження.

2. Для отримання більш точних результатів для обох схем також були застосовані методи аналізу відмов із загальних причин, невизначеності, важливості та чутливості.

3. Частота відмов при несправності однієї вихідної лінії для обох схем була однаковою. Однак, враховуючи відмову підстанції, представлену відключенням обох вихідних ліній одночасно, схема з полуторним вимикачем має приблизно на 20% меншу недоступність, ніж схема зі здвоєним вимикачем, а інтенсивність відмов полуторної схеми на 15,6% менша, ніж схеми зі здвоєним вимикачем, без урахування відмов із загальних причин. У цьому випадку полуторна схема є більш надійною, ніж схема зі здвоєним вимикачем. Однак, якщо врахувати наявність відмов із загальних причин, то підстанції з обома схемами мають однаковий середній час неготовності та частоту відмов.

4. У цілому полуторна схема та схема з двома вимикачами на приєднання забезпечує однакову або дуже близьку надійність.