

ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

Яворський Павло Валерійович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Дослідження методів оцінки показників надійності систем
електропостачання
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Яворський П. В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Журавльов Валерій Пилипович

(прізвище, ім'я, по батькові)

д.ф-м.н., професор кафедри вищої

та прикладної математики

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2023

АНОТАЦІЯ

Яворський П. В. Дослідження методів оцінки показників надійності систем електропостачання 220 кВ. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

Метою кваліфікаційної роботи 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.

Ключові слова: надійність, облік відмов, метод розрахунку.

ABSTRACT

Yavorskyi P. V. Research on methods of assessing reliability indicators of 220 kV power supply systems. Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2023.

The purpose of the qualification work is to choose a method of calculating reliability indicators, which allows to increase the accuracy of the reliability level assessment, taking into account the failures of the switching equipment and to choose the most effective version of the scheme at the design and operation stage with less computational costs.

Keywords: reliability, failure accounting, calculation method.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ	7
1.1 Розвиток теорії надійності	7
1.2 Поточний аналіз стану об'єктів магістральних і розподільних електричних мереж	9
Висновки по розділу 1	14
РОЗДІЛ 2 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ СТРУКТУРНОЇ НАДІЙНОСТІ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ЯКА ВРАХОВУЄ ВІДМОВИ КОМУТАЦІЙНОЇ АПАРАТУРИ	16
2.1 Основні поняття теорії надійності	16
2.2 Аналіз методів оцінки показників структурної надійності	20
2.3 Моделі відмов комутаційної апаратури	35
Висновки по розділу 2	39
РОЗДІЛ 3. ПРОВЕДЕННЯ РОЗРАХУНКІВ НА ОСНОВІ ОБРАНОГО МЕТОДУ ОЦІНКИ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ДЛЯ ІСНУЮЧИХ СХЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	40
3.1 Програмні комплекси, які застосовувані для розрахунку показників надійності електроенергетичних систем	40
3.2 Опис інженерної методики оцінки показників структурної надійності, яка враховує відмови комутаційної апаратури	41
3.3 Аналіз надійності типових схем електропостачання	42
Висновки по розділу 3	49
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	52

ВСТУП

У даний час основною тенденцією в енергетиці є створення великих енергооб'єднань, у яких є складна структура, з одного боку - це призводить до збільшення частки системних аварій, в результаті яких одиничний відмова може спричинити за собою каскадне розвиток аварії і охопити значну частина енергооб'єднання, з інший 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 про резервуванні або дублювання достатньо великої кількості споживачів, що наводить до великим капітальним витрат, отже, це рішення повинно бути належним чином обґрунтовано.

«Розрахувавши збитки, нанесені споживачам через перерви електропостачання, збитки через аварійні ремонти, і витрати, спрямовані на підвищення надійності, можна оптимізувати рівень надійності електроенергетичного обладнання і систем в цілому» [3,5].

«Суттєвий зріст споживання електричної енергії пов'язаний з якісною зміною споживачів. Останнє визначено запровадженням нових технологій та поглибленням електрифікації різних виробництв, що наводить до збільшення залежності нормального функціонування споживачів від надійності постачання електричної енергією» [4,5]. Це може привести до значному матеріальному 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 із-за системних аварій, як вже говорилося вище, може привести до серйозних збитків, які можуть бути також пов'язані з загрозою для життя людей.

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 велике 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 м. і концепції забезпечення надійності в електроенергетиці [2,5].

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 відповідно 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 ведучих періодичних виданнях, вхідних в наукометричні бази даних Scopus і WoS, фундаментальні і прикладні наукові дослідження, проведені вітчизняними і зарубіжними вченими, нормативні акти та документи. В процесі роботи використовувалися загальні положення теорії надійності, теорії ймовірності, теорії графів, досвіду експлуатації електроустаткування.

Перелік публікацій автора за темою дослідження:

Яворський П. В., Кравчук О. О. ПОРЯДОК РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ ГОЛОВНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ ПІДСТАНЦІ АНАЛІТИЧНИМ МЕТОДОМ.

Матеріали VII Міжнародна науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи» 15-17 листопада 2023 року. Житомир: Поліський національний університет, 2023.- С 47-49.

Яворський П. В., Кравчук О. О. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ ГОЛОВНОЇ СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ ПІДСТАНЦІ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ – 2023». 25 жовтня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023.- С 106-108.

Яворський П. В. ПОТОЧНИЙ АНАЛІЗ СТАНУ ОБ'ЄКТІВ МАГІСТРАЛЬНИХ І РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Інженерні процеси та системи» 14-15 червня 2023 року. Житомир: Поліський національний університет, 2023.- С 47-51.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

1.1 Розвиток теорії надійності

«Відповідно до [3] 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 і т.д., так і сукупність елементів-підстанції і т.д.» [1,5].

Іноді зустрічаються терміни структурна надійність і функціональна надійність, це робиться для того, щоб спростити розрахунки.

«Перший термін позначає надійність в умовах, коли об'єм 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 чергу підрозділяється на балансову і режимну, навпаки, розглядає надійність тільки в області режимних параметрів, а значення структурних характеристик вважаються заданими і незмінними, тобто розглядається аналіз режимів, їх обмежень, пропускний здібності при зміні структури (що особливо важливо в експлуатації)» [1,5].

«Балансова надійність пов'язана з дефіцитами потужності та/або енергії як при поступових, так і раптових відмови з обмеженням або відключенням споживачів та/або зниженням якості електроенергії внаслідок перевищення навантаження наявної або робочої потужності або дефіциту енергоресурсів. Способами запобігання порушень балансової надійності в частині

забезпеченості первинними енергоресурсами є створення їх запасів на електростанціях. Забезпеченість виробничими потужностями на перспективу реалізується за рахунок введення нових потужностей в генерації і системотворчої мережі чи посилення основний мережі. В експлуатації для цією цілі використовується аварійний ремонт або дострокове виведення 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» [5].

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

Рішенню завдань оцінки надійності було присвячено велике кількість досліджень як вітчизняних авторів так і зарубіжних авторів.

«Для ЕЕС важливими є питання забезпечення надійності функціонування при різних внутрішніх і зовнішніх збуреннях, 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 економно витратити виділені на її забезпечення засоби" [5,7].

В даний час накопичений певний досвід для знаходження кількісної оцінки показників надійності, для цього використовуються різноманітні

методи. Деякі з них уже устоялися, 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 володіння теоретичними методами і моделями, але і переробка їх і пристосування до особливостей цих об'єктів і, як наслідок, створення нових методів та моделей» [5,6].

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 рисунку 1.1 представлені властивості надійності.

Величина обернена безвідмовності – це відмова. Основні типи відмов представлені на рисунку 1.2.

Для прийняття рішення про періодичність ремонтів, про часткову або повну заміну 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 ПЛ і електрообладнання, що вимагають першочергової заміни.

Причинами відмов в електричній мережі в більшості випадків є

ушкодження обладнання електромережєвих об'єктів або поява неприпустимих режимних параметрів в елементах мережі, що вимагає прийняття невідкладних дій щодо їх усунення.

