

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
Факультет інженерії
Кафедра електричної інженерії**

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

**до кваліфікаційної магістерської роботи
освітньо-кваліфікаційного рівня магістр**

галузі знань 14 електрична інженерія

зі спеціальності 141 електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

на тему **МЕТОДИ ОЦІНКИ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

Виконав: студент групи ЕЕ-22дм

Гнилицький О. О. _____

(прізвище, та ініціали)

Керівник

доц. Філімоненко К. В. _____

(прізвище, та ініціали)

Завідувач кафедри

доц. Руднев Є. С. _____

(прізвище, та ініціали)

Київ
2023 р.

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інженерії
Кафедра електричної інженерії
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Напрямок підготовки 14 «Електрична інженерія»
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри
доц. Руднєв Є. С.

« ____ » _____ 2023 року

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТУ

_____ Гнилицькому Олександр Олександровичу _____.

1. Тема проекту Методи оцінки показників надійності систем електропостачання

2. Керівник проекту доц., к.т.н. Філімоненко Костянтин Вадимович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального № 564/15.23-С від 23.10.2023

Строк подання студентом проекту 05 грудня 2023 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Вихідні данні визначені в переліку питань, що підлягають розробці в магістерській роботі

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз стану питання й літературних джерел; Аналіз стану надійності електричної мережі; Обґрунтування методу розрахунку показників структурної надійності схем електропостачання; Програмні комплекси, застосовувані для розрахунку показників надійності

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Плакати, що пояснюють суть магістерської роботи, презентація.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 - 3	доц. Філімоненко К. В.		

7. Дата видачі завдання _____ 16 жовтня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1.	Аналіз літературних джерел	16.10-30.10.2023	
2.	Аналіз стану надійності електричної мережі	30.10-07.11.2023	
3.	Обґрунтування методу розрахунку показників структурної надійності схем електропостачання	05.11-20.11.2023	
4.	Програмні комплекси, застосовувані для розрахунку показників надійності	20.11-01.12.2023	
5.	Аналіз надійності типових схем електропостачання	01.12-05.12.2023	
6.	Оформлення магістерської роботи	01.12-06.12.2023	

Студент

_____ підпис

Гнилицький О. О.
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту

_____ підпис

доц. Філімоненко К.В.
прізвище та ініціали

РЕФЕРАТ

Магістерська робота **Гнилицький О. О.** «Методи оцінки показників надійності систем електропостачання». Стор. – 85; Рис. – 29; Табл. –7; Використаних джерел – 32.

В магістерській роботі проаналізовано стан питання створення нових і розширення існуючих складних електроенергетичних систем, що вимагає таких методів оцінки надійності, які б дозволили при проектуванні враховувати досвід експлуатації, провести аналіз різних варіантів забезпечення надійності, а також спрогнозувати надійність нових енергосистем.

Проаналізовано різні методи кількісної оцінки показників надійності електроенергетичних систем і застосування спрощених методів розрахунку надійності, що дозволяють більше ефективно, і з меншими обчислювальними витратами вирішувати завдання оцінки надійності, набувають великого значення.

В роботі виконано: аналіз стану надійності електричної мережі; вибір і обґрунтування методу розрахунку показників структурної надійності схем електропостачання, що враховує відмови комутаційної апаратури; проведено розрахунки на основі обраного методу оцінки показників надійності для існуючих схем електропостачання.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ, ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ, ТЕОРІЯ НАДІЙНОСТІ; ПОКАЗНИКИ СТРУКТУРНОЇ НАДІЙНОСТІ; ВІДМОВИ АПАРАТУРИ

SUMMERY

Oleksandr Hnylytskyi. «Methods of assessing reliability indicators of power supply systems»
VOLODYMYR DAHL EAST UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY. ELECTRICAL
ENGINEERING DEPARTMENT, gr. EE-22dm. – Kyiv, 2023.

Pages – 86; Drawings – 29; Tables –7; Sources – 32.

The master's work analyzed the state of creation of new and expansion of existing complex electric power systems, which requires reliability assessment methods that would allow for design to take into account operating experience, analyze various options for ensuring reliability, and also predict the reliability of new power systems.

Various methods of quantitative assessment of the reliability indicators of electric power systems are analyzed and the application of simplified methods of reliability calculation, which allow more efficiently and with lower computational costs to solve the task of reliability assessment, are of great importance.

The work performed: analysis of the reliability of the electric network; selection and substantiation of the method of calculation of indicators of structural reliability of power supply schemes, which takes into account failures of switching equipment; calculations were made based on the chosen method of assessing reliability indicators for existing power supply schemes.

KEY WORDS: ELECTRICAL SYSTEMS, ELECTRICAL NETWORKS,
RELIABILITY THEORY; INDICATORS OF STRUCTURAL RELIABILITY; EQUIPMENT
FAILURES

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 Аналіз стану надійності електричної мережі	7
1.1 Елементи теорії надійності	7
1.2 Поточний аналіз стану об'єктів магістральних і розподільних електричних мереж	10
1.3 Аналіз причин ушкодження основного електроустаткування 110- 750 кВ	19
1.4 Висновки по розділу 1	37
РОЗДІЛ 2 Вибір та обґрунтування методу розрахунку показників структурної надійності схем електропостачання, враховує відмови комутаційної апаратури	41
2.1 Основні поняття теорії надійності	41
2.2 Аналіз методів оцінки показників структурної надійності	45
2.3 Моделі відмов комутаційної апаратури	61
2.4 Висновки по розділу 2	67
РОЗДІЛ 3 Проведення розрахунків на основі обраного методу оцінки показників надійності для існуючих схем електропостачання	68
3.1 Програмні комплекси, застосовувані для розрахунку показників надійності електроенергетичних систем	68
3.2 Опис інженерної методики оцінки показників структурної надійності, враховує відмови комутаційної апаратури	70
3.3 Аналіз надійності типових схем електропостачання	71
3.4 Висновки по розділу 3	79
ВИСНОВКИ	80
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	82

ВСТУП

Теорія надійності як наука виникла у п'ятдесятих роках двадцятого сторіччя. Основне її завдання – це розробити та вивчити методи, які забезпечать ефективність роботи різних елементів (виробів, пристроїв, систем) в процесі їх експлуатації [1,2].

На сьогоднішній час питанням надійності присвячено велике кількість робіт, вони викликають чималий інтерес у всьому світі. Однак, незважаючи на велику кількість робіт у даній галузі, в даний час актуальність цієї теми не знижується. Пов'язано це з тим, що підключаються нові споживачі, створюються складні системи електропостачання.

На практиці спеціаліст в області електроенергетики постійно приймає різні рішення: обирає оптимальні варіанти системи; підбирає режими роботи систем в умовах, які відрізняються від нормальних; здійснює ремонти, заміни та оперативні перемикання. На вибір даних рішень впливає велика кількість різних чинників. Для деяких з них можна зробити кількісний аналіз та розрахунок, внаслідок чого можна, можливо звузити область можливих варіантів прийняття рішень; інші не піддаються кількісним описам. Це призводить до невизначеності при виборі рішень. Незважаючи на це, фахівцям необхідно їх приймати, з'єднуючи практичні знання з кількісними розрахунками та інженерною інтуїцією, а також проводити якісний аналіз завдань, що проводяться. При цьому виникає ризик вибору помилкових і неоптимальних рішень. Відповідно, чим більше різноманітних факторів, які не можна прорахувати, тим більше ймовірність того, що можна прийняти неправильні рішення та отримати їх негативні наслідки. Надійність серед усіх різноманітних факторів займає особливе місце. Тому виникла потреба в кількісній оцінці аварійних ситуацій та їх наслідків.

У даний час головною тенденцією в енергетиці є створення великих енергооб'єднань, які мають складну структуру. З одного боку - це призводить до збільшення частки системних аварій, в результаті яких одинична відмова може спричинити за собою каскадний розвиток аварії і охопити значну частина енергооб'єднання, з іншої сторони - об'єднання дозволяє отримати значні економічні переваги. Тому необхідно проаналізувати всі витрати, пов'язані із підвищенням рівня надійності. Щоб підвищити надійність досить часто приймають рішення о резервуванні або дублювання достатньо великого кількості споживачів, що призводить до великих капітальних витрат, отже, це рішення повинно бути належним чином обґрунтовано.

«Розрахувавши збитки, нанесений споживачам через перерви електропостачання, збитки через аварійного ремонту, і витрати, спрямовані на підвищення надійності, можна оптимізувати рівень надійності електроенергетичного обладнання і систем в цілому» [1, 3, 4].

Суттєве зростання споживання електричної енергії пов'язане з якісною зміною споживачів. Останнє визначено запровадженням нових технологій та поглибленням електрифікації різних виробництв, що призводить до збільшення залежності нормального функціонування споживачів від надійності постачання електричної енергії» [5,6]. Це може привести до значної матеріальної шкоди через порушення енергопостачання, а в деяких випадках призвести до масштабів національного лиха, доказом чого є ряд аварій у різних країнах світу, наприклад, США – Канада у серпні 2003 р.; Швеція – Данія – Італія у вересні 2003 р.. Таким чином, ряд непередбачених і випадкових причин може привести до втрати електроенергії, або знизити її якість у частини або навіть у всіх споживачів системи електропостачання «Порушення електропостачання через системних аварій, як вже говорилося вище, може привести до серйозних збитків, які можуть бути також пов'язані з загрозою для життя людей. Наприклад, Нью-Йоркська аварія в США призвела до того, що більше чим на десять годин на території з населенням приблизно 30 мільйонів людина була практично припинено життєдіяльність.

Збитки від даної аварії, по попереднім розрахунками, перевищував сто мільйонів доларів» [6, 7].

В деяких електроенергетичних системах число аварій може досягати на протязі року кількох десятків, а річний невідпусток електроенергії у результаті наслідків аварій - кількох мільярдів кіловат-годин. Сумарна загальна потужність генераторів, які одночасно простоюють в аварійному ремонті, складає десятки мільйонів кіловат. Різні наслідки від ненадійності елементів системи стають суттєвими, у зв'язку з цим необхідно постійно удосконалювати методи, що дозволяють прогнозувати розвиток, проектування, будівництво, монтаж і експлуатацію електроенергетичних систем, з допомогою яких можна, можливо було б найбільш повно враховувати надійність і економічно витратити засоби, які виділяються на її забезпечення [9-12]. Таким чином, на сьогоднішній день оцінка показників надійності систем електропостачання стає однією з важливих завдань розвитку в галузі енергетики.

Створення нових і розширення без того складних електроенергетичних систем вимагає таких методів оцінки надійності, які б дозволили при проектуванні враховувати досвід експлуатації, провести аналіз різних варіантів забезпечення надійності, а також спрогнозувати надійність нових енергосистем.

Існуючі на сьогоднішній момент різні методи кількісної оцінки показників надійності електроенергетичних систем дуже громіздкі, тому питання вибору і застосування спрощених методів розрахунку надійності, що дозволяють більше ефективно, і з меншими обчислювальними витратами вирішувати завдання оцінки надійності, набувають великого значення.

Таким чином, кількісна оцінка рівня надійності різних схем електропостачання є в сучасних умовах актуальною темою, що підтверджується основними розділами енергетичної стратегії України на період до 2030 р. і концепції забезпечення надійності в електроенергетиці [2,15].

Метою дослідження є вибір методу розрахунку показників надійності, що дозволяє підвищити точність оцінки рівня надійності з обліком відмов комутаційної апаратури і з меншими обчислювальними витратами, вибрати найбільш ефективний варіант схеми на стадії проектування та експлуатації.

У відповідності з зазначеною метою поставлені наступні завдання дослідження:

1. Аналіз стану надійності електричної мережі.
2. Вибір і обґрунтування методу розрахунку показників структурної надійності схем електропостачання, що враховує відмови комутаційної апаратури.
3. Проведення розрахунків на основі обраного методу оцінки показників надійності для існуючих схем електропостачання.

Методи дослідження. У основі вивчення лежать матеріали всеукраїнських і міжнародних науково-практичних конференцій, публікації в фахових періодичних виданнях, у виданнях, що входять до наукометричної бази даних Scopus, фундаментальні і прикладні наукові дослідження, що проведені українськими і зарубіжними вченими, нормативні акти та документи. В процесі роботи використовувалися загальні положення теорії надійності, теорії ймовірності, теорії графів, нормативних актів експлуатації електроустаткування.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

1.1 Елементи теорії надійності

«Відповідно до [1] надійність – це властивість об'єкта виконувати задані функції в заданому обсязі при певних умовах функціонування. Якщо розглядати сферу електроенергетики, то це безперебійне постачання електроенергією в межах допустимих показників її якості і виняток ситуацій, небезпечних для людей і довкілля. Під об'єктом дослідження розуміється як окремі елементи, наприклад, вимикачі, лінії, трансформатори тощо, так і сукупність елементів-підстанції і тощо» [1, 6].

Іноді зустрічаються терміни структурна надійність і функціональна надійність, це робиться для того, щоб спростити розрахунки. Перший термін позначає надійність в умовах, коли обсяг виконуваних функцій не важливий. Тут область допустимих значень змінних стану містить тільки структурні характеристики, а режимні параметри враховуються приблизно. Таким чином, складову, обумовлену структурою системи, тобто. складом елементів, їх взаємозв'язками, пропускними здібностями, без кількісного обліку режимних особливостей функціонування елементів, тобто особливостей виконання ними функцій системі називають структурною надійністю (особливо важлива в процесі проектування).

Функціональна надійність, яка в свою черга підрозділяється на балансову і режимну, навпаки, розглядає надійність тільки в області режимних параметрів, а значення структурних характеристик вважаються заданими і

незмінними, то є розглядається аналіз режимів, їх обмежень, пропускний здібності при зміні структури (що особливо важливо в експлуатації) [1-12].

«Балансова надійність пов'язана з дефіцитами потужності та/або енергії як при поступових, так і раптових відмов з обмеженням або відключенням споживачів та/або зниженням якості електроенергії внаслідок перевищення навантаження наявної або робочої потужності або дефіциту енергоресурсів. способами запобігання порушень балансовий надійності в частини забезпеченості первинними енергоресурсами є створення їх запасів на електростанціях. Забезпеченість виробничими потужностями на перспективуреалізується за рахунок введення нових потужностей в генерації і системотворчої мережі чи посилення основний мережі. В експлуатації для цієї цілі використовується аварійний ремонт або достроковий висновок з планового ремонту обладнання» [2]. Режимна надійність ділиться на статичну та динамічну. «Низька балансова надійність, звичайно, впливає як на статичну, так і динамічну режимну надійність електроенергетичної системи (ЕЕС). Підвиди останньої відрізняються наслідками для споживачів: це короткочасне зниження якості електроенергії або відключення споживачів, порушення стійкості, поділ ЕЕС на частини, масштабне відключення споживачів, для живучості – масове відключення споживачів, поділ системи» [13].

Запитання визначення надійності електромережевого комплексу є важливими на сучасному етапі розвитку електроенергетики. У зв'язку з цим спостерігається підвищений інтерес до проблеми надійності всім світі.

Рішенню завдань оцінки надійності присвячено велике кількість досліджень українських і зарубіжних авторів, таких як Р. Алан, Р. Біллінтон, Б. Ділон, Ч. Сінгх, Дж. Ендрені, А.В. Журахівський, С.В. Казанський, О. В. Кириленко, О. М. Васілевський, Г.Г. Півняк, В.В. Козирський тощо.

Перші публікації із застосування теорії ймовірності до завдання забезпечення надійності виникли у 30-х роках тому, що виникла потреба до кількісної характеристики аварійних ситуацій та її наслідків. Для отримання

таких характеристик була потрібна теорія, що дозволяє прогнозувати і розраховувати поведінку систем при певних умовах у майбутньому. Такою теорією виявилася теорія надійності.

Витоки розвитку теорії надійності можна віднести до часу другої світової війни. Спочатку проблема надійності була сформульована стосовно до радіоелектронних пристроїв і систем автоматики. Відомо, що перші формальні розрахунки надійності були зроблені в ході спроб знайти пояснення поганій якості німецьких реактивних снарядів ФАУ-1 та ФАУ-2. Ці снаряди будувалися з великої кількості деталей, кожна з яких вважалася надійною. Фундаментальний висновок про те, що надійність системи, в якій вихід з ладу будь-якого елемента призводить до відмові всією системою, визначається показниками надійності всіх (незалежних) елементів і тому може опинитися багато нижче за самого низького з цих показників, був отриманий тільки після цього експерименту. Сьогодні цей простий результат добре відомий, а в те час це було відкриттям.

Після війни перші системні спроби вивчення надійності були зроблені в електронній, ядерній та космічній промисловості, де від систем, складність яких постійно збільшувалася, була потрібна висока надійність. Далі, при накопиченні досвіду, формалізації завдань та поширення на інші галузі техніки, теорія надійності поступово почала набувати рис загальної наукової дисципліни, тому в даний час методи теорії надійності використовуються в різних областях техніки, в тому числі і в електроенергетиці» [1,2,15].

У США фахівці по теорії і практиці надійності почали збиратися на конференції по надійності, організовані інститутом інженерів з електроніки та електротехніки [IEEE].

Для ЕЕС важливими є питання забезпечення надійності функціонування при різних внутрішніх і зовнішніх обуреннях, які можуть сприяти каскадному розвитку аварій. У зв'язку з цим, виникає питання забезпечення живучості, тобто. збереження працездатності після появи збурень, які призводять до великомасштабних наслідків. Можливі наслідки

від ненадійності стають такими суттєвими, що потрібне постійне вдосконалення методів прогнозування розвитку, проектування, будівництва, монтажу, експлуатації і діагностики електроенергетичних систем, що дозволяють найбільш повно враховувати надійність і найбільш заощадливо витратити виділені на її забезпечення засоби [3,10].

На даний час накопичений певний досвід для знаходження кількісної оцінки показників надійності, для цього використовуються різноманітні методи. Деякі з них уже встоялися, інші продовжують розвиватися, треті тільки зароджуються.

Однак на сьогоднішній день для оцінки показників надійності електроенергетиці добре розроблені лише достатньо загальні математичні методи і побудовані «універсальні» математичні моделі з великим кількістю припущень. Однак, при дослідженні надійності конкретних енергетичних об'єктів потрібно не тільки володіти теоретичними методами і моделями, але і переробка їх і пристосування до особливостей цих об'єктів і, як наслідок, створення нових методів та моделей [1, 2].

1.2 Поточний аналіз стану об'єктів магістральних і розподільних електричних мереж

Стійке функціонування мережевого електроенергетичного комплексу неможливо без надійною роботи магістральних і розподільчих електричних мереж. Таким чином, надійність електропостачання є однією з головних характеристик ефективності електроенергетичної системи.

Надійність є комплексною властивістю, яка залежить від призначення об'єкта та умов його експлуатації, складається з кількох одиничних властивостей. на рис. 1.1 представлені властивості надійність.

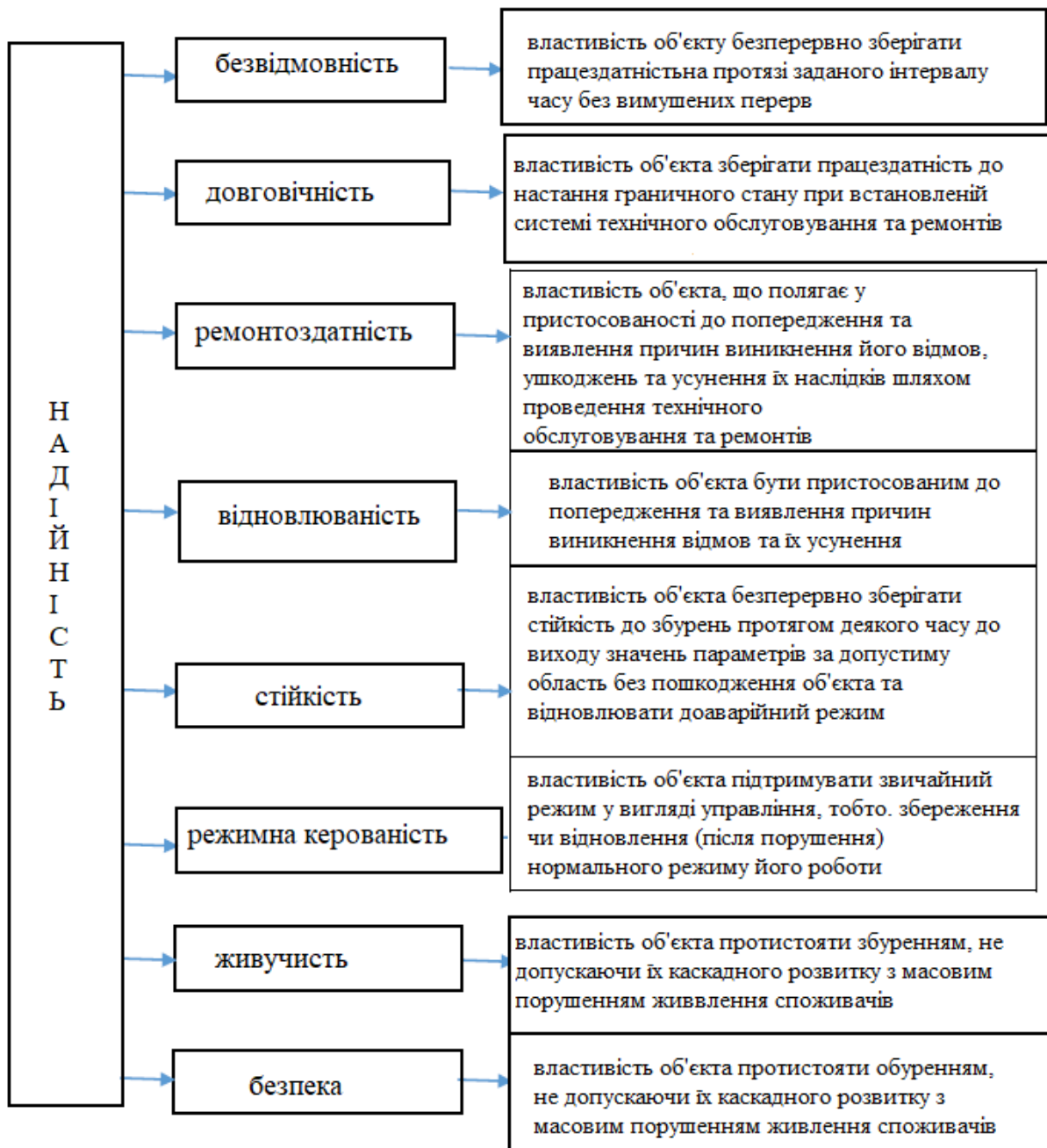


Рисунок 1.1 – Основні властивості надійності

Величина зворотня до безвідмовності – це відмова. Основні типи відмов представлені на рис. 1.2.

