

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до курсу лекцій з дисципліни
" НАДІЙНІСТЬ І ДІАГНОСТИКА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ"

(для здобувачів вищої освіти спеціальності 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка)
(Електронне видання)

Укладач Н. М. Філімоненко, доц., канд. техн. наук,

ЗАТВЕРДЖЕНО
на засіданні кафедри
електричної інженерії
Протокол № 5 від 07.12.2023р.

Київ 2023

УДК 621.311

Методичні вказівки до курсу лекцій з дисципліни "Надійність і діагностика електрообладнання" (для здобувачів вищої освіти спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)/ Укладач Н. М. Філімоненко. – Київ: Вид-во СНУ ім. В. Даля. – 98 с.

Розглянуто основні поняття та засади теорії надійності, класифікацію та причини відмов в системах електропостачання, потоки відмов і відновлень та їх властивості та характеристики. Розглянуті питання надійності електричних мереж на пристроїв релейного захисту та автоматики.

У конспекті також розглядаються питання технічного обслуговування та діагностики стану електроустаткування.

©СНУ ім. В. Даля, 2023

Укладач

Н. М. Філімоненко, к.т.н., доц.

Рецензент

О. С. Кроль, д.т.н., проф.

ЗМІСТ

Назва розділу	Стор.
ЛЕКЦІЯ 1 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПОНЯТЬ ТА ТЕРМІНІВ	4
ЛЕКЦІЯ 2 КЛАСИФІКАЦІЯ ВІДМОВ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	10
ЛЕКЦІЯ 3 ВІДМОВИ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	16
3.1 Причини та характер відмов основних елементів систем електропостачання	16
3.2 Показники надійності елемента СЕП та інтенсивність відмов	18
ЛЕКЦІЯ 4 НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ СЕП	22
4.1 Номенклатура показників надійності елементів СЕП	22
4.2 Потік відмов і відновлень, їх властивості і характеристики	24
ЛЕКЦІЯ 5 ЗАКОНИ РОЗПОДІЛУ ВИПАДКОВОЇ ВЕЛИЧИНИ В ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ	30
ЛЕКЦІЯ 6 ВИЗНАЧЕННЯ ОБСЯГУ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ТА ДОВІРЧИХ ІНТЕРВАЛІВ ДЛЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ	39
ЛЕКЦІЯ 7 ЗАГАЛЬНА МОДЕЛЬ ВІДМОВ УСТАТКУВАННЯ	44
ЛЕКЦІЯ 8 ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ	49
8.1 Визначення надійності електричних мереж з урахуванням навмисних відключень	49
8.2 Надійність функціонування пристроїв релейного захисту й автоматики і комутаційної апаратури	54
ЛЕКЦІЯ 9 КОЕФІЦІЄНТ НЕЗАБЕЗПЕЧЕНОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЄЮ	60
ЛЕКЦІЯ 10 НАДІЙНІСТЬ І ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ УСТАТКУВАННЯ	63
ЛЕКЦІЯ 11 ВІРОГІДНІСТЬ ДІАГНОСТИКИ	75
ЛЕКЦІЯ 12 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З ВИСОКОЮ НАПРУГОЮ	83
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	96

ЛЕКЦІЯ 1

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПОНЯТЬ ТА ТЕРМІНІВ

Сучасна нормативна база України з питань надійності ґрунтується на ДСТУ 2860.94 «Надійність техніки. Терміни та визначення».

В ГОСТ 27.002–83 надійність визначається, як «властивість об'єкта зберігати в часі в встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах застосування, технічного обслуговування, ремонтів, зберігання і транспортування».

Говорячи про об'єкти, можна мати на увазі і конкретний об'єкт (наприклад, лінія № 205), і безліч конкретних об'єктів (наприклад, вимикачі серії ВВБ – 220 випуску 1977 р.), і певний клас об'єктів, реальних або проєктованих, що відповідають заданій структурі і складу елементів (наприклад, спрощені підстанції 110 кВ без вимикачів на стороні вищої напруги). Структура і взаємодія елементів об'єкта визначають його модель надійності.

В моделях надійності широко використовують поняття «елемент» і «система». Об'єкт, надійність якого розглядається незалежно від надійності його частин, а тільки залежно від його функціональної ролі і місця в системі або установці, називають елементом. Сукупність взаємозалежних елементів або об'єктів, призначених для виконання певного кола завдань, що мають єдине керування функціонуванням і розвитком, називають системою.

Устаткування електроенергетичних систем ϵ , з одного боку, елементом відповідної системи або підсистеми, а з іншого боку, – виробом, тобто об'єктом, надійність якого розглядається незалежно від його ролі в системі, але відповідно до технічних умов і ГОСТ на продукцію даного типу. Виробами ϵ всі машини, апарати і інше встаткування, що поставляють заводи – виготовлювачі.

Відповідно до ГОСТ 27.002–83 надійність – комплексна властивість, що містить в собі безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збережездатність.

Надійність електроенергетичних систем – також комплексна властивість, що включає в себе безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність, збережездатність, стійкоздатність, режимну керованість, живучість і безпеку.

Безвідмовність – властивість об'єкта безупинно зберігати працездатний стан протягом деякого часу або деякого наробітку.

Працездатний стан (працездатність) – стан об'єкта, при якому значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати задані функції, відповідають вимогам нормативно-технічної і (або) конструкторської документації.

Наробіток – тривалість або обсяг роботи об'єкта.

Довговічність – властивість об'єкта зберігати працездатність до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту.

Граничний стан – такий стан об'єкта, при якому його подальше застосування по призначенню неприпустиме або недоцільне, або відновлення неможливе або недоцільне.

Ремонтпридатність – властивість об'єкта, що полягає в пристосованості до попередження і виявлення причин виникнення відмов, ушкоджень, до підтримки і відновлення працездатності шляхом технічного обслуговування і ремонтів.

Відмова працездатності – подія, що полягає в переході об'єкта з одного рівня працездатності на іншій, більш низький.

Відмова функціонування – подія, що полягає в переході об'єкта з одного відносного рівня функціонування на іншій, більш низький. Під відносним рівнем функціонування розуміється відношення фактичного рівня до необхідного в цей момент часу. Відмови бувають повні і часткові. Часткова відмова працездатності переводить об'єкт в стан часткової працездатності. Повні відмови приводять

об'єкт до непрацездатного стану.

Непрацездатний стан – стан об'єкта, при якому він не здатний виконувати всі задані функції.

Працездатний об'єкт може бути в робочому і неробочому стані. В робочому стані він виконує задані функції, в неробочому – не виконує.

Неробочий стан містить в собі стани попереджувального ремонту, аварійного ремонту, аварійного простою і залежного простою.

Робочий стан об'єкта містить в собі наступні режими:

- нормальний, коли забезпечуються значення заданих параметрів режиму роботи і резервування в встановлених межах;
- ремонтний, коли частина елементів об'єкта перебуває в стані попереджувального або аварійного ремонту;
- аварійний – від моменту виникнення відмови елемента до моменту локалізації відмови;
- післяаварійний – від моменту локалізації відмови до встановлення заданого режиму.

Збережездатність – це властивість об'єкта зберігати значення показників безвідмовності, довговічності і ремонтпридатності протягом і після зберігання і (або) транспортування.

Стійкоздатність – властивість системи безупинно зберігати стійкість протягом деякого інтервалу часу.

Стійкість – здатність системи переходити від одного стійкого режиму до іншого при різних збурюючих впливах.

Режимна керованість – це властивість системи забезпечувати включення, відключення і зміну режиму роботи елементів за заданим алгоритмом.

Живучість – властивість системи протистояти великим збурюванням режиму, не допускати їх ланцюгового розвитку і масового відключення споживачів, не передбаченого алгоритмом роботи протиаварійної автоматики.

Безпека визначається як властивість об'єкта не створювати небезпеки для людей і навколишнього середовища в всіх можливих режимах роботи і аварійних

ситуацій.

Причинами відмов устаткування є uszkodження або несправності.

Під uszkodженнями в енергетиці звичайно розуміють руйнування встаткування, поломку деталей, порушення цілості електричних і магнітних ланцюгів, псування ізоляції.

Під несправностями – разрегулювання механізмів без руйнування і псування та ін. Ушкодження і несправності, в свою чергу, можуть виникнути через дефекти встаткування, тобто через:

- невідповідність його встановленим вимогам при випуску з заводу – виготовлювача (брак продукції);
- аварійні (нерозраховані) впливи навколишнього середовища;
- неправильне транспортування, монтаж, обслуговування і ремонт.

Відмова електроенергетичної установки в виконанні заданих функцій (відмова функціонування) настає в результаті відмов:

- устаткування;
- суміжних установок;
- протиаварійної автоматики.

А також при нерозрахованих зовнішніх впливах або при неможливості задоволення вимог до кількості і якості електроенергії.

При наявності в установці резервних елементів, при можливості заміни встаткування, що відмовило, і ремонту без припинення роботи надійність установки буде визначатися не тільки частотою відмов, але і швидкістю відновлення основних і резервних елементів.

Рівень розладу функціонування установок енергосистем при аваріях і порушеннях в роботі називають глибиною.

На електростанціях глибина аварій характеризується рівнем зниження розташованої потужності і виробітки електроенергії, на підстанціях – кількістю відключених споживачів і недовідпуском енергії, на лініях електропередачі – числом відключених ланцюгів і рівнем зниження пропускної здатності, в електричних мережах – обсягом відключених споживачів і районних підстанцій,

в системах електропостачання – рівнем аварійних обмежень споживачів, в енергосистемах і об'єднаннях – рівнем дефіциту потужності і енергії, а також рівнем зниження частоти.

Глибина аварій залежить від тривалості і способу відновлення функціонування установок. В деяких установках, таких як установки власних потреб АЕС, навіть короточасне зниження напруги при коротких замиканнях приводить до порушення роботи механізмів.

Відключення ушкодженої ділянки мережі дією релейного захисту не відновлює працездатності механізму навіть при наявності джерел живлення, що працюють в режимі постійно включеного резерву.

Для більшості ж установок таке зниження напруги не є відмовою і глибина аварій при цьому оцінюється тільки для споживачів, яких відключають.

Функціонування установок відновлюється шляхом відключення ушкоджених елементів дією релейного захисту, засобами протиаварійної автоматики (АПВ, АВР), шляхом оперативних перемикачів, які виконує черговий персонал, диспетчер електричної мережі або енергосистеми, а також проведенням аварійно - відбудовних ремонтів.

Глибина аварій з порушенням живлення споживачів визначається ступенем резервування встаткування і установок. На електростанціях є резерв генераторної потужності. Цей резерв закладений в обертових і зупинених турбо- і гідрогенераторах, в гарячих і холодних котлоагрегатах, в активній зоні енергетичних ядерних реакторів, в спеціальних газотурбінних установках.

На підстанціях і в електромережах є явний і схований резерв пропускної здатності, що полягає в недовантаженні робочих і резервних ліній і трансформаторів, в можливому аварійному перевантаженні елементів, що залишилися в роботі.

Частота, тривалість і глибина аварій в енергосистемах визначаються в великому ступені наявністю планових і позапланових відключень і зупинок устаткування, які послабляють ступінь резервування установок.

Планові відключення здійснюють відповідно до графіка поточних і

капітальних ремонтів, що коректується залежно від виникнення або відсутності аварій напередодні наміченого відключення.

Позапланові відключення виконують при необхідності плавки ожеледі, усунення виявлених дефектів, небезпечних режимів або при настанні граничних станів.

Відмови спрацьовування, неселективні і помилкові спрацьовування пристроїв релейного захисту, а також помилки персоналу збільшують глибину аварій, сприяють розвитку важких ланцюгових аварій, таких як аварії на північному сході США і Канади, і в Москві (2005р.).

Виникнення подібних аварій в енергосистемах більшості розвинених країн свідчить про велику значимість проблеми надійності в енергетиці на сучасному етапі її розвитку. Особливо гостро стає завдання забезпечення живучості енергосистем, керованості установок, безпеки встаткування і безперебійності електропостачання споживачів.