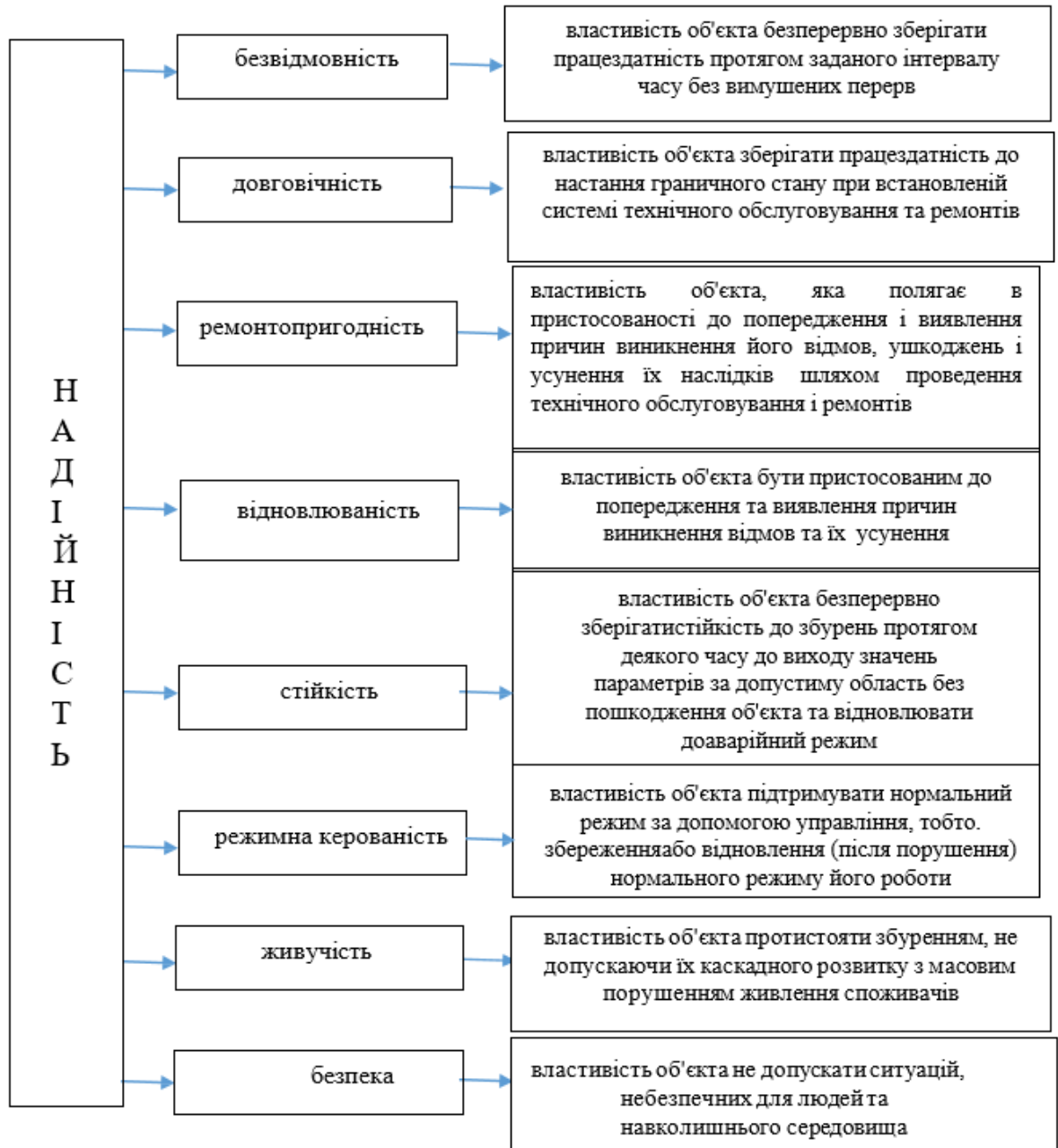


Рисунок 1.1 – Основні властивості надійності

Усі випадки ушкодження обладнання електричної мережі, неприпустимих відхилень параметрів технічного стану електричних установок, а також повних чи часткових незапланованих відключень електроприймачів належать до технологічних порушень. Усі технологічні

порушення підлягають розслідування і обліку, що дозволяє створити базу даних по аварійності в електричних мережах за тривалий термін експлуатації.

Основні причини ушкоджень електрообладнання підстанцій представлені на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 - Розподіл відмов обладнання

Як видно з рисунка 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 бурь) порядку 25 %. Найбільш важкими є ожеледно-вітерові впливу [6]. Сторонні впливу - 15 %, недоліки експлуатації і 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%» [9].

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% [9].

Частка повітряних ліній на 01.01.2021, що знаходяться в експлуатації більше 35 років, в розрізі класів напруги склала:

- ПЛ 220 (330) кВ- 52%;
- ПЛ 110 кВ -61%;
- ПЛ 35 кВ - 63%;
- ПЛ 6-10 кВ - 50%;
- ПЛ 0,4 кВ - 46%» [6].

Спираючись на відомі статистичні дані на 01.01.2021 частка основного обладнання підстанцій, термін експлуатації якого перевищив 25 років, в залежності від класу напруги становила [9]:

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

Таким чином, основне електротехнічне обладнання як в розподільчому, так і в магістральному електромережному комплексі в значній 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.

1.1 Аналіз пошкоджень основного електроустаткування 110-750 кВ

Аналіз ушкоджуваності та оцінка технічного стану основного електрообладнання необхідна для розробки заходів з метою забезпечення надійності і безперебійної роботи енергосистеми з урахуванням 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 [11,13].

За даний період сталося більше 6000 ушкоджень електрообладнання підстанцій. на рисунку 1.4 показано кількість ушкоджень електрообладнання 110-750 кВ в відсотках від спільного кількості пошкоджень електрообладнання [12].

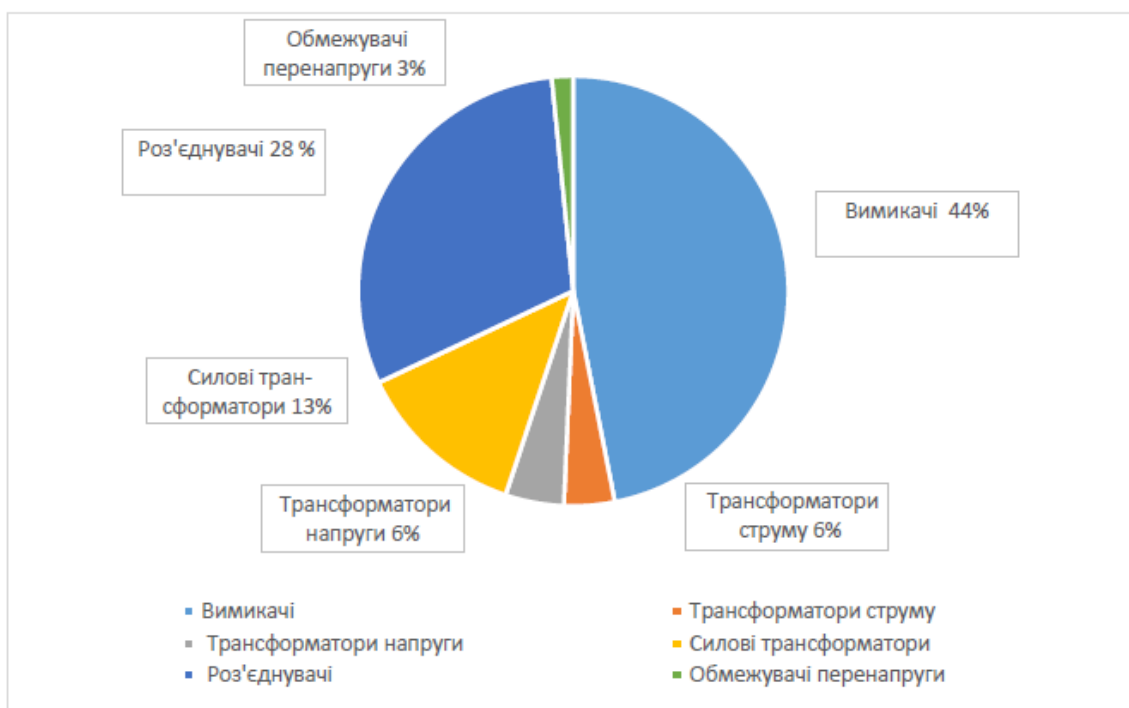


Рисунок 1.4 – Число пошкоджень електрообладнання

Як видно із рисунка 1.4 найбільший вклад в число пошкоджень вносять вимикачі та роз'єднувачі.

Розподіл відмов вимикачів різних класів напруги показано на рисунку 1.5 [9].

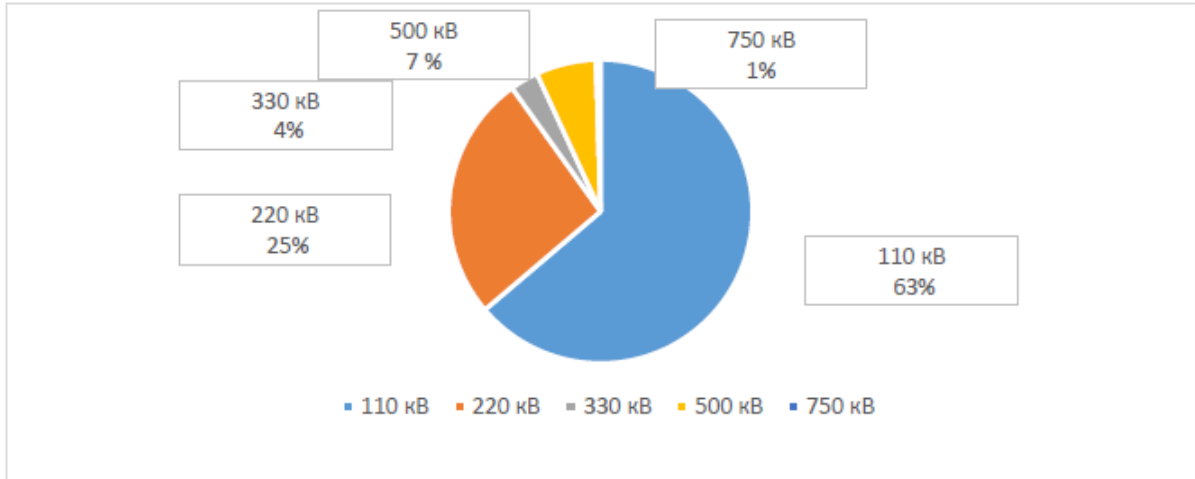


Рисунок 1.5 – Кількість ушкоджень вимикачів різних класів напруг

Розподіл ушкоджень по типам вимикачів представлено на рисунку 1.6.