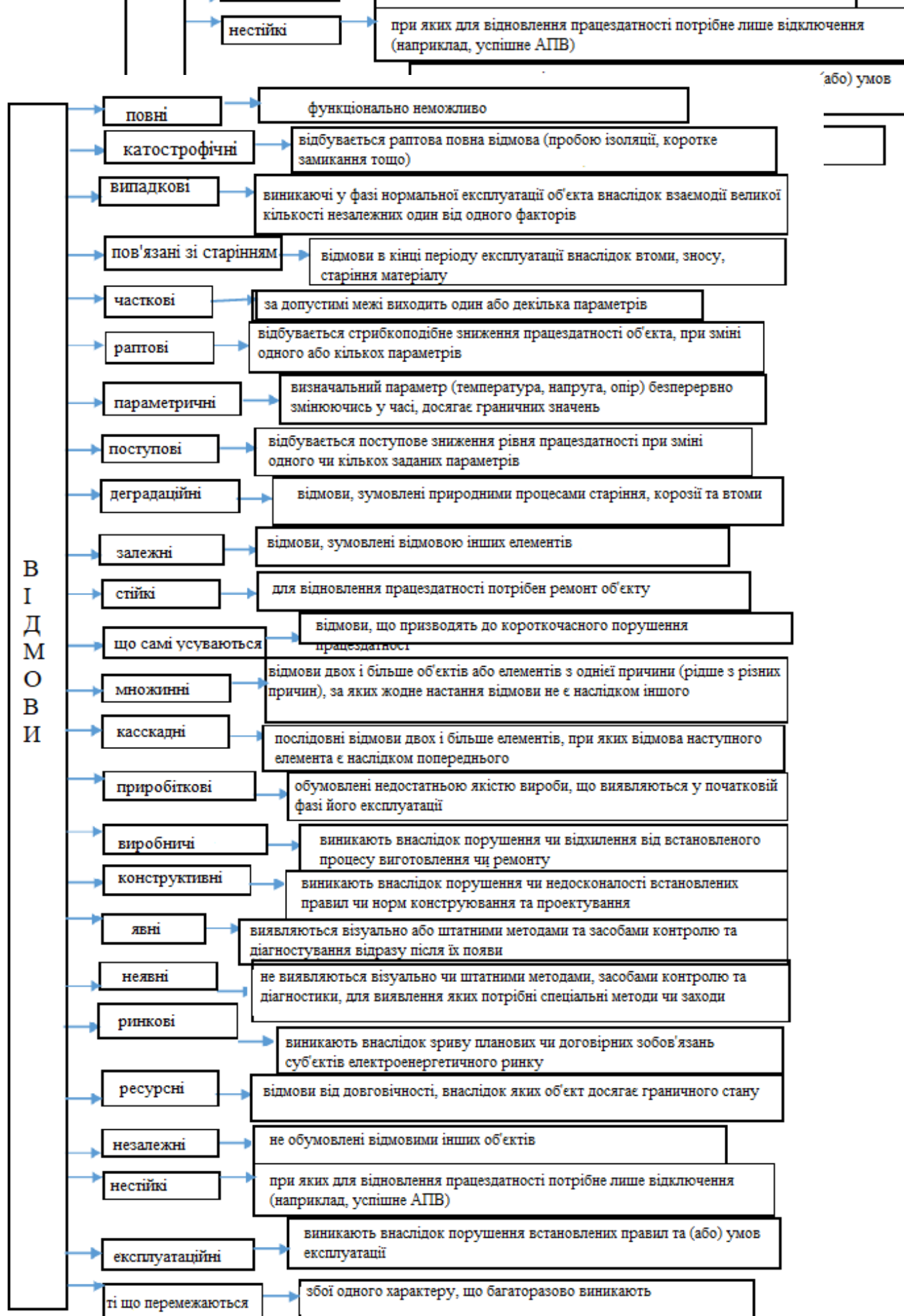


Рисунок 1.2 – Типи відмов

Для прийняття рішення про періодичність ремонтів, про часткову або повної заміні при технічному переозброєнні морально і фізично застарілого обладнання новим, більше досконалим повинні бути проведено:

- статистичний аналіз ушкодженості обладнання ПС і ПЛ;
- аналіз причин відмов;
- виявлення найбільш слабких по надійності елементів ВЛ і електрообладнання, що вимагають першочергової заміни.

Причинами відмов в електричній мережі в більшості випадків є ушкодження обладнання електромережевих об'єктів або поява неприпустимих режимних параметрів в елементах мережі, що вимагає прийняття невідкладних дій щодо їх усунення.

Усе випадки ушкодження обладнання електричної мережі, неприпустимих відхилень параметрів технічного стану електричних установок, а також повних чи часткових незапланованих відключень електроприймачів належать до технологічних порушень. Усе технологічні порушення підлягають розслідування і обліку, що дозволяє створити базу даних по аварійності в електричних мережах затривалий термін експлуатації.

Основні причини ушкоджень електрообладнання підстанцій представлені на рис. 1.3.

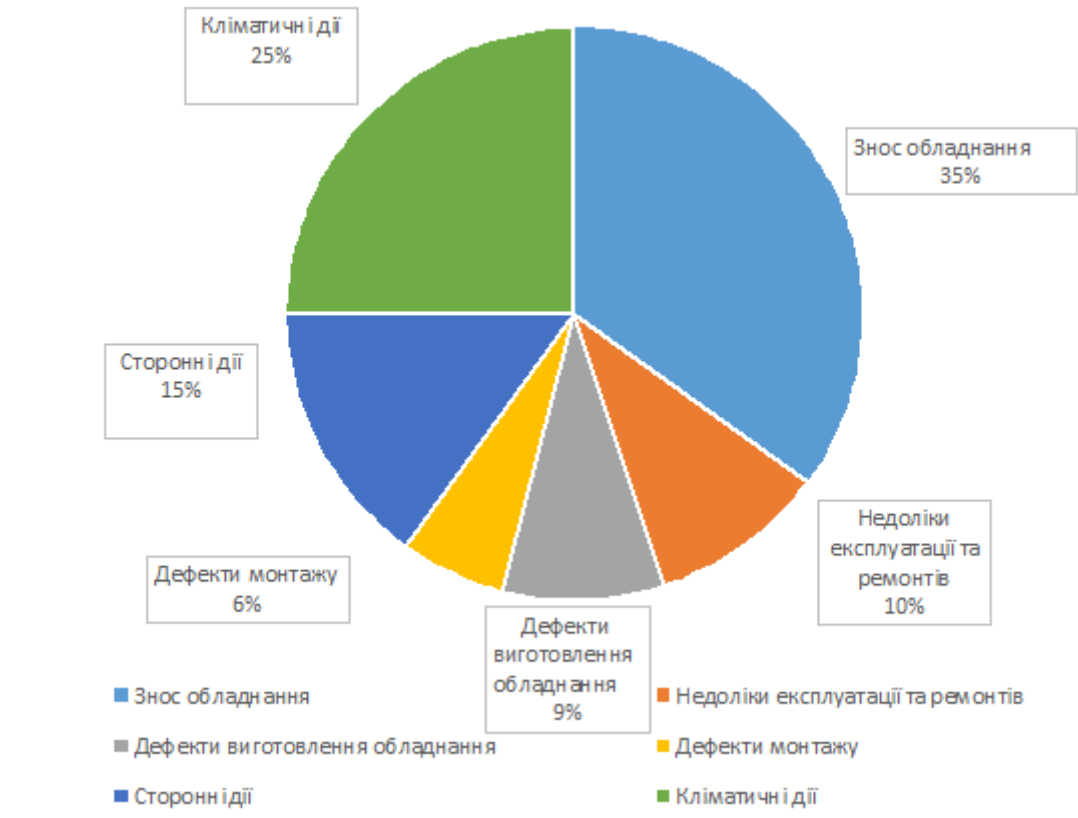


Рисунок 1.3 – Розподіл відмов обладнання

Як видно з рис. 1.3, найбільшими є відмови, викликані зносом обладнання -35 % і впливом кліматичних впливів (атмосферні перенапруги, зміни температури навколишнього середовища, дія вітру, ожеледиці на проводах, вібрації та «танець» проводів, забруднення повітря, вплив геомагнітних збурень) порядку 25 %. Найбільш важкими є ожеледно-вітерові впливи [3]. Сторонні впливи - 15 %, недоліки експлуатації та ремонтів - 10 %, на частку дефектів виготовлення обладнання припадає 9% та дефекти монтажу 6% відповідно.

«Стан єдиної національної електричної мережі характеризується наступним обсягом обладнання із наднормативним терміном служби: 59% для підстанцій (ПС) (понад 25 років) та 49% для ліній електропередач (ЛЕП) (більше 35 років), при цьому частка обладнання, що знаходиться в експлуатації більше 50 років, для ПС складає 4%, для ЛЕП - 18%».

За даними на 2018 року частка основного електрообладнання підстанцій, що експлуатується понад 25 років становить:

- на ПС напругою 750 кВ - 47%;
- на ПС напругою 500 кВ - 52%;
- на ПС напругою 330 кВ - 47%;
- на ПС напругою 220 кВ - 74%;
- на ПС напругою 110 кВ і нижче - 57%.

У 2015 році зафіксовано негативну динаміку старіння парку обладнання – частка парку обладнання, що виробило нормативний термін служби, порівняно з 2014 роком збільшилася на 2% як за повітряним ЛЕП, так і по обладнання ПС. Даний факт свідчить о необхідності збільшення обсягів технічного переозброєння і реконструкції об'єктів електромережного господарства.

У магістральному електромережному комплексі для оцінки стану обладнання ПС, ЛЕП використовується трирівнева система «робоче - погіршене - передаварійне». Робоче - стан обладнання, при якому зберігається його здатність виконувати задані функції, а експлуатаційні значення параметрів відповідають вимогам нормативно-технічної документації; погіршений стан обладнання, при якому значення хоча б одного параметра, характеризує здатність виконувати задані функції, досягло граничного значення, встановленого нормативно-технічної документації. «Предаварійне – стан обладнання, при якому його подальша експлуатація повинна бути припинено через порушення вимог безпеки або коли значення хоча б одного з параметрів, характеризуючих здатність виконувати задані функції, перевищило граничне значення» [46].

На початок 2018 року стан 78% обладнання ПС оцінювалося як «робоче 22% – "погіршене". У випадку оцінки стану обладнання як «передаварійне» проводяться заходи щодо його ремонту або заміни в цілях забезпечення необхідного рівня надійності функціонування електромережевого комплексу.

Встановлене основне електротехнічне обладнання виготовлено, в здебільшого, в шістдесяті-сімдесяті роки минулого століття і поступається

сучасним аналогам по технічним характеристикам, масогабаритним показниками, вимагає збільшуватися з зростанням терміну служби витрат на технічне обслуговування та ремонт.

79% пристроїв РЗА виконано з використанням електромеханічних реле. На мікроелектронній базі виконано 3%, на мікропроцесорній - 18% пристроїв. «Загальна частка пристроїв РЗА із наднормативним терміном служби (25 років для електромеханічних, 12 років для мікроелектронних, 15 років для мікропроцесорних пристроїв) складає 53,2%.

Стан об'єктів розподільчого електромережевого комплексу характеризується наступною часткою обладнання зі наднормативним терміном служби: 63% для ПС (понад 25 років) та 51% для ЛЕП (понад 35 років), при цьому частка обладнання, що перебуває в експлуатації понад 50 років, ПС складає 3%, для ЛЕП - 5%.

Частка повітряних ліній на початок 2018, що знаходяться в експлуатації більше 35 років, в розрізі класів напруги склала [16]:

- ВЛ 220 (330) кВ- 52%;
- ВЛ 110 кВ -61%;
- ВЛ 35 кВ - 63%;
- ВЛ 6-20 кВ - 50%;
- ВЛ 0,4 кВ - 46%».

Спираючись на відомі статистичні дані на початок 2018 частка основного обладнання підстанцій, термін експлуатації якого перевищив 25 років, в залежності від класу напруги становила:

- для обладнання з номінальною напругою 220 кВ і вище - 34%;
- для обладнання з номінальною напругою 110 кВ - 75%;
- для обладнання з номінальною напругою 35 кВ - 81%;
- для обладнання з номінальною напругою 6-20 кВ- 62%.

Таким чином, основне електротехнічне обладнання як в розподільчому, так і в магістральному електромережному комплексі в значно частині виробило нормативний термін служби, і поступається сучасним аналогам по

технічним характеристикам і показниками надійності, що вимагає збільшених зі зростанням терміну служби витрат на технічне обслуговування та ремонт.

«В ЛЕП 0,4-20 кВ в здебільшого використовуються алюмінієві, неізолювані дроти малих перерізів, а також дерев'яні і залізобетонні опори.

ЛЕП 0,4-110 (220) кВ проектувалися по критерієм мінімуму витрат, а розрахункові кліматичні умови приймалися із повторюваністю один раз в 5-10 років.

У якості силового кабелю використовувався в здебільшого кабель з паперово-олійний ізоляцією, з алюмінієвими жилами.

ПС 35-110 (220) кВ в здебільшого укомплектовані двома силовими трансформаторами (біля 70% від спільного числа ПС)» [16].

«Основна частка релейного захисту та автоматики (РЗА) виконана на основі електромеханічних реле – 79%. На мікроелектронній базі -5%, на мікропроцесорної - 16% пристроїв. Загальна частка пристроїв РЗА і ПА, відпрацювали термін служби (25) років для електромеханічних, 12 років для мікроелектронних, 15 років для мікропроцесорних пристроїв) 54%» [16].

Встановлене підстанційне обладнання в розподільчих мережах по ряду параметрів відповідає обладнання, яке експлуатувалося в технічно розвинених країнах світу 25-30 років назад.

Починаючи з 1990 року, внаслідок об'єктивних економічних умов, скоротилися темпи реконструкції, технічного переозброєння та нового будівництва об'єктів розподільчого електромережевого комплексу, що привело до помітному старінню парку експлуатованого обладнання.

Загальна частка технологічних порушень в електромережевому комплексі з причин, пов'язаних із старінням (зносом) обладнання, за підсумками 2015 року становила 24%. У зв'язку з цим необхідно забезпечити оновлення виробничого парку в обсягах, достатніх для недопущення зростання частки обладнання з тривалими термінами експлуатації.

Основні причини пошкодження ліній електропередач – грозові відключення, забруднення ізоляції, вплив сторонніх осіб і організацій,

пожежі. Також залишається стабільно високим кількість технологічних порушень через падіння бічних дерев.

У мережах напругою 6-20 кВ відбувається, в середньому, до 30 відключень в рік в розрахунку на 100 км повітряних і кабельних ліній. У мережах напругою 0,4 кВ - до 100 відключень у рік на 100 км [16].

Статистика ушкоджень на ВЛ 6-20 кВ представлена на рис. 1.4.



Рисунок 1.4 – Причини пошкоджень на ВЛ 6-20 кВ

Причини пошкоджень кабельних ліній у класах напруги 0,4 - 110 (220) кВ представлені на рис. 1.5.

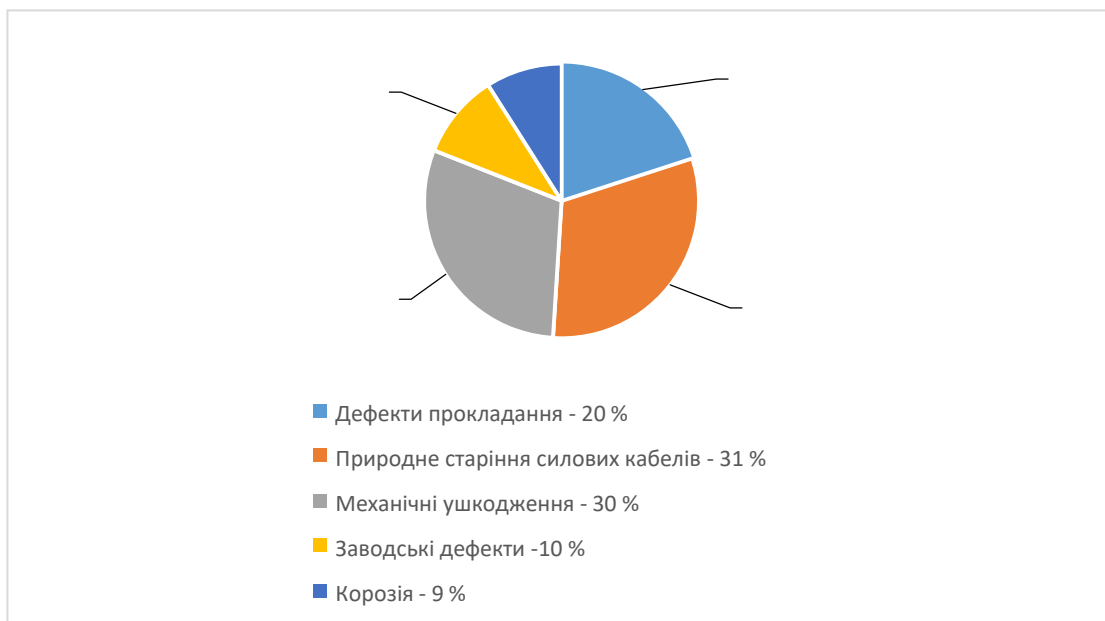


Рисунок 1.5 – Причини uszkodжень кабельних ліній 0,4-110 (220) кВ

1.3 Аналіз причин uszkodження основного електроустаткування 110- 750 кВ

Аналіз причин uszkodження та оцінка технічного стану основного електрообладнання необхідна для розробки заходів з метою забезпечення надійності і безперебійної роботи енергосистеми з обліком старіння обладнання, наявності дефектів, якості технічного обслуговування, механічних і кліматичних впливів, що сприяє визначенню надійності різних типів обладнання і окремих його вузлів, зниження тривалості і числа профілактичних ремонтів. Все це дозволяє оцінити можливість подальшої експлуатації обладнання та розробити заходи з метою збільшення терміну служби обладнання.

Розглянемо основні види пошкоджень силових трансформаторів, вимірювальних трансформаторів напруги і струму, вимикачів, роз'єднувачів,

виконаний за 1997–2017 рр. на основі літературних джерел [10, 16].

На рис. 1.5 показано кількість ушкоджень електрообладнання 110-750 кВ в відсотках від спільної кількості пошкоджень електроустаткування.

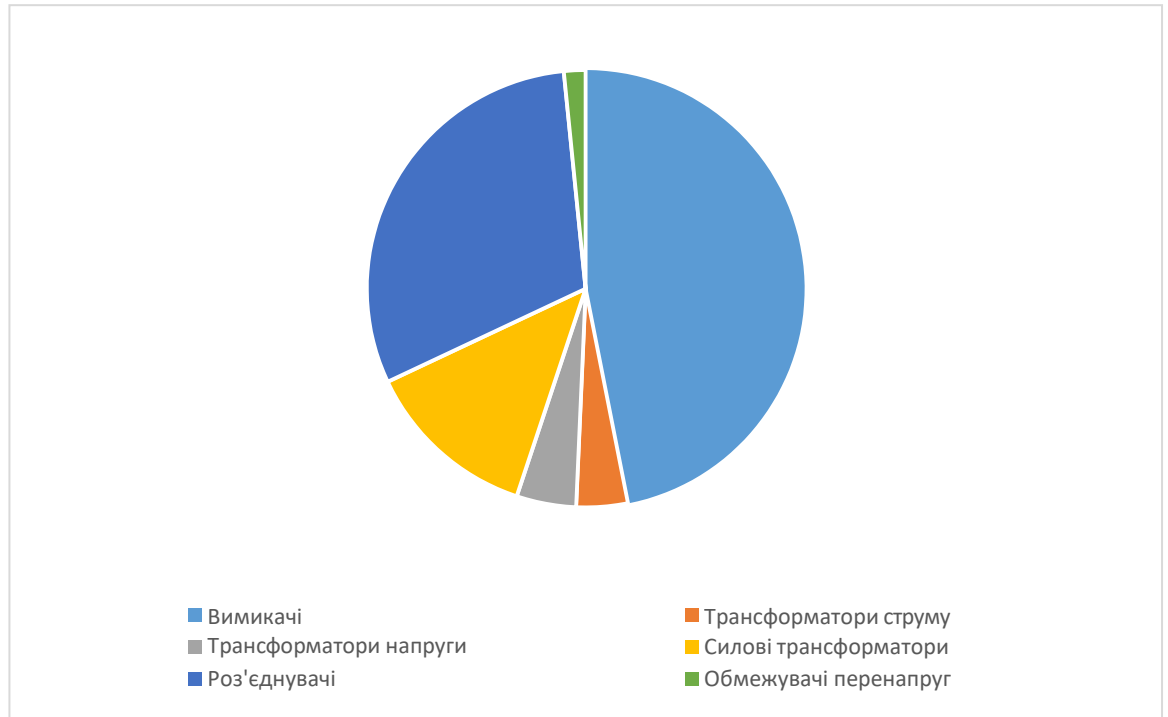


Рисунок 1.5 – Число пошкоджень електроустаткування

Силові трансформатори є основним електричним устаткуванням, що забезпечує передачу енергії від електричних станцій до споживачів та її розподіл. За допомогою трансформаторів здійснюється підвищення напруги до значень (35, 110, 220, 330, 500, 750 кВ), необхідних для ліній електропередач енергосистем, а також багаторазове східчасте зниження напруг до значень, які застосовуються безпосередньо в приймачах електроенергії (10; 6,3; 0,66; 0,38; 0,22; 0,127 кВ). Силові трансформатори випускаються номінальною потужністю кратної потужності 10, 16, 25, 40, 63 кВ*А в трифазному й однофазному виконанні.

Кількість пошкоджень силових трансформаторів та причини ушкоджень представлені відповідно на рис. 1.6 і 1.7.