ЛЕКЦІЯ 2

КЛАСИФІКАЦІЯ ВІДМОВ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Відмова є одним з основних понять теорії надійності. Поняття про повну і часткову відмову відбиває ту обставину, що система електропостачання (СЕП) та її частини є об'єктом з рівнем ефективності функціонування, що змінюється. Наприклад, при ушкодженні секціонованої ЛЕП відключається тільки частина лінії, що означає часткову відмову ЛЕП. Обмежене і неякісне електропостачання є частковими відмовами функціонування СЕП, на відміну від повної перерви електропостачання, коли споживач повністю втрачає електроенергію.

Проведемо класифікацію відмов.

За тривалістю розрізняють наступні відмови в електропостачанні:

- тривалі перерви в електропостачанні споживача, обумовлені ліквідацією масових ушкоджень в СЕП, викликаних, як правило, гололідно-вітровими руйнуваннями опор і проводів ЛЕП (на період до декількох діб);

- припинення живлення споживачів на час відновлення працездатності елемента, що відмовив, СЕП (4–24 год);

- припинення живлення споживачів на час, необхідний для включення резервного живлення вручну, діями оперативно-виїзних бригад підприємств електричних мереж (1,5–6 год);

- припинення живлення на час оперативних перемикачів, виконуваних черговим персоналом на підстанціях (кілька хвилин);

- короткочасна відмова в електропостачанні споживача на час автоматичного введення резервного живлення або автоматичного відключення ушкодженої ділянки мережі (кілька секунд).

З погляду на інформування відмови бувають:

- раптові, коли споживач не одержує ніякої інформації про відмову;
- позапланові відключення, відомості про які надходять споживачеві незадовго до моменту відключення;
- планові відключення, про які споживача попереджують завчасно.

Стосовно до відмови і ушкодження застосовують такі поняття, як критерій, причина, ознаки (прояв), характер і наслідки.

Критерій відмови – працездатний стан об'єкта визначається переліком заданих параметрів і припустимих меж їхньої зміни – допусками. Порухенням працездатного стану вважається вихід хоча б одного параметра за встановлений допуск. Ознаки, що дозволяють встановити факт порушення працездатного стану, є критеріями відмов. Вони зазначені в нормативно-технічній документації на об'єкт.

Причинами відмов можуть бути дефекти, допущені при конструюванні, виробництві і ремонтах, порушенні правил і норм експлуатації, різного роду ушкодження, а також природні процеси зношування і старіння.

Ознаками відмови (ушкодження) називають безпосередні, або непрямі впливи на органи почуттів спостерігача явищ, характерних для непрацездатного стану об'єктів або зв'язаних з ним процесів. Наприклад, зміна показників контрольних приладів, дія сигнального пристрою, поява характерних шумів.

Характером відмови (ушкодження) називають конкретні зміни в об'єкті, пов'язані з виникненням відмови (ушкодження), наприклад обрив проведення.

До наслідків відмови відносяться явища, процеси і події, що виникли після відмови і безпосередньо пов'язані з ним (зупинка двигуна, відтавання холодильника та ін.). Іноді наслідки відмови є його ознаками.

Для об'єктів енергетики основною нормативно-технічною документацією, що встановлює критерії відмов, є «Інструкція з розслідування і обліку аварій та інших порушень в роботі електростанцій, електричних і теплових мереж, енергосистем і енергооб'єднань». Відповідно до цього документа порушення роботи об'єктів енергетики залежно від характеристики порушення ступеня ушкодження і їхніх наслідків вважають аваріями, відмови в роботі I ступеня,

відмови в роботі II ступеня, споживчі відключення.

Аварії бувають станційні, електромережеві, тепломережеві і системні. На підприємстві електричної мережі аварією вважають порушення нормальної роботи електричної мережі напругою 6 кВ і більше, що викликало:

- перерву електропостачання одного і більше споживачів I категорії, що мають живлення від двох незалежних джерел, на строк, що перевищує час дії пристроїв автоматичного повторного включення (АПВ) або автоматичного введення резерву (АВР); при невідповідності схеми живлення споживачів I категорії вимогам Правил пристроїв електроустановок (ПУЕ) (тобто не забезпеченим електропостачанням від двох незалежних джерел живлення) на строк більше 2,5 год, а для сільськогосподарських споживачів – більше 10 годин;

- перерву електропостачання одного і більше споживачів II категорії на строк більше 2,5 год, а для сільськогосподарських споживачів II категорії – більше 10 год;

- перерву електропостачання одного і більше споживачів III категорії на строк більше 24 год;

- недовідпущення електроенергії споживачам в розмірі 20 тис. кВт·год і більш незалежно від тривалості перерви електропостачання;

- руйнування силового трансформатора потужністю 10 МВА і більше, якщо відновлення його неможливе або недоцільне;

- ушкодження ПЛ 110 кВ і вище, що вимагає відновлення протягом 24 годин, а також ушкодження кабельної лінії 110 кВ, що вимагає відновлення протягом 36 годин;

- пожежу на підстанції з вищою напругою 110 кВ і більше, що викликала її знеструмлення на строк 8 годин і більше.

Системна аварія це:

- порушення стійкості енергосистеми, поділ її на частини, що викликала відключення споживачів на загальну потужність більше 5 % від навантаження енергосистеми;

- робота енергосистеми з частотою нижче 49,5 Гц тривалістю більше 1 годин;

- масові відключення або uszkodження ЛЕП напругою 6 кВ і вище через стихійне явище, які призвели до відключення споживачів на загальну потужність більше 10 % навантаження енергосистеми.

Відмовою в роботі першого ступеня є:

- порушення нормальної роботи електричної мережі, що викликало перерву електропостачання одного і більше споживачів I категорії, при невідповідності схеми їхнього живлення ПУЕ, або одного і більше споживачів

II категорії на строк 0,5–2,5 год, а для сільськогосподарських споживачів – 2–10 год; одного і більше споживачів III категорії на строк 8–24 год;

- недовідпущення електроенергії споживачам 5–20 тис. кВт·год;

- uszkodження основного електроустаткування мереж, що вимагає відбудовного ремонту в встановлений термін;

- uszkodження повітряної або кабельної лінії 35, 110 кВ, що вимагає відбудовного ремонту в строк до 24 (36 год).

До відмов в роботі другого ступеня належать порушення нормальної роботи електричних мереж, в тому числі:

- перерви в електропостачанні споживачів, що не є аварією I ступеня; uszkodження деяких видів устаткування;

- недовиконання диспетчерського графіка електронавантаження або оперативного завдання диспетчера;

- автоматичне відключення або помилкове відключення встаткування персоналом;

- знеструмлення ділянок електромережі напругою нижче 6 кВ.

Аварії і відмови залежно від причин винуватців їхнього виникнення бувають з вини:

- персоналу електропідприємства або енергоуправління;

- інших організацій (заводів-виготовлювачів, проектних, будівельних,

монтажних та ін.);

- сторонніх організацій і осіб;
- через стихійні явища.

ЛЕКЦІЯ 3

ВІДМОВИ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

3.1 Причини та характер відмов основних елементів систем електропостачання

Самим ненадійним елементом систем електропостачання (СЕП) є лінії електропередачі (ЛЕП) через розосередженість по території і впливи на них різних зовнішніх факторів. Так, в міських електромережах близько 85 % відключень доводяться на ЛЕП. В сільських мережах ця цифра досягає 90–95 %.

Основними причинами ушкоджень повітряних ліній (ПЛ) є:

- грозові перекриття ізоляції;
- ожеледь-ізморозові відкладення;
- навантаження від вітру;
- вібрація і танок проводів;
- загоряння дерев'яних опор;
- ослаблення механічної міцності деталей опор;
- ушкодження опор і проводів автотранспортом і механізмами та ін.

Зовнішні впливи приводять до перекриття ізоляції, розриву ізоляторів,

оплавленню металевих деталей, обриву проводів, ослабленню їхньої механічної міцності при вібрації і танці в результаті розламу окремих дротів, поломці деталей, падінню стійок разом з проводами. Найбільш важкі наслідки викликають ожеледь-вітрові навантаження.

Порушення в нормальній роботі ПЛ викликано рядом факторів:

- перевищенням фактичних зовнішніх навантажень розрахункових значень;
- дефектами, що допускають при виготовленні опор, проводів ізоляції ПЛ (застосування низьких марок цементу і металу, порушення центрування арматури в залізобетонних виробках, неякісне просочення деревини антисептиками, неякісне з'єднання дротів при виготовленні проведення та ін.);
- неправильним застосуванням типів проводів, опор, ізоляторів по природно-кліматичним зонам країни;
- використання глухих затискачів замість затискачів обмеженої міцності закладення та ін.;
- порушенням правил монтажу і спорудження ПЛ (неправильне виведення стійок залізобетонних опор, недостатнє поглиблення опор при установці, розкачування проводів по траверсах опор; неправильна установка стріл прогину тощо);
- порушеннями при прийманні лінії в експлуатацію (невиконання перевірки дефектних ізоляторів і термозварних з'єднань, невідповідність застосованих типів виробів закладеним в проектах);
- недоліками експлуатації (недотримання строків, обсягів і складу перевірок, вимірів, заміни дефектного встаткування, капітальних ремонтів, фарбування, підтяжки і інших робіт на ПЛ);
- порушеннями сторонніми організаціями і особами (наїзди на опори, проїзди під ПЛ високогабаритних механізмів, накиди).

Основною причиною ушкоджень кабельних ліній (КЛ) є порушення їхньої механічної міцності будівельними машинами і механізмами при ґрунтових роботах. З цієї причини в міських електромережах відбувається близько 60–70 % усіх ушкоджень КЛ. Іншими причинами є старіння міжфазної і поясної ізоляції, інтенсивна корозія (електрична і хімічна) покриття, перевантаження кабелю, проникнення вологи в кабель, порушення ізоляції гризунами.

Пошкоджуваність КЛ залежить від способу прокладки КЛ (в землі, блоках, трубах, тунелях), різниці горизонтальних рівнів ділянки КЛ (при великих

перепадах відбувається набрякання масла і осушення ізоляції), агресивності навколишнього середовища, величини блукаючих струмів і наявності захисту від них, інтенсивності ведення будівельних робіт в зоні прокладки КЛ, строку експлуатації, режиму роботи.

Електричні пробої звичайно відбуваються не в цілому кабелі, а в місцях установки сполучних муфт, на кінцевих вирвах, вертикальних ділянках кабелю. Силові трансформатори ушкоджується значно рідше, ніж лінії електропередачі, однак відмова трансформатора веде до важких наслідків і відновлення його працездатності вимагає тривалого часу.

Основні причини ушкодження трансформаторів:

- ушкодження ізоляції обмоток трансформатора через дефекти конструкції і виготовлення, при впливі зовнішніх перенапруг в мережі, струмів коротких замикань;

- ушкодження перемикачів (в основному регульованих під навантаженням), також викликаних конструктивними і технологічними дефектами;

- ушкодження введів, в основному при впливі зовнішніх перенапруг в мережі (перекриття зовнішньої або внутрішньої ізоляції, механічні ушкодження, неякісні контактні з'єднання).

Ремонт трансформаторів великих габаритів виконують на місці. Такий ремонт пов'язаний з необхідністю виїмки керна трансформатора, вимагає застосування піднімальних механізмів і триває іноді кілька діб.

Ремонт трансформаторів малих габаритів на напругу 6–20 кВ виконують централізовано в майстернях підприємств електричних мереж. Ушкоджений трансформатор замінюють іншим, працездатним.

Основні способи підвищення надійності експлуатації трансформаторів:

- ретельне приймання в експлуатацію з виконанням контрольних випробувань;

- періодичні огляди і перевірки в процесі експлуатації з виконанням необхідних строків і обсягу випробувань;

- дотримання режимів роботи трансформатора, які не допускають значного перевантаження на тривалий час;
- установка в мережі засобів зниження потужності коротких замикань і величини перенапруг.

Відмови комутаційних апаратів (вимикачів, роз'єднувачів, відмикачів і віддільників) відбуваються при відключенні коротких замикань, виконанні ними різних операцій, а також в стаціонарному стані.