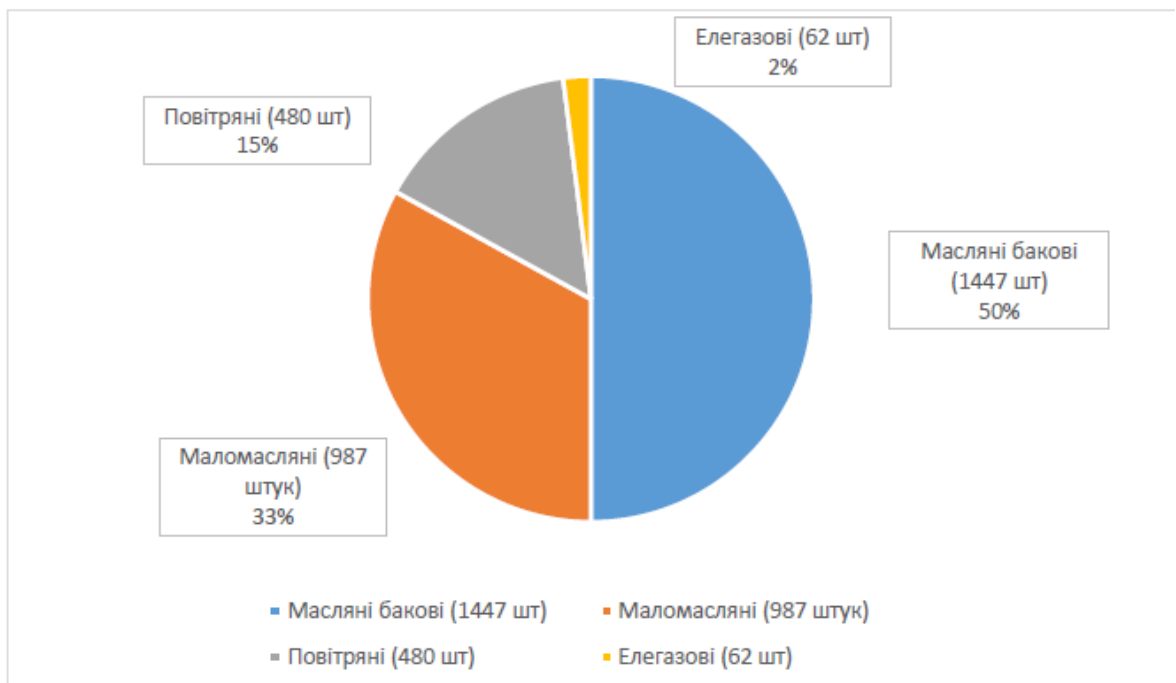


Рисунок 1.6 – Кількість пошкоджень різних типів вимикачів

Висновки по першому розділу

1. Розглянуто сучасний стан питання розвитку теорії надійності. 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 - 44%.

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.

РОЗДІЛ 2

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

2.1 Основні поняття теорії надійності

Електроенергетична система представляє собою складну структуру з великим кількістю елементів. Як вже говорилося, для простої 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 [10].

Точне знання розподілу потоку потужності та рівнів напруги потрібно при аналізі функціональною 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 еквівалентної схемою заміщення, 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 [9,11,13]:

- відмови елементів системи є незалежними подіями;
- потік відмов подій ординарен, тобто. ймовірність появи на одному проміжку часу двох і більше подій зневажливо мала по 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, т.к. другий відмова може мати місце тільки після відновлення цього пристрої;
- періоди безвідмовної роботи елементів значно більше тривалостей 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 поточорозподіл 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» [13].

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, яка припадає на один об'єкт. Оскільки $\mu = const$, то й $T_B = const$.

Статистично середня час відновлення дорівнює:

$$T_B = \frac{\sum_{i=1}^{N_B(0)} t_{Bi}}{n}, \quad (2.2)$$

де t_{Bi} - тривалість відновлення i -го елемента (об'єкта), n - число відмов даного об'єкта, $N_B(0)$ - 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, які вийшли з ладу, замінюються працездатними, тобто. число елементів що спостерігаються зберігається однаковим в процесі експлуатації.

З статистичних даних параметр потоку відмов $\omega(t)$ визначається по формулі:

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

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

Для експоненційного закону надійності інтенсивність і параметр потоку відмов не залежать від часу і збігаються, т. б.

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

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:

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

де t_{Pi} – i -й інтервал часу справний роботи елемента, t_{Bi} – i -й інтервал часу відновлення елемента після i -ої відмови, n – число відмов.

Або K_G можна, отримати по наступному виразу:

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

де T – середній час безвідмовної роботи.

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

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

2.2 Аналіз методів оцінки показників структурної надійності

Як вже говорилося в першому роздірі, парк електрообладнання електричних мереж має велику частку обладнання, яке відпрацювало встановлений стандартами мінімальний термін служби. Тому останнім часом у зв'язку з аваріями, що почастишали в електроенергетичній системі, все частіше встає питання оцінки надійності і безперебійності функціонування. Для рішення цього питання проведемо аналіз методів оцінки структурної надійності і на основі цього аналізу оберемо метод, що дозволяє більш ефективно, і з меншими обчислювальними витратами розрахувати основні показники надійності, що дозволить розробити заходи по підвищенню рівня надійності енергетичних об'єктів.

З найбільш вживаних нині методів розрахунку можна назвати експериментальні методи, методи імітаційного моделювання (статистичні методи) та аналітичні методи (рисунок 2.1).

Експериментальні методи поділяються на методи випробувань на надійність та на методи спостереження.

Випробування на надійність, як правило, застосовуються для серійних виробів, що випускаються в великому кількості. «Дослідні випробування на надійність проводяться виявлення фактичних значень показників надійність».

Контрольні - для перевірки відповідності показників надійності об'єктів вимогам ДСТУ, технічного завдання і т.д.

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» [8,11].

Проводити спеціальні випробування для систем електропостачання, перебувають з дуже великого числа різнорідних елементів, в реальних умовах експлуатації в багатьох випадках не представляється можливим, тому частіше всього застосовуються методи спостережень, або як їх ще називають ретроспективні методи. Вони є витягом і обробки 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 [5]. У здебільшого це витрати на збір і обробку статистичних даних. У результаті показники надійності об'єкта можуть бути оцінені експериментальними методами, наприклад, наступним чином [8, 10].

Статистично середній час відновлення можна, 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 $m_{VP3A}(\Delta t)$ пристроїв релейний захисту і автоматики і числа неспрацьовування $m_B(\Delta t)$ самого комутаційного апарату до спільному числу вимог $M(\Delta t)$ на роботу цих пристроїв за період спостережень Δt

$$q_B^* = \frac{1}{M(\Delta t)} \cdot [m_{VP3A}(\Delta t) + m_B(\Delta t)]. \quad (2.8)$$