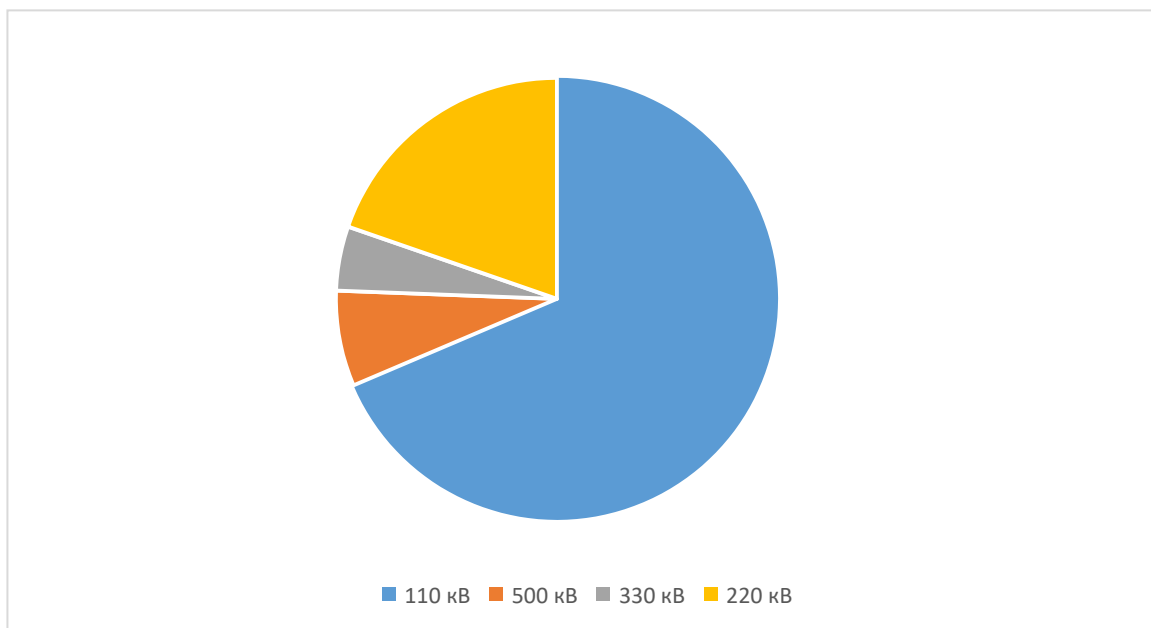
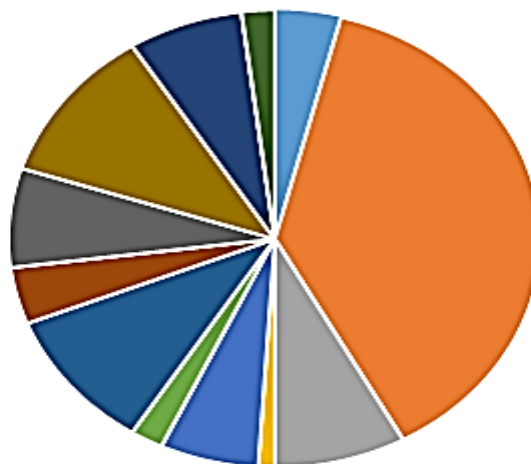


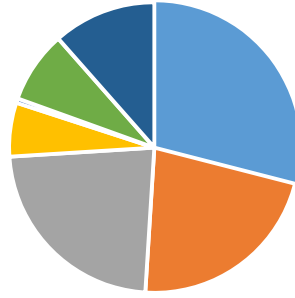
Рисунок 1.6 – Кількість пошкоджень силових трансформаторів різних класів напруг

На рис. 1.8 показано ушкодження основних вузлів силових трансформаторів. на рисунку 1.9 представлені причини внутрішніх ушкоджень силових трансформаторів. на рис. 1.10 - причини пошкоджень пристроїв РНН силових трансформаторів. На рис. 1.11 – причини ушкоджень введів силових трансформаторів.



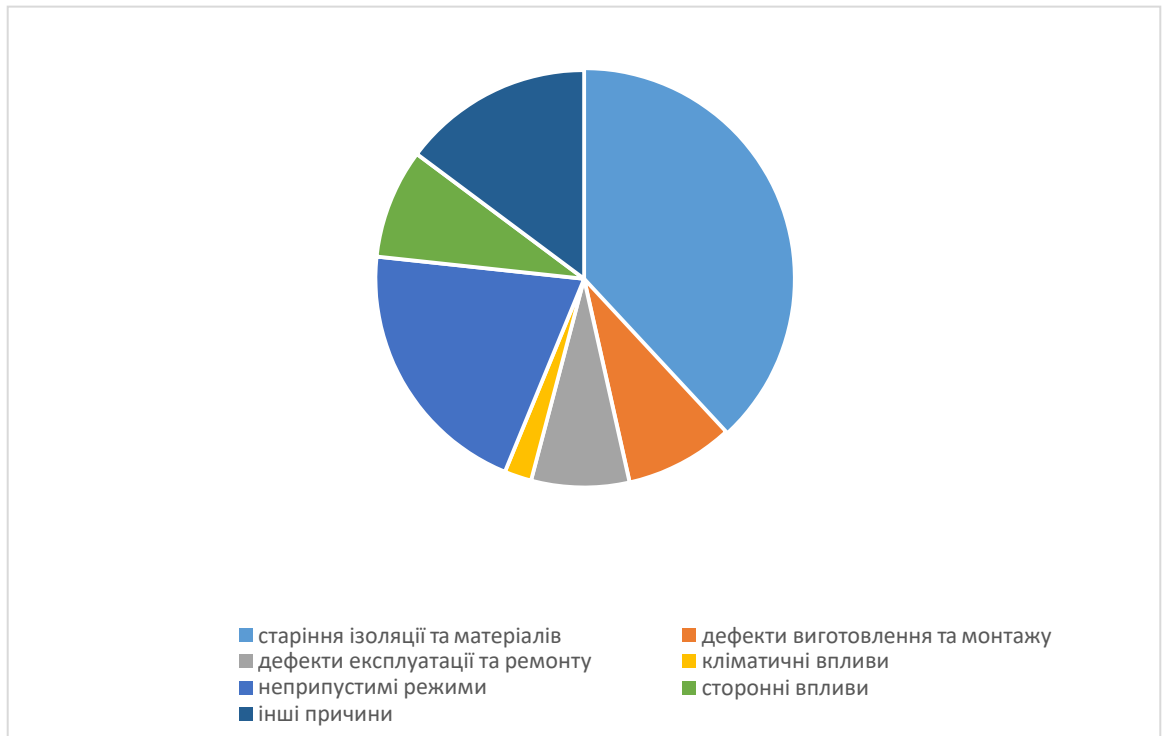
- 1 – старіння ізоляції обмоток
- 2 старіння матеріалу (корозія, втома метал, зносдеталей, старіння прокладочних матеріалів)
- 3-дефект виготовлення
- 4-дефект конструкції
- 5-дефект ремонту
- 6 дефект монтажу
- 7-недоліки експлуатації
- 8-кліматичі дії
- 9-стороні дії
- 10-причини не виявлені
- 11-неприпустимі режими
- 12- іржавіння

Рисунок 1.7 – Причини ушкодження силових трансформаторів



- 1- внутрішні пошкодження (пошкодження магнітопроводів обмоток, відводів, які приводять до внутрішніх коротких замиикань)
- 2- вводи
- 3- пристрої регулювання напруги
- (РПН)
- 4-система охолодження
- 5- влаштовані трансформатори струму

Рисунок 1.8 – Кількість ушкоджень основних вузлів силових трансформаторів



- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| ■ старіння ізоляції та матеріалів | ■ дефекти виготовлення та монтажу |
| ■ дефекти експлуатації та ремонту | ■ кліматичні впливи |
| ■ неприпустимі режими | ■ сторонні впливи |
| ■ інші причини | |

Рисунок 1.9 - Основні причини внутрішніх ушкоджень силових трансформаторів

З рис. 1.9 видно, що основними причинами внутрішніх ушкоджень були старіння матеріалів і ізоляції, і неприпустимі режими, при цьому найчастіше ушкоджувалися обмотки трансформаторів 11,3%.

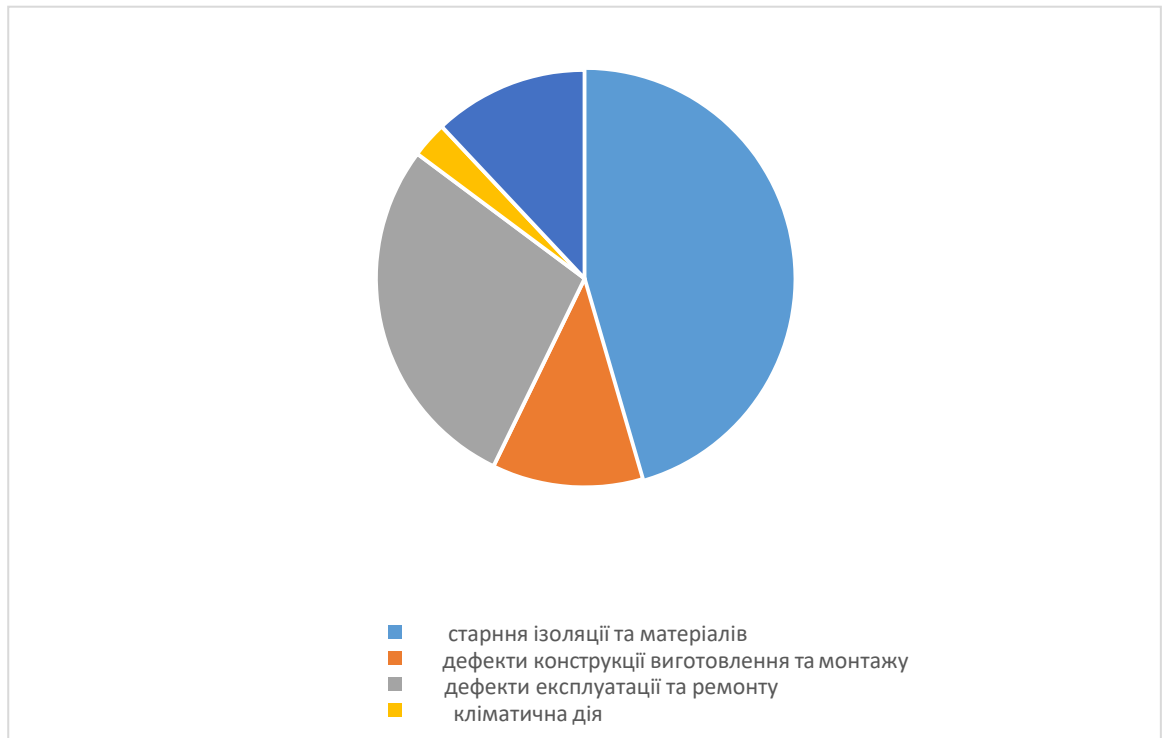


Рисунок 1.10 – Причини пошкоджень пристроїв РПН силових трансформаторів

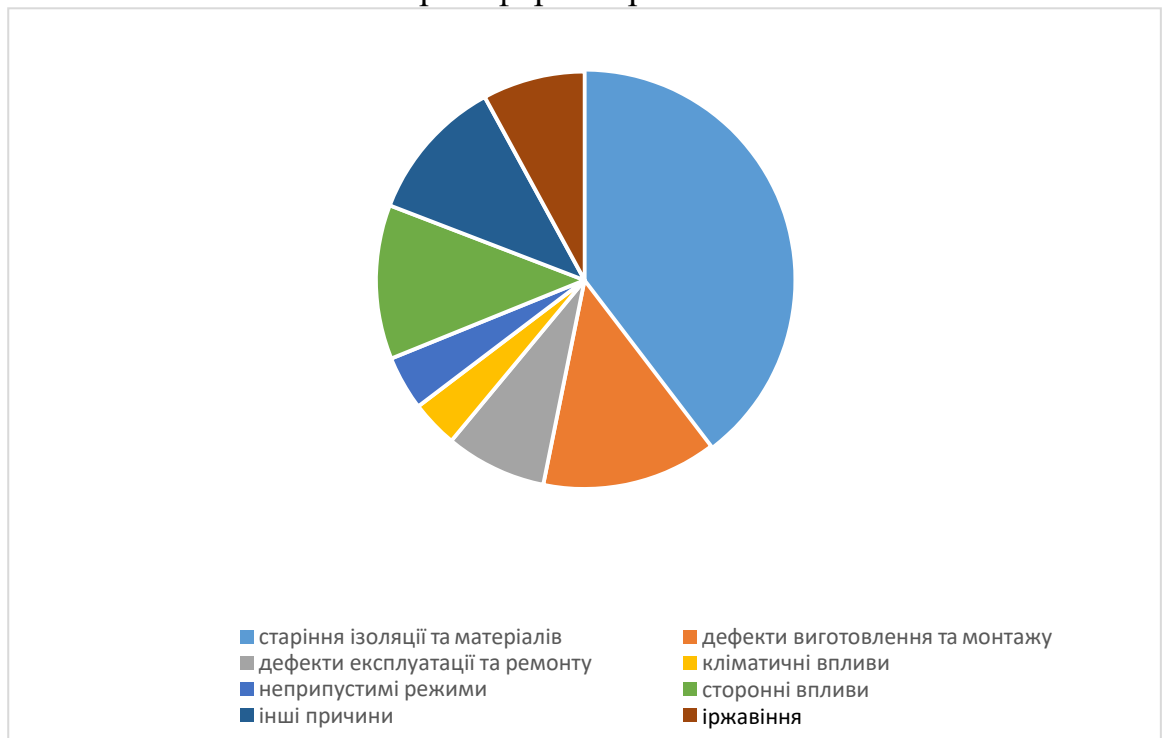


Рисунок 1.11 – Причини пошкоджень силових ввідів трансформаторів

Таким чином, результат аналізу показав, що найбільше частою причиною порушень у роботі силових трансформаторів 110-500 кВ є ушкодження вводів і пристроїв РПН (45) % всіх ушкоджень).

Трансформатори напруги призначені для перетворення високої напруги мережі в напругу, зручну для виміру звичайними приладами, а також для ізоляції цих приладів. Номінальна напруга вторинних обмоток приймається 100 В або $100\cdot\sqrt{3}$ В. За будовою та принципом дії трансформатор напруги подібний із силовим трансформатором.

Кількість ушкоджень вимірювальних трансформаторів напруги (ТН) різних класів напруг представлені на рис.1.12.

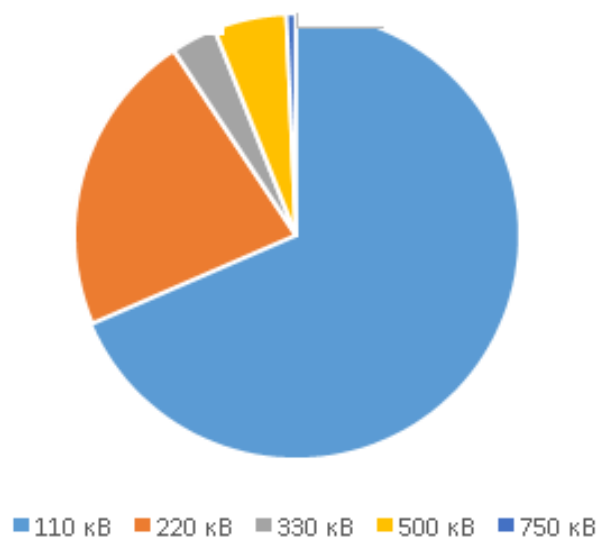


Рисунок 1.12 – Кількість пошкоджень трансформаторів напруги різних класів напруг

Причини пошкодження трансформаторів напруги представлені на рис. 1.13.



Рисунок 1.13 – Причини пошкодження трансформаторів напруги

Найменше кількість ушкоджень доводиться на вимірювальні трансформатори напруги емнісного типу. Трансформатори напруги з елегазовою ізоляцією стали застосовувати на підстанціях щодо нещодавно, тобто. їх кількість невелика від загальної кількості експлуатованих трансформаторів, тому даних про їх ушкоджуваності не має.

Кількість ушкоджень трансформаторів струму різних класів напруги показані на рис. 1.14.

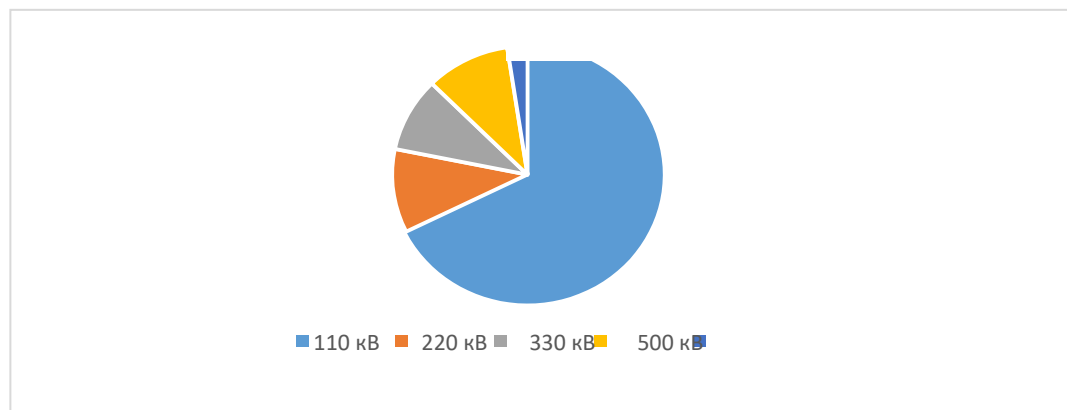


Рисунок 1.14 - Кількість ушкоджень трансформаторів струму різних класів напруг

Найбільше кількість відмов доводиться на маслонаповнені трансформатори струму – 87,9 % (найчастіше це трансформатори струму типу ТФЗМ), для елегазових трансформаторів струму кількість відмов становить 12,1%.

Причини ушкоджень маслонаповнених трансформаторів струму представлені на рисунку 1.15, елегазових трансформаторів струму - на рис.1.16.

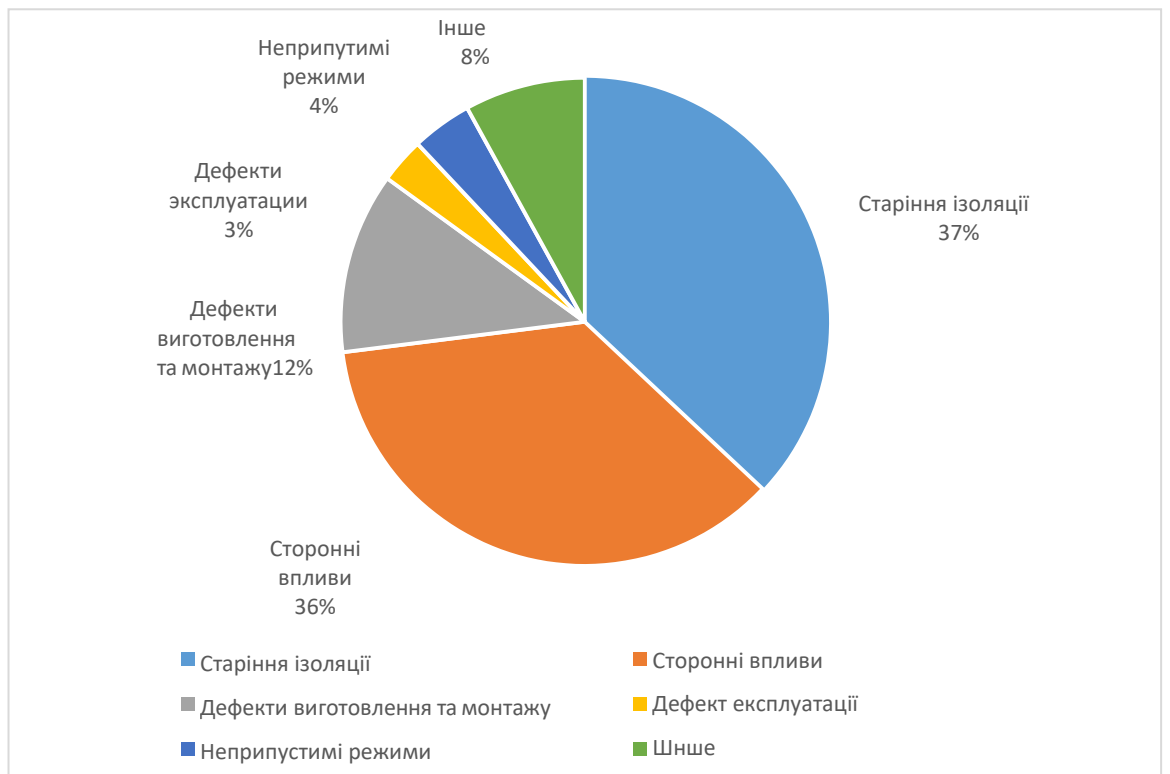


Рисунок 1.15 – Причини пошкоджень маслонаповнених трансформаторів струму

Для маслонаповнених трансформаторів струму велика кількість відмов пов'язано з сторонніми впливами, наприклад, в результаті розльоту уламків при пошкодженні трансформаторів струму сусідніх фаз (18,0%) і ушкодження сусіднього обладнання (вимикачі, роз'єднувачі) - 14%.



Рисунок 1.16 – Причини ушкоджень елегазових трансформаторів струму

Що стосується елегазових трансформаторів струму, то велика частина відмов пов'язані з різними дефектами. Дані дефекти пов'язані з періодом освоєння виробництва елегазових трансформаторів струму як вітчизняних, так та зарубіжних виробників.

Розподіл відмов вимикачів різних класів напруги показано на рис.1.17.

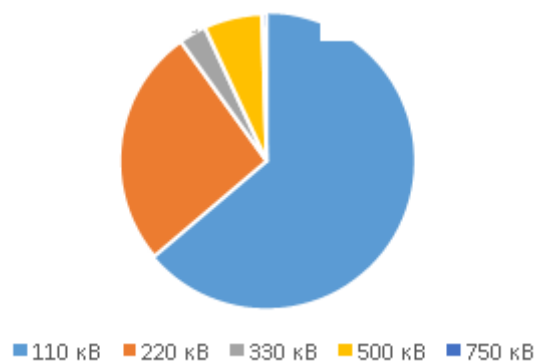


Рисунок 1.17 – Кількість ушкоджень вимикачів різних класів напруг

Розподіл ушкоджень по типам вимикачів представлено на рис. 1.18.