Основна причина ушкоджень комутаційних апаратів – механічні ушкодження, пов'язані з недосконалістю конструкції, порушенням технології виготовлення або правил експлуатації. Електричні ушкодження комутаційних апаратів обумовлені перекриттям ізоляції при зовнішніх і внутрішніх перенапругах, пробоем внутрибакової ізоляції вимикачів та ін.

Значна частина лінійних роз'єднувачів 6–10 кВ ушкоджуються через недоліки їхнього конструктивного виконання.

3.2 Показники надійності елемента СЕП та інтенсивність відмов

Надійність системи залежить від надійності її елементів; елемент – це частина системи, надійність якої вивчається незалежно від надійності складових його частин.

При аналізі надійності електричних мереж як елементи розглядають ЛЕП, електроустаткування (трансформатори, вимикачі, двигуни), функціональні вузли, відмови яких призводять до однакових наслідків (осередки розподільних пристроїв, шини підстанцій тощо), а також виробничі установки.

Для характеристики надійності елементів потрібно встановити спостереження за їхньою роботою. Спостереження починається від моменту $t = 0$

(тобто моменту пуску установки, продажу виробу) до закінчення строку їхнього функціонування (рис. 3.1).

В процесі функціонування елементів час від часу відбуваються відмови. Статистична обробка даних про відмови дозволяє визначити показники надійності.

Елементи

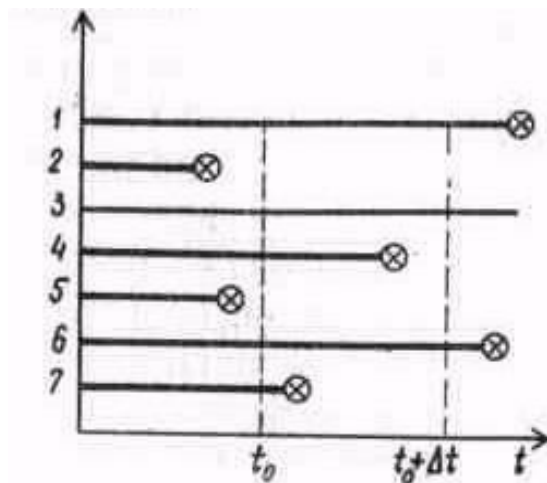


Рисунок 3.1 – Графік спостережень за випробуваннями

Значення показників надійності елементів електричних мереж наведені в довідковій літературі.

Інтенсивність відмов – це ймовірність того, що елемент, що раніше проробив безвідмовно до моменту t , відмовить в відрізку $(t + \Delta t)$ за умови, що Δt досить малий

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p(t < \varphi_1 < t + \Delta t / \varphi_1 > t)}{\Delta t} = \frac{p(t < \varphi_1 < t + dt / \varphi_1 > t)}{dt},$$

де φ_1 – випадковий інтервал часу до першої відмови.

Іншими словами, $\lambda(t)$ – це умовна ймовірність відмови після t за одиницю часу Δt за умови, що до моменту t відмови не було.

Статистичну інтенсивність відмов визначають як відношення числа елементів $n(t, \Delta t)$, що відмовили саме в інтервалі $(t, t + \Delta t)$ до числа елементів

$N(t)$, справних до моменту t

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(t, \Delta t)}{N(t) \Delta t}.$$

З досвіду відомо, що Δt повинне бути досить малим, а $n(t, t + \Delta t)$ – великим.

На основі аналізу великої кількості статистичних даних про відмови елементів СЕП доведено, що $\lambda(t)$ в часі описується кривою, що наведена на рисунку 3.2. На цій кривій можна виділити три фази з різними закономірностями зміни інтенсивності відмов.

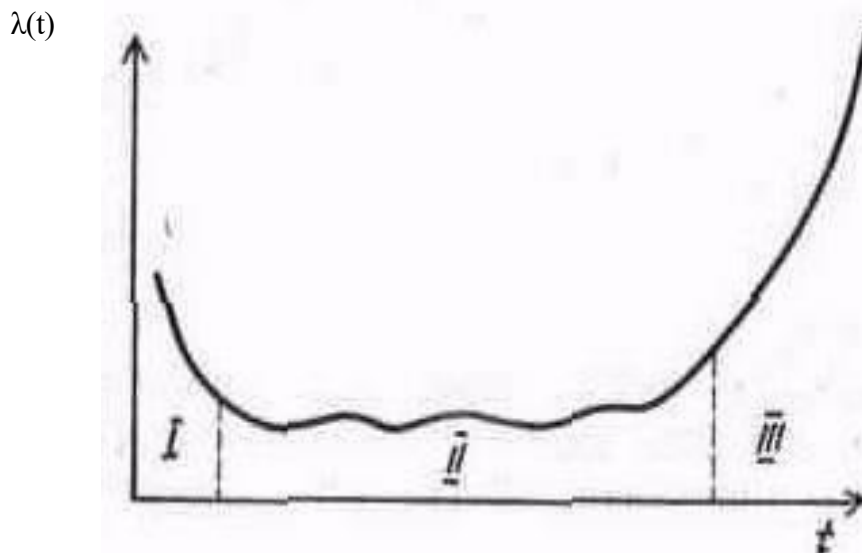


Рисунок 3.2 – Залежність інтенсивності відмов від часу

Перша фаза – прироботочні відмови. Відмови в цей період відбуваються при невідповідності параметрів елементів умовам функціонування – навантаженню, напрузі. На цій стадії в основному виявляються дефекти проектування, спорудження, монтажу. В міру їхнього усунення інтенсивність відмов падає. На цій фазі $\lambda(t)$ описується розподілом Вейбулла, або гамма-розподілом.

Друга фаза – нормальний період роботи елемента. На елемент впливають випадкові фактори і відмови відбуваються в основному за рахунок

перевищення розрахункових значень факторів, що впливають. В цей період функція не залежить від часу початку спостереження і описується експоненціальним розподілом.

Третя фаза – старіння елемента. Внаслідок зношування, втомі, тобто зміни внутрішньої структури елемента в результаті необоротних фізико-хімічних процесів, число відмов збільшується навіть при нормальній експлуатації. Умови, в яких працює елемент (агресивне середовище, підвищена вологість, механічні і електричні впливи), можуть прискорити процес старіння. Довговічність роботи елементів можна збільшити (тобто віддалити третю фазу) за рахунок заходів з захисту від впливів навколишнього середовища, охолодження, організації системи обслуговування.

Для основних елементів СЕП період приробляння триває 3–5 років. Для ПЛ на опорах з просоченої деревини старіння проявляється через 15–20 років після введення в експлуатацію. Строк старіння трансформаторів і кабельних ліній, обумовлений старінням ізоляції, становить 20–30 років. Старіння комутаційних апаратів настає через 40–50 років. Звичайно така апаратура морально застаріває раніше, ніж фізично. В основному ж елементи СЕП є високонадійними елементами, тобто такими, в яких час їхньої безвідмовної роботи T значно перебільшує час відновлення τ .

ЛЕКЦІЯ 4

НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ СЕП

4.1 Номенклатура показників надійності елементів СЕП

Ймовірність безвідмовної роботи, тобто ймовірність того, що час безвідмовної роботи буде більше часу t

$$R(t) = p(\varphi_1 > t).$$

Статистично $R(t)$ визначається як відношення числа елементів $N(t)$, що безвідмовно проробили до моменту t , до первісного числа спостережуваних елементів $N(0)$

$$\hat{R}(t) = \frac{N(t)}{N(0)}.$$

Ймовірність відмови, тобто ймовірність того, що відмова наступила до моменту t

$$F(t) = p(\varphi_1 < t).$$

Статистично $F(t)$ є відношенням елементів $n(t)$, що відмовили до моменту t , до первісного числа спостережуваних елементів $N(0)$

$$\hat{F}(t) = \frac{n(t)}{N(0)}.$$

Щільність ймовірності відмови – похідна величина від ймовірності відмови; означає ймовірність того, що відмова елемента відбудеться за одиницю часу ($t, t + \Delta t$)

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = p(t|\varphi_1(t + \Delta t)).$$

Статистично $f(t)$ визначають як відношення числа елементів $n(t, \Delta t)$, що відмовили за інтервал Δt часу, до первісного числа спостережуваних елементів

$$\hat{f}(t) = \frac{n(t, \Delta t)}{N(0)\Delta t}.$$

Показники, що були наведені раніше, пов'язані співвідношеннями, які наведені в таблиці 4.1.

Середній час безвідмовної роботи

$$T = M(\varphi) = \int_0^{\infty} R(t) dt.$$

Статистично T є відношенням часу роботи елемента до математичного очікування числа його відмов протягом цього часу.

Розглянемо показники надійності елементів СЕП для стаціонарного (сталого) режиму.

Таблиця 4.1 – Співвідношення показників надійності

Відома функція	Формули для визначення інших функцій			
	$R(t)$	$F(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$R(t)$	–	$1 - R(t)$	$-\frac{d}{dt}R(t)$	$-\frac{1}{R(t)}\frac{d}{dt}R(t)$
$F(t)$	$1 - F(t)$	–	$\frac{d}{dt}F(t)$	$\frac{1}{F(t)}\frac{d}{dt}F(t)$
$f(t)$	$\int_t^{\infty} f(x)dx$	$\int_0^t f(x)dx$	–	$\frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(x)dx}$
$\lambda(t)$	$e^{-\int_0^t \lambda(x)dx}$	$1 - e^{-\int_0^t \lambda(x)dx}$	$\lambda(t)e^{-\int_0^t \lambda(x)dx}$	–

Коефіцієнт готовності K_{Γ} визначає ймовірність знаходження елемента в працездатному стані в сталому режимі. Для будь-яких законів розподілу

$$K_{\Gamma} = \frac{T}{(T + \tau)},$$

де τ – математичне очікування часу відновлення елемента.

Коефіцієнт простою $K_{\text{пр}}$ визначає ймовірність того, що в сталому режимі в довільний момент часу елемент буде непрацездатний.

Очевидно, що

$$K_{\text{пр}} = 1 - K_{\Gamma} = \frac{\tau}{(T + \tau)}.$$

Коефіцієнт технічного використання обчислюють за формулою

$$K_{\text{ти}} = \frac{T}{(T + \tau + \eta)},$$

де τ – середній час відновлення елемента після відмови;

η – математичне очікування часу знаходження елемента в відключеному стані для виробництва профілактичних робіт.

Коефіцієнт оперативної готовності являє собою ймовірність безвідмовної роботи елемента протягом заданого часу роботи (t , Δt) в період нормального функціонування за умови, що до цього моменту елемент не відмовив

$$K_{\text{ог}} = K_{\Gamma}R(t).$$

4.2 Потік відмов і відновлень, їх властивості і характеристики

Розглянемо процес функціонування елементів, який показано на рисунку
Елемент, проработавши випадковий час T_1 , відмовляє і потім відновлюється

протягом τ_1 (рисунок 4.1). Після відновлення він функціонує знову і, проробивши якийсь час T_2 , знову виходить з ладу, відновлюється за час τ_2 тощо

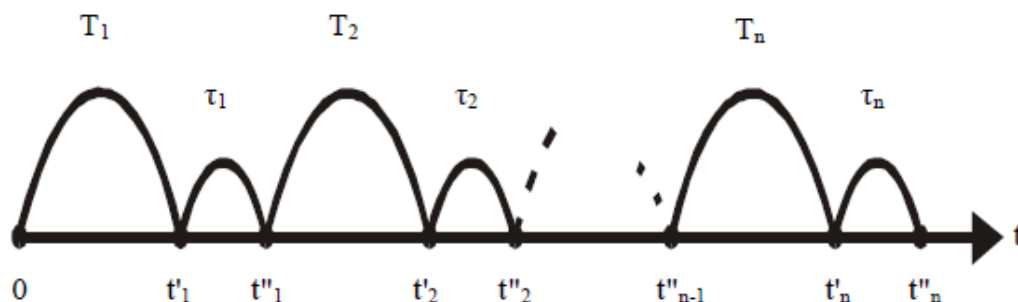


Рисунок 4.1 – Процес функціонування елемента Моменти часу

$$t'_1 = T_1;$$

$$t'_2 = T_1 + \tau_1 + T_2;$$

...

$$t'_n = T_1 + \tau_1 + T_2 + \dots + \tau_{n-1} + T_n$$

будемо називати відмовами елементів. Відмови елементів в часі утворюють потік відмов.