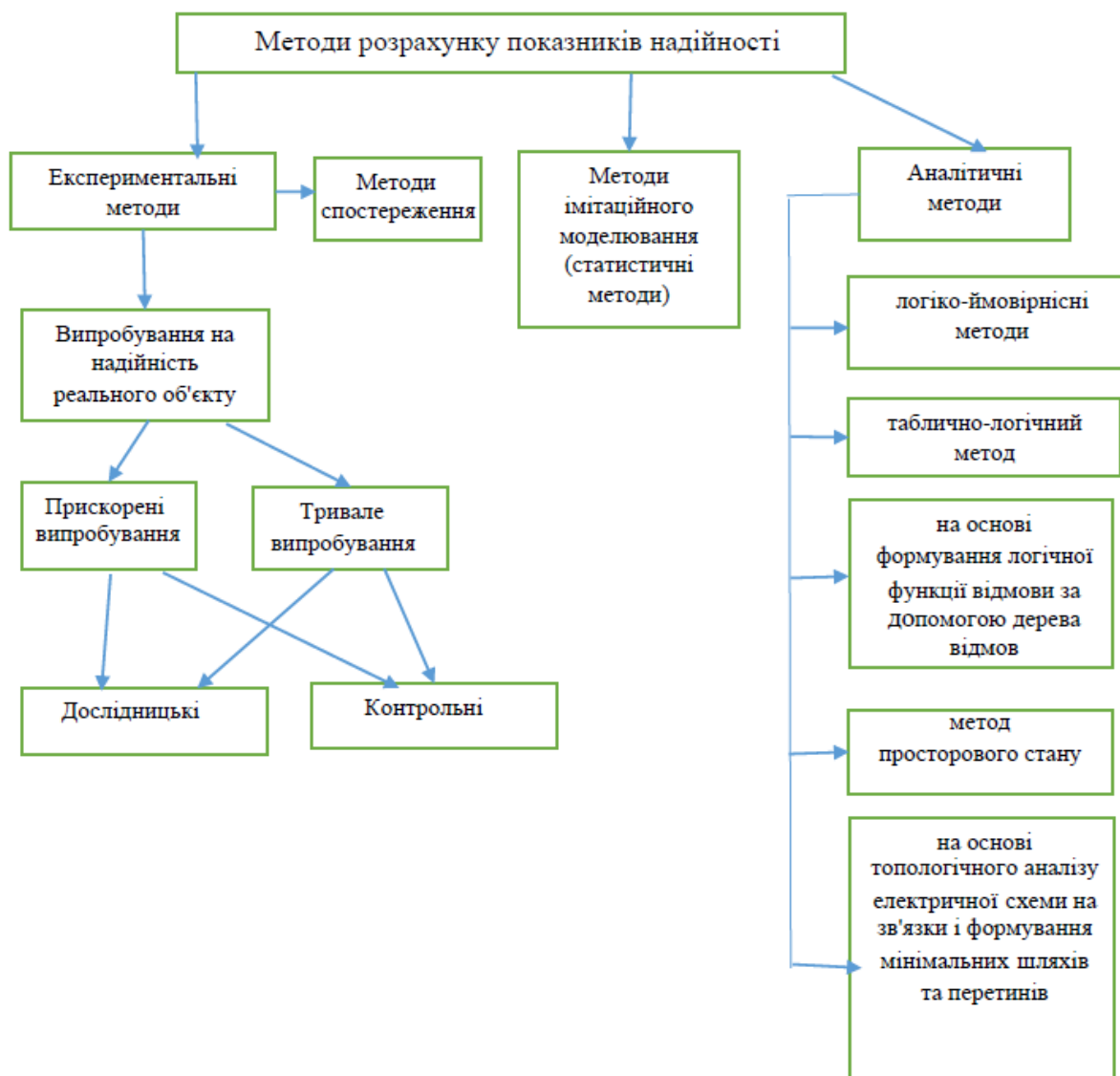


Рисунок 2.1 - Методи оцінки показників структурної надійності

«Як показує практика, недостатній об'єм статистичних даних відмов та відновлення елементів електроенергетичних систем України 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» [13]. за цією причини 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 [3, 4].

Аналітичні методи при наявності математичного описи функціональних зв'язків між окремими факторами дозволяють вирішити будь-яке завдання для оцінки надійності в електроенергетиці з необхідною точністю. Як правило на практиці, багато методів, які пов'язані з аналітичними, 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 [3, 7, 13,]. Загальна формула ймовірності безвідмовний роботи:

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

Середнє час безвідмовний роботи:

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

При експонентному розподілі ймовірність безвідмовної роботи протягом часу t обчислюється за формулою

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

а середній час безвідмовний роботи

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

«До основних аналітичних методів відносяться:

- логіко-імовірнісні методи [15];
- таблично-логічний метод [3,15];
- на основі формування логічною функції відмови з допомогою дерева відмови [14];
- на основі топологічного аналізу електричної схеми на зв'язність і формування мінімальних шляхів і перерізів [14];
- метод простору станів [4,15]».

Слід відзначити, що поділ методів розрахунку достатньо умовний, т.я. в межах кожного методу можуть використовуватися розділи з інших методик.

Логіко-імовірнісний метод використовує функції алгебри логіки. Тут слід зазначити роботи І.А. Рябініна, Г.М. Черкесова, Л.І. Волгіна і інших. «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, які приймають лише два значення (1 або 0) і обумовлені різними наборами двійкових аргументів, називаються двійковими функціями або функціями алгебри логіки (ФАЛ)» [14].

Виконуються три основні логічні операції: кон'юнкція (що відповідає множенню подій у теорії ймовірностей), диз'юнкція (відповідна додаванню подій) і заперечення. Заперечення висловлювання x позначається як \bar{x} . Логічне множення висловлювань x_1 і x_2 позначається як $x_1 \wedge x_2$ 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

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

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

Неважко визначити умови працездатності для систем, які мають невелику кількість елементів у структурній схемі. 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, яка представляє собою такий логічний добуток з заперечень її елементів, жоден із компонентів якої не можна вилучити, не порушивши умови непрацездатності системи. Таку кон'юнкцію можна записати в вигляді функції

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

де K_{S_j} - безліч номерів елементів \bar{X}_i , відповідних даному перетину j .

Таким чином, якщо структурно-функціональні зв'язки системи можна уявити, наприклад, у вигляді сукупності елементів, пов'язаних між собою послідовним, паралельним або іншим способом, то працездатний або непрацездатний стан такої системи можна, можливо записати в вигляді функції алгебри логіки. Логіко-імовірнісний метод застосовується в здебільшого для розрахунку надійності суднових електроенергетичних систем [15], технологічних схем атомних електростанцій, включаючи схеми надійного живлення установок власних потреб.

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

Таблично-логічний метод застосовується в тих випадках, коли різноманітність відмов аналізованої системи велике. Тут слід відзначити роботи Ф.І. Синчугова, Ю.Б. Гука, В.І. Трубіцина, В.Г., Китушина, М.М. Розанова і інших. З допомогою таблично-логічного методу можна виявити

різні види аварій, що виникають при накладенні відмов елементів головною схемою на ремонтні і експлуатаційні режими, різні складом що знаходяться в роботі елементів і їх ушкоджувальність. 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» [16].

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'ютері.

Метод, заснований на аналізі дерева відмов, представляє собою систематичний аналіз подій, які можуть викликати відмову системи, включаючи відмови підсистем та елементів, які є першопричиною відмов системи. У результаті аналізу будується так зване дерево відмов (рисунки 2.2), структура дерева відмов дозволяє визначити алгоритми, при допомозі яких можна, обчислити ймовірність відмови системи [15]. Деякі поняття, використовувані в методі дерева відмов, запозичені із теорії графів. Теоретично деревом графів 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. Можна відмітити наступні роботи І.В. Білоусенко, А.П. Ковальова, Дж. Ендрені, Б. Діллона, ч. Сінгха та інших [17].

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'язуючі 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 кінцеві події; аналогічним чином дерево продовжується на наступних рівнях. Найбільш уживаними логічними операціями є I і $АБО$, значно рідше вживається $НІ$, визначення та символи цих логічних операцій показано на рисунку 2.3» [15,17].



Рисунок 2.2 – Дерево відмов

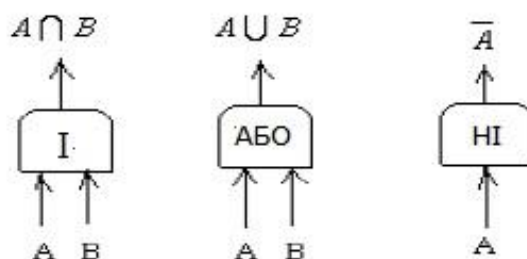


Рисунок 2.3- Логічні операції

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

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 великої кількості розрахунків.

Топологічний метод на основі формування мінімальних шляхів та перерізів (Ю.А. Фокін, В.В. Зорін, І.В. Недін, Р. Біллінтон, Р. Алан, Дж. А. А., Дж. Ендрені, В. Л. Прус, В.В. Тисленко). Він полягає в наступному: реальна схема електропостачання замінюється еквівалентною структурною: послідовно-паралельною (шляхи) і паралельно-послідовною (перетини). Шляхи - це сукупності мінімального набору елементів, функціонування яких забезпечує нормальне функціонування схеми від джерела живлення до вузла навантаження [17]. Перетини – це сукупності мінімального набору елементів, відмова яких в будь-який з сукупностей приводить до відмови розглянутого вузла [15], це основні перерізи, тобто. за елементами, що входять у дані перерізи, може передаватися електроенергія в вузол навантаження. Крім основних формуються і додаткові перерізи. «Додаткові перерізи визначаються на основі інформації про основні перерізи, в які входять вузли схеми, і списків, які відображають зони впливу відмов елементів на вузли. Додатковими перерізами називають сукупності елементів, за якими безпосередньо електроенергія у вузол навантаження не передається (або передається по частині з них), але відмова, яка або поєднання відмови одних з навмисними відключеннями інших припиняє подачу живлення в вузол навантаження на час оперативних перемикачів в мережі, тобто при відключенні одного або кількох елементів, що відмовили, може бути

відновлено живлення навантаження» [15]. Склавши показники надійності основних і додаткових перерізів, визначаються показники надійності схеми всього вузла.

Для невеликих схем (до декількох сотень елементів) [67] шляхи та перерізи визначаються безпосередньо за схемою. Алгоритми будуються таким чином, щоб на початку визначалися всі шляхи в схемі, 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 -го рядка 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 одноелементний 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 перерізи знаходяться шляхом логічної суми кількох рядків, у даному випадку шляхом аналізу поєднань по два рядки, тобто. якщо логічна сума рядків складатиметься з одних одиниць, то утворюються двоелементні перерізи.

Аналогічно визначаються триелементні перерізи, при цьому аналізуються поєднання трьох рядків. У цьому методі зазвичай аналіз закінчується на розгляді двоелементних перерізів, т.я. в складних схемах з великою кількістю елементів число мінімальних шляхів може бути дуже велике, що ускладнює розрахунки навіть з застосуванням ЕОМ [16].