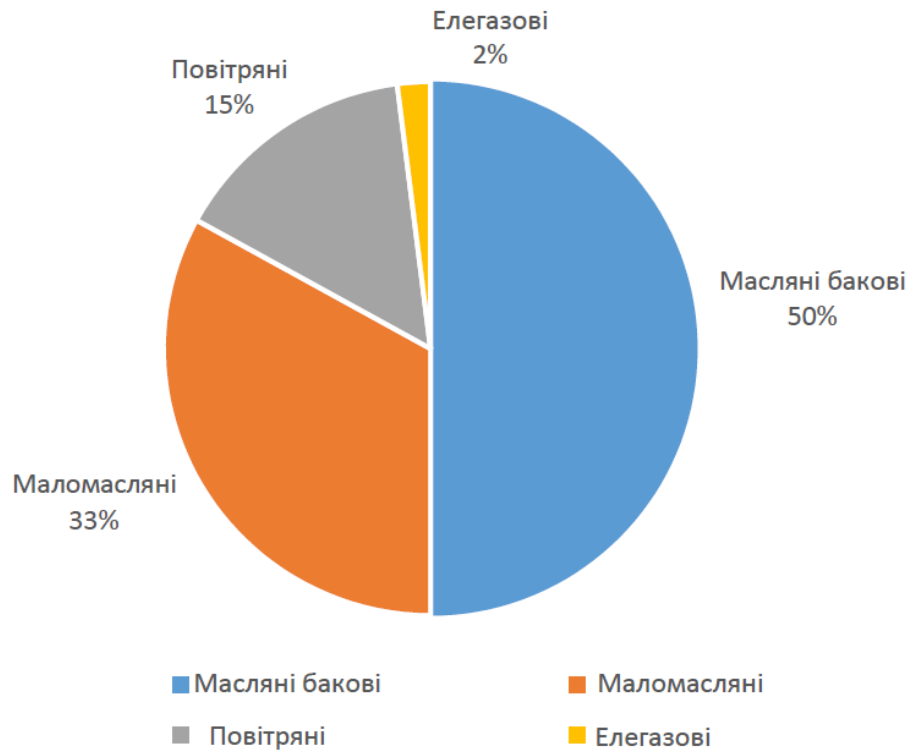


Рисунок 1.18 – Кількість пошкоджень різних типів вимикачів

На рис. 1.19–1.22 показано відповідно структура відмов різних типів вимикачів (повітряних, маломасляних, бакових масляних і елегазових).



Рисунок 1.19 - Причини ушкоджень повітряних вимикачів

Найбільше число відмов повітряних вимикачів всіх типів, наприклад, ВВБ, ВВМ, ВВ пов'язано з витоком стисненого повітря. Основні місця витoku повітря - це з'єднання трубопроводів, гумові і поліуретанові ущільнення, які в результаті низького якості і тривалого терміну експлуатації втрачають свої пружні властивості.

Декілька випадків відмов пов'язано з несправностями в механізмах приводу, що призводить до невиконання вимикачем команд на увімкнення або відключення, або мимовільному включенню і відключення. Основні причини – неякісний та невчасний ремонт, а також втома і вироблення металевих деталей механізмів приводу від тривалою експлуатації.

Основними причинами виходу ізоляторів з ладу є процеси старіння, а також низька якість порцеляни.

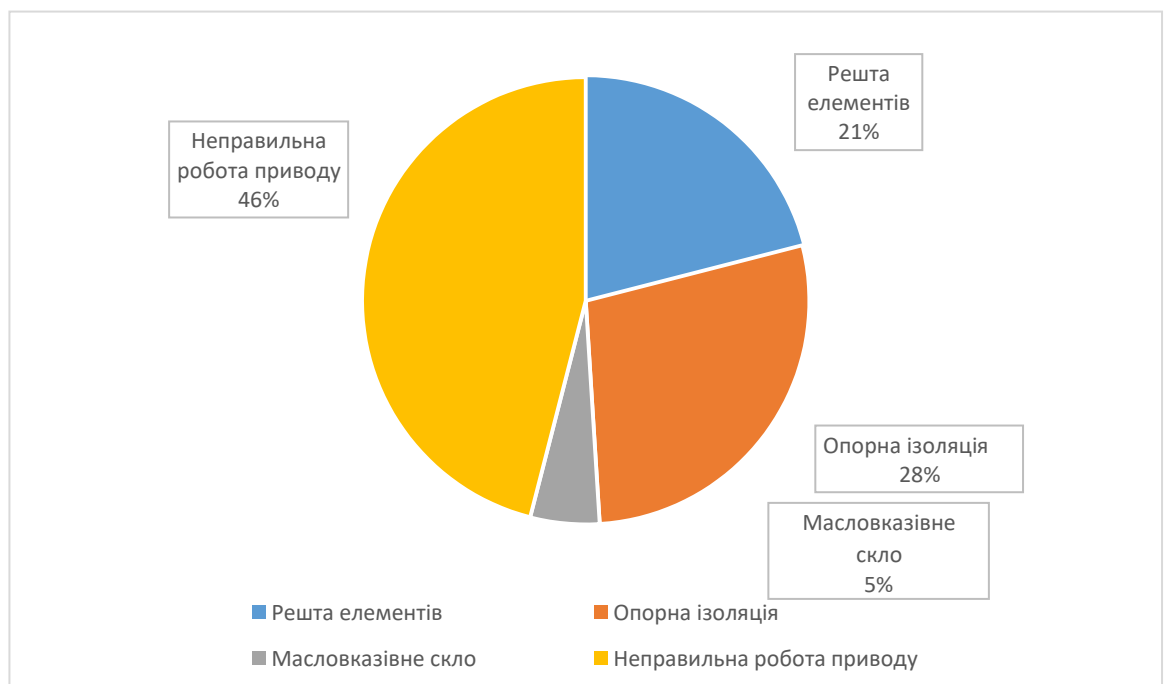


Рисунок 1.20 – Причини пошкоджень маломасляних вимикачів

Найбільше число відмов вимикачів відбулося через неправильної роботи приводу, що призводило до невиконання команд на включення і відключення, а також мимовільному включенню, відключення та затримки виконання операції. Найчастіше це приводило до пошкодження самого вимикача.

Аналіз даних щодо відмов вимикачів дозволив виділити основні причини відмов приводу:

- Найбільш частою причиною відмов була розрегулювання механізмів приводу, як від недотримання технічного обслуговування належним чином, так і від втоми матеріалу при тривалою експлуатації і багаторазових спрацьовування. Практично завжди це призводило до заклинювання приводу та згоряння електромагнітів включення і відключення в ланцюгах управління.

- Досить велике число відмов приводу відбулося через ушкодження ізоляції котушок електромагнітів - пробую ізоляції через тривалою експлуатації.

- Відмови також відбувалися через розрегулювання контактів в комутуючих пристрої, що наводило до тривалому протіканню струму в котушках включення та відключення та виходу їх з ладу.

Велике кількість маломасляних вимикачів пов'язано з ушкодженням опорних ізоляторів.

6 % відмов вимикачів були пов'язані з ушкодженнями передавальних механізмів від приводу (ізоляційні тяги, штанги, троси). Основний причиною було порушення структури матеріалу деталей, розщеплення і втрата ізолюючих властивостей, що наводило до пробую ізоляційного проміжок всередині наповненої олією колони.

Деяке кількість відмов вимикачів пов'язані з несправностями дугогасних пристроїв, що наводило до відмовимо в гашенні дуги.

Також відмови вимикачів були пов'язані з витіканням масла. Місця витікання масла: масловказівне скло; ущільнення фланцевих з'єднань; ущільнення масловказівного скла; тріщини в корпусі, зливний кран, манометр; ущільнення випускного клапана.

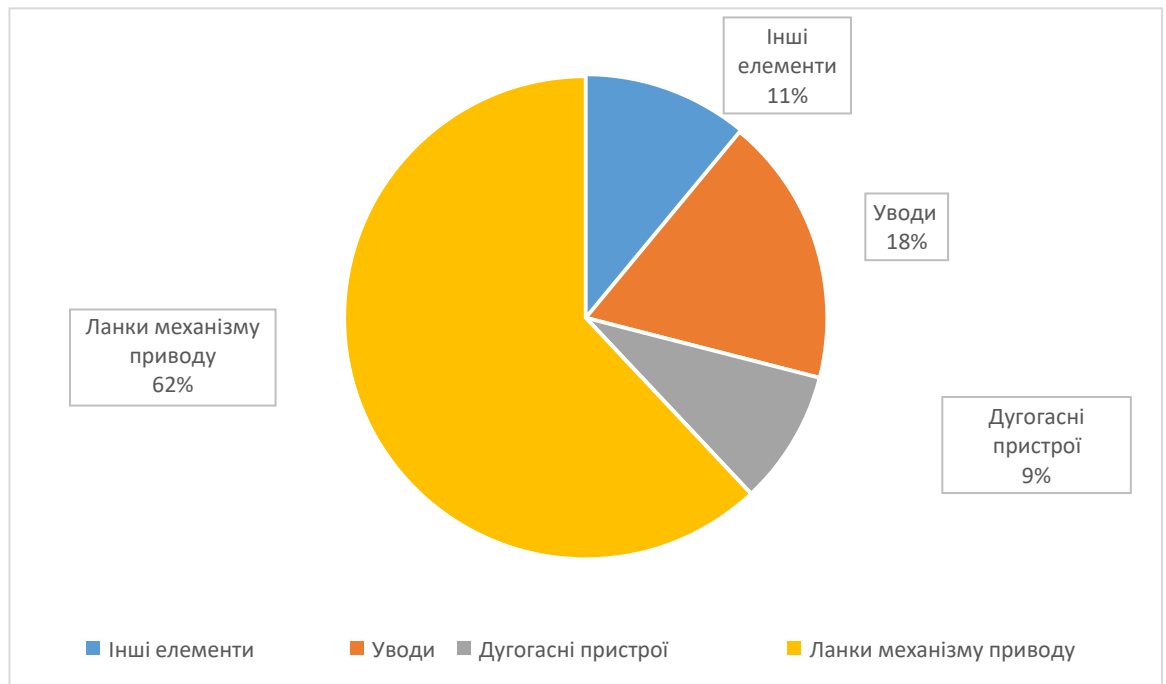


Рисунок 1.21 – Причини ушкоджень масляних бакових вимикачів

Найбільше кількість відмов доводиться на бакові масляні вимикачі серії МКП та У.

Саме велике число відмов вимикачів відбулося через неправильною роботи приводу, що привело до невиконання команд на включення і відключення, а також мимовільному включенню, відключення та затримки виконання операції. Найчастіше це приводило до пошкодження самого вимикача.

Аналіз даних щодо відмов вимикачів дозволив виділити основні причини відмов приводу:

- Найбільше число відмов приводу відбулося через згоряння електромагнітів включення і відключення через порушення міжвитковій ізоляції в результаті тривалою експлуатації і заїдання штока сердечника електромагніту.
- Розрегулювання механізмів приводу, а також пригорання і розрегулювання блок-контактів в комутуючих пристроях також наводили до тривалому протіканню струму по обмоткам електромагнітів, в

- внаслідок чого вони перегорали. Причиною цього був тривалий термін експлуатації і багаторазові операції вимикачем, що наводило до зносу деталей приводу, а також неякісна регулювання механізмів після проведення капітальних ремонтів.

- 18% відмов вимикачів пов'язано з ушкодженнями високовольтних вводів:

- Найбільш частою причиною ушкодження введення є пробій паперово-масляної ізоляції, а також перекриття по фарфоровій покривці через відкладення продуктів горіння олії на її поверхні.

- Пошкодження порцелянових сорочок введення викликано неякісним виготовленням на заводі-виробнику, що наводило до появи мікротріщин, зволоженню паперово-олійний ізоляції і її пробою.

- 7 % відмов вимикачів відбулися через ушкодження передавальних механізмів від приводу. Основний причиною було порушення структури матеріалу деталей, розщеплення і втрата ізолюючих властивостей, що призводило до пробою олії всередині бака, шляхом перекриття від тяг на корпус. У деяких випадках це призводило до вибуху та повному руйнування вимикача.

- 9 % відмов вимикачів пов'язані з несправностями дугогасних пристроїв.

- Невелике кількість відмов вимикачів пов'язано з витоком олії.

Найбільша кількість елегазових відмов вимикачів довелось на вимикачі виробництва «Сіменс»-«Євроконтакт» (відмова підігрівального пристрою) та вимикачів «АББ Електроінжиніринг» (відмова підігрівального пристрою, несправність сигналізації тиску, замикання вторинних ланцюгів приводу PLK-220).

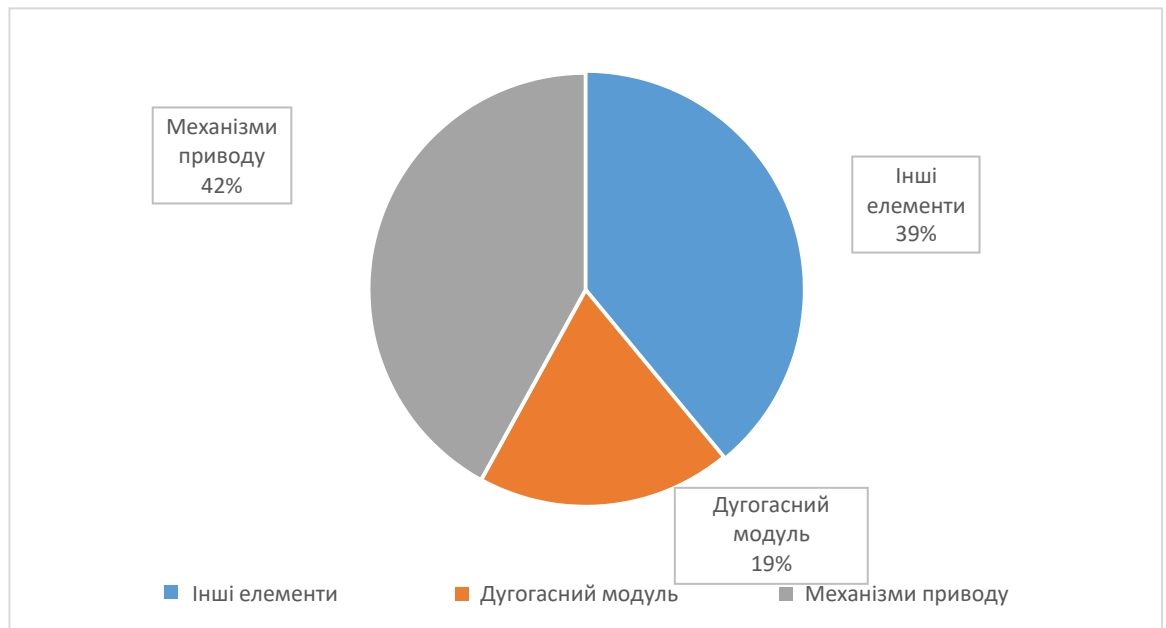


Рисунок 1.22 – Причини пошкоджень елегазових вимикачів

Найбільше число відмов елегазових вимикачів пов'язано з несправністю блоків відключення, яка є конструктивною недоробкою заводу-виробника.

Таким чином, проведений аналіз дозволив виявити найбільш слабкі елементи (вузли), ушкодження яких наводили до відмовимо вимикачів:

- 1) Найбільш слабким елементом повітряних вимикачів є гумові і поліуретанові ущільнення, які наводили до витoku стисненого повітря з вимикача.
- 2) Найбільш пошкоджені елементи олійних бакових вимикачів - привід і введення. Більше 50% відмов олійних бакових вимикачів пов'язані з ушкодженням ланок механізмів приводу, електромагнітів, комутуючих ланцюгів та ланцюгів управління.
- 3) Найбільш слабкими елементами маломасляних вимикачів є привід і опорна ізоляція.
- 4) У елегазових вимикачів найбільш пошкодженим елементом є привід - 42%, дефект якого був допущений при виготовленні на заводі-виробнику.

На сьогоднішній день згідно [16] на знову проєктованих і реконструйованих підстанціях рекомендується встановлювати елегазові та вакуумні вимикачі, масляні та повітряні вимикачі застосовувати не можна.

Розподіл відмов роз'єднувачів за різними класами напруги представлений на рисунку 1.23.

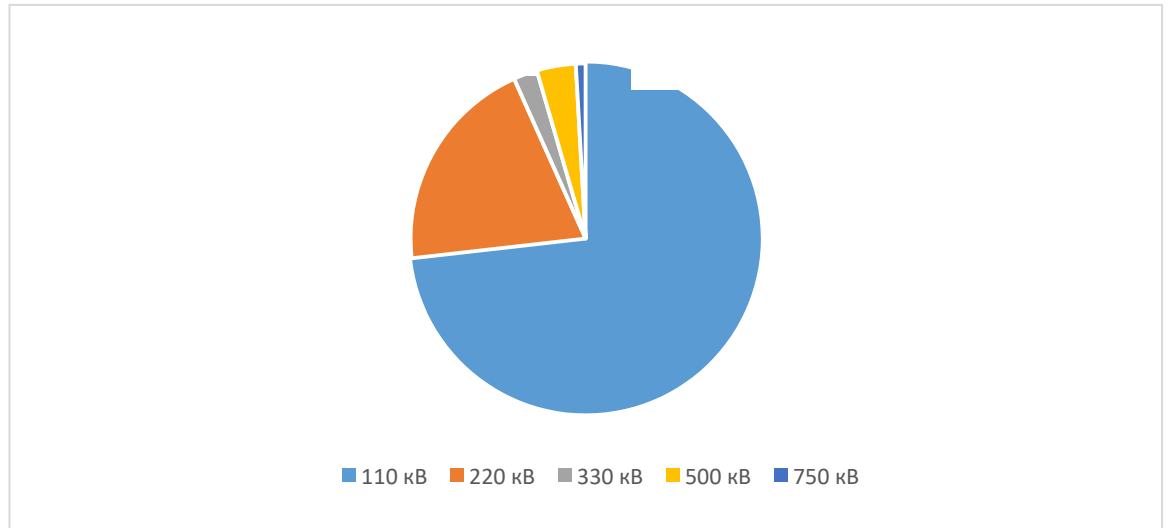


Рисунок 1.23 – Кількість пошкоджень роз'єднувачів різних класів напруг

Причини ушкоджень роз'єднувачів показано на рисунку 1.24.

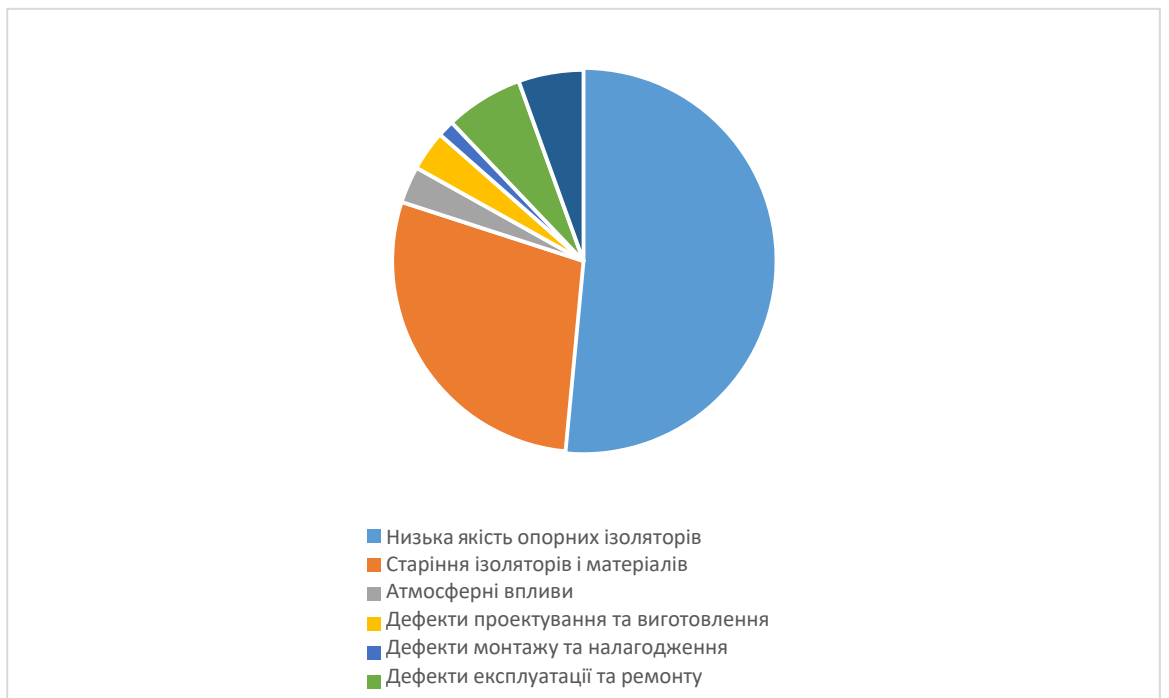


Рисунок 1.24 – Причини ушкоджень роз'єднувачів

Структура ушкоджень роз'єднувачів представлена на рис. 1.25.

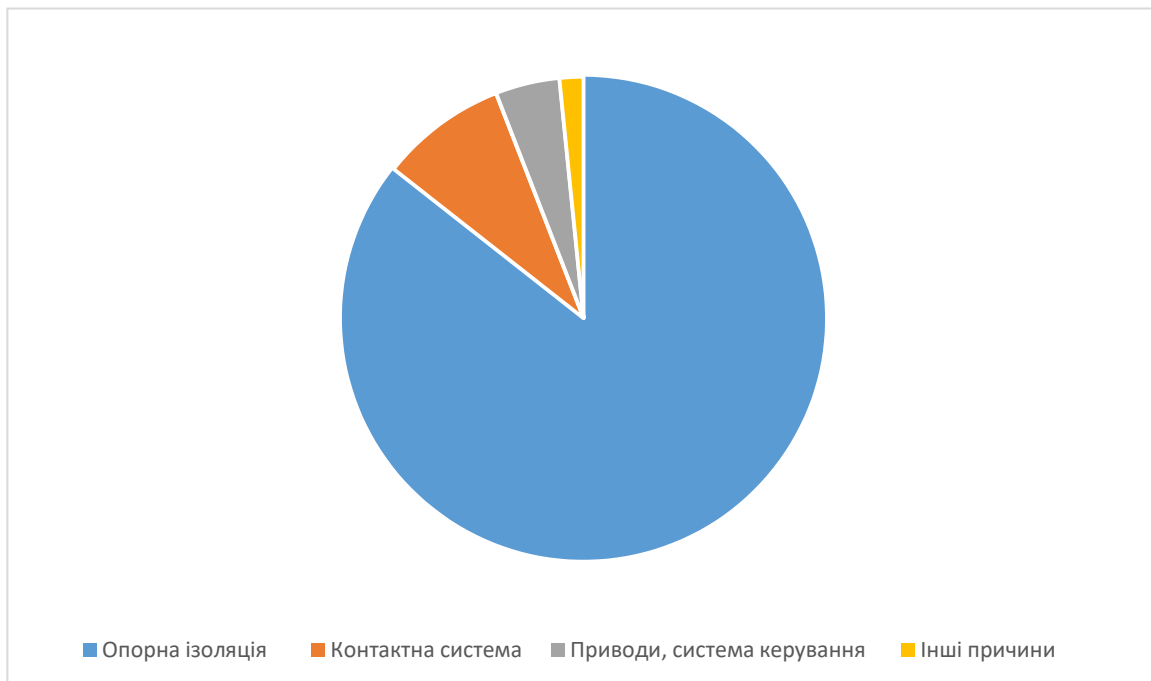


Рисунок 1.25 – Причини пошкоджень основних елементів та вузлів роз'єднувачів

Як випливає з наведених вище рисунків, найбільше число ушкоджень роз'єднувачів пов'язано з ушкодженнями і руйнуваннями опорних ізоляторів.