Потік називається стаціонарним, якщо ймовірність появи подій на інтервалі $\Theta_k(t, t + \Delta t)$ залежить тільки від Θ_k і не залежить від T , тобто стаціонарність означає, що ймовірність відмови для будь-якого інтервалу часу залежить тільки від його довжини, але не від моменту початку цього відрізка на осі часу.

Потік називається ординарним, якщо ймовірність сполучення двох і більше подій в той самий момент часу дуже мала

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=2}^{\infty} p_i(t, t + \Delta t)}{\Delta t} = 0,$$

де $p_i(t, t + \Delta t)$ – ймовірність відмов (двох і більше) елементів за час від t до

Тобто ординарність потоку відмов означає, що в момент часу Δt не може бути більше однієї відмови.

Потік подій називається потоком без післядії, якщо для будь-яких непересічних інтервалів часу кількість подій, що попадають в один з них, не залежить від кількості подій, що попадають в інші інтервали.

Відсутність післядії означає, що ймовірність настання n відмов за відрізок Δt не залежить від того, скільки було відмов і як вони були розподілені в часі, тобто всі відмови є незалежними подіями.

В реальних умовах електричних мереж жодна з зазначених властивостей в точності не дотримується. При відмові одного з елементів може відбутися перерозподіл навантаження на елементи, що залишилися, таким чином, що і ці елементи відмовлять, тобто порушиться відсутність післядії.

Фактично небезпека відмови елемента з його «віком» збільшується (нестационарність процесу). Порушується і властивість ординарності. Однак дослідження показали, що не буде великої помилки в інженерних розрахунках, якщо прийняти, що ці умови справедливі.

Потік відмов, що задовольняє властивостям стаціонарності, відсутності післядії і ординарності, називають найпростішим потоком.

Допускається, що властивості найпростішого потоку відмов мають елементи електричних мереж, що перебувають в нормальному періоді роботи і мають достатній резерв з потужності (пропускної здатності).

Для характеристики потоку відмов вводиться параметр потоку відмов елемента

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p(t, t + \Delta t)}{\Delta t} = \frac{p(t, t + dt)}{dt}.$$

Статистично параметр потоку відмов визначається відношенням числа елементів n , що відмовили в інтервалі $(t, t + \Delta t)$, до числа елементів, що перебувають під спостереженням $N(t)$, за умови, що всі елементи, які вийшли з ладу, замінюють працездатними

$$\hat{\omega}(t) = \frac{n(t, t + \Delta t)}{N(t)}.$$

При найпростішому потоці відмов параметр потоку і інтенсивність відмов не залежать від часу і рівні між собою

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

В цьому випадку ймовірність безвідмовної роботи елемента описується експоненціальним законом розподілу.

Відновлення елемента вимагає часу, яким не можна зневажити, яке порівнянне з часом функціонування елемента.

Час відновлення складається звичайно з часу, який потрібен щоб знайти несправний елемент або виявити, що він несправний, і часу, що потрібен, щоб замінити елемент, що відмовив новим або зробити ремонт елемента, що відмовив.

Моменти часу

$$t''_1 = T_1 + \tau_1;$$

$$t''_2 = T_1 + \tau_1 + T_2 + \tau_2;$$

...

$$t''_n = T_1 + \tau_1 + T_2 + \dots + \tau_{n-1} + T_n + \tau_n$$

будемо називати часом відновлення і вони утворять потік відновлень. Припускаємо, що величини T_i і τ_i незалежні.

Ймовірність відновлення елемента за заданий час, тобто ймовірність того, що час відновлення менше заданого

$$G(t) = p(\varphi_B < t),$$

де φ_B – випадковий інтервал часу від початку до закінчення відновлення.

Статистично $G(t)$ визначають як відношення числа випадків $m(t)$, коли відновлення елемента тривало менше інтервалу t , до загального числа спостережуваних випадків відновлення $M(0)$

$$\hat{G}(t) = \frac{m(t)}{M(0)}.$$

Середній час відновлення або математичне очікування часу відновлення

$$\tau = M(\varphi_B) = \int_0^{\infty} G(t) dt.$$

Статистично τ – сумарний час відновлення, зафіксований за M випадків відновлення, віднесений до кількості цих випадків

$$\hat{\tau} = \sum_{i=1}^M \frac{\varphi_{B_i}}{m}.$$

Інтенсивність відновлення – аналогічно інтенсивності відмов подається як умовна ймовірність відновлення елемента за проміжок $(t, t+\Delta t)$ за умови, що до цього моменту він відновлений не був

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p(t < \varphi_B < t + \Delta t / \varphi_B > t)}{\Delta t} = \frac{p(t < \varphi_B < t + dt / \varphi_B > t)}{dt},$$

$$\hat{\mu}(t) = \frac{m(t, \Delta t)}{M(t) \Delta t}.$$

Як параметр експоненціального розподілу відновлення використовують

інтенсивність відновлення μ .

Ймовірність відновлення елемента за час від 0 до t

$$G(t) = 1 - e^{-\mu t},$$

середній час відновлення

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

Для інженерних розрахунків надійності в електричних мережах приймають, що час безвідмовної роботи T і час відновлення t розподіляються за експоненціальним законом.

ЛЕКЦІЯ 5

ЗАКОНИ РОЗПОДІЛУ ВИПАДКОВОЇ ВЕЛИЧИНИ В ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ

Розглянемо декілька законів розподілу випадкової величини, які використовуються в теорії надійності.

Експоненціальний розподіл визначається одним параметром – інтенсивністю відмов λ , а показники надійності дорівнюють:

- ймовірність безвідмовної роботи в інтервалі від 0 до t

$$R(t) = e^{-\lambda t};$$

- ймовірність відмови (рис. 5.1)

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t};$$

- щільність ймовірності відмови (рис. 5.2)

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t};$$

- середній час безвідмовної роботи

$$T = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) dt = \frac{1}{\lambda};$$

- інтенсивність відмов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{\int_0^{\infty} f(x) dx} = \frac{f(x)}{R(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda.$$

Останній вираз припускає, що встаткування, в якого час безвідмовної роботи має експоненціальний розподіл, не старіє. Якщо об'єкт почав функціонувати в нескінченно віддалений момент часу в минулому, то кількість відмов в інтервалі $[0, t]$ залежить лише від його довжини, тобто розглядається стаціонарний стан.

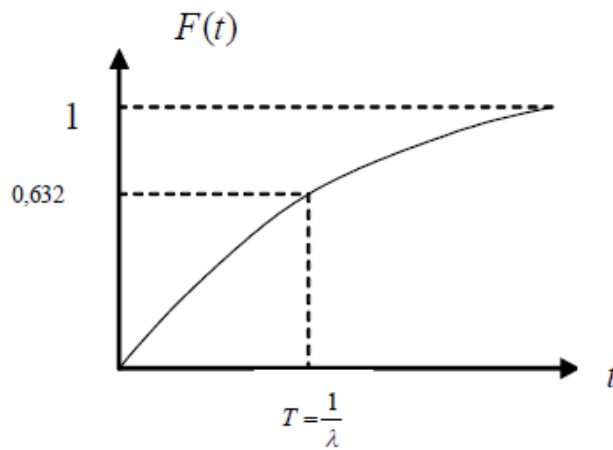


Рисунок 5.1 – Графік залежності ймовірності відмови від часу

Тому в електроенергетиці при вирішенні практичних завдань інтенсивність відмов вважають постійною протягом тривалого часу.

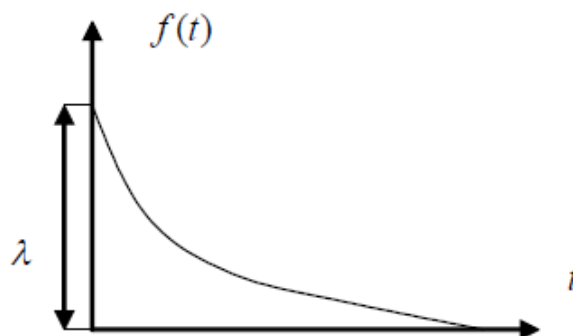


Рисунок 5.2 – Залежність щільності ймовірності відмови від часу

Розглянемо рівномірний закон розподілу випадкової величини, який досить часто використовується в теорії надійності.

Визначимо основні характеристики: – щільність ймовірності відмови

$$f(t) = \frac{1}{T},$$

де T – час функціонування елемента;

– ймовірність відмови на інтервалі $t = 0$, до t

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = \int_0^t \frac{1}{T} dt = \frac{t}{T} \Big|_0^t = \frac{t}{T};$$

– ймовірність безвідмовної роботи

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \frac{t}{T};$$

– середній час безвідмовної роботи

$$T_{\text{ср}} = \int_0^T \left(1 - \frac{t}{T}\right) dt = T - \frac{t^2}{2T} \Big|_0^T = T - \frac{T^2}{2T} = \frac{T}{2};$$

– інтенсивність відмов

$$\lambda(t) = \frac{\frac{1}{T}}{1 - \frac{t}{T}} = \frac{T}{T(T-t)} = \frac{1}{T-t}.$$

На рисунку 5.3 наведено графік щільності ймовірності відмови, а на рисунку 5.4 – графік ймовірності відмови.

За допомогою розподілу Вейбула досліджують інтенсивність відмов для періодів приробляння і старіння.

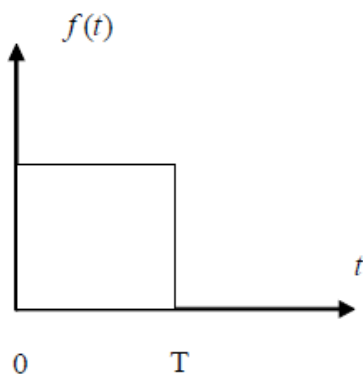


Рисунок 5.3 – Графік щільності ймовірності відмови

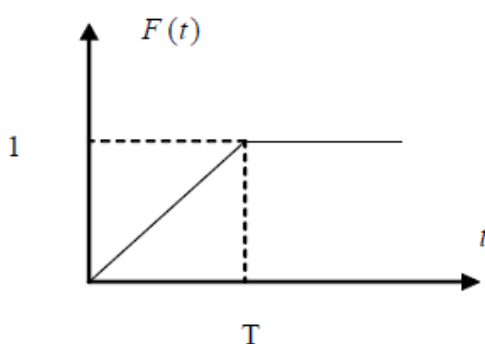


Рисунок 5.4 – Графік ймовірності відмови

Щільність відмов (рис. 5.5)

$$f(t) = \frac{dR(t)}{dt} = \frac{b}{a} \cdot t^{b-1} e^{-t^b/a^{-1}},$$

де a і b – постійні розподілу.

При $b = 1$ розподіл Вейбула перетворюється в експоненціальний; при $b < 1$ – підвищена інтенсивність відмов $\lambda(t)$ в період приробляння; при $b = 1,5$ інтенсивність відмов $\lambda(t)$ майже постійна; при $b=2,0$ мало залежить від часу, підвищуючись при тривалій експлуатації; при $b = 3,0$ $\lambda(t)$ істотно залежить від часу.