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 [15], які були розроблені для розрахунків на ЕОМ, показав ряд обмежень, що ускладнюють їх реалізацію: один і той же самий переріз може формуватися кілька разів; перевірка графа на зв'язковість при переборі всіх поєднань відмов елементів схеми, як основна операція в визначенні перерізів,

зумовлює великий час рахунків; формування перерізів по матриці мінімальних шляхів є практично неефективним через дуже велику кількість шляхів.

Метод простору станів (Дж. Ендрені, Ю.А. Фокін, Б. Діллон, Ч. Сінгх, В.І. Попков, К.С. Демірчан, В.Л. Прус, В.В. Тисленко, М.М. Розанов, Д.А. Арзамасцев, В.П. Обоскалов, Р. Біллінтон, Р. Алан та інші).

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. Стани 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 стани. Усі можливі стани системи утворюють простір станів [15].

При використанні методу простору стану для опису 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 експонентний розподіл часу безвідмовної 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 [17].

Припущення про експоненційний розподіл інтервалів часу, минулого до настання певної події, лежить в основі більшості технічних розрахунків. «Однак модель із постійною інтенсивністю переходів часто дає задовільні результати і в тих випадках, коли ці розподілу в насправді не експоненційні, якщо розглядається тривалий проміжок часу функціонування системи» [3, 10, 15].

Якщо тривалість станів описуються експоненційним законом розподілу, то процес називається найпростішим. Для нього характерні властивості ординарності, відсутності післядії і стаціонарності. Потоки подій, одночасно що володіють властивостями ординарності (події не настають одночасно) і

відсутності післядії (події незалежні), називаються пуассонівськими, така їх назва пов'язано із законом Пуассона. Теоретичні розрахунки частіше всього виконуються в припущенні того, що потоки найпростіші.

У теорії надійності широке застосування знаходять марківські процеси з дискретними станами та безперервним часом [10, 15, 17]. 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 інший відбуваються під впливом потоків відмов і відновлень, а переходи з стану S_i в стан S_j описують при допомозі їх інтенсивностей λ_{ij} . Іntenсивність 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) слід, що при малому Δt вираження $p_{ij}(\Delta t)$ може бути визначена виразом

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

Якщо інтенсивність $\lambda_{ij}(t)$ не залежить від часу, т.б. $\lambda_{ij} = const$, то безперервний марківський процес називається однорідним, тобто інтенсивності переходів постійні в однорідному марківському процесі [17]. 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 частину 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» [3, 15]. 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.

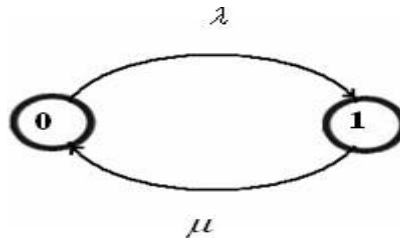


Рисунок 2.4 - Граф станів системи

Якщо процес є марківським, його можна описати за допомогою диференціальних рівнянь, в яких невідомими є ймовірності станів $p_0(t)$ та $p_1(t)$. При рішенні використовуються наступні умови: потік відмов найпростіший з інтенсивність відмов $\lambda = const$ та відновлення $\mu = const$, закон розподілу часу відновлення та часу між відмовами експоненційний. Для будь-якого моменту часу $p_0(t) + p_1(t) = 1$. Якщо поведінку системи розглядати в інтервалі часу $[0, t + \Delta t]$, тоді система в момент $t + \Delta t$ буде перебувати в стані 0 і за час Δt відмов не спостерігалось, а також якщо система в момент часу t знаходилася у 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 $\Delta t \rightarrow 0$ можливо одержати 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 [3, 15].

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 однодиференціальне 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, безпосередньо записати, користуючись наступним правилом. У лівій частині рівняння записується похідна від ймовірності розглянутого стану во часу, в правою частини- стільки доданків, скільки дуг (вхідних та вихідних) пов'язано з даними станом. Кожен доданок дорівнює добутку інтенсивностей переходу, що є позначенням дуги, яка розглядається, на ймовірність того стану, з якого виходить ця дуга. Причому, якщо дуга для цього стану (для якого складається рівняння) є вихідною, то відповідний 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 лише асимптотичні (стаціонарні) значення ймовірностей ($t \rightarrow \infty$). Тоді від системи диференціальних рівнянь переходять до системи рівнянь алгебри. Для цього необхідно всі похідні прирівняти до нуля ($\frac{dp_i(t)}{dt} = 0$) і зробити заміну $p_i(t)$ і на p_i

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

$$\begin{cases} 0 = -\lambda p_0 + \mu p_1, \\ 0 = \lambda p_0 - \mu p_1. \end{cases}$$

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

$$\begin{cases} 0 = -\lambda p_0 + \mu p_1 \\ p_0 + p_1 = 1 \end{cases} \quad (2.15)$$

У результаті розрахунків одержимо

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

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

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

"Основний областю 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 відмови, обчислюються аналогічні показники для станів відмови системи в цілому» [15].

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 точки 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, т.к. 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 один одного і дозволяють враховувати надійність комутаційної апаратури.

Практично у 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 даній роботі обираємо метод простору станів, як основний для кількісній оцінці 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 рисунка 1.5 найбільше відмов припадає на вимикачі. «З позицій надійності вимикач - один з найбільш складні елементів. У його моделі відмови потрібно враховувати параметри надійності електричних апаратів (власне вимикача з приводом, роз'єднувачів), пристроїв релейного захисту і автоматики, умови ремонтно-експлуатаційного обслуговування та низку інших факторів [3, 15]. 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 даних типів вимикачів представлені на рисунках 1.19-1.22. На основі проведеного аналізу даних діаграм можна, зробити висновок, що основними причинами відмов повітряних і оливних вимикачів є: відмови приводу і ланцюгів управління, ушкодження ізоляторів, руйнування газової камери через незгання дуги, дефекти гумового 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) [7, 17]. Основою в більшості всіх розрахунків надійності вимикачів є моделі марківських випадкових процесів з різним ступенем обліку процесу відновлення, ремонтних станів і т.д. [4, 11].

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 стані, при оперативних перемиканнях та при відключенні пошкоджених елементів, тобто. при локалізації короткого замикання. На рисунку 2.5 показано статистика відмов власне самих вимикачів з приводами в різних станах.

У найбільш складних, повних моделях відмови вимикача [17] 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).

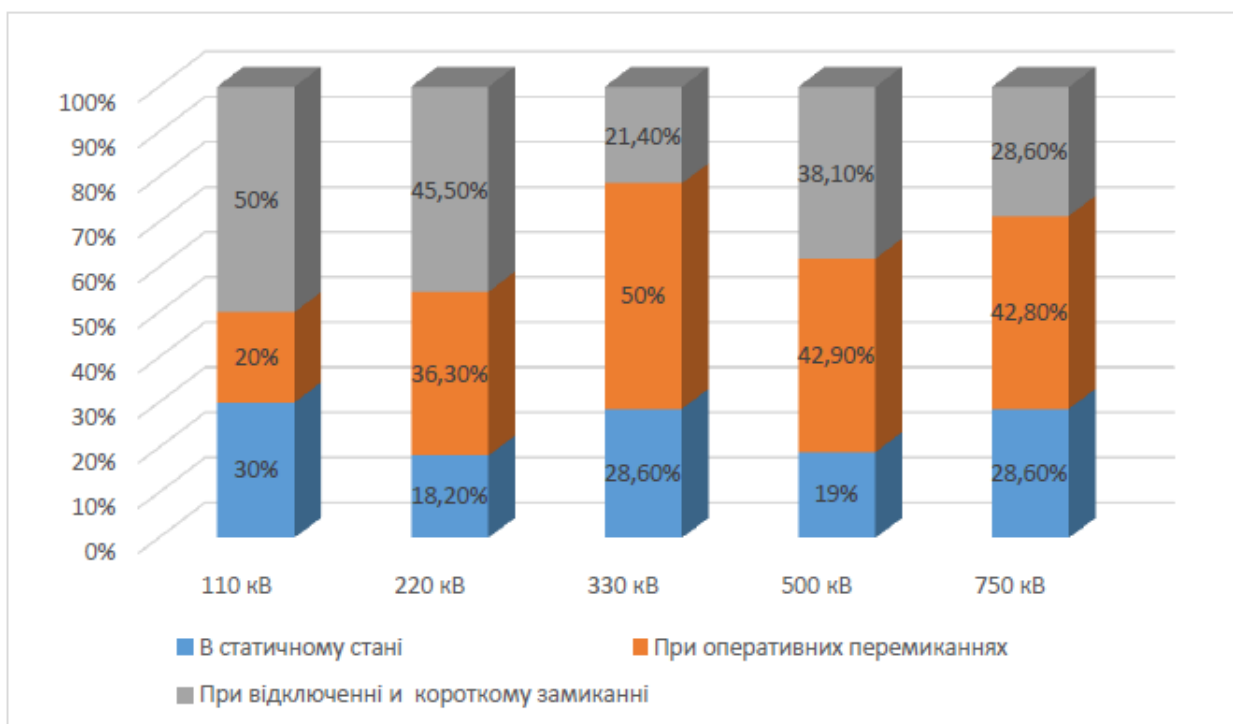


Рисунок 2.5 – Відмови вимикачів у статичному стані, при оперативних перемиканнях і при відключенні короткого замикання