Було встановлено, що основними причинами пошкоджень опорних порцелянових ізоляторів роз'єднувачів є: а) низька якість порцеляни (51,5%); б) тривалий термін експлуатації – 30 років та більше (22,5%); в) руйнування арматури (фланців) ізоляторів (1,2%).

Також аналіз даних о ушкодженості показав, що якщо є дефектні опорні ізолятори в колонках, роз'єднувачі 110 і 220 кВ можуть пошкоджуватися з падінням ізоляційних колонок як в період їх стаціонарний роботи, так і при здійсненні операцій «включення - відключення», що може привести до важким небезпек для експлуатаційного персоналу. Для роз'єднувачів на напруги 330, 500 та 750 кВ з паралельними колонками опорних ізоляторів подібних обвалів ізоляційних конструкцій не спостерігалось.

У результаті наведеного аналізу також можна, можливо зробити висновок, щодля підвищення надійності роз'єднувачів та зниження ризику травматизму для експлуатаційного персоналу необхідна заміна ненадійних порцелянових опорних ізоляторів, термін служби яких вийшов, на сучасні Опорні полімерні ізолятори.

Пошкодження контактної системи роз'єднувачів пов'язані з недоліками проектування та експлуатації, монтажу та налагодження, а також відсутністю своєчасної діагностики технічного стану контактів комутаційного апарату.

1.4 Висновки по розділу I

1. Розглянуто сучасне стан питання розвитку теорії надійність. Було показано, що питання визначення надійності електромережевого комплексу є важливими на сучасному етапі розвитку електроенергетики.

2. Проведено аналіз стану об'єктів магістральних і розподільчих електричних мереж. Виявлено, що загальна частка технологічних порушень в електромережному комплексі по причин, пов'язаним зі старінням (зносом) обладнання, склала 24%, що свідчить о необхідності збільшення обсягів технічного переозброєння і реконструкції об'єктів електромережевого господарства.

3. Проведено аналіз структури відмов силових трансформаторів, вимірювальних трансформаторів напруги і струму, вимикачів, роз'єднувачів . На основі аналізу було виявлено, що найбільший відсоток відмов доводиться на вимикачі – 46,9%.

РОЗДІЛ 2

ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ СТРУКТУРНОЇ НАДІЙНОСТІ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ВРАХОВУЄ ВІДМОВИ КОМУТАЦІЙНОЇ АПАРАТУРИ

2.1 Основні поняття теорії надійності

Електроенергетична система представляє собою складну структуру з великим кількістю елементів. Як вже говорилося, для простоти розрахунків надійність ділять на структурну і функціональну. Структурна та функціональна є розрахунковими моделями надійності системи, коли управління комутацією мережі здійснюється в випадку відмов елементів по заданим алгоритмів і програм. Можливі відмови системи (аварії), виявлені при аналізі розрахункових моделей, є розрахунковими подіями. на них орієнтована вся структура і автоматики системи. У реальному житті в енергосистемі крім розрахункових аварій відбуваються аварії нерозрахункові, коли в ході розвитку первинних відмов мають місце відмови та неправильні дії персоналу та коштів управління, а також впливу стихійних сил та сторонніх факторів. Ці явища відносяться до області живучості енергосистем [17-24].

Точне знання розподілу потоку потужності та рівнів напруги потрібно при

аналізі функціональної надійності чинною енергосистеми в ході оперативного управління. Тоді розрахунки розподілу потоку здійснюються по повним рівнянням з обліком напруг у вузлах, значень активної та реактивної потужності у гілках мережі і умов їх генерування в вузлах. Але це вже завдання розрахунку режимів.

Розглянемо структурну надійність. Структура системи змінюється як при випадкових обурення, так і при навмисних перемикання.

Уявимо електричну систему еквівалентною схемою заміщення, яка містить генеруючі, навантажувальні та транзитні вузли, а також зв'язки між ними. Як критерій (умови) відмови системи вважатимемо обмеження або припинення живлення хоча б одного з вузлів навантаження. Це може статися, коли наявна генеруюча потужність у системі недостатня для електропостачання всіх споживачів (дефіцит потужності), перевантажені лінії електропередачі або перервано зв'язки навантажувального вузла із системою. Тому крім обчислення показників надійності системи в цілому необхідно визначити надійність електропостачання окремих навантажувальних вузлів. Розрахунок структурної надійності дозволяє визначати надійність електропостачання вузлів, але не враховує ймовірність нестачі генерованої потужності покриття навантаження споживачів. Якщо не розглядати випадки порушення стійкості паралельною роботи генераторів системи та виходу за допустимі межі напруг у вузлах, ставлячи ці випадки до завдань забезпечення стійкості і режимної керованості, то й тоді визначення показників безвідмовності і готовності електроенергетичної системи представляється складною завданням. Наявність великої кількості елементів у структурі та їх зв'язність електричному режиму, наявність відновлення і профілактики і обмежень по пропускну здібності елементів мережі змушує приймати при аналізі структурної надійності електричних систем наступні спрощують припущення [17-24]:

- відмови елементів системи є незалежними подіями;
- потік відмов подій є ординарним, тобто, ймовірність появи на одному проміжку часу Δt двох і більше подій суттєво мала у порівняно з

ймовірністю появи лише однієї події. Ординарність потоку висловлює собою умова практичною неможливістю одночасного появи двох і більше подій. Потік відмов одного відновлюваного пристрої завжди є ординарним, тобто друга відмова може мати місце тільки після відновлення цього пристрої;

- періоди безвідмовної роботи елементів значно більші за тривалість їх відновлення;
- час безвідмовний роботи і час відновлення розподілені по експоненційному закону;
- розглядаються тільки стаціонарні стану елементів і визначаються їх ймовірності (відносні тривалості), тобто. ймовірність появи певного числа подій за фіксований проміжок часу залежить тільки від довжини проміжку та не залежить від положення проміжок на осі часу, тобто. густина потоку появи подій постійна в часі.

Схема заміщення електроенергетичної системи є складну мережеву структуру, тому при побудові її моделі надійності використовуються різні методи оцінки показників структурної надійності. Ці методи не дозволяють точно визначити потікорозподіл у мережі, так як враховують лише перший закон Кірхгофа. Проте простота реалізації методів є вирішальним перевагою при складних схемах і великому кількості розрахунків.

«Основними подіями в системі є відмови та відновлення як окремих елементів, так і системи в загалом, обумовлені показниками надійності. Загальноприйнятими в міжнародною практиці основними показниками надійності є: ймовірність безвідмовний роботи - Probability of Failurefree Operation, час відновлення – Restoration Time» [17-24].

Як показники, що кількісно характеризують надійність схеми і її елементів, також рекомендується використовувати наступні показники:

Інтенсивність відновлення $\mu(t)$ – умовна ймовірність відновлення після моменту t за одиницю часу Δt за умови, що до моменту t відновлення елемента не сталося.

Чисельні значення інтенсивності відновлення та інтенсивності відмов

зведені в довідковій таблиці по видам обладнання і ремонтів.

Середнє час відновлення T_B – при експоненційному розподіл часу відновлення, коли інтенсивність відновлення $\mu = const$ – аналогічно маємо співвідношення

$$T_B = \frac{1}{\mu}, \quad (2.1)$$

тобто середній час відновлення чисельно дорівнює середній за безліччю однотипних елементів (об'єктів) тривалості відновлення, припадає на один об'єкт. Оскільки $\mu = const$ – то й $T_B = const$.

Статистично середня час відновлення дорівнює:

$$T_B = \frac{\sum_i^{N_y(0)} t_{Bi}}{n}, \quad (2.2)$$

де t_{Bi} - тривалість відновлення i -го елемента (об'єкта), n - число відмов даного об'єкта. $N_y(0)$ - число відновлених елементів.

Параметр потоку відмов $\omega(t)$ – математичне очікування числа відмов, що відбулися за одиницю часу, починаючи з моменту t за умови, що всі елементи, що з ладу, замінюються працездатними, тобто. число спостерігаються елементів зберігається однаковим в процесі експлуатації

З статистичних даних параметр потоку відмов $\omega(t)$ визначається з формули:

$$\omega(t) = \frac{n(\Delta t)}{N\Delta t}, \quad (2.3)$$

де N , $n(\Delta t)$ - відповідно загальне кількість елементів, поставлених на випробування, і число елементів, відмовили за інтервал часу Δt .

Для експоненційного закону надійності інтенсивність і параметр потоку відмов не залежать від часу і збігаються, тобто

$$\lambda(t) = \omega(t) = \lambda = \omega = \text{const.} \quad (2.4)$$

Для оцінки кількох властивостей надійності використовуються комплексні показники:

Коефіцієнт готовності K_G - ймовірність того, що об'єкт виявиться в працездатному стані в довільний момент часу t .

Для визначення величини K_G окремого елемента використовується наступна статистична оцінка:

$$K_G = \frac{\sum_{i=1}^n t_{P_i}}{\sum_{i=1}^n t_{P_i} + \sum_{i=1}^n t_{B_i}}, \quad (2.5)$$

де t_{P_i} - i -й інтервал часу справний роботи елемента,
 t_{B_i} - i -й інтервал часу відновлення елемента після i -го відмови, n - число відмов.

Або K_G можна, можливо отримати за наступним виразом:

$$K_G = \frac{T}{T + T_B}, \quad (2.6)$$

де T - середній час безвідмовний роботи.

• Коефіцієнт вимушеного простою K_{II} - ймовірність того, що в довільний момент часу t об'єкт буде в непрацездатному стані:

$$K_{II} = 1 - K_G = \frac{T_B}{T + T_B}. \quad (2.7)$$

2.2 Аналіз методів оцінки показників структурної надійності

Як вже згадувалось в першій главі, парк електрообладнання електричних мереж має велику частку обладнання, відпрацював встановлений стандартами мінімальний термін служби. Тому в останнім часом у зв'язку з аваріями, що почастишали в електроенергетичній системі. Усе частіше встає питання оцінки надійності і безперебійності функціонування. З найбільш вживаних нині методів розрахунку можна назвати експериментальні методи, методи імітаційного моделювання (статистичні методи) та аналітичні методи (рисунок 2.1).

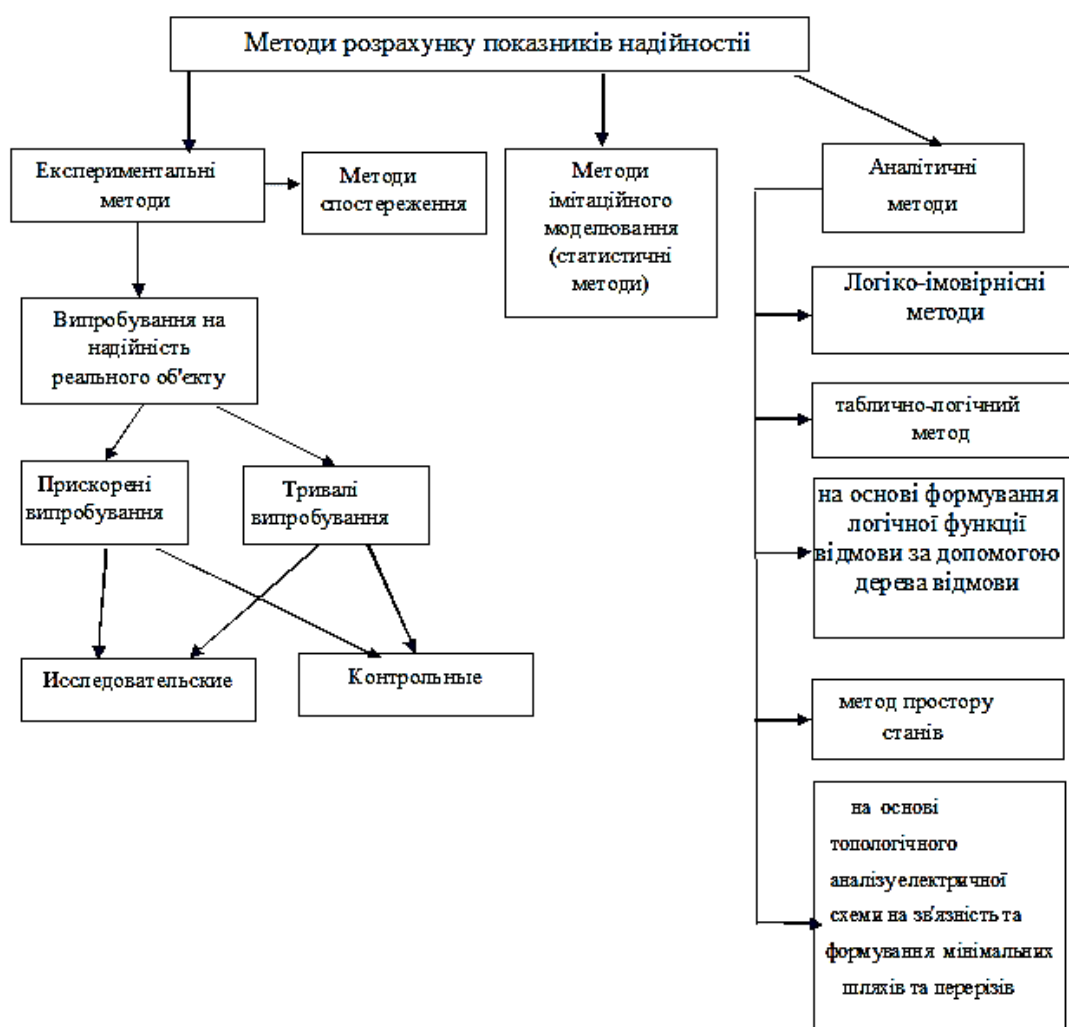


Рисунок 2.1 – Методи оцінки показників структурної надійності

Випробування на надійність, як правило, застосовуються для серійних виробів, що випускаються в великому кількості. «Дослідні випробування на надійність проводяться виявлення фактичних значень показників надійності. Контрольні – для перевірки відповідності показників надійності об'єктів вимогам ДСТУ, технічного завдання тощо.

За часом проведення випробування поділяються на прискорені та тривалі. Основною особливістю тривалих випробувань є відтворення реальних умов експлуатації об'єкт. Прискорені випробування моделюють форсовані режими навантаження об'єкта з метою отримання достатньої інформації про надійність за максимально короткий термін по порівнянні з умовами експлуатації.

Проводити спеціальні випробування для систем електропостачання, перебувають з дуже великого числа різномірних елементів, в реальних умовах експлуатації во багатьох випадках не представляється можливим, тому частіше всього застосовуються методи спостережень, або як їх ще називають ретроспективні методи. Вони є витягом і обробку інформації з аналізу роботи об'єкта, що діє. Вартість робіт, пов'язаних з оцінкою надійності експлуатованого електроенергетичного обладнання цими методами, в відмінність від вартості випробувань на надійність мінімальна. У здебільшого це витрати на збір і обробку статистичних даних. У результаті показники надійності об'єкта можуть бути експериментальними методами оцінені, наприклад, наступним [17-24].

Статистично середня час відновлення можна, можливо визначити по формулі (2.2). З статистичних даних параметр потоку відмов $\omega(t)$ визначається по формулі (2.3).

Ймовірність відмови в спрацьовуванні комутаційного апарату q_B статистично визначається як ставлення числа неспрацьовування $m_{\text{УРЗА}}(\Delta t)$ пристроїв релейний захисту і автоматики і числа неспрацьовування $m_B(\Delta t)$ самого комутаційного апарату до спільному числу вимогроботу їх $M(\Delta t)$ на пристроїв за період спостережень Δt

$$q_B^* = \frac{1}{M(\Delta t)} [m_{\text{впр3А}}(\Delta t) + m_B(\Delta t)]. \quad (2.8)$$

Як показує практика, недостатній обсяг статистичних даних відмов та відновлення елементів електроенергетичних систем Росії не дозволяє в повній мірі використовувати цей метод. Однак по результатам статистичних даних, наявних в журналах технологічних порушень, можна, можливо зробити висновок, як впливають наведені вище фактори на події в системі, а також на надійність її елементів і електроенергетичної системи в цілому [69]. За цією причиною повинна проводитися робота по збору, обробці, зберіганню і використанню даних щодо надійності об'єктів систем електропостачання.

Методи імітаційних випробувань (метод Монте Карло або статистичні методи) став широко використовуватися завдяки впровадженню в практику розрахунків комп'ютерів. Сутність методу складається в тому, що на обчислювальній машині моделюється дійсний хід процесу, і після того як над цим процесом проведено достатньо тривалі спостереження, робляться оцінки показників надійності. Таким чином, в цьому методі моделювання розглядається як послідовність реальні експерименти. Після серії дослідів одержують деяку вибірку випадкових реалізацій, які потім піддають стандартним процедурам статистичної обробки. Основний недолік методу Монте Карло полягає в тому, що потрібна велика кількість випробувань, в результаті цього витрати машинного часу на моделювання можуть виявитися надзвичайно великими, в особливості якщо в ході обчислень зустрічається велике кількість різних станів системи, вимагають складного аналізу умов відмови.

Аналітичні методи при наявності математичного описи функціональних зв'язків між окремими факторами дозволяють вирішити будь-яку завдання по оцінці надійності в електроенергетиці з необхідною точністю. Як правило на практиці, багато методи, що відносяться до аналітичних, використовують громіздкі описи функціональних зв'язків, що вимагає досить трудомістких, в ряді випадків, розрахунків навіть з використанням сучасних комп'ютерів. Тим не

менше, з всього різноманіття розглянутих підходів для оцінки структурної надійності найбільш кращими є аналітичні методи, які розглянемо детальніше. Найбільш поширені формули, що використовуються для розрахунків у аналітичних методах наступні [5, 7, 12, 16, 23, 27]. Загальна формула ймовірності безвідмовний роботи:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (2.9)$$

Середнє час безвідмовний роботи:

$T = \int_0^{\infty} P(t) dt .$	(2.10)
---------------------------------	--------

При експонентному розподілі ймовірність безвідмовної роботи в плин часу t обчислюється за формулою

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt .$$

а середня час безвідмовний роботи

$$T = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} .$$

До основним аналітичним методам відносяться:

- логіко-ймовірнісні методи;
- таблично-логічний метод.
- на основі формування логічною функції відмови з допомогою дерева відмови;
 - на основі топологічного аналізу електричної схеми на зв'язність і формування мінімальних шляхів і перерізів;
 - метод простору станів.

Слід відзначити, що поділ методів розрахунку достатньо умовно, через те, що в межах кожного методу можуть використовуватися розділи з інших

методик.

Логіко-імовірнісний метод використовує функції алгебри логіки. «Функція алгебри логіки використовує систему двійкових змінних, тобто. є величина, яка приймає два значення: «істина» і «брехня». Якщо x істинно, то $x = 1$, якщо x хибно, то $x = 0$. Змінна величина, яка приймає лише два значення (1 або 0), називається двійковою. Функції, приймаючи лише два значення (1 або 0) і обумовлені різними наборами двійкових аргументів, називаються двійковими функціями або функціями алгебри логіки (ФАЛ)» [8, 56].

Виконуються три основні логічні операції: кон'юнкція (що відповідає множенню подій у теорії ймовірностей), диз'юнкція (відповідна додавання подій) і заперечення. Заперечення висловлювання x позначається як \bar{x} .

Логічне сумування виразів x_1 і x_2 визначається як $x_1 \vee x_2$ або $x_1 + x_2$.

При вивченні надійності схем є поняття найкоротшого шляху Π успішного функціонування системи, тобто. кон'юнкцію її елементів, ні одну з компонент якої не можна вилучити, не порушивши умови функціонування. Таку кон'юнкцію можна записати в вигляді

$$\Pi_l = \bigwedge_{i \in K_{\Pi_l}} X_i,$$

де K_{Π_l} - безліч номерів елементів X_i , відповідних даному шляху l .

Визначити умови працездатності для систем, мають невелика кількість елементів у структурній схемі, неважка. Якщо ж розглядати систему, що має у структурній схемі велику кількість елементів, то складання функції працездатності простим перебором стає нереальним.

У зв'язку з цим вводиться поняття мінімального перерізу відмов системи, що є таке логічне утворення з заперечень її елементів, жоден із компонентів якої не можна вилучити, не порушивши умови непрацездатності системи. Таку кон'юнкцію можна записати в вигляді функції

$$S_j = \bigwedge_{i \in K_{S_j}} \bar{X}_i,$$

де K_j - безліч номерів елементів X_i , відповідних даному перерізу j .

Таким чином, якщо структурно-функціональні зв'язку системи можна уявити, наприклад, у вигляді сукупності елементів, пов'язаних між собою послідовним, паралельним або іншим способом, то працездатне або непрацездатне стан такої системи можна, можливо записати в вигляді функції алгебри логіки. *Логіко-ймовірнісний* метод застосовується в здебільшого для розрахунку надійності суднових електроенергетичних систем, технологічних схем атомних електростанцій, включаючи схеми надійного живлення установок власних потреб.

Гідність даного методу - можливість реалізації на комп'ютер. Недоліком є складність розрахунку зі збільшенням схеми при неавтоматизованою реалізації розрахунків.

Таблично-логічний метод застосовується в тих випадках, коли різноманітність відмов аналізованої системи велике. З допомогою таблично-логічного методу можна виявити різні види аварій, що виникають при накладенні відмов елементів головною схеми на ремонтні і експлуатаційні режими, різні складом що знаходяться в роботі елементів і їх ушкоджуваність. Для всіх виявлених аварій обчислюється частота виникнення відмов і середня тривалість ліквідації аварії.

Пошуки та стани, що шукаються, пов'язані з збігом відмов одних з непрацездатними станами інших елементів. Складається таблиця розрахункових логічних зв'язків відмов, режимів і аварій, в якій записується, які відмови до якоїсь аварії призводять до кожного з режимів. Таблиця є матрицею, де кожен стовпець ідентифікує вихідне стан, а рядок – стан відмови елемента, тобто. кожна клітина таблиці представляє один із можливих станів системи. Побудовані певним чином таблиці дозволяють організувати перебір таких станів та збігів. Форми таблиць можуть бути різними, відображаючи специфіку задачі. Виведення розрахункових виразів для частоти та тривалості аварій заснований на послідовному застосуванні формули повної ймовірності при розгляді безлічі

можливих кон'юнкцій.

Перевага цього методу – це наочність визначення різних видів аварій. Нестача - виникають труднощі при аналізі складних технічних систем у зв'язку з великим кількістю переборів вихідних станів і станів відмов, що важко піддається формалізації на комп'ютер.

Метод, заснований на аналізі дерева відмов, представляє собою систематичний аналіз подій, які можуть викликати відмова системи, включаючи відмови підсистем та елементів, які є першопричиною відмов системи. У результаті аналізу будується так зване дерево відмов (Рисунок 2.2), структура дерева відмов дозволяє визначити алгоритми, при допомозі яких можна, можливо обчислити ймовірність відмови системи. Деякі поняття, використовувані в методі дерева відмов, запозичені із теорії графів. Теоретично графів деревом називається такий граф (сукупність вершин і ребер), який є зв'язковим (виходячи з будь-якої вершини, можна досягти будь-якої іншої вершини, пройшовши деяку послідовність ребер) і не містить замкнутих контурів (випадок, коли деяка послідовність ребер починається і закінчується в одній і тій самій вершині). Дерево із спрямованими ребрами (дугами), де з кожної вершини починається одна єдина дуга, за винятком вершини, званою коренем дерева, називають логічним деревом.

Деревом називають зв'язковий граф, що не містить замкнутих контурів. між будь-якими двома вузлами дерева можна, можливо побудувати тільки один єдиний шлях. Деревом відмов називають логічне дерево, в якому гілки представляють собою події, що приводять до відмові системи, підсистеми або елементів, а вузли - логічні операції, зв'язуючи вихідні та результуючі події відмов. Дерево відмов починається з єдиної події в корені дерева, що називається кінцевою подією; на наступному рівні з'являються події, які можуть спричинити кінцеве подія; аналогічним чином дерево продовжується на наступних рівнях. Найбільш уживаними логічними операціями є *I* і *АБО*, значно рідше вживається *НЕ*, визначення та символи цих логічних операцій показано на рис. 2.3 [17-24].

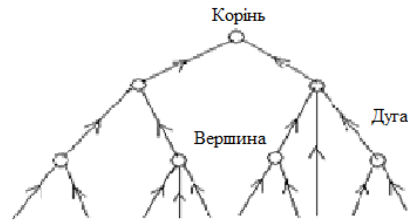


Рисунок 2.2 – Дерево відмов

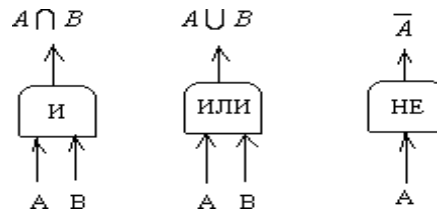


Рисунок 2.3 – Логічні операції

Процес побудови дерева відмов йде від кінцевої події зверху вниз через проміжні до вихідних подій та станів, доти, Бувай на всіх рівнях дерева не залишаться одні елементарні події та стану.

Аналіз дерева відмов визначає найбільш важливі відмови та найбільш слабкі місця системи. Недоліком цього методу є те, що розрахунки надійності схем з великим кількістю елементів можуть бути скрутні, тому що для кожного цікавого стану розрахункової схеми має будуватися своє «дерево відмов», що призводить до великого кількості розрахунків.

Топологічний метод на основі формування мінімальних шляхів та перерізів (В.В. Зорін, І.В., Біллінтон, Р. Алан, Дж. А. А., Дж. Ендрені, В. Л. Прус, В.В. Тисленко). Він полягає в наступному: реальна схема електропостачання замінюється еквівалентної структурної: послідовно-паралельної (шляху) і паралельно-послідовній (перетину). Шляхи - це сукупності мінімального набору елементів, функціонування яких забезпечує нормальне функціонування схеми від джерела живлення до вузла навантаження. Перетину – це сукупності мінімального набору елемента, відмова яких в будь-який з сукупностей наводить до відмові розглянутого вузла [17-24]. це основні перерізи, тобто. за елементами,

що входять у дані перерізу, може передаватися електроенергія в вузол навантаження. Крім основних формуються і додаткові перерізу. Додаткові перерізи визначаються на основі інформації про основних перерізах, в які входять вузли схеми, і списків, відбивають зони впливу відмов елементи на вузли. Додатковими перерізами називають сукупності елементів, за якими безпосередньо електроенергія у вузол навантаження не передається (або передається по частини з них), але відмова, яких або поєднання відмови одних з навмисними відключеннями інших припиняє подачу живлення в вузол навантаження на час оперативних перемикачів в мережі, то є при відключенні одного або кількох елементів, що відмовили, може бути відновлено живлення навантаження. Склавши показники надійності основних і додаткових перерізів, визначаються показники надійності схеми щодо вузла.

Для невеликих схем (до декількох сотень елементів) шляху та перерізу визначаються безпосередньо по схемою. Алгоритми будуються таким чином, щоб на початку визначалися всі шляхи в схемою, представляючи їх в вигляді матриці шляхів P , в якій рядки відповідають розрахунковим елементам схеми, а стовпці – мінімальним шляхам. Якщо в i -й мінімальний шлях входить k -й розрахунковий елемент, то на перетині i -го стовпця і k -й рядки ставиться одиниця. У результаті логічного додавання рядків визначаються всі основні перерізи щодо вузла, що розглядається. Якщо рядок матриці P складається з одних одиниць, то відповідний розрахунковий елемент утворює одноелементне переріз. Якщо в рядках матриці P є хоча б одна складова, що дорівнює нулю, то в схемі не існує одноелементних перерізів і можна відразу перейти до пошуку двоелементних. Двоелементні перерізу знаходяться шляхом логічною суми кількох рядків, у даному випадку шляхом аналізу поєднань по дві рядки, тобто. якщо логічна сума рядків складатиметься з одних одиниць, то утворюються двоелементні перерізи.

Аналогічно визначаються триелементні перерізу, при цьому аналізуються поєднання трьох рядків. У цьому методі зазвичай аналіз закінчується на розгляді двоелементних перерізів тому, що в складних схемах з великою кількістю

елементів число мінімальних шляхів може бути дуже велике, що ускладнює розрахунки навіть з застосуванням ЕОМ.

Методи визначення основних і додаткових перерізів для великих схем електропостачання достатньо складні. З розвитком ЕОМ були розроблені алгоритми, що дозволяють вирішувати це завдання. Тим не менш аналіз алгоритмів, які були розроблені для розрахунків на ЕОМ, показав ряд обмежень, що ускладнюють їх реалізацію: одне й те саме переріз може формуватися кілька разів; перевірка графа на зв'язковість при переборі всіх поєднань відмовили елементів схеми, як основна операція в визначенні перерізів, зумовлює велике час рахунки; формування перерізів по матриці мінімальних шляхів є практично неефективним через дуже великої кількості шляхів.

Метод простору станів. Для того щоб розрахувати надійність системи за цим методом, спочатку аналізують стан системи, що визначається станом кожного елемента: елемент або працює, або відмовив, або знаходиться ще в будь-якому стані, наприклад, у запобіжному ремонті. Стану такої системи під впливом потоків відмов та відновлень можуть змінюватись у часі. У загальному випадку можна говорити про деяку систему, яка у процесі функціонування може змінювати свої статки. Усе можливі стану системи утворюють простір станів [17,21].

При використанні методу простору стану для описи процесу переходів системи з одного стану в інше застосовують моделі Маркова. Строго обґрунтувати застосування цього методу можна при наступні припущення: 1) якщо кожен з елементів системи має експонентне розподіл часу безвідмовний роботи; 2) ймовірність переходу з одного стану в інший не повинна залежати від передісторії системи, тобто. від станів, в яких система знаходилася раніше. Насправді ці припущення можуть виконуватися, але однаково при розрахунках застосовують зазначені припущення .

Припущення про експоненційному розподіл інтервалів часу, минулого до настання певного події, лежить в основі більшості технічних розрахунках. «Однак модель із постійною інтенсивністю переходів часто дає задовільні результати і в

тих випадках, коли ці розподіли в насправді не є експоненційними, якщо розглядається тривалий проміжок часу функціонування системи» [17,21].

Якщо тривалості станів описуються експоненційним законом розподілу, то процес називається найпростішим. Для нього характерні властивості ординарності, відсутності післядії і стаціонарності. Потoki подій, одночасно що володіють властивостями ординарності (Події не наступають одночасно) і відсутності післядії (події незалежні), називаються пуассонівськими, таке їх назва пов'язано із законом Пуассон. Теоретичні розрахунки частіше всього виробляються в припущенні того, що потоки найпростіші.

У теорії надійності широке застосування знаходять марківські процеси з дискретними станами та безперервним часом [17-26]. Для безперервного марківського процесу сума ймовірностей станів будь-якого проміжку часу дорівнює одиниці:

$$\sum_i p_i(t) = 1.$$

При вивченні випадкових процесів з дискретними станами і безперервним часом в теорії надійності вважають, що переходи системи з одного стану в інше відбуваються під впливом потоків відмов і відновлень, а переходи з стану S_i в стан S_j описують за допомогою їх інтенсивностей $\lambda_{ij}(t)$.

Інтенсивність переходу визначається як

$$\lambda_{ij}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p_{ij}(\Delta t)}{\Delta t}. \quad (2.11)$$

З формули (2.11) витікає, що при малому Δt вірогідність переходу бути визначена за виразом

$$p_{ij}(\Delta t) \approx \lambda_{ij}(t) \Delta t. \quad (2.12)$$

Якщо інтенсивність переходів $\lambda_{ij}(t)$ не залежать від часу, тобто $\lambda_{ij} = \text{const}$, то безперервний марківський процес називається однорідним, тобто. інтенсивності переходів постійні в однорідному марківському

процесі [27]. Якщо λ_{ij} є функціями часу, то безперервний марківський процес називається неоднорідним.

Процес зміни станів можна проілюструвати за допомогою графа станів системи (рис. 2.4). «Граф задається безліччю точок або вершин і безліччю ліній або ребер, що з'єднують між собою всі або частина точок. Якщо ребра орієнтовані, що зазвичай показується стрілкою, то вони називаються дугами, і граф з такими ребрами називається орієнтованим графом, якщо ребра не мають орієнтації, то граф називається неорієнтованим» [17-26]. Вершини графа позначаються номерами станів (у найпростішому випадку таких станів буде два: 0 – система працездатна, 1 - система в стані відмови), дуги графа показують напрямки переходів системи з одного стану в інше.

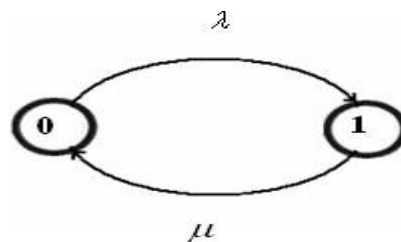


Рисунок 2.4 – Граф станів системи

Якщо процес є марківським, його можна описати за допомогою диференціальних рівнянь, в яких невідомими є ймовірності станів $p_0(t)$ і $p_1(t)$, то при розв'язанні використовуються наступні умови: потік відмов найпростіший з інтенсивність відмов $\lambda = const$ і відновлень $\mu = const$, закон розподілу часу відновлення та часу між відмовами експонентний. Для будь-якого моменту часу $p_0(t) + p_1(t) = 1$. Якщо поведінка системи розглядати в інтервалі часу $[0, t = \Delta t]$, то тоді система в момент якщо система в момент часу $t + \Delta t$ буде перебувати в стані 0 і за час знаходилася в Δt відмов не спостерігалось, а також, стані 1 і за час Δt відновлення закінчилося. Тоді використовуємо формулу

$$p_0(t + \Delta t) = p_0(t)e^{-\lambda\Delta t} + p_1(t)(1 - e^{-\mu\Delta t}),$$

так як $e^{-\lambda\Delta t} \approx 1 - \lambda\Delta t$, $e^{-\mu\Delta t} \approx 1 - \mu\Delta t$, то

$$p_0(t + \Delta t) = p_0(t)(1 - \lambda\Delta t) + p_1(t)(1 - e^{-\mu\Delta t}).$$

Проводячи аналогічні міркування для другого стану, виходить друге рівняння

$$p_1(t + \Delta t) = p_1(t)(1 - \mu\Delta t) + p_0(t)\lambda\Delta t.$$

При $\Delta t \rightarrow 0$ можна отримати систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = -\lambda p_0(t) + \mu p_1(t), \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = -\mu p_1(t) + \lambda p_0(t). \end{cases} \quad (2.13)$$

Рівняння виду (2.13) отримали назву диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена [[17-26].

До цих рівнянь додається рівняння для ймовірностей станів:

$$p_0(t) + p_1(t) = 1. \quad (2.14)$$

Крім того, повинні бути задані початкові умови. Тоді, вирішуючи будь-яке одне диференціальне рівняння з двох (2.13) спільно з рівнянням (2.14) при заданих початкових умовах, можна, можливо визначити ймовірності станів системи.

Якщо граф орієнтований, то систему диференціальних рівнянь для ймовірностей станів можна, можливо безпосередньо записати, користуючись наступним правилом. У лівій частині рівняння записується похідна від ймовірності розглянутого стану в часі, в правою частини - стільки доданків, скільки дуг (вхідних та вихідних) пов'язано з даними станом. кожне доданок одно твору інтенсивностей переходу, що є позначенням дуги, що розглядається, на

ймовірність того стану, з якого виходить ця дуга. Причому, якщо дуга для цього стану (для якого складається рівняння) є виходить, то відповідне їй доданок має знак мінус, якщо дуга є вхідна, то відповідне їй доданок має знак плюс.

При оцінці структурної надійності систем із великим терміном служби розглядають тільки асимптотичні (стаціонарні) значення ймовірностей ($t \rightarrow \infty$). Тоді від системи диференціальних рівнянь переходять до системі алгебраїчних рівнянь. Для цього необхідно всі похідні прирівняти до нуля ($\frac{dp_i(t)}{dt} = 0$) і зробити заміну $p_i(t)$ на p_i .

Так, наприклад, система рівнянь (2.13) набуває вигляд:

$$0 = -\lambda p_0 + \mu p_1,$$

$$0 = \lambda p_0 - \mu p_1.$$

Замінюючи одне з цих рівнянь виразом $p_0 + p_1 = 1$, отримуємо систему з двох незалежних рівнянь з двома невідомими

$$0 = -\lambda p_0 + \mu p_1 \quad (2.15)$$

$$p_0 + p_1 = 1.$$

У результаті розрахунків маємо:

$$p_0 = \frac{\mu}{\mu + \lambda} = \frac{T}{T + T_B} = K_{\Gamma},$$

$$p_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{T_B}{T + T_B} = K_{\Pi},$$

де K_{Γ} - коефіцієнт готовності, K_{Π} - коефіцієнт вимушеного простою.

Головною цариною застосування методу простору станів є обчислення характеристик надійності ремонтпридатних систем. Основними показниками,

визначеними даними методом, є ймовірності, середні параметри потоків відмов і середні тривалості окремих станів системи. Після знаходжень станів системи, приводять до її відмову, обчислюються аналогічні показники для станів відмови системи в цілому» [17].

В даний час у практиці не існує такого математичного методу, який можна було б використовувати для реальних розрахунків з обліком всіх багатогранних властивостей системи електропостачання. Перелічені вище аналітичні методи, як правило, спираються на велике число припущень і обмежень, звужують область їх використання.

До загальних недоліків перерахованих вище методів можна віднести те, що для рішення завдань надійності потрібно витратити велике кількість часу, що збільшує трудомісткість завдання, тому необхідно застосовувати методи, що дозволяють з меншими обчислювальними витратами вирішувати відповідні завдання.

Розвиток обчислювальної техніки поставило перед електроенергетиками завдання переглянути існуючі методи з крапки зору їх використання в математичному забезпеченні автоматизованих систем управління. Виявилось, що багато методи, попри на їх витонченість і ефективність при рішенні без ЕОМ приватних задач малої розмірності, мало придатні для практичних завдань розмірності тому, що вони, зокрема, важко формалізовані. Спершу розвитку теорії надійності для аналізу енергосистем набули широкого застосування ті методи, які були розроблені загальної теорією надійності та спрямовані, як правило, на виконання ручних розрахунків. Сюди слід віднести логіко-імовірнісні, таблично-логічні, метод «дерева відмов». Специфіка енергосистем зажадала розробки алгоритмів та програм, призначених для виконання розрахунків на ЕОМ без втручання або з мінімальним участю людини. Найбільш придатним для розрахунків на комп'ютері з числа методів, отримали широкий розвиток, є метод мінімальних шляхів і перерізів і метод простору станів, які доповнюють друг друга і дозволяють враховувати надійність комутаційної апаратури.

Практично во всіх даних методах присутній аналіз імовірнісних станів системи. Достатньо повно ці загальні властивості описуються методом простору станів.

Провівши аналіз різних методів розрахунку показників надійності, та розглянувши переваги і недоліки кожного методу, в даної роботі обираємо метод простору станів, як основний для кількісної оцінки надійності схем електропостачання, як найбільш зручний для практичного застосування за умовами повноти врахованих факторів і найбільш піддається формалізації при машинній реалізації. У зв'язку з цим, розрахуємо показники надійності методом простору станів.

2.3 Моделі відмов комутаційної апаратури

Для розрахунку показників надійності було обрано метод простору станів. Однак у практичній реалізації даного методу не приділяється належного уваги розгляду різних видів відмов комутаційної апаратури. Тому в даному параграфі розглянемо основні моделі відмов комутаційної апаратури, враховують не тільки відмови типу коротке замикання «КЗ» та «обрив ланцюга», а й інші види відмов, що використовуються при розрахунках показників надійності електроенергетичних систем.

Як видно з рис. 1.5 найбільше відмов припадає на вимикачі. «З позицій надійності вимикач - один з найбільш складні елементи. У його моделі відмови потрібно враховувати параметри надійності електричних апаратів (власне вимикача з приводом, роз'єднувачів), пристроїв релейний захисту і автоматики, умови ремонтно-експлуатаційного обслуговування та низку інших факторів. На сьогоднішній день продовжують перебувати в експлуатації вимикачі, конструкція яких застаріла і термін служби досягає більше 20 років (наприклад, масляні і повітряні). Основні причини ушкоджень Дані типи вимикачів представлені на

рисунках 1.19-1.22. На основі проведеного аналізу даних діаграм можна, можливо зробити висновок, що основними причинами відмов повітряних і олійних вимикачів є: відмови приводу і ланцюгів управління, ушкодження ізоляторів, руйнування газової камери через незгасання дуги, дефекти гумових ущільнення (для повітряних вимикачів). Основні причини відмов – це тривалий термін експлуатації і багаторазові операції вимикачами, що призвело до зношування деталей. Тому для точної оцінки надійності систем електропостачання необхідно враховувати надійність комутаційних апаратів

«Моделі надійності вимикачів за ступенем деталізації основних факторів, що впливають, різноманітні і їх історично ділять на два великі класу: спрощені та складні (уточнені). Основою в більшості всіх розрахунків надійності вимикачів є моделі марківських випадкових процесів з різним ступенем обліку процесу відновлення, ремонтних станів тощо. [17-24].

У найпростішій моделі враховуються всі аварійні відключення, пов'язані з експлуатацією вимикача, без диференціації причин їх виникнення. З спільного числа відмов виділяють відмови типу «КЗ», які вимагають для локалізації вимикача, що відмовив, наприклад через перекриття його дугогасної камери, відключення всіх суміжних вимикачів. Також виділяють відмови типу "обрив". Під ними розуміють ті відмови, які вимагають виведення вимикача у позаплановий ремонт, тобто. що приводять до розриву ланцюги, в якій знаходиться відмовив вимикач. Розглянуті відмови виявляються переважно при обходах і оглядах. Уточнення моделі відмови вимикача досягається угрупованням відмов, що відбуваються в статичному стан, при оперативних перемиканнях та при відключенні пошкоджених елементів, тобто. при локалізації короткого замикання. на рис. 2.5 показано статистика відмов власне самих вимикачів з приводами в різних станах.

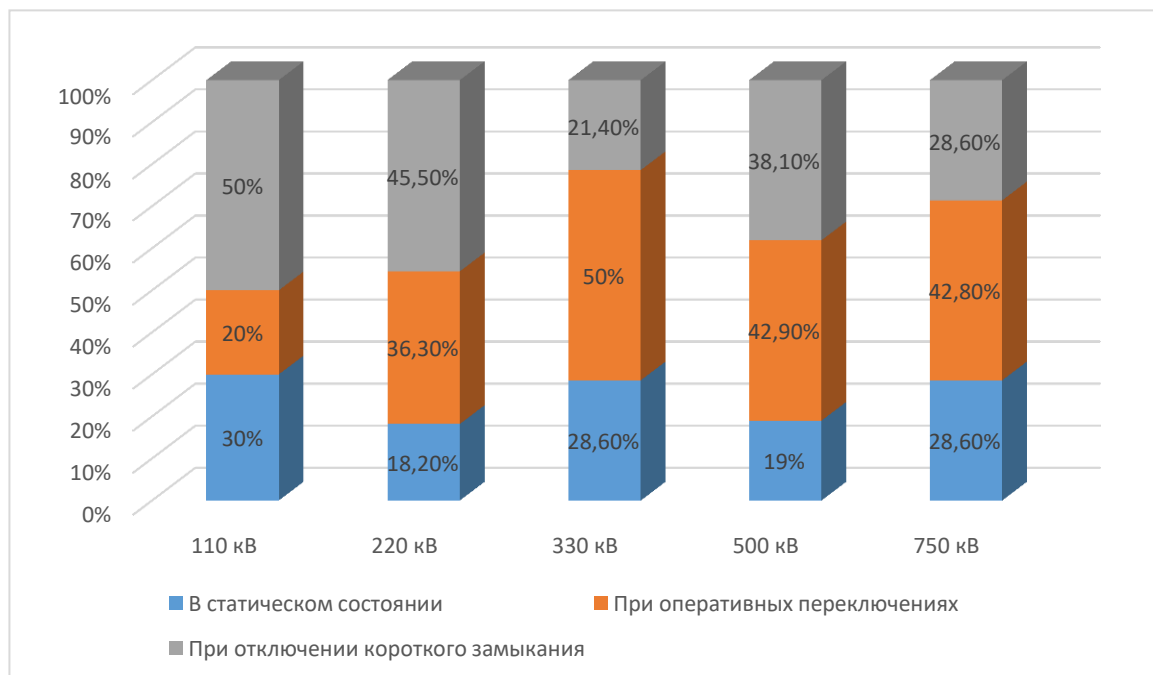


Рисунок 2.5 – Відмови вимикачів у статичному стані, при оперативних перемиканнях і при відключенні короткого замикання

У найбільш складних, повних моделях відмови вимикача моделювання процесу комутації електричних ланцюгів охоплює процеси при відмові як власне вимикачів, так і обладнання приєднань, введення-виведення їх з роботи по різних причин (у резерв, із резерву, для виконання аварійно-відновлювальних та планових ремонтів). Дуже значна група відмов вимикачів, пов'язаних з ненадійністю (відмовами функціонування) пристроїв РЗА внаслідок відмови, зайвого і хибного спрацювання. Це відбувається, коли при короткому замиканні на приєднанні з різних причин відбувався відмова спрацювання основних та резервних пристроїв РЗА, що впливають на вимикач даного приєднання. При цьому коротке замикання ліквідувалося дією УРОВ (пристрій резервування при відмові вимикача), наводячи до втрати не тільки даного, але і в ряді випадків суміжних приєднань. Таким чином, якщо на захищається ділянці відбувається коротке замикання та спрацювання його захисту, але при цьому вимикач з якихось причин це коротке замикання не усуває, то УРОВ видає команду на відключення суміжних вимикачів, через які йде підживлення точки КЗ. Робиться це з певною витримкою часу для відбудови від часу дії вимикача.

Зайвеспрацьовування обумовлено переважно порушенням селективності РЗА при зовнішніх КЗ, тобто. не в захищається зоні. Вимикач розглянутого приєднання відключався при наявності вимоги відключення вимикачів інших приєднань та відсутності таких на відключення вимикача цього приєднання. Хибне спрацьовування полягало в відключенні від пристроїв РЗА вимикача при відсутності на то відповідного вимоги як на даним, так і на інших приєднаннях. Вони мали місце, наприклад, при дефектах виготовлення та монтажу пристроїв РЗА, а також через помилкові дії персоналу при роботі з ними. Наявність РЗА робить роботу і відповідно відмови вимикачів залежать від відмов іншого устаткування. Крім того, автоматичне повторне включення (АПВ) призводить до того, що одне пошкодження обладнання, що захищається, виникає кілька вимог спрацьовування вимикачів, збільшуючи ймовірність відмов останніх. Таким чином, частка відмов вимикачів через порушень роботи пристроїв РЗА може перевищувати кількість відмов власне вимикачів з приводами (Рисунок 2.6).

У зв'язку з цим, помітно розбіжність даних по моделям відмови вимикача у різних роботах. Однак у деяких роботах обґрунтовано, що недоцільно ділити відмови, яким піддається електрообладнання в процесі експлуатації, більш ніж на три види, такі як відмова типу «коротке замикання», відмова типу «обрив ланцюги» і відмова спрацьовування» [17-24].

Існує ряд різних методик оцінки надійності комутаційних апаратів (КА) електроенергетичних систем.

У певних роботах оцінка надійності КА полягає в наступному: формуються основні і додаткові перерізу. «Для знаходження даних перерізів складають списки «В», "П", "А", "АВР". «Списки документів складаються для кожного вузла схеми, не відокремлені від вузла який-небудь комутаційної апаратурою (перелік "В"); елементів, відокремлених від вузла неавтоматичної комутаційної апаратурою (перелік "П"); елементів, відокремлених від вузла автоматичною комутаційної апаратурою (перелік "А"); якщо електропостачання вузла резервується за допомогою АВР, то формується перелік елементів, відмова яких викликає потребу роботи пристроїв АВР (список «АВР»). Ці списки і

знайдені основні перерізу служать вихідний інформацією для побудови додаткових перерізів». Викладений наближений метод формування умов станів відмови має низку недоліків: число додаткових перерізів, як правило, більше основних; при освіті додаткових перерізів необхідно постійно здійснювати контроль, не є чи отримане переріз основним; не включається чи який-небудь елемент в додаткове більше одного рази, Усе це збільшує трудомісткість розрахунків та знижує ефективність при знаходженні перерізів вищого порядку. Тому при практичних розрахунках зазвичай обмежуються визначенням перерізів із числом елементів трохи більше двох.

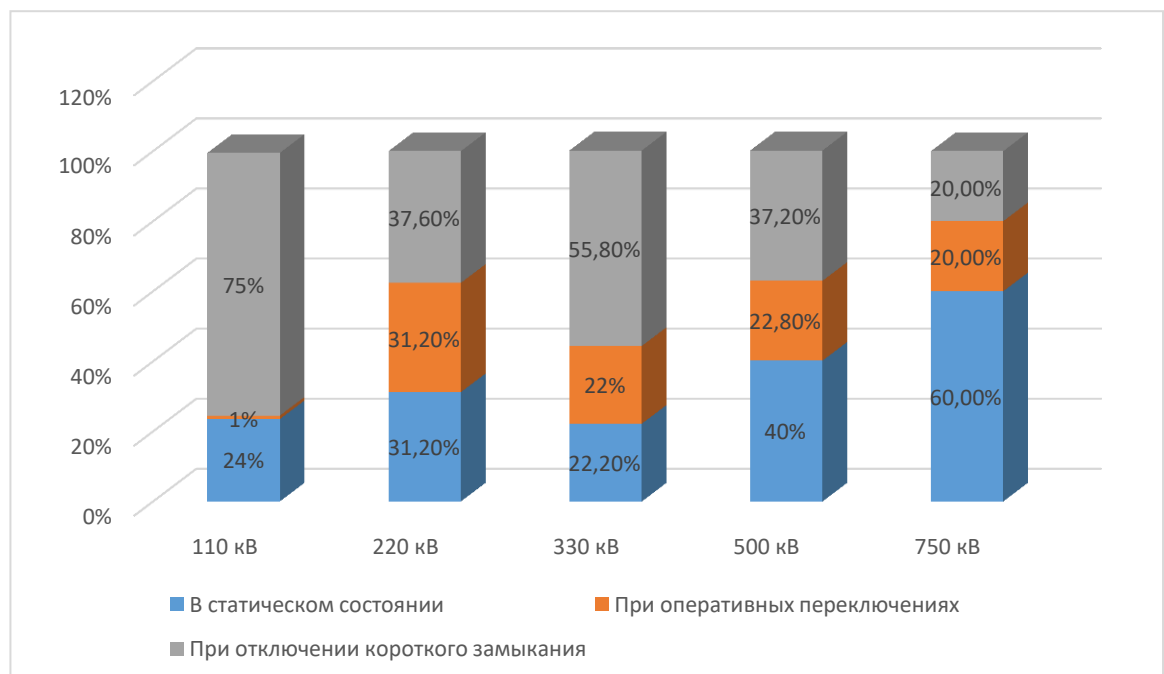


Рисунок 2.6 - Відмови вимикачів через порушень роботи РЗА в різних режимах

У роботах [27,28] алгоритм оцінки надійності КА полягає в визначення шляхів між джерелом живлення та вузлом навантаження за графом схеми. Шляхи можна простежити, просуваючись до попередніх елементів від споживача до джерела. Потім визначають код шляху елемента. Кодом шляхи називають вектор, який показує, які шляхи будуть перервані в результаті винятки даного елемента: цифра 1 в і-м розряді коду означає, що буде перервано і-й шлях, цифра 0 – що

шлях не постраждає. Потім всі стани перевіряються щодо визначення того, чи не є вони станами відмови з мінімальними перерізами. Нестача алгоритму полягає в тому, що для перевірки графа на зв'язковість при переборі всіх поєднань елементів схеми щодо того є отриманий стан станом відмови системи і є стан МС-станом або ні, потрібна велика кількість часу рахунку, особливо для великих електричних систем.

У інших роботах [15,31] розроблено класифікація перерізів з обліком відмов комутаційної апаратури на основі перерахування станів відмови.

Таким чином, аналіз відомих методів по обліку впливу комутаційних апаратів на надійність схем електропостачання виявив, що в роботах [67] метод оцінки надійності КА найбільш піддається формалізації при машинній реалізації, однак формування перерізів відбувається недостатньо точно, що породжує певні труднощі при роботі з ними; в роботах Дж. Ендрені метод оцінки КА точний, але при практичній реалізації даний метод погано піддається формалізації та громіздкий, що призводить до збільшення трудомісткості завдання та ускладнює розрахунок надійності схем електропостачання промислових підприємств навіть з допомогою обчислювальних програм. У роботах [15, 31] запропоновано інженерна методика оцінки показників надійності, враховує різні види відмов комутаційної апаратури, що дозволяє з меншими обчислювальними витратами вирішувати завдання оцінки структурної надійності.

2.4 Висновки по розділу 2

1. Розглянуто основні поняття, що застосовуються у теорії надійності. Показано, що під час аналізу структурної надійності електричних систем. можна, можливо прийняти ряд припущень, спрощують розрахунок показників надійності.

2. Проведено порівняльний аналіз методів оцінки показників

структурної надійності Розглянуто основні переваги та недоліки даних методів. на основі проведеного аналізу обраний метод простору змагань як основний.

3. Розглянуто основні моделі відмов комутаційної апаратури, зокрема вимикачів тому, що на них припадає більша частина відмов. Показано необхідність обліку впливу відмов комутаційної апаратури для проведення точної оцінки надійності систем електропостачання. Таким чином, для подальшого розрахунку обрано інженерна методика оцінки показників надійності, що враховує різні види відмов комутаційної апаратури, базується на методі простору стану.

РОЗДІЛ 3

ПРОВЕДЕННЯ РОЗРАХУНКІВ НА ОСНОВІ ОБРАНОГО МЕТОДУ ОЦІНКИ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ДЛЯ ІСНУЮЧИХ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

3.1 Програмні комплекси, застосовувані для розрахунку показників надійності електроенергетичних систем

Визначення показників надійності для сучасних електроенергетичних систем неможливо без використання відповідних програмних комплексів.

У Росії та за кордоном на сьогоднішній день отримали найбільше поширення наступні програмні комплекси, що дозволяють моделювати і розраховувати імовірнісні показники надійності електроенергетичних систем (Рис. 3.1):

1. Програмні комплекси "RISK SPECTRUM" (Швеція); «SAPHIRE» (США), що використовують в якості вихідних даних «дерева подій» і «дерева подій».
2. Програмний комплекс "WINDCHILL RBD" (США), що використовує спеціальну блок-схему працездатності системи.
3. Вітчизняний програмний комплекс "АРБІТР", використовує логіко-імовірнісний метод.
4. Програмні комплекси моделювання енергосистем: «MATLAB»,

програмне середовище, що дозволяє моделювати енергетичні об'єкти та розробляти системи керування; «ETAP SYSTEMS» (США), програмне забезпечення для електроенергетичних систем, що дозволяє проводити проектування, аналіз, обслуговування електроенергетичних систем;

«PSCAD» (Канада), програмний комплекс, що дозволяє моделювати роботу енергосистем.

Основний недолік програмних комплексом зарубіжного виробництва – це висока вартість та складність підготовки кадрів для вивчення спеціалізованих програмних комплексів

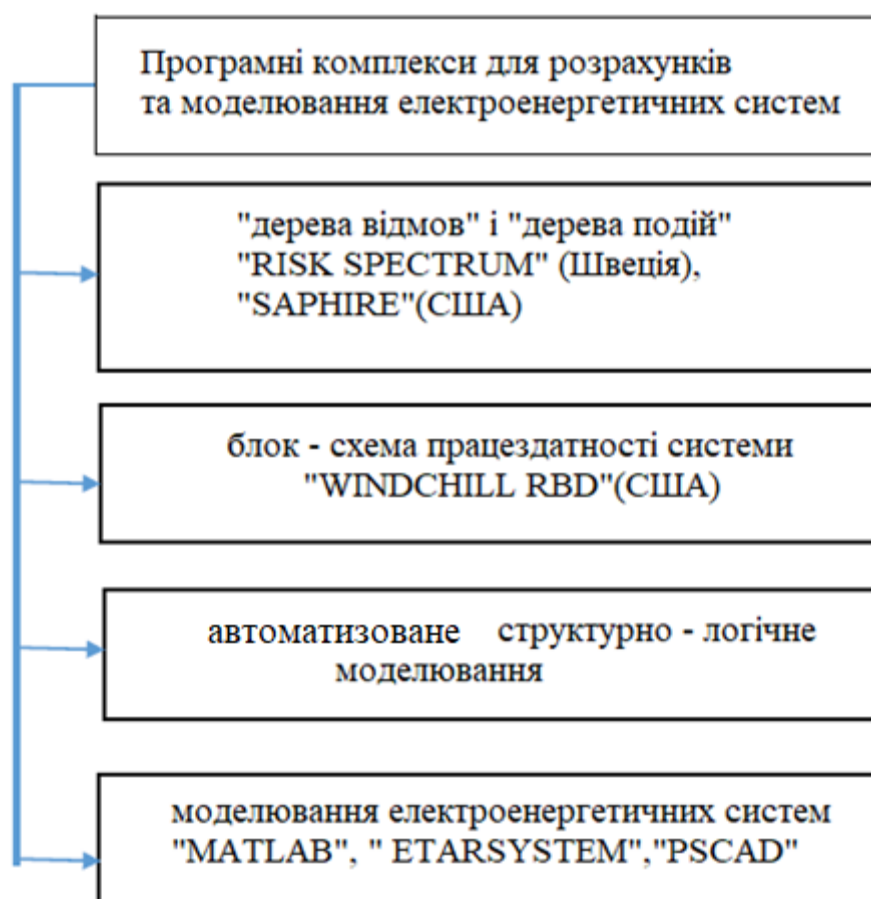


Рисунок 3.1 – Основні програмні комплекси для розрахунку та моделювання електроенергетичних систем

Використання складних в освоєнні і дорогих спеціалізованих програмних комплексів виправдано тільки в тих галузях випадках, де відмова обладнання

може спричинити катастрофічні наслідки, наприклад, в атомній енергетиці. Для проектів, у яких відмова обладнання не тягне настільки серйозних наслідків, можливо використання авторських програмних продуктів, наприклад, вартість яких не порівнянна зі спеціалізованими, а обмежена набір функціональних можливостей компенсується простотою освоєння.

3.2 Опис інженерної методики оцінки показників структурної надійності, враховує відмови комутаційної апаратури

Як уже згадувалося в другому розділі, для подальшого розрахунку обрано інженерна методика оцінки показників надійності, що враховує різні види відмов комутаційної апаратури, базується на методі простору стану. Розглянемо основні моменти.

Для описи переходів з одного стану елемента в інше використовуються марківські моделі. Таким чином, кожен елемент I (силовий трансформатор, вимикач, роз'єднувач тощо) електричної системи може бути в одному з наступних станів: I_N – стан нормальною роботи елемента I електричної системи L , I_S – стан між відмовою елемента I та завершенням оперативних перемикачів (відмова типу "коротке замикання"), I_R – стан аварійного ремонту елемента I (відмова типу "обрив ланцюга"), I_3 – стан капітального ремонту (умисного відключення) елемента I , I_V – стан поточного ремонту (умисного відключення) елемента I . Кількість станів системи може виявитися дуже великою, що наводить до громіздким розрахунками, використовують різні прийоми і наближення, що зменшують трудомісткий обсяг обчислень. Один з прийомів, що дозволяє скоротити обсяг обчислювальної роботи та знизити трудомісткість методу простору станів, полягає в виділення деяких сукупностей елементів системи, так званих перерізів [20, 66, 75, 81]. Таким чином, у рамках прийнятої моделі розглянуто метод перерахування станів відмови на основі якого формуються різні класи перерізів $[J_i]$, $i = 1, 2, \dots, 20$. Кожному класу перерізів відповідає

свій стан відмови MC , де MC - це стан відмови з мінімальними перерізами. Причому стану відмови для кожного перерізу унікальні, ні перерізів з однаковими станами відмови.

Для кожного класу перерізів застосовують формули для розрахунку результуючих показників надійності системи, виробляють розрахунок ймовірності стану відмови системи P і середнього параметра потоку відмов системи f . Дані формули виходять на основі марківських моделей.

Для зменшення обчислювальних витрат будемо використовувати для розрахунку програмний комплекс [59, 60], що дозволяє автоматизувати процес розрахунку надійності та виконувати оцінку показників надійності схем електропостачання з мінімальними витратами часу. Комплекс складається з двох програм: "Формування класів перерізів для обчислення результуючих показників надійності" та "Розрахунок результуючих показників надійності систем електропостачання".

Програма «Формування класів перерізів для обчислення результуючих показників надійності» по розрізам на основі зони впливу і ймовірності відмови спрацьовування захисно-комутаційної апаратури формує класи перерізів $[J_i]$, $i=1, 2, \dots, 20$. на основі текстового файлу "Elemtip.dat", в якому зберігаються дані про відповідність елемент типу показників надійності, "Tipreli.dat", в якому зберігаються вихідні дані про показники надійності елементів, програма «Розрахунок результуючих показників надійності систем електропостачання» "Reliabil." виконує розрахунок ймовірності стану відмови системи P і середнього параметра потоку відмов системи f .

Програми дозволяють візуально-наочно уявити вихідні дані і результати роботи програми.

3.3 Аналіз надійності типових схем електропостачання

Проведемо порівняння типових схем електропостачання, що застосовуються на промислових підприємствах (рис. 3.3) та розрахуємо кількісну оцінку показників надійності з допомогою інженерної методики, описаною вище.

Раніше широко застосовувалися схеми з віддільниками і короткозамикачі. За останні кілька років рекомендовані до Застосування схеми підстанцій суттєво змінилися, так як на знову проєктованих або реконструйованих підстанціях виключено можливість застосування схем з віддільниками і короткозамикачами, експлуатація яких показала їх низьку надійність. Типові електричні схеми розподільчих пристроїв вибираються в відповідно нормативними документами [32]. Схема лінія-трансформатор із вимикачем (Рисунок 3.2, а) застосовується для тупикових або відгалужувальних одно-трансформаторних підстанцій при необхідності автоматичного відключення пошкодженого трансформатора від повітряної лінії, що живить кілька підстанцій. Схема з двома вимикачами та неавтоматичною перемичкою з боку ліній (рисунок 3.2, б) застосовується для тупикових або відгалужувальних дво-трансформаторних підстанцій, що живляться по двох повітряним лініям. Схема місток з вимикачами в ланцюгах ліній і ремонтною перемичкою з боку ліній (рисунок 3.2, в) застосовується для прохідних дво-трансформаторних підстанцій із двостороннім живленням за необхідності збереження у роботі двох трансформаторів при короткомузамиканні або пошкодження на повітряної лінії в нормальному режимі роботи підстанції. Розрахуємо показники надійності на прикладі схеми рисунок 3.2, б. Схема електропостачання та розрахунковий граф наводяться на рисунку 3.4.

При розрахунку кількісних показників структурної надійності важливу роль відіграють стани відмови – стани, в яких система втрачає працездатність. Критерієм відмови системи Рис. 3.3 служить порушення зв'язку між двома виділеними вершинами (джерелом $s=14$ і стоком $t = 17$). Різним станам відмови

елементів, як вже говорилося раніше, відповідають різні класи перерізів. Для цієї схеми (рисунок 3.3) формуються наступні класи перерізів, наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Класи перерізів


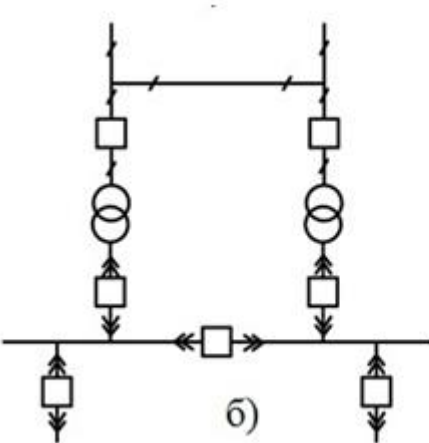
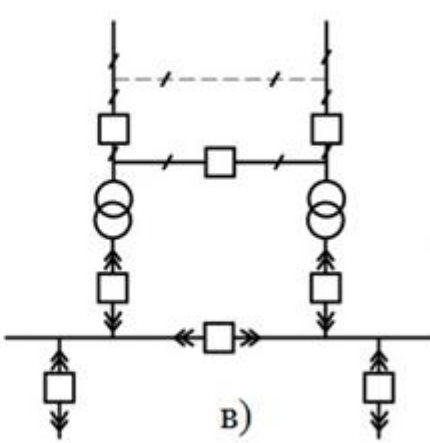

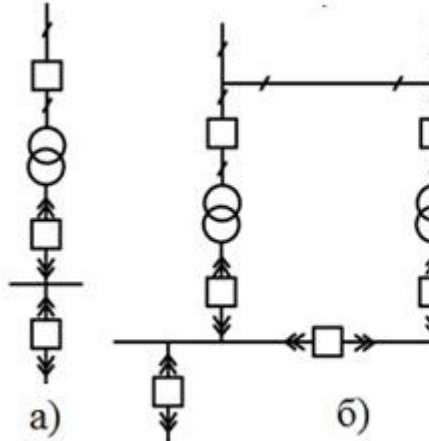
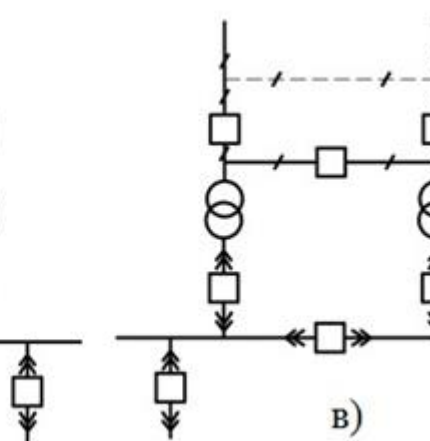
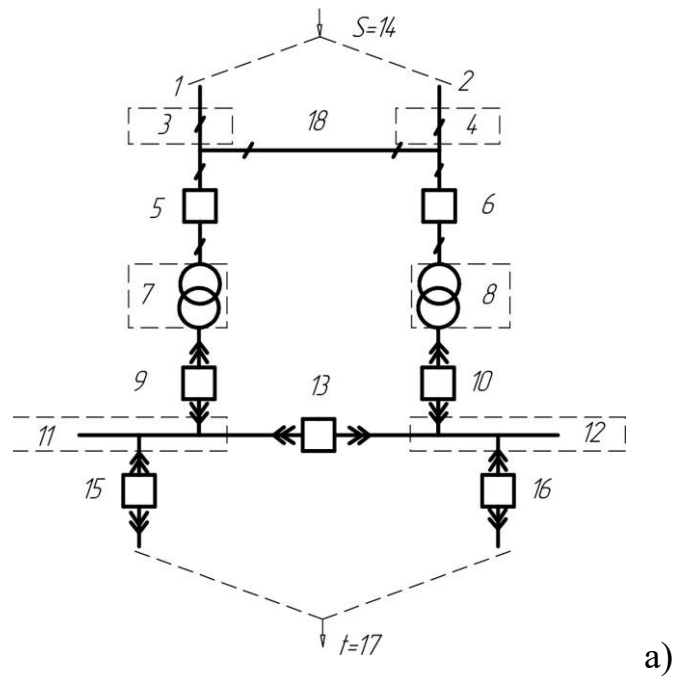
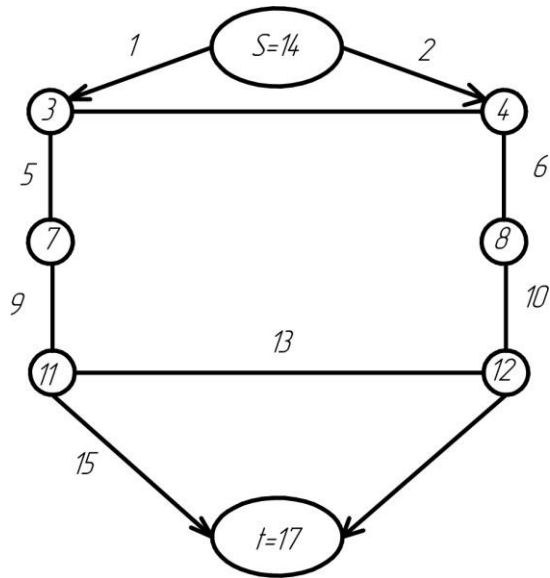
Клас	Елементи мережі (перерізи)		
			<hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/>
			

Рисунок 3.2 – Типові схеми підстанцій



a)



б)

Рисунок 3.3 – Схема електропостачання і розрахунковий граф

Для перерізів, представлених в таблиці 3.1, стани відмови задаються:

$$MC(J_2) = \{I_S\},$$

$$MC(J_3) = \{I_R K_R, I_V K_R, I_C K_R, I_R K_V, I_R K_C\},$$

$$MC(J_4) = \{I_S K_R, I_S K_V, I_S K_C\},$$

$$MC(J_5) = \{I_S K_S\},$$

$$MC(J_6) = \{I_S K_R, I_S K_V, I_S K_C, I_R K_S, I_V K_S, I_C K_S\}.$$

Наприклад, переріз 15-8 відповідає станам відмови 15_{S_8R} , 15_{S_8V} , 15_{S_8C} (клас $[J_4] \Theta$), де стан R - відмова типу «обрив ланцюги», C і V - стан навмисного відключення і відмови типу «коротке замикання» (стан S).

Для класів перерізів (Таблиця 3.1) розраховують ймовірність стану відмови системи P та середній параметр потоку відмов системи f . Значення про надійність елементів можна взяти з [27, 39] або на основі статистичних даних.

Вклад перерізів виділених класів в ймовірність стану відмови системи розраховуються за наступним формулами:

$$P_2(J_2) = P(I_S) = \lambda_{NS}(I)T_{SR}(I);$$

$$\begin{aligned} P_3(J_3) &= \{P(I_RK_C) + P(I_RK_V)\} + P(I_RK_R) + \{P(I_CK_R) + P(I_VK_R)\} = \\ &= \{\lambda_{NS}(I)T_{RN}(I)\lambda_{NC}(K)T_{CN}^2(K) / (T_{CN}(K) + T_{RN}(I)) + \lambda_{NS}(I)T_{RN}(I)\lambda_{NV}(K)T_{VN}^2(K) / \\ &/ (T_{VN}(K) + T_{RN}(I))\} + \lambda_{NS}(I)T_{RN}(I)\lambda_{NS}(K)T_{RN}(K) + \{\lambda_{NC}(I)\lambda_{NS}(K)T_{RN}(K)T_{CN}^2(I) / \\ &/ (T_{CN}(I) + T_{RN}(K)) + \lambda_{NV}(I)\lambda_{NS}(K)T_{RN}(K)T_{VN}^2(I) / (T_{VN}(I) + T_{RN}(K))\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_4(J_4) &= \{P(I_SK_C) + P(I_SK_V)\} + P(I_SK_R) = \\ &= \{\lambda_{NS}(I)T_{SR}(I)\lambda_{NC}(K)T_{CN}^2(K) / (T_{CN}(K) + T_{SR}(I)) + \lambda_{NS}(I)T_{SR}(I)\lambda_{NV}(K)T_{VN}^2(K) / \\ &/ (T_{VN}(K) + T_{SR}(I))\} + \lambda_{NS}(I)T_{SR}(I)\lambda_{NS}(K)T_{RN}(K); \end{aligned}$$

$$P_5(J_5) = P(I_SK_S) = \lambda_{NS}(I)T_{SR}(I)\lambda_{NS}(K)T_{SR}(K);$$

$$\begin{aligned} P_6(J_6) &= \{P(I_SK_C) + P(I_SK_V)\} + P(I_SK_R) + P(I_RK_S) + \{P(I_CK_S) + P(I_VK_S)\} = \\ &= \{\lambda_{NS}(I)T_{SR}(I)\lambda_{NC}(K)T_{CN}^2(K) / (T_{CN}(K) + T_{SR}(I)) + \lambda_{NS}(I)T_{SR}(I)\lambda_{NV}(K)T_{VN}^2(K) / \\ &/ (T_{VN}(K) + T_{SR}(I))\} + \lambda_{NS}(I)T_{SR}(I)\lambda_{NS}(K)T_{RN}(K) + \lambda_{NS}(I)T_{RN}(I)\lambda_{NS}(K)T_{SR}(K) + \\ &+ \{\lambda_{NC}(I)\lambda_{NS}(K)T_{SR}(K)T_{CN}^2(I) / (T_{CN}(I) + T_{SR}(K)) + \lambda_{NV}(I)\lambda_{NS}(K)T_{SR}(K)T_{VN}^2(I) / \\ &/ (T_{VN}(I) + T_{SR}(K))\}. \end{aligned}$$

Вклад перерізів виділених класів в середній параметр потоку відмов системи:

$$f_2(J_2) = f(I_S) = \lambda_{NS}(I);$$

$$f_3(J_3) = \{f(I_R K_C) + f(I_R K_V)\} + f(I_R K_R) + \{f(I_C K_R) + f(I_V K_R)\} = \\ = \{\lambda_{NS}(I)\lambda_{NC}(K)T_{CN}(K) + \lambda_{NS}(I)\lambda_{NV}(K)T_{VN}(K)\} + \lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)(T_{RN}(I) + T_{RN}(K)) + \\ + \{\lambda_{NC}(I)\lambda_{NS}(K)T_{CN}(I) + \lambda_{NV}(I)\lambda_{NS}(K)T_{VN}(I)\};$$

$$f_4(J_4) = \{f(I_S K_C) + f(I_S K_V)\} + f(I_S K_R) = \\ \{\lambda_{NS}(I)\lambda_{NC}(K)T_{CN}(K) + \lambda_{NS}(I)\lambda_{NV}(K)T_{VN}(K)\} + \lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)(T_{SR}(I) + T_{RN}(K));$$

$$f_5(J_5) = f(I_S K_S) = \lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)(T_{SR}(I) + T_{SR}(K));$$

$$f_6(J_6) = \{f(I_S K_C) + f(I_S K_V)\} + f(I_S K_R) + f(I_R K_S) + \{f(I_C K_S) + f(I_V K_S)\} = \\ = \{\lambda_{NS}(I)\lambda_{NC}(K)T_{CN}(K) + \lambda_{NS}(I)\lambda_{NV}(K)T_{VN}(K)\} + \lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)(T_{SR}(I) + T_{RN}(K)) + \\ + \lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)(T_{RV}(I) + T_{SR}(K)) + \{\lambda_{NC}(I)\lambda_{NS}(K)T_{CN}(I) + \lambda_{NV}(I)\lambda_{NS}(K)T_{VN}(I)\},$$

де для елемента I відповідно $\lambda_{NS}(I)$ – інтенсивність відмов, $\lambda_{NC}(I)$ – інтенсивність капітального ремонту, $\lambda_{NV}(I)$ – інтенсивність поточного ремонту,

$$T_{SR}(I) = 1 / \mu_{SR}(I), T_{RN}(I) = 1 / \mu_{RN}(I), T_{VN}(I) = 1 / \mu_{VN}(I), T_{CN}(I) = 1 / \mu_{CN}(I),$$

середній час перемикань, аварійного, капітального і поточного ремонтів елемента I відповідно.

Інші типові схеми (рис. 3.3, а, в) розраховуються аналогічно. Розрахункові значення показників надійності схем (Рисунок 3.4) наведено в таблиці 3.2, 3.3, 3.4,

де f_{ia} – параметр потоку аварійних відмов,

f_{imes} і f_{icap} – параметр потоку поточних і капітальних ремонтів,

$f_{i\Sigma} = f_{ia} + f_{imes} + f_{icap}$ – середній параметр потоку відмов,

$$T_{ia} = \frac{P_{ia}}{f_{ia}} \text{ – час аварійного відновлення,}$$

$$T_{imes} = \frac{P_{imes}}{f_{imes}} \text{ и } T_{icap} = \frac{P_{icap}}{f_{icap}} \text{ – час поточного і капітального ремонтів,}$$

$$T_{i\Sigma} = \frac{P_{i\Sigma}}{f_{i\Sigma}} \text{ – середній час відновлення системи,}$$

P_{ia} – ймовірність стану аварійного відмови,

P_{imes} і P_{icap} – ймовірність стану поточного та капітального ремонтів,

$P_{i\Sigma} = P_{ia} + P_{imes} + P_{icap}$ – ймовірність стану відмови системи.

Таблиця 3.2 – Значення параметра потоку відмов

Схема	$f_{ia}, \text{рік}^{-1}$	$f_{imes}, \text{рік}^{-1}$	$f_{icap}, \text{рік}^{-1}$	$f_{i\Sigma}, \text{рік}^{-1}$
а	0,75	1,03	1,02	1,075
б	0,011	0,001	0,0009	0,0129
в	0,0113	0,0012	0,0011	0,0136

Таблиця 3.3 – Значення середнього часу відновлення

Схема	$T_{ia},$ ГОД	$T_{imes},$ ГОД	$T_{icap},$ ГОД	$T_{i\Sigma}$ ГОД
а	7,17	8,95	5,92	6,42
б	1,73	3,85	3,4	2,014
в	1,63	2,48	1,83	1,72

Таблиця 3.4 – Значення ймовірності стану відмови

Схема	P_{ia}	P_{imes}	P_{icap}	P_{icap}
а	$6,145 \cdot 10^{-4}$	$1,053 \cdot 10^{-4}$	$0,69 \cdot 10^{-4}$	$7,88 \cdot 10^{-4}$
б	$2,176 \cdot 10^{-6}$	$0,44 \cdot 10^{-6}$	$0,35 \cdot 10^{-6}$	$2,966 \cdot 10^{-6}$
в	$2,112 \cdot 10^{-6}$	$0,34 \cdot 10^{-6}$	$0,23 \cdot 10^{-6}$	$2,682 \cdot 10^{-6}$

З аналізу таблиць 3.2, 3.3, 3.4 можна зробити наступні висновки: найгіршою щодо параметра потоку відмов та ймовірності стану відмови, параметра потоку та

ймовірності стану поточного та капітального ремонтів є одно-трансформаторна підстанція (Рис. 3.3, а), тому ці підстанції можуть споруджуватися для живлення невідповідних споживачів. З погляду безперебійності електропостачання кращою є схема (Рис. 3.3, б). Як видно з розрахунків, на надійність електропостачання впливають планово-попереджувальні ремонти тому, що з однієї сторони поточні і капітальні ремонти спрямовані на підвищення надійності систем електропостачання, а з іншої, - профілактичні ремонти роблять схему нерезервована, внаслідок цього параметр потоку та ймовірність стану поточного та капітального ремонтів вносять суттєвий внесок в чисельні показники надійності схем електропостачання. На основі поданих розрахунків можна розробити заходи по забезпечення надійності і подальшої безперебійної роботи схеми електропостачання

Таким чином, з допомогою представленою методики можна, можливо розрахувати кількісні показники структурної надійності систем електропостачання, оцінити можливість подальшої експлуатації обладнання і провести порівняльний аналіз різних варіантів схем.

3.4. Висновки по розділу 3

1. Проведено аналіз основних програмних комплексів, що застосовуються для розрахунку показників надійності електроенергетичних систем у Росії і за кордоном. Аналіз показав, що Основний недолік програмних комплексом закордонного виробництва – це висока вартість та складність підготовки кадрів для вивчення спеціалізованих програмних комплексів, тому для деяких технічних проектів, у яких відмова обладнання не тягне настільки серйозних наслідків, можливо використання авторських програмних продуктів.

2. Розглянуто основні моменти, обраною для подальших розрахунків, інженерної методики оцінки показників надійності, враховує різні види відмов комутаційної апаратури.

3. Проведено практична реалізація методики для розрахунку показників надійності типових схем електропостачання, заданих у вигляді графової моделі.

Наведена методика розрахунку показників надійності з урахуванням відмов комутаційної апаратури дозволяє підвищити точність оцінки рівня надійності і з меншими обчислювальними витратами вибрати найбільш ефективний варіант схеми на стадії проектування та експлуатації.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуто сучасний стан питання розвитку теорії надійності щодо застосування її до теми дослідження. Показано, що питання визначення надійності електромережевого комплексу є важливими на сучасному етапі розвитку електроенергетики.
2. Проведено аналіз стану об'єктів магістральних і розподільчих електричних мереж. Виявлено, що загальна частка технологічних порушень в електромережному комплексі по причинах, що пов'язані зі старінням (зносом) обладнання склала 24%, що свідчить о необхідності збільшення обсягів технічного переозброєння та реконструкції об'єктів електромережевого господарства.
3. Проведено аналіз структури відмов силових трансформаторів, вимірювальних трансформаторів напруги і струму, вимикачів, роз'єднувачів. На основі аналізу було виявлено, що найбільший відсоток відмов приходить на вимикачі.
4. Показано необхідність оцінки надійності різних типів обладнання і схеми електропостачання в цілому з метою розробки заходів по забезпечення надійності і безперебійній роботі. Для цього необхідно вибрати метод кількісної оцінки показників надійності з обліком надійності комутаційної апаратури, що дозволяє підвищити точність оцінки рівня надійності схем електропостачання, оцінити можливість подальшої експлуатації обладнання і провести аналіз різних варіантів забезпечення надійності.
5. Проведено порівняльний аналіз методів оцінки показників структурної надійності. Розглянуто основні переваги та недоліки даних методів. на основі проведеного аналізу обраний метод простору змагань як основний.
6. Розглянуто основні моделі відмов комутаційної апаратури, зокрема вимикачів, тому що на них припадає більша частина відмов. Показано необхідність обліку впливу відмов комутаційної апаратури для проведення точної

оцінки надійності систем електропостачання. Для подальшого розрахунку обрано інженерну методику оцінки показників надійності, враховує різні види відмов комутаційної апаратури, базується на методі простору стану.

7. Проведено аналіз основних програмних комплексів, що застосовуються для розрахунку показників надійності електроенергетичних систем у Росії і за кордоном. Аналіз показав, що Основний недолік програмних комплексом закордонного виробництва – це висока вартість та складність підготовки кадрів для вивчення спеціалізованих програмних комплексів, тому для деяких технічних проектів, у яких відмова обладнання не тягне настільки серйозних наслідків, можливо використання авторських програмних продуктів.

8. Проведено практична реалізація методики для розрахунку показників надійності типових схем електропостачання, заданих у вигляді графової моделі. Наведена методика розрахунку показників надійності з урахуванням відмов комутаційної апаратури дозволяє підвищити точність оцінки рівня надійності і з меншими обчислювальними витратами вибрати найбільш ефективний варіант схеми на стадії проектування та експлуатації.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛОВ

1. Журахівський С.В. Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж: підручник/ С.В. Журахівський , А.В. Журахівський, С.В. Казанський, Ю.П. Матеєнко, О.Р. Пастух. – Київ.: КПІм. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. –456с.
2. Казанський С. В. Надійність електроенергетичних систем [електронний ресурс] : навчальний посібник / С. В. Казанський, Ю. П. Матеєнко, Б. М. Сердюк ; НТУУ «КПІ». – Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – 216 с.
3. Кириленко О. В. Аналіз надійності функціонування електроенергетичних об'єктів / О. В. Кириленко, Б. М. Кінаш, В. І. Гудим. НАН України, Ін-т електродинаміки, Львів. держ. ун-т безпеки життєдіяльн. – К. : [б. в.], 2008. – 224 с.
4. Хоменко І. В. Електроенергетика України. Структура, керування, інновації: монографія / І. В. Хоменко, О. А. Плахтій, В. П. Нерубацький, І. В. Стасюк. – Харків: НТУ «ХПІ», ТОВ «Планета-Прінт», 2020. – 132 с.
5. Рожков П. П. Конспект лекцій з дисципліни «Надійність електричних мереж» для магістрів денної та заочної форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (освітні програми «Електротехнічні системи електроспоживання» / П. П. Рожков, С. Е. Рожкова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 85 с.
6. Лут М.Т., Мірошник О.В., Трунова І.М. Основи технічної експлуатації енергетичного обладнання АПК.: Підручник для студентів ВНЗ. – Харків: Факт, 2008.– 438 с.
7. Васілевський О. М. Нормування показників надійності технічних засобів : навчальний посібник / О. М. Васілевський, О. Г. Ігнатенко. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 160 с.

8.Казанський С.В. Експлуатація електричних систем: Обслуговування електричних мереж під робочою напругою: навч. посіб. /С.В.Казанський.– Київ.:НТУУ «КП»,2016. –237с.

9. Півняк Г.Г. Енергетична ефективність систем електропостачання : монографія /Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка ; М-во освіти і науки України,Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – 2-ге вид., переробл. і допов.– Дніпро: НТУ «ДП» , 2018. – 148 с.

10.Казанський С.В. Експлуатація електричних систем:Обслуговування електричних мереж під робочою напругою: навч. посіб. / С.В.Казанський.– Київ.:НТУУ «КП»,2016. – 237с.

11. Конспект лекцій з дисципліни «Надійність і діагностика електрообладнання» для студентів за напрямом 6.050702 “ Електромеханіка”/ укл.Клюєв О.В. – Дніпродзержинськ: ДДТУ,2013, – 143 с.

12. Оптимізація режимів енергосистем та електростанцій. Текст лекцій з курсу "АСК та оптимізація режимів енергосистем" для студентів електроенергетичного факультету спеціальності "Електричні системи та мережі" / А.В. Журахівський. Львів: ДУ "ЛП". – 112 с

13. Зорин В.В., Тисленко В.В., Клеппель Ф., Адлер Г. Надежность систем электроснабжения. – Киев: Вища школа, 1984. –192 с.

14. Бурбело, М. Й. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків : навчальний посібник / М. Й. Бурбело, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 204 с.

15. Бурбело, М. Й. Математичні задачі електроенергетики. Математичне моделювання електропостачальних систем : навчальний посібник / М. Й. Бурбело – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 185 с.

16. СОУ НЕК 20.261:2018 Технічна політика ДП "НЕК "УКРЕНЕРГО" у сфері розвитку та експлуатації магістральних та міждержавних електричних мереж. – Київ 2018р. –119 с.

17. Саух С. Є. Математичне моделювання електроенергетичних систем в ринкових умовах: монографія / С. Є. Саух, А. В. Борисенко. – К.: «Три К», 2020. – 340 с.
18. Мокін Б. І. Методологія та організація наукових досліджень : навчальний посібник / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін. – 2-е вид., змін. та доп. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 317 с.
19. Тулайдан В. Основи наукових досліджень : навчальний посібник / В. Тулайдан. – Ужгород, 2018. – 105 с.
20. Коломієць С. В. Теорія випадкових процесів: навчальний посібник / С. В. Коломієць ; Державний вищий навчальний заклад “Українська академія банківської справи Національного банку України”. – Суми : ДВНЗ “УАБС НБУ”, 2013. – ч. II. – 103 с.
21. Мінченко, А. А. Теорія надійності в задачах електроенергетичних систем : навч. посібник / А. А. Мінченко, І. М. Богатирьов, О. П. Лазуренко ; НТУ “ХПІ”. – Харків : Підручник НТУ “ХПІ”, 2014. – 152 с.
22. ДСТУ 2862-94. Методи розрахунку показників надійності техніки. Загальні вимоги : Видання офіційне. – Київ : Держстандарт України, 1995. – 38 с.
23. ДСТУ 2864-94. Надійність техніки. Експериментальне оцінювання та контроль надійності : Видання офіційне. – Київ : Держстандарт України, 1995. – 31 с.
24. ГНД 34.09.453-2003 Розрахунок показників надійності для електростанцій, теплових мереж та енергокомпаній. Методика. Наказ Мінпаливенерго України від 23.12.2003 р. № 782. – Київ : ОЕП «ГРІФРЕ», 2004. – 42 с.
25. Математичне моделювання та оптимізація систем електроспоживання у сільському господарстві: навч. посібник / Г.Б. Іноземцев, В.В. Козирський; За ред. Г.Б. Іноземцева. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2010 – 140 с.
26. Журахівський А.В. Оптимізація режимів енергосистем та електростанцій. Текст лекцій з курсу "АСК та оптимізація режимів енергосистем" для студентів електроенергетичного факультету спеціальності "Електричні

системи та мережі" – Львів: ДУ "ЛП". – 112 с.

27. Навчальний посібник з курсу “Процеси Маркова в актуарній математиці” / Укл.: М.В. Карташов – К., Вид.-полігр. центр ‘Київський університет’, 2008 –56 с.

28. Billinton Roy, Huang Dange. Basic Considerations in Generating Capacity Adequacy Evaluation/Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 1-4 May 2005. – P. 611-614.

29. Cepeda J.C., Rueda J.L., Erlich I., Colome D.G. Recognition of post-contingency dynamic vulnerability regions: Towards smart grids// IEEE PES General Meeting, San Diego (USA), 22-27 July, 2012, – 8 p.

30. Ernst D., Ruiz-Vega D., Pavella M., Hirsh P.M., Sobajic D. A unified approach to transient stability contingency filtering, ranking and assessment// IEEE Trans. Power Systems, 2001, vol. 16, № 1, P. 392-400.

31. Черненко Ю.В. Облік відмов комутаційної апаратури у схемах електропостачання промислових підприємств//Міжнародний журнал прикладних та фундаментальних досліджень. 2017. №12.– С. 43-48.

32. СОУ – Н ЕЕ 40.1-00100227-101:2014 Норми технологічного проектування енергетичних систем і електричних мереж 35 кВ і вище. Київ: Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2014 – 60 с.

Рисунок 2.5, 2.6