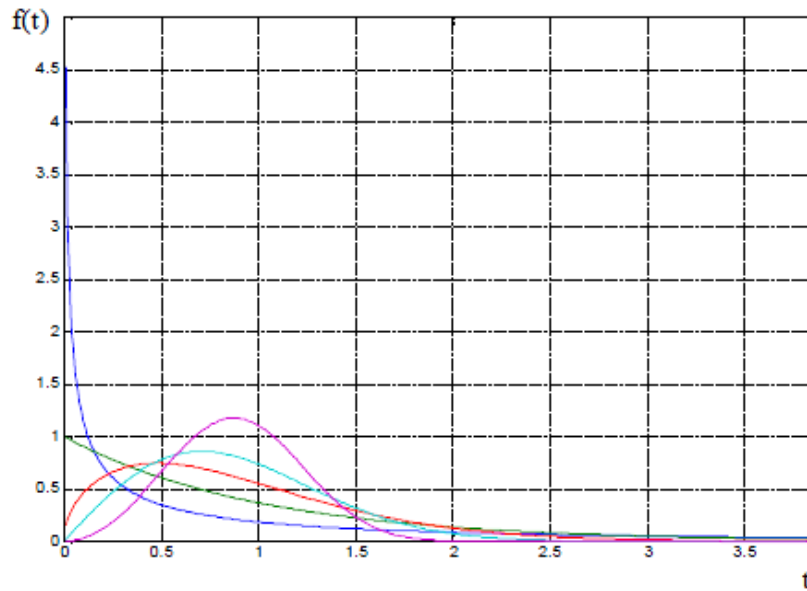


Рисунок 5.5 – Графік щільності відмов

Для розподілу Вейбула:

– ймовірність безвідмовної роботи

$$R(t) = e^{-t^b a^{-1}};$$

– ймовірність відмови

$$F(t) = 1 - e^{-t^b a^{-1}};$$

– середній час безвідмовної роботи

$$T = a^{b^{-1}} \Gamma(b^{-1} + 1),$$

– де $\Gamma(b^{-1} + 1)$ – гама-функція,

$$\Gamma(b^{-1} + 1) = \int_0^{\infty} x b^{-1} e^{-x} dx,$$

– інтенсивність відмов (рис. 5.6)

$$\lambda(t) = ba^{-1}t^{b-1}.$$

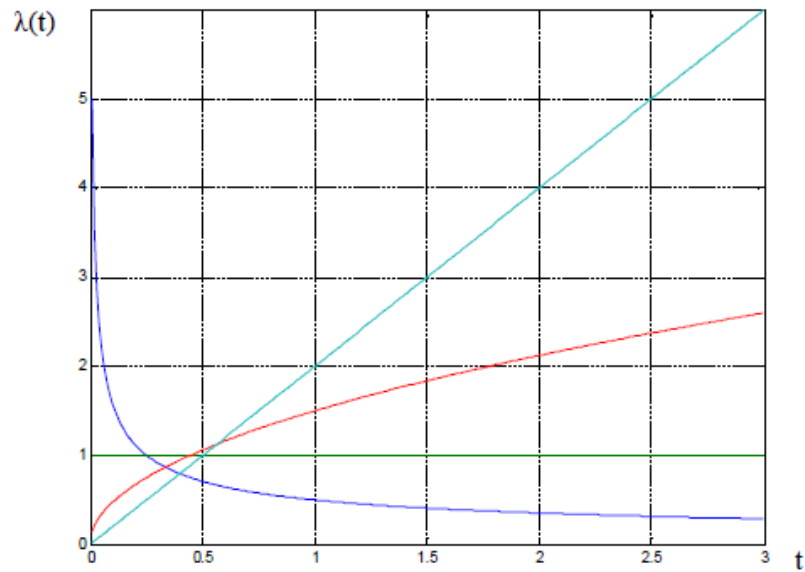


Рисунок 5.6 – Графік інтенсивності відмов

Гамма-розподіл характеризується щільністю розподілу

$$f(t) = \frac{b^a}{\Gamma(a)} t^{a-1} e^{-bt},$$

де $\Gamma(a) = \int_0^{\infty} x^{a-1} e^{-x} dx$ - гама функція.

Для теорії надійності практичний інтерес представляє випадок, коли a – ціле число. При $a=1$ гама-розподіл перетворюється в експоненціальний. При $a>1$ гама-розподіл є розподілом суми a незалежних випадкових величин, кожна з яких має експоненціальний розподіл:

$$f(t) = b \frac{(bt)^{a-1}}{(a-1)!} e^{-bt};$$

$$R(t) = e^{-bt} \sum_{i=0}^{a-1} \frac{(bt)^i}{i!};$$

$$\lambda(t) = \frac{b(bt)^{a-1}}{(a-1)! \sum_{i=0}^{a-1} \frac{(bt)^i}{i!}}; \quad T = ab^{-1}.$$

Біноміальний розподіл може бути використано, коли елементи системи перебувають в стані працездатності або непрацездатності і ймовірність настання того або іншого стану для всіх елементів однакова і незмінна. Ймовірності деякої події системи являють собою члени розкладання бінома

$(p + q)^n$, де p і q – відповідно ймовірності працездатного і непрацездатного станів кожного елемента.

Число комбінацій з n елементів при m працездатних елементах становить число сполучень з n по m

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

За теоремою множення ймовірність кожної комбінації для незалежних подій становить $p^m q^{n-m}$. Оскільки комбінації несумісні, за теоремою додавання ймовірність того, що з n елементів виявляться працездатними рівно m елементів, визначають в такий спосіб:

$$P_{m,n} = \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m (1-p)^{n-m}.$$

Розподіл Пуассона – граничний випадок біноміального розподілу при досить великому n і малій ймовірності події. Випадкова величина розподілена за законом Пуассона, якщо ймовірність того, що вона прийме певне значення m , виражається формулою

$$p_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a}, \quad m = 0, 1, 2, \dots,$$

де a – параметр закону Пуассона.

При цьому

$$M(x) = D(x) = a.$$

Розподіл Пуассона є прийнятною моделлю для оцінки ймовірності настання певного числа подій (зміна стану системи) в заданий проміжок часу від 0 до t , якщо розглянуті події не залежать друг від друга.

Раптові відмови, що носять випадковий характер, звичайно досить добре можуть бути описані експонентним законом: навпаки, відмови, що виникають в результаті зношування, в результаті необоротних фізико-хімічних змін фізичних параметрів елемента вже не підкоряються експонентному закону. Ці відмови, що носять назви поступових, в багатьох випадках досить добре описуються нормальним законом.

Для нормального закону надійності функція надійності (ймовірність безвідмовної роботи) має вигляд

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \frac{t-T_0}{\sigma}} \int e^{-\frac{x^2}{2}} dx.$$

Оскільки звичайно $\delta \ll T_0$, то це рівняння можна записати і більш просто

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \frac{t-T_0}{\sigma}} \int e^{-\frac{x^2}{2}} dx,$$

де T_0 – середній час безвідмовної роботи;

$$\delta^2 = D.$$

Можна показати, що небезпека відмови (щільність умовної імовірності відмови в момент t , за умови що до цього моменту елемент працював безвідмовно) для нормального закону має такий вигляд зображений на рисунку 5.7.

З графіку видно, що функція монотонно зростає і після значення $t = T_0$

починає наближатися до асимптоти $y = \frac{t-T_0}{\delta}$.

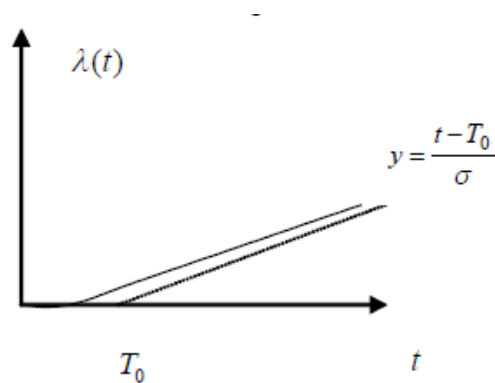


Рисунок 5.7 – Графік залежності щільності умовної імовірності відмови

В реального елемента часто сполучаються обидва типи відмов. В ньому може відбутися раптова відмова, але паралельно йде старіння елемента, що приводить до поступової відмови, якщо до цього не відбувся раптовий. Такий елемент можна розглядати що складається як би з двох частин, в одній з яких може відбутися тільки раптова відмова, а в інший тільки поступовий. Елемент працює до першої з цих відмов.

Якщо $P_1(t)$ – ймовірність того, що за час t не відбудеться раптова відмова, а $P_2(t)$ – ймовірність, того що за цей час не відбудеться поступової відмови, то, припускаючи, що ці відмови виникають незалежно одна від одної, одержимо, що функція надійності елемента $P(t)$ дорівнює

$$P(t) = P_1(t)P_2(t) = e^{-\lambda t} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \frac{t-T_0}{\sigma}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx.$$

ЛЕКЦІЯ 6

ВИЗНАЧЕННЯ ОБСЯГУ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ТА ДОВІРЧИХ ІНТЕРВАЛІВ ДЛЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ

Однією з важливих задач є визначення мінімального обсягу статистичної інформації, за яким з необхідною вірогідністю можна одержати показники надійності елементів СЕП.

Відповідно до ГОСТ 27.502–83 методи визначення мінімального числа об'єктів спостережень можуть бути параметричними (при відомому виді закону розподілу досліджуваної випадкової величини) і непараметричними (вид закону розподілу невідомий).

Якщо відомий закон розподілу шуканої величини, варто задатися відносною (або абсолютною) похибкою з довірчою ймовірністю β . Крім того, необхідно мати оцінку випадкової величини $X_{\text{досл}}$, отриману на підставі дослідів або по вибірках з множини значень випадкової величини. Для двохпараметричних законів розподілу необхідно також вибіркове середнє квадратичне відхилення $\delta_{\text{досл}}$.

Так, при експонентному законі, коли функція щільності ймовірності задана в вигляді

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad \text{при } t \geq 0.$$

Число N об'єктів спостереження залежить від відносної похибки δ визначення середнього значення $t_{\text{ср}}$ досліджуваної випадкової величини t з довірчою ймовірністю β .

Відносну помилку визначають як

$$\delta = (t^B - t_{cp}) / t_{cp} ,$$

де t^B – верхня однобічна довірча границя.

Рекомендують використовувати довірчі ймовірності β , рівні 0,80; 0,90; 0,95; 0,99.

Число N об'єктів спостережень визначають з формули

$$\delta + 1 = 2N / \chi^2 (1 - \beta; 2N) ,$$

де $\chi^2 (1 - \beta; 2N)$ – квантиль розподілу χ^2 при числі ступенів свободи $2N$.

Формули і приклади розрахунку числа N приведені в ГОСТ 27.502–83 також для закону розподілу Вейбулла, нормального і логарифмічно нормального закону.

При невідомому виді закону розподілу випадкової величини мінімальне число N для перевірки необхідної ймовірності $P(t)$ безвідмовної роботи протягом деякого часу t з довірчою ймовірністю β задається за умови відсутності відмов за час t

$$N = \ln (1 - \beta) / \ln P(t) .$$

Якщо при випробуваннях N об'єктів за час t не буде відзначено жодної відмови, результати спостережень вважаються задовільними. Якщо ж відбудеться хоча б одна відмова, то необхідне значення ймовірності не підтверджується.

Визначення мінімального обсягу статистичної інформації розглянемо на прикладі.

Приклад 1. Визначити обсяг випробувань дизель-генераторів аварійної електростанції для АЕС. Задана ймовірність безвідмовної роботи $P(t_p) = 0,9$ протягом розрахункового часу ліквідації аварії $t_p=240$ год. Довірчу ймовірність того, що $P(t_p) \geq 0,9$, прийmemo $\beta = 0,95$. Тоді, вважаючи, що закон розподілу

наробітку на відмову для даного типу встаткування ще невідомий, одержуємо

$$N = \ln(1 - 0,95) / \ln(0,9) = 2,9957 / 0,1054 = 28,43.$$

Це означає, що на випробування протягом 240 годин необхідно поставити 30 дизель-генераторів. Якщо за цей час не відбудеться жодної відмови, то $P(240) \geq 0,9$. В протилежному випадку $P(240) < 0,9$.

В результаті проведення випробувань можна одержати значення чисельної характеристики випадкового процесу, наприклад, математичного очікування.

Така оцінка називають «точковою». Будемо називати цю величину параметром a . В ряді завдань потрібно не тільки знайти для параметра \tilde{a} підходяще чисельне значення, але і оцінити його точність і надійність.