Дуже значна група відмов вимикачів, пов'язаних з ненадійністю (відмовами функціонування) пристроїв РЗА внаслідок відмови, зайвого і хибного спрацьовування. Це відбувається, коли при короткому замиканні на приєднанні з різних причин відбулася відмова спрацьовування основних та резервних пристроїв РЗА, що впливають на вимикач даного приєднання. При

цьому короткий замикання ліквідувалося дією ПРВВ (пристрій резервування при відмові вимикача), наводячи до втрати не тільки даного, але і в ряді випадків суміжних приєднань. Таким чином, якщо на ділянці що захищається відбувається коротке замикання та спрацювання його захисту, але при цьому вимикач з якихось причин це коротке замикання не усуває, то ПРВВ видає команду на відключення суміжних вимикачів, через які йде підживлення точки КЗ. Робиться це з певною витримкою часу для відбудови від часу дії вимикача. Зайве спрацювання 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 спрацювання полягало в відключенні від пристроїв РЗА вимикача при відсутності на то відповідної вимоги як на даному, так і на інших приєднаннях. Вони мали місце, наприклад, при дефектах виготовлення та монтажу пристроїв РЗА, а також через помилковій 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 спрацювання 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) [3,13].

У зв'язку з цим, помітно розбіжність даних по моделям відмови вимикача у різних роботах [6, 12, 15]. Однак у роботах [3, 16] 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 спрацювання» [10].

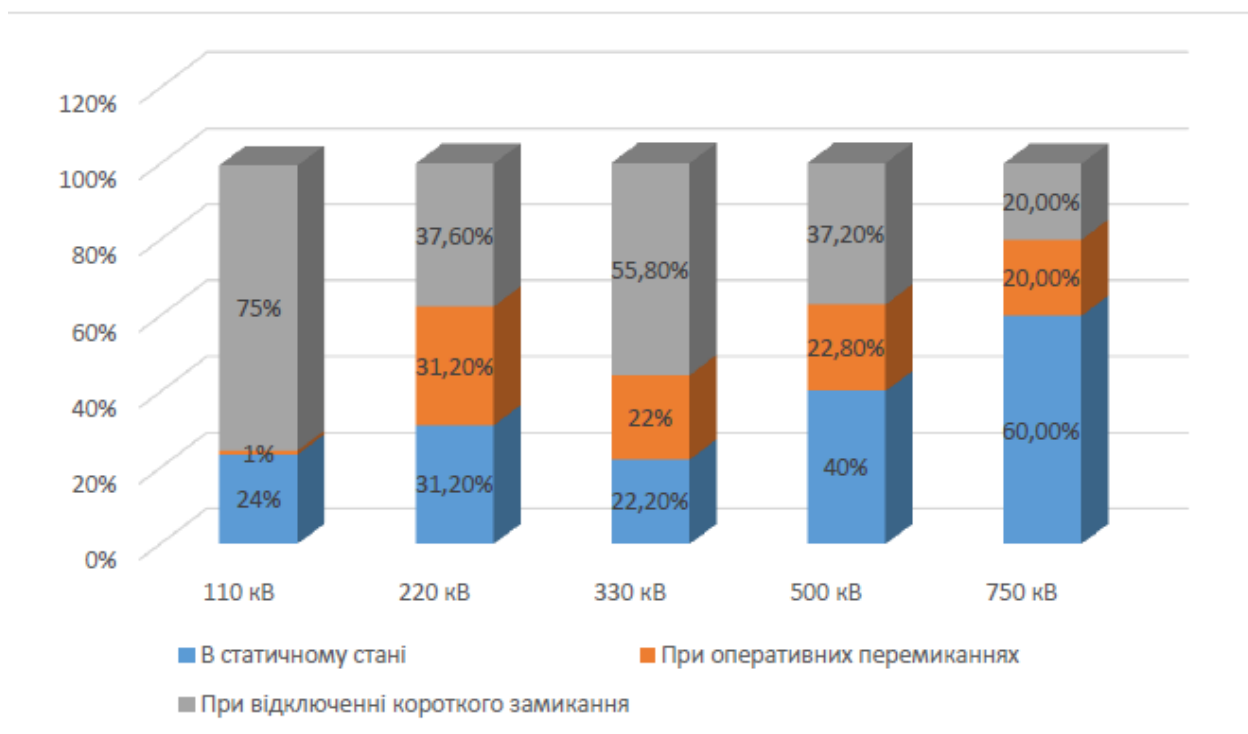


Рисунок 2.6 - Відмови вимикачів через порушень роботи РЗА в різних режимах

Висновки по другому розділу

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, т.я. на них припадає більша частина відмов. Показано необхідність обліку впливу відмов комутаційної апаратури для проведення точної оцінки надійності систем електропостачання.

РОЗДІЛ 3

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

3.1 Програмні комплекси, які застосовувані для розрахунку показників надійності електроенергетичних систем

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

В Україні та за кордоном на сьогоднішній день отримали найбільше поширення наступні програмні комплекси, що дозволяють моделювати і розраховувати імовірнісні показники надійності електроенергетичних систем (Рисунок 3.1):

1. Програмні комплекси "RISKSPECTRUM" (Швеція); «SAPPHIRE» (США), що використовують в якості вихідних даних «деревавідмов» і «дерева подій».

2. Програмний комплекс "WINDCHILL RBD" (США), що використовує спеціальну блок-схему працездатності системи.

3. Вітчизняний програмний комплекс "АРБІТР" ("АСМ СЗМА"), 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.

Використання складних в освоєнні і дорогих спеціалізованих програмних

комплексів виправдано тільки в тих галузях і 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 [6], вартість яких не порівнянна зі спеціалізованими, а обмежена набір функціональних можливостей компенсується простотою освоєння.

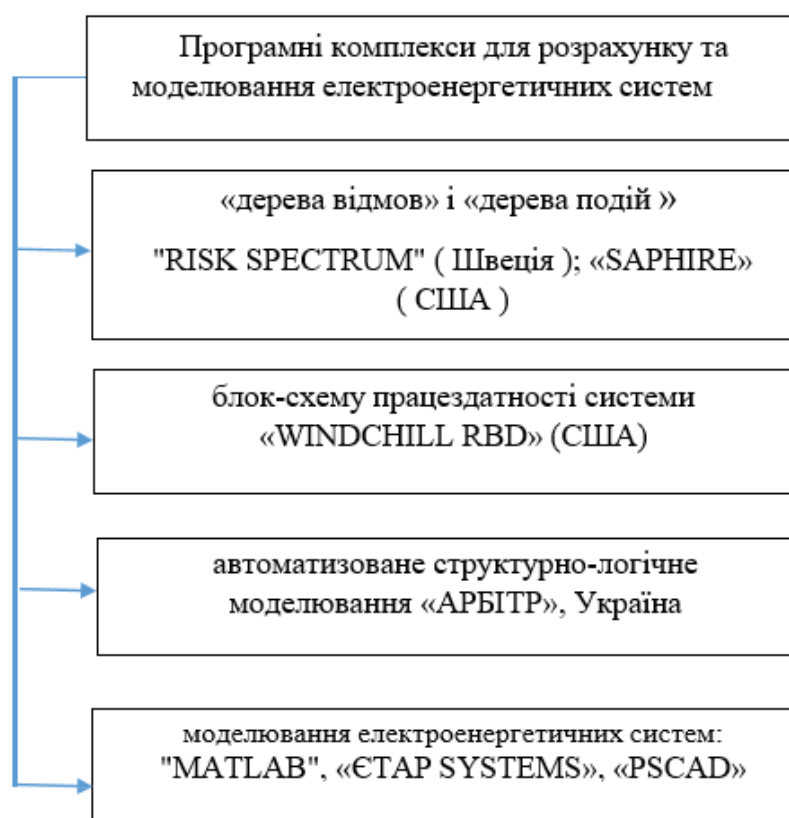


Рисунок 3.1 – Основні програмні комплекси для розрахунку та моделювання електроенергетичних систем

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

Як уже говорилося у 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 опису переходів з одного стану елемента в інший використовуються марківські моделі. Таким чином, кожен елемент I (силовий трансформатор, вимикач, роз'єднувач і тощо) електричної системи може знаходитися в одному із досліджувальних станів: I_N – стан нормальної 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_C – стан капітального ремонту (навмисного відключення) елемента I , I_V – стан поточного ремонту (навмисного відключення) елемента I .

Кількість станів системи може виявитися дуже великою, що приводить до громіздких розрахунків, тому 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 виділенні деяких сукупностей елементів системи, так званих перерізів [3, 6, 15]. Таким чином, у рамках прийнятої моделі розглянуто метод перерахування станів відмови на основі якого формуються різні класи перерізів $[J_i] \ominus, i = 1, 2, \dots, 20$. Кожному класу перетинів відповідає свій стан відмов MC , де MC - це стан відмови з мінімальними перерізами. Причому стану відмови для кожного перерізу унікальні, немає 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.

3.3 Аналіз надійності типових схем електропостачання

Проведемо порівняння типових схем електропостачання, що застосовуються на промислових підприємствах (рисунок 3.2) та розрахуємо кількісну оцінку показників надійності з допомогою інженерної методики, описаної вище.

Раніше широко застосовувалися схеми з віддільниками і короткозамикачами. 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 [3]. Схема лінія-трансформатор із вимикачем (малюнок 3.2, а) застосовується для тупикових або відгалужувальних одотрансформаторних 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 двотрансформаторних підстанцій, що живляться по двом повітряним лініям. Схема місток з вимикачами в ланцюгах ліній і ремонтною перемичкою з боку ліній (рисунок 3.2, в) застосовується для прохідних двотрансформаторних підстанцій із двостороннім живленням за необхідності збереження у роботі двох трансформаторів при короткому замиканні або пошкодженні 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 3.3.

При розрахунку кількісних показників структурної надійності важливу роль відіграють стани відмови - стани, в яких система втрачає працездатність. Критерієм відмови системи рисунок 3.4 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 $[J_i] \ominus$	Елементи класу (перетини) $c \in [J_i] \ominus$
$[J_2] \ominus$	13
$[J_3] \ominus$	15-16, 15-12, 11-6, 11-12, 11-10, 9-12, 11-8, 9-10, 7-12, 9-8, 7-10, 7-6, 5-8, 5-6, 7-4, 3-8, 5-4, 3-6, 3-4, 3-2, 1-4, 1-2
$[J_4] \ominus$	2-11, 4-11, 6-11, 1-12, 3-12, 5-12, 15-8, 16-7
$[J_5] \ominus$	15-2, 15-4, 15-6, 1-16, 3-16, 5-16
$[J_6] \ominus$	9-16, 10-15, 1-10, 3-10, 5-10, 2-9, 4-9, 6-9, 1-8, 2-7, 1-6, 2-5

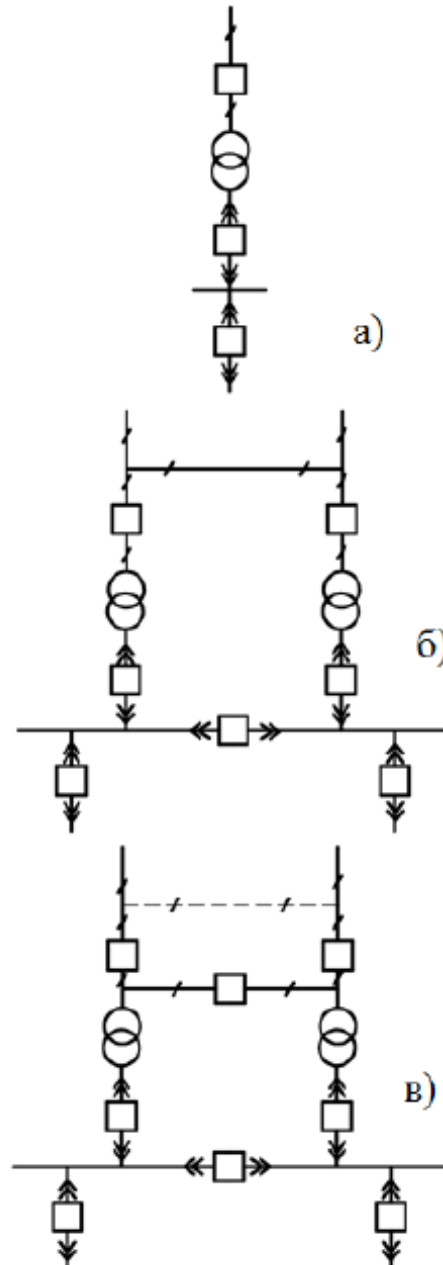


Рисунок 3.3 - Типові схеми підстанцій

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

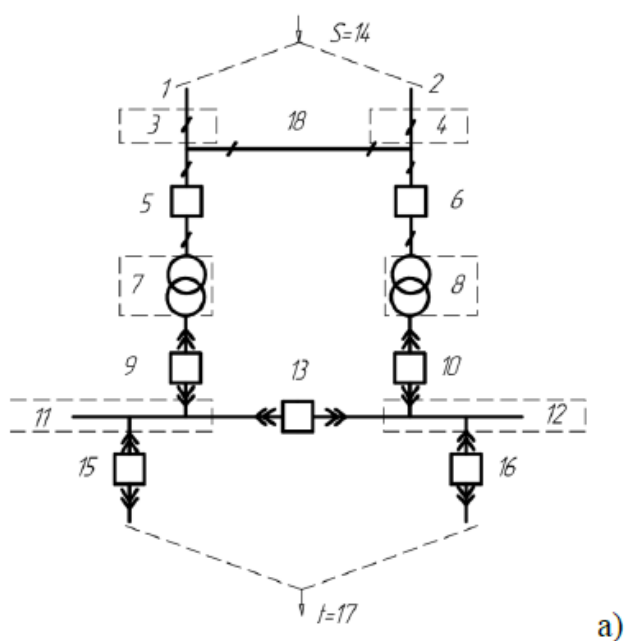
$$MC(J_2) = \{I_S\},$$

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

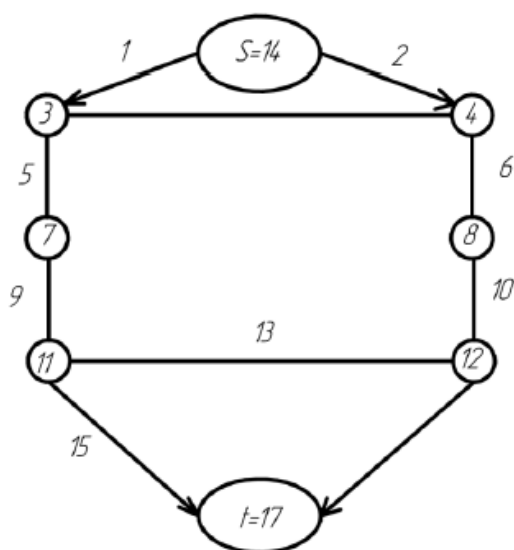
$$MC(J_4) = \{I_S K_R, I_S K_V, I_S K_C\},$$

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

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



a)



б)

Рисунок 3.4 -Схема електропостачання і розрахунковий граф

Наприклад, переріз 15-8 відповідає станам відмови $15_S 8_R$, $15_S 8_V$, $15_S 8_C$ (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 [17] або на основі статистичних даних.

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

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

$$\begin{aligned} P_3(J_3) &= \{P(I_R K_C) + P(I_R K_V)\} + P(I_R K_R) + \{P(I_C K_R) + P(I_V K_R)\} = \\ &= \{\lambda_{NS}(I)T_{RN}(I)\lambda_{NC}(K)T_{CN}^2(K) / (T_{CN}(K) + T_{RN}(I)) + \lambda_{NS}(I)T_{RN}(I)\lambda_{NV}(K)T_{VN}^2(K) / \\ &/ (T_{VN}(K) + T_{RN}(I))\} + \lambda_{NS}(I)T_{RN}(I)\lambda_{NS}(K)T_{RN}(K) + \{\lambda_{NC}(I)\lambda_{NS}(K)T_{RN}(K)T_{CN}^2(I) / \\ &/ (T_{CN}(I) + T_{RN}(K)) + \lambda_{NV}(I)\lambda_{NS}(K)T_{RN}(K)T_{VN}^2(I) / (T_{VN}(I) + T_{RN}(K))\}; \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned} P_6(J_6) &= \{P(I_S K_C) + P(I_S K_V)\} + P(I_S K_R) + P(I_R K_S) + \{P(I_C K_S) + P(I_V K_S)\} = \\ &= \{\lambda_{NS}(I)T_{SR}(I)\lambda_{NC}(K)T_{CN}^2(K) / (T_{CN}(K) + T_{SR}(I)) + \lambda_{NS}(I)T_{SR}(I)\lambda_{NV}(K)T_{VN}^2(K) / \\ &/ (T_{VN}(K) + T_{SR}(I))\} + \lambda_{NS}(I)T_{SR}(I)\lambda_{NS}(K)T_{RN}(K) + \lambda_{NS}(I)T_{RN}(I)\lambda_{NS}(K)T_{SR}(K) + \\ &+ \{\lambda_{NC}(I)\lambda_{NS}(K)T_{SR}(K)T_{CN}^2(I) / (T_{CN}(I) + T_{SR}(K)) + \lambda_{NV}(I)\lambda_{NS}(K)T_{SR}(K)T_{VN}^2(I) / \\ &/ (T_{VN}(I) + T_{SR}(K))\}. \end{aligned}$$

Вклад перерізів виділених класів в середній параметр потоку відмов системи:

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

$$\begin{aligned}
f_3(J_3) &= \{f(I_R K_C) + f(I_R K_V)\} + f(I_R K_R) + \{f(I_C K_R) + f(I_V K_R)\} = \\
&= \{\lambda_{NS}(I)\lambda_{NC}(K)T_{CN}(K) + \lambda_{NS}(I)\lambda_{NV}(K)T_{VN}(K)\} + \lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)(T_{RN}(I) + T_{RN}(K)) + \\
&+ \{\lambda_{NC}(I)\lambda_{NS}(K)T_{CN}(I) + \lambda_{NV}(I)\lambda_{NS}(K)T_{VN}(I)\}; \\
f_4(J_4) &= \{f(I_S K_C) + f(I_S K_V)\} + f(I_S K_R) = \\
&\{\lambda_{NS}(I)\lambda_{NC}(K)T_{CN}(K) + \lambda_{NS}(I)\lambda_{NV}(K)T_{VN}(K)\} + \lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)(T_{SR}(I) + T_{RN}(K)); \\
f_5(J_5) &= f(I_S K_S) = \lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)(T_{SR}(I) + T_{SR}(K)); \\
f_6(J_6) &= \{f(I_S K_C) + f(I_S K_V)\} + f(I_S K_R) + f(I_R K_S) + \{f(I_C K_S) + f(I_V K_S)\} = \\
&= \{\lambda_{NS}(I)\lambda_{NC}(K)T_{CN}(K) + \lambda_{NS}(I)\lambda_{NV}(K)T_{VN}(K)\} + \lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)(T_{SR}(I) + T_{RN}(K)) + \\
&+ \lambda_{NS}(I)\lambda_{NS}(K)(T_{RN}(I) + T_{SR}(K)) + \{\lambda_{NC}(I)\lambda_{NS}(K)T_{CN}(I) + \lambda_{NV}(I)\lambda_{NS}(K)T_{VN}(I)\},
\end{aligned}$$

де для елемента I відповідно $\lambda_{NS}(I)$ – інтенсивність відмов, $\lambda_{NC}(I)$ – інтенсивність капітального ремонту, $\lambda_{NV}(I)$ – інтенсивність поточного ремонту, $T_{SR}(I) = 1/\mu_{SR}(I)$, $T_{RN}(I) = 1/\mu_{RN}(I)$, $T_{CN}(I) = 1/\mu_{CN}(I)$, $T_{VN}(I) = 1/\mu_{VN}(I)$ – середній час перемикачів, аварійного, капітального та поточного ремонту елемента I відповідно.

Інші типові схеми (рисунок 3.2, а, в) розраховуються аналогічно. Розрахункові значення показників надійності схем (рисунок 3.3) наведено у таблиці 3.2, 3.3, 3.4, де f_{ia} – параметр потоку аварійних відмов, f_{imec} та f_{icap} – параметр потоку поточних та капітальних ремонтів, $f_{i\Sigma} = f_{ia} + f_{imec} + f_{icap}$ – середній параметр потоку відмов, $T_{ia} = \frac{P_{ia}}{f_{ia}}$ – час аварійного відновлення, $T_{imec} = \frac{P_{imec}}{f_{imec}}$ – час поточного та $T_{icap} = \frac{P_{icap}}{f_{icap}}$ капітального ремонтів, і $T_{i\Sigma} = \frac{P_{i\Sigma}}{f_{i\Sigma}}$ – середній час відновлення системи, P_{ia} – ймовірність стану аварійної відмови, P_{imec} та P_{icap} – ймовірність стану поточного та капітального ремонтів, $P_{i\Sigma} = P_{ia} + P_{imec} + P_{icap}$ – ймовірність стану відмови системи.

Таблиця 3.2 - Значення параметра потоку відмов

Схема	$f_{ia}, \text{рік}^{-1}$	$f_{imes}, \text{рік}^{-1}$	$f_{icap}, \text{рік}^{-1}$	$f_{iz}, \text{рік}^{-1}$
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	$T_{ia}, \text{ч}$	$T_{imes}, \text{ч}$	$T_{icap}, \text{ч}$	$T_{iz}, \text{ч}$
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_{iz}
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, можливо зробити наступні висновки: найгіршою щодо параметра потоку відмов та ймовірності стану відмови, параметра потоку та ймовірності стану поточного та капітального ремонтів є однострансформаторна підстанція (рисунок 3.3, а), тому ці підстанції можуть споруджуватися для живлення невідповідальних споживачів. З погляду безперебійності електропостачання кращою є схема (рисунок 3.3, б). Як видно з розрахунків, на надійність електропостачання впливають планово-попереджувальні ремонти, т.я. з однієї сторони поточні і капітальні ремонти спрямовані на підвищення надійності систем електропостачання, а з інший, - профілактичні ремонти роблять схему нерезервовану, 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 безперебійній 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.

Висновки по третьому розділу

1. Проведено аналіз основних програмних комплексів, що застосовуються для розрахунку показників надійності електроенергетичних систем в країні 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. 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 електромережевому комплексі по причин, пов'язаним 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 доводиться на вимикачі - 44%.

4. Показано необхідність оцінки надійності різних типів обладнання і схеми електропостачання в цілому з метою розробки заходів по забезпечення надійності і безперебійний роботи. 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, т.я. 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.

1. 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 2790-94 Системи електропостачальні номінальною напругою понад 1000 В: джерела, мережі, перетворювачі та споживачі електричної енергії. Терміни та визначення.

2. ДСТУ 2791-94 Системи електропостачальні номінальною напругою до 1000 В: джерела, мережі, перетворювачі та споживачі електричної енергії. Терміни та визначення.

3. Казанський С. В. Надійність електроенергетичних систем : навч. посіб. / С. В. Казанський, Ю. П. Матеєнко, Б. М. Сердюк. – К. : НТУУ «КПІ», 2011. – 216 с. – ISBN 978-966-622-453-1. 2. Казанський С. В. Моделі організації ринків електричної енергії / С. В. Казанський // Електропанорама. – 2008. – № 3. – С. 55 – 57

4. Мірошник Ю.В., студент, Казанський С.В ЯКІСТЬ НАДАННЯ ПОСЛУГ З ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ: ОСНОВНІ ТЕРМІНОЛОГІЧНІ ВИЗНАЧЕННЯ ТА НОРМАТИВНА БАЗА/ КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електричних мереж та систем

5. N 978-966-622-453-1. 2. Постанова Національної комісії регулювання електроенергетики України від 17.02.2011 р. № 232 «Про затвердження форм звітності № 17-НКРЕ (квартальна) «Звіт щодо показників надійності електропостачання» та № 18-НКРЕ (квартальна) «Звіт щодо показників комерційної якості надання послуг» та інструкцій щодо їх заповнення». Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 21.03.2011 р. за № 374/19112.

6. Кирик В.В., Рибка О.О., Аналіз стану та технічної відповідності електричних мереж ОЕС України вимогам ENTSO-E Гідроенергетика України, 3—4/2021, ISSN 18129277

7. Приватне Акціонерне Товариство «Національна енергетична компанія «Укренерго» (НЕК «Укренерго»). (n.d.). План розвитку системи передачі на 2021-2030 роки, схвалений постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг № 57 від

20.01.2021. Retrieved from <https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya/plan-rozvytku-oesukrayiny>

8. Приватне Акціонерне Товариство «Національна енергетична компанія «Укренерго» (НЕК «Укренерго»). (n.d.). Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей для покриття прогнозованого попиту на електричну енергію та забезпечення необхідного резерву у 2020 році. Retrieved from <https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya/zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-dostatnostigeneruyuchykh-potuzhnostej/#1596701774919-04e9ab60-f849>

9. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. (n.d.). Звіт про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг у 2020 році. Retrieved from https://www.nerc.gov.ua/data/filearch/Catalog3/-Richnyi_zvit_NKREKP_2020.pdf

10. Кирик В.В. Електричні мережі та системи: підручник /В. В. Кирик. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – 324 с. ISBN 978-966-990-031-9

11. Кирик В.В. Розподільні електричні мережі напругою 20 кВ та ефективність їх роботи / В.В.Кирик, Б.В. Циганенко, О.С. Яндульський.-К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018.-228с. ISBN 978-966-622-910-9

12. Постанова Національної комісії регулювання електроенергетики України від 17.02.2011 р. «Про затвердження Звіту про діяльність Національної комісії регулювання електроенергетики України у 2010 році»

13. 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. ISBN 978-617-7897-02-5

14. Александровская Л.Н., Афанасьева А.П., Лисов А.А. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем: М. Логос, 2001. 208 с.

15. Биллinton Р., Аллан Р. Оценка надежности электроэнергетических систем: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.

16. Гук Ю.Б., Казак Н.А., Мясников А.В. Теория и расчет надежности систем электроснабжения. М.: Энергия, 1970. 176 с.

17. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 318 с