Потрібно знати, до яких помилок може призвести заміна параметра a його точковою оцінкою \tilde{a} і з яким ступенем упевненості можна чекати, що ці помилки не вийдуть за відомі межі.

Такі завдання особливо актуальні при малому числі спостережень, коли точкова оцінка \tilde{a} значною мірою випадкова і наближена, а заміна a на \tilde{a} може призвести до серйозних помилок.

Щоб сформулювати уявлення про точність і надійність оцінки \tilde{a} , в математичній статистиці користуються так званими довірчими інтервалами і довірчими ймовірностями.

Нехай для параметра a отримана з досвіду незміщена оцінка \tilde{a} . Ми бажаємо оцінити можливу помилку. Призначимо деяку досить більшу ймовірність β (наприклад, $\beta = 0,9$ або $0,99$), таку, що подію з ймовірністю β можна вважати практично достовірною, і знайдемо таке значення ε , для якого

$$P(|\tilde{a} - a| < \varepsilon) = \beta.$$

Тоді діапазон практично можливих значень помилки, що виникає при заміні a на \tilde{a} , буде $\pm \varepsilon$; більші за абсолютною величиною помилки будуть з'являтися тільки з малою ймовірністю $\delta = 1 - \beta$.

Перепишемо попереднє співвідношення в вигляді

$$P(\tilde{\alpha} - \varepsilon < \alpha < \tilde{\alpha} + \varepsilon) = \beta.$$

Рівність означає, що з ймовірністю β невідоме значення параметра α попадає в інтервал

$$I_{\beta} = (\tilde{\alpha} - \varepsilon; \tilde{\alpha} + \varepsilon).$$

Ймовірність β прийнято називати довірчою ймовірністю, а інтервал I_{β} – довірчим інтервалом. Границі інтервалу I_{β}

$$\alpha_1 = \tilde{\alpha} - \varepsilon; \quad \alpha_2 = \tilde{\alpha} + \varepsilon$$

називають довірчими границями.

Розглянемо завдання про довірчий інтервал для математичного очікування. Будемо виходити з того, що величина \tilde{m} розподілена за нормальним законом. Характеристики цього закону – математичне очікування і дисперсія – дорівнюють відповідно m і D/n .

Припустимо, що величина D є відомою, і знайдемо таку величину ε_{β} , для якої

$$P(|\tilde{m} - m| < \varepsilon_{\beta}) = \beta.$$

Виразимо ймовірність в лівій частині через нормальну функцію розподілу

$$P(|\tilde{m} - m| < \varepsilon_{\beta}) = 2\Phi^*\left(\frac{\varepsilon_{\beta}}{\sigma_{\tilde{m}}}\right) - 1,$$

де $\sigma_{\tilde{m}} = \sqrt{D/n}$ – середнє квадратичне відхилення оцінки \tilde{m} .

З попереднього рівняння отримаємо

$$2\Phi^*\left(\frac{\varepsilon_{\beta}}{\sigma_{\tilde{m}}}\right) - 1 = \beta.$$

Знаходимо значення ε_{β}

$$\varepsilon_{\beta} = \sigma_{\tilde{m}} \arg \Phi^* \left(\frac{1+\beta}{2} \right),$$

де $\arg \Phi^*(x)$ – функція, зворотна до $\Phi^*(x)$, тобто таке значення аргументу, при якому нормальна функція розподілу дорівнює x .

Дисперсія D , через яку виражена величина $\delta_{\tilde{m}}$, в точності не відома, в якості її орієнтовного значення можна скористатися оцінкою D і покласти приблизно

$$\delta_{\tilde{m}} = \sqrt{D/n}$$

Таким чином, приблизно розв'язано задачу побудови довірчого інтервалу, що дорівнює

$$I_{\beta} = (\tilde{m} - \varepsilon_{\beta}; \tilde{m} + \varepsilon_{\beta}).$$

ЛЕКЦІЯ 7

ЗАГАЛЬНА МОДЕЛЬ ВІДМОВ УСТАТКУВАННЯ

Один зі способів подання ймовірностей переходу системи, що містить декілька елементів, з одного стану в інший, полягає в побудові діаграми переходів. Діаграма переходів являє собою графа, вершини якого відповідають станам системи, а напрямком дуги вказує можливі переходи від одного стану до іншого. Ймовірності переходів відзначаються ризиками, приписуваними кожній з дуг. Сума ймовірностей для дуг, що виходять з будь-якої вершини графа, повинна дорівнювати одиниці. Графи, що мають такі властивості, називають марківськими ланцюгами (рис. 7.1). Їх було запропоновано для вивчення процесів масового обслуговування російським вченим А. А. Марковим.

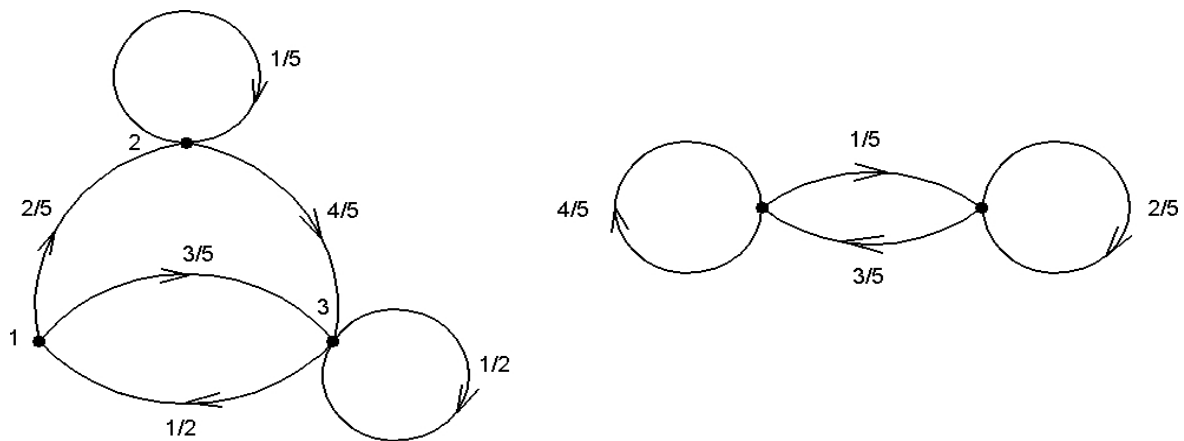


Рисунок 7.1 – Приклади марківських ланцюгів

До марківських ланцюгів можуть бути зведені багато процесів в різних галузях науки і техніки, будемо їх використовувати для побудови моделі відмов. Устаткування електроенергетичних установок з часом відмовляє.

Математичний опис процесу виникнення відмови зображають моделлю

відмов. В більшості випадків елементи установок, що відмовили відновлюють. Включення в роботу резервних елементів дозволяє відновити працездатність устаткування без припинення функціонування установки.

Процес відновлення і профілактики встаткування не виключає повністю можливості відмов установки, але в значній мірі знижує їхню ймовірність, тобто підвищує надійність. Математичний опис цих процесів називають моделлю надійності. Моделі відмов і моделі надійності використовують для розрахунку показників надійності.

Перейдемо до розгляду моделі відмов, більше близької до фізики зношування і старіння. Припустимо, що елемент устаткування в момент t може перебувати в кожному з $N + 1$ станів – від E_N до E_0 . Граф переходів з одного стану в інший зображено на рисунку 7.2.

На рисунку 7.2 прийняті наступні позначення: E_0 – стан відмови, λ_0 – інтенсивність раптових відмов, λ_1 – параметр потоку переходів від стану E_{k+1} до стану E_k ($k=1, 2, \dots, N-1$), обумовлений як

$$\lambda_1 = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_1(t, t + \Delta t)}{\Delta t},$$

де $P_1(t, t + \Delta t)$ – ймовірність одного переходу зі стану в стан в інтервалі $(t, t + \Delta t)$.

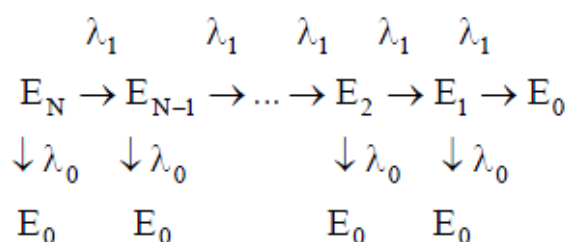


Рисунок 7.2 – Граф переходів з одного стану в інші при раптових і поступових відмовах без відновлення

Передбачають, що за N етапів елемент остаточно зношується і наступає відмова. Миттєвий параметр – потік впливів, що зношують елемент на одну N -у

частину, приймається рівним λ_1 , крім відмов, які пов'язані зі зносом, спостерігаються також раптові відмови з інтенсивністю відмов λ_0 .

Ймовірнісний закон переходів сформулюємо в такий спосіб. Якщо елемент в момент часу t перебуває в стані E_k ($2 \leq k \leq N$), то ймовірність переходу за час Δt в стан E_{k-1} є $\lambda_1 \cdot \Delta t + 0(t)$, а в стан E_0 – $\lambda_0 \cdot \Delta t + 0(t)$. При $k = 1$ ймовірність переходу в стан E_0 за час Δt дорівнює $(\lambda_0 + \lambda_1) \cdot \Delta t + 0(t)$.

Ймовірність двох і більше переходів в інтервалі $(t, t + \Delta t)$ дорівнює $0(t)$. Через $0(t)$ позначені величини зовнішнього порядку малості в порівнянні з λ_0 і λ_1 .

Нехай $P_k(t)$ – ймовірність знаходження елемента в стані E_k у момент t ($1 \leq k \leq N - 1$).

Ця ймовірність складається з наступних складових:

1) ймовірності того, що в момент t елемент був в стані E_k і в інтервалі $(t, t + \Delta t)$ не відбулося переходу в інший стан, $P_k(t)[1 - \lambda_0 \Delta t - \lambda_1 \Delta t + 0(\Delta t)]$;

2) ймовірності того, що в момент t елемент був в стані E_{k+1} і в інтервалі $(t, t + \Delta t)$ відбувся один перехід в стан E_k – $P_{k+1}(t) [\lambda_1 \Delta t + 0(\Delta t)]$;

3) ймовірності того, що в момент t елемент був в стані E_{k+r} , де $r > 1$, і за час від t до $t + \Delta t$ відбулося r переходів – $P_{k+r}(t) \cdot 0(\Delta t)$.

Враховуючи всі складові, напишемо наступне рівняння

$$P_k(t + \Delta t) = P_k(t)[1 - \lambda_0 \Delta t - \lambda_1 \Delta t] + P_{k+1}(t)\lambda_1 \Delta t + 0(\Delta t).$$

Робимо алгебраїчні перетворення

$$P_k(t + \Delta t) - P_k(t) = -P_k(t)(\lambda_0 + \lambda_1)\Delta t + P_{k+1}(t)\lambda_1 \Delta t + 0(\Delta t);$$

$$\frac{P_k(t + \Delta t) - P_k(t)}{\Delta t} = -(\lambda_0 + \lambda_1) \cdot P_k(t) + \lambda_1 P_{k+1}(t) + \frac{0(\Delta t)}{\Delta t}.$$

Зробимо граничний перехід, і одержуємо похідну

$$P'_k(t) = -(\lambda_0 + \lambda_1) \cdot P_k(t) + \lambda_1 P_{k+1}(t).$$

Очевидно, що

$$P'_N = -(\lambda_0 + \lambda_1) \cdot P_N(t).$$

Безвідмовну роботу елемента можна визначити як суму подій знаходження його в кожному зі станів E_k ($1 \leq k \leq N$). Ймовірність безвідмовної роботи визначається при цьому як ймовірність суми подій, що за теоремою додавання ймовірностей дає

$$\sum_{k=1}^N P_k(t) = P(t).$$

Похідна суми дорівнює сумі похідних

$$P'(t) = \sum_{k=1}^N P'_k(t) = -\lambda_1 P_1(t) - \lambda_0 \sum_{k=1}^N P_k(t).$$

На підставі двох попередніх рівнянь отримаємо

$$P'_k(t) = -\lambda_1 \cdot P_1(t) - \lambda_0 P(t).$$

Розв'язання останнього рівняння при початкових умовах $P_N(0) = 1$, $P_k(0) = 0$ і $P(0) = 1$

$$P(t) = e^{-\lambda_0 t} \left[1 - \lambda_1 \int_0^t e^{-\lambda_1 x} (\lambda_1 x)^{N-1} / (N-1)! dx \right].$$

Розглянемо окремі граничні випадки розглянутої моделі:

1) $\lambda_0 > 0$; $\lambda_1 = 0$; число N кінцеве; експоненціальний закон; випадкові відмови

$$P(t) = e^{-\lambda_0 t};$$

2) $\lambda_0 = 0$; $\lambda_1 > 0$; число N кінцеве; гамма-розподіл; пізні відмови

$$P(t) = 1 - \lambda_1 \int_0^t e^{-\lambda_1 x} (\lambda_1 x)^{N-1} / (N-1)! dx.$$

Виразивши $(N-1)!$ через гамма-функцію, одержимо

$$P(t) = 1 - \int_0^t e^{-\lambda_1 x} \lambda_1^N x^{N-1} \frac{dx}{\Gamma(N)}.$$

3) $\lambda_0 > 0$; $\lambda_1 > 0$; $N \rightarrow \infty$; розподіл прагне до експоненціального, тому що початок старіння зміщається в нескінченність.

4) $\lambda_0 = 0$; $\lambda_1 = \beta N$; число N велике; змінний закон розподілу; рівномірне зношування; при цьому

$$P(t) = 0,5 - \Phi_0[\beta\sqrt{N}(t - 1/\beta)].$$

ЛЕКЦІЯ 8

ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

8.1 Визначення надійності електричних мереж з урахуванням навмисних відключень

Елемент системи може бути виведений з роботи не тільки через втрату працездатності, але і для виконання будь-яких робіт, чи то на самому елементі, чи то на елементах з ним взаємозалежних.

Наприклад, проведення планово-попереджувальних ремонтів на встаткуванні, усунення дефектів, що збільшують небезпеку відмови, виконання робіт поблизу елемента, що перебуває під високою напругою. Такі відключення називаються навмисними, оскільки їх виконують спрямованими діями персоналу, що обслуговує встаткування.

З метою спрощення моделі функціонування елемента використовують показники, аналогічні показникам, що характеризують відмови і відновлення:

- частота навмисних відключень

$$v = \frac{[m'(t, t + \Delta t)]}{M(t)};$$

- середній час обслуговування (відновлення після навмисного відключення)

$$\hat{\eta} = \frac{\left(\sum_1^M \theta_{\text{обси}} \right)}{M}.$$

Кількість і тривалість навмисних відключень елементів СЕП впливає на надійність електропостачання споживачів. З одного боку, при навмисних відключеннях виконуються роботи, спрямовані на підвищення надійності СЕП, а

з іншого, – навмисні відключення знижують надійність електропостачання споживачів, створюючи нерезервовані схеми.

Навмисні відключення утворюють потік подій, що не є випадковими, оскільки вони виконують спрямовану дію персоналу. При цьому, якщо визначають надійність на короткий період часу, наприклад при вирішенні в мережах оперативних завдань, пов'язаних зі змінами режимів, то навмисні відключення вважаються детермінованими подіями і надійність розраховують для різних режимів роботи СЕП, що відповідають навмисним відключенням елементів.

Якщо надійність аналізують за тривалий проміжок часу, наприклад при проектуванні СЕП, то заздалегідь передбачити число таких відключень або їхню тривалість неможливо. В такому випадку навмисні відключення розглядають як потік випадкових подій і використовують положення теорії ймовірностей і математичної статистики так само як і для потоків відмов і відновлень.

Аналіз великого обсягу статистичних даних показав, що навмисні відключення вважаються випадковими подіями, якщо часовий період рішення задачі розрахунку надійності становить не менш року. Навмисні відключення елементів СЕП будемо розглядати як випадкові події.

Розглянемо послідовне з'єднання елементів. Якщо навмисні відключення вважати незалежними подіями, то для послідовно з'єднаних елементів частота навмисних відключень, як і частота відмов, відповідає сумі навмисних відключень елементів

$$v_c^{(n)} = \sum_{i=1}^n v_i$$

при середньому часі обслуговування

$$\eta_c^{(n)} = \left(v_c^{(n)}\right)^{-1} \sum_{i=1}^n v_i \eta_i,$$

де v_i , η_i – показники навмисних відключень i – го елемента.

Однак при ремонті електроустаткування звичайно відключають кілька

взаємозалежних елементів, наприклад, ЛЕП і знижувальну підстанцію, що живиться по даній лінії, трансформатор і шини розподільчого пристрою. Це означає, що сумарна частота навмисних відключень ланцюжка елементів менше суми частот окремих елементів.

Один з елементів ланцюжка, який частіше відключається, назвемо базовим, а відносну частоту навмисних відключень інших елементів стосовно базового – коефіцієнтом збігу. Статистично він визначають як

$$\hat{g}_{j/6} = m_{i/6}(t) / M_i(t),$$

де $m_{i/6}$ – число навмисних відключень i – го елемента, зроблених разом з навмисними відключенням базового елемента, за період t ;

M_i – загальне число навмисних відключень i -го елемента.

В таблиці 8.1 наведені коефіцієнти збігу основних елементів електричної мережі. Значення цих коефіцієнтів мають приблизний характер.

Таблиця 8.1 – Коефіцієнти збігу основних елементів електричної мережі

Номер елемента	Умовні позначення	Базові елементи			
		ВЛ(КЛ) 35, 110 кВ	ВЛ(КЛ) 6, 10 кВ	Тр-р 110, 35/0,4 кВ	Тр-р 6, 10/0,4 кВ
1	ВЛ 6, 10 кВ	0,7	1	0,6	–
2	КЛ6, 10 кВ	0,6	1	0,5	–
3	Комірка РП 35, 110 кВ	0,8	–	0,6	–
4	Комірка вимик. 6, 10 кВ	0,85/0,75	0,8	0,6/0,85	–
5	Комірка РП 6, 10 кВ	0,3	0,6	0,4	1
6	Трансформатор 35, 110/10 кВ	0,6	–	1	–
7	Трансформатор 6, 10/0.4 кВ	0,3	0,6	0,4	1
8	Шини 35, 110 кВ	0,6	–	0,8	–
9	Шини 6, 10 кВ	0,75	–	0,7	0,8
10	Зборка НН ТП	–	0,4	–	0,8

З урахуванням коефіцієнта збігу формули для визначення показників навмисних відключень елементів, що послідовно з'єднані приймуть вигляд:

– для частоти навмисних відключень

$$v_c^{(n)} = v_0 + \sum_{i=1, i \neq 0}^n v_i \left(1 - g_{i/0}\right);$$

– середнього часу обслуговування

$$\eta_c^{(n)} = \left(v_c^{(n)}\right)^{-1} \left[v_0 \eta_0 + v_{(\max)} \left(\eta_{(\max)} - \eta_0 \right) + \sum_{i=1, i \neq 0}^n v_i \left(1 - g_i\right) \right],$$

де $v_c^{(n)}, \eta_0$ – частота навмисних відключень і середній час обслуговування базового елемента;

$N_{(\max)}, \eta_{(\max)}$ – те ж саме для елемента кола, де розташований базовий елемент, у якого час обслуговування максимальний; n – число елементів в колі.

Формулами, що наведені користуються коли система ще не була еквівалентно перетворена. Після еквівалентного перетворення елементів навмисні відключення можна вважати незалежними подіями і застосовувати звичайні формули для еквівалентного перетворення елементів.

Розглянемо паралельне з'єднання елементів.

При паралельному з'єднанні двох елементів в випадку простою одного з елементів, причому неважливо, з якої причини, другий елемент не виводиться з роботи і живлення не порушується. Це справедливо для систем з будь-якою кількістю паралельно з'єднаних елементів.

В процесі функціонування СЕП можливий випадок, коли один з елементів простоює, а другий – відмовляє. В цьому випадку, якщо система складається з двох паралельних елементів, вона відмовляє. Частота відмов в такому випадку представлена в вигляді трьох доданків

$$\omega_c^{(2)} = \omega^0 + \omega' + \omega'',$$

де ω^0 – можливість відмови одного з елементів під час простою другого елемента після відмови;

ω' – можливість відмови першого елемента під час простою після навмисного відключення другого елемента;

ω'' – можливість відмови другого елемента при простої після навмисного відключення першого елемента.

Чим частіше і триваліше навмисні відключення, тим більше і тим нижче надійність системи.

Частоти відмов і середній час відновлення системи, що складається з двох паралельно з'єднаних елементів

$$\omega^{(2)}_c = [\omega_1 \omega_2 (\tau_1 + \tau_2) + \omega_1 v_2 \eta_2 + \omega_2 v_1 \eta_1] \cdot 8760^{-1} ;$$

$$\tau^{(2)}_c = \left(\omega^{(2)}_c \right)^{-1} \left(\omega^0 \tau^0 + \omega' \tau' + \omega'' \tau'' \right) ,$$

де $\tau^0 = \tau_1 \tau_2 (\tau_1 + \tau_2)^{-1} ;$

$$\tau' = \tau_1 \eta_2 (\tau_1 + \eta_2)^{-1} ;$$

$$\tau'' = \tau_2 \eta_1 (\tau_2 + \eta_1)^{-1} .$$

В загальному випадку для системи з m паралельно з'єднаних елементів

$$\omega^{(m)}_c = \left(\omega^0 + \sum_{r=1}^m \omega_r \right) \cdot 8760^{1-m} ,$$

де

$$\omega^0 = \left(\prod_{i=1}^m \omega_i \tau_i \right) \left(\sum_{i=1}^m \tau_i^{-1} \right) ; \quad \omega_r = v_r \eta_r \left(\prod_{i=1}^m \omega_i \tau_i \right) \left(\sum_{i=1}^m \tau_i^{-1} \right) ; \quad r = 1, 2, \dots, m$$

та

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

де $\tau^0 = \left(\sum_{i=1}^m \tau_i^{-1} \right)^{-1} ; \quad \tau_r = \left(\eta_r^{-1} + \sum_{i=1}^m \tau_i^{-1} \right)^{-1} ; \quad r = 1, 2, \dots, m .$

8.2 Надійність функціонування пристроїв релейного захисту й автоматики і комутаційної апаратури

Для локалізації елемента, що відмовив, і подачі в вузол навантаження живлення від резервного джерела живлення необхідно, щоб спрацював комплекс пристроїв релейного захисту і автоматики (УРЗА), а також комутаційні апарати (КА), на які впливають ці пристрої.

Розглянемо операції відключення ушкодженої лінії і подачу резервного живлення в розрахунковий вузол навантаження (рис. 8.2). Є розподільний пристрій з двома секціями шин, між якими встановлений секційний вимикач з пристроєм автоматичного уведення резерву (АВР) двосторонньої дії. В нормальному режимі кожна секція живиться по своїй лінії, секційний вимикач відключений.

При ушкодженні лінії Л1 відбувається наступне: релейний захист на вимикачі (В1) має подати команду на його відключення; спрацьовує В1, що відключає Л1 від джерела живлення (ДЖ); релейний захист на В2 має подати команду на відключення В2; спрацьовує В2, що відключає Л1 від вузла навантаження А; від зникнення напруги на секції шин спрацьовує пристрій АВР і подає команду на включення В5; спрацьовує В5 і напруга від Л2 через секцію шин і В5 подається на А.

Таким чином, для забезпечення живлення вузла навантаження знадобилося виконати шість операцій. В дійсності кількість операцій значно більша, оскільки кожен комплект УРЗА складається з декількох виробів – реле, контакторів та ін. Причому, на кожній з операцій апаратура, що працює, може відмовити. Тому для точної оцінки надійності електропостачання вузла навантаження потрібно враховувати кінцеву надійність УРЗА і КА.

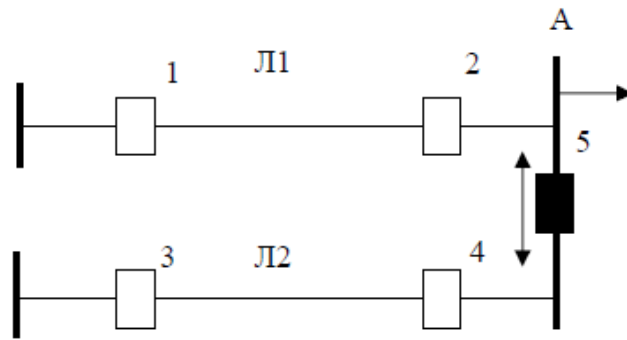


Рисунок 8.2 – Приклад схеми електричної мережі

З одного боку, КА є елементом силового електричного кола і несе навантаження (електричне, механічне) в нормальному режимі. Тому КА як і інші елементи електричної мережі КА може відмовити в нормальному режимі. Такі відмови називають статичними, наприклад, перекриття опору ізоляції, перегрів контактів. Але з іншого боку, на КА впливають УРЗА для виконання основних функцій по включенню (відключенню). Може відбутися і відмова в задоволенні вимогам на спрацьовування. З цього погляду КА можна розглядати як елемент комплексу УРЗА. Такі відмови називають відмовами функціонування.

Відмови функціонування УРЗА і КА бувають трьох видів: відмови в спрацьовуванні (невиконання УРЗА і КА вимог на спрацьовування); зайві спрацьовування (спрацьовування УРЗА і КА за вимоги на спрацьовування, що надходить не на цей, а на інший пристрій); помилкові спрацьовування (спрацьовування УРЗА і КА при відсутності вимог на спрацьовування).

Зупинимося на кількісній оцінці відмов в спрацьовуванні, оскільки цей вид відмов становить найбільший інтерес з погляду надійності схем електричних з'єднань.

Якщо розглядати надійність виконання якимось пристроєм своїх функцій (наприклад, відключити вимикач), то елементи релейного захисту, автоматики, виконавчих органів комутаційного апарата вважаються системою послідовно з'єднаних елементів, кожний з яких може відмовити. При цьому відмова кожного з елементів приводить до однакових наслідків, тобто не спрацьовує КА. Тому

при вирішенні задач аналізу надійності схем електричних з'єднань потоки відмов в спрацьовуванні УРЗА і КА розглядаються як один потік.

Характеристикою цього потоку є ймовірність неспрацьовування, статистично обумовлена як відношення числа не спрацьовувань УРЗА і КА за період спостереження до загального числа вимог на роботу цих пристроїв за цей же період

$$q_A = [m_{\text{УРЗА}}(t) + m_{\text{КА}}(t)]M(t)^{-1}.$$

В таблиці 8.2 наведені орієнтовні значення ймовірності неспрацьовування типових схем релейного захисту і пристроїв автоматичного введення резерву на напругу 6, 10 і 35, 110 кВ.

Таблиця 8.2 – Ймовірності неспрацьовування типових схем

Найменування пристроїв	Ймовірність неспрацьовування q_A	
	При напрузі 6, 10 кВ	При напрузі 35, 110 кВ
Релейний захист ліній	0,020	0,015
Релейний захист трансформатору	–	0,010
Автоматичне введення резерву	0,022	0,020

Під пристроєм розуміють комплект релейного захисту або автоматики з виконавчими органами КА.

Частота відмов в розрахунковій точці схеми електричних з'єднань, що залежить від надійності функціонування УРЗА і КА, складе

$$\omega_A = \alpha q_A,$$

де α – частота вимог, що надходять на УРЗА і КА; цю величину визначають числом відмов устаткування, що захищає.

Вимогами вважають не тільки стійкі відмови, які фіксуються як відмови в електропостачанні, але і нестійкі відмови, які ліквідуються при зникненні напруги. Нестійкі відмови для повітряних ЛЕП становлять близько 50–70 %. Для інших видів основного встаткування СЕС число нестійких відмов менше і в розрахунках надійності їх можна не враховувати.

Для ПЛ очікувана частота вимог на спрацьовування УРЗА і КА

$$\alpha = R_H \omega_{\text{ПЛ}}^0 \ell_{\text{ПЛ}},$$

де R_H – коефіцієнт збільшення числа вимог на спрацьовування за рахунок обліку нестійких відмов;

$\omega_{\text{ПЛ}}^0$ – питома частота відмов ВЛ, яку захищають;

$\ell_{\text{ПЛ}}$ – довжина ПЛ, яку захищають.

Для орієнтовних розрахунків приймають

$R_H = 1,5$ – для ПЛ 6, 10 кВ.

$R_H = 1,6$ – для ПЛ 35, 110 кВ,

При відмові в спрацьовуванні УРЗА і КА вимога надходить на спрацьовування відповідних пристроїв більше високого структурного рівня. Так, якщо відмовить в відключенні лінійний вимикач В1 (рис. 8.3), то надходить заявка на відключення шинного вимикача В2, що приводить до повного знеструмлення шин розподільного пристрою.

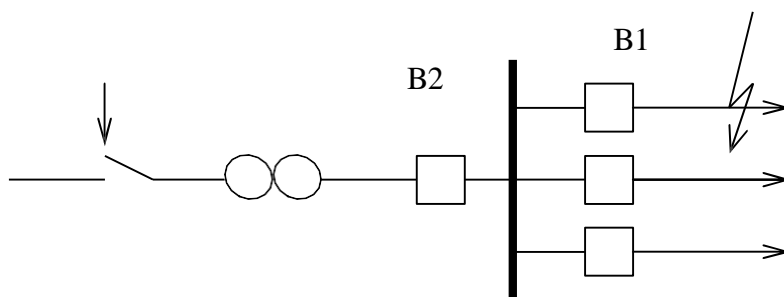


Рисунок 8.3 – Розрахункова схема роботи УРЗА і КА

Оскільки накладення відмов в спрацьовуванні УРЗА і КА трапляється рідко, при практичних розрахунках надійності схем електричних з'єднань його

можна не враховувати.

Час відновлення при відмовах в спрацьовуванні УРЗА і КА – це час локалізації відмови.

Приклад 1. Визначити показники надійності в розрахунковій точці А схеми на рисунку 8.4. Довжина ПЛ1 становить 25, ПЛ2 – 20 км. Надійність вимикачів (частота відмов в статичному стані) і шин РУ не враховують. РУ 110 кВ обслуговують ОВБ і розташовано в сільській місцевості.

Шини першої секції РУ 110 кВ будуть знеструмлені при відмові Л1 (Л2) в період простою Л2 (Л1) – на час ремонту τ_p , а також при відмові Л1 (неспрацьовуванні В2 або неспрацьовуванні В5) – на час усунення відмови в спрацьовуванні τ_A .

Схему заміщення представлено на рисунку 8.4, де елементи 1 і 2 заміщають Л1 і Л2; елементи 3, 4, 5 відображають відмови в спрацьовуванні вимикачів 1, 2, 5. Заштрихована поверхня елементів 3, 4, 5 на рисунку означає, що час відновлення для них визначається часом локалізації відмови.

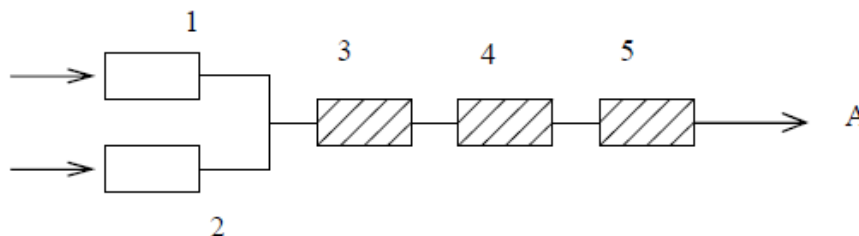


Рисунок 8.4 – Еквівалентна схема заміщення

Чисельні значення показників надійності структури рівні

$$\omega_1 = \omega_{Л110}^0 \ell_{Л1} = 0,08 \cdot 25 = 2,0 \text{ рік}^{-1};$$

$$\tau_1 = \tau_{Л110} = 8 \text{ год};$$

$$\nu_1 = \nu_{Л110}^0 \ell_{Л1} = 0,15 \cdot 25 = 3,75 \text{ рік}^{-1};$$

$$\begin{aligned}
\eta_1 &= \eta_{\text{Л110}} = 8 \text{ год}; \\
\omega_2 &= 1,6 \text{ рік}^{-1}; \\
\tau_2 &= 8 \text{ год}; \\
\nu_2 &= 3,0 \text{ рік}^{-1}; \\
\eta_2 &= 8 \text{ год}; \\
\alpha_{\text{Л1}} &= R_{\text{H}} \omega_{\text{Л110}}^0 \ell_{\text{Л1}} = 1,6 \cdot 0,08 \cdot 25 = 3,2 \text{ рік}^{-1}; \\
\omega_3 &= \alpha_{\text{Л1}} \cdot q_{\text{рз110}} = 3,2 \cdot 0,015 = 0,048 \text{ рік}^{-1}; \\
\tau_3 &= \tau_{\text{Л}}^{\text{ОВБ}} = 2,0 \text{ год}; \\
\omega_4 &= 0,048 \text{ рік}^{-1}; \\
\tau_4 &= 2,0 \text{ год}; \\
\omega_5 &= \alpha_{\text{Л1}} q_{\text{АВР110}} = 0,064 \text{ рік}^{-1}; \\
\tau_5 &= 2,0 \text{ год}.
\end{aligned}$$

Для паралельно з'єднаних елементів з урахуванням навмисних відключень визначають показники надійності еквівалентного елемента:

$$\begin{aligned}
\omega_6 &= \omega^0 + \omega' + \omega'' = [\omega_1 \omega_2 (\tau_1 + \tau_2) + \omega_1 \nu_2 \eta_2 + \omega_2 \tau_1 \eta_2] \cdot 8760^{-1}; \\
\omega^0 &= 6 \cdot 10^{-3}; \quad \omega' = 5,48 \cdot 10^{-3}; \quad \omega'' = 5,47 \cdot 10^{-3} \text{ рік}^{-1}; \\
\tau^0 &= \tau_1 \tau_2 (\tau_1 + \tau_2) = 4 \text{ год}; \\
\tau' &= \tau_1 \eta_2 (\tau_1 + \eta_2) = 4 \text{ год}; \\
\tau'' &= 4 \text{ год}; \\
\tau_6 &= 4 \text{ год}; \\
\nu_6 &= \eta_6 = 0.
\end{aligned}$$

Показники надійності структури

$$\begin{aligned}
\omega_{\text{А}} &= \omega_6 + \omega_3 + \omega_4 + \omega_5 = 0,177 \text{ рік}^{-1}; \\
\tau_{\text{А}} &= 2,19 \text{ год}.
\end{aligned}$$

Як видно з прикладу, надійність УРЗА і КА дуже впливає на надійність схеми. Так, складова частоти відмов, обумовлена ненадійністю УРЗА і КА (елементи 3, 4, 5), становить 90,5 %.

ЛЕКЦІЯ 9

КОЕФІЦІЄНТ НЕЗАБЕЗПЕЧЕНОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЄЮ

При оцінці надійності електропостачання одного споживача звичайно розглядають два стани системи: працездатна і непрацездатна. Імовірність знаходження СЕП повністю в непрацездатному стані дуже мала. Сучасні СЕП – це складні мережі, які багаторазово резервуються й одержують живлення від декількох джерел. Вони оснащені більшою кількістю пристроїв захисту, автоматики і телемеханіки.

У той же час відмова в електропостачанні хоча б одного споживача, приєднаного до СЕП, приводить до недовиконання системою основного завдання – постачання споживачам електроенергії в потрібній кількості і належній якості. В цьому випадку відбувається зниження вихідного ефекту системи.

Отже, кількісно оцінити надійність СЕП можна визначенням вихідного ефекту системи, що розраховують по кількості електроенергії, що розподіляється системою.

Якщо СЕП абсолютно надійна, то вихідний ефект її виражається в кількості електроенергії, відпущеної відповідно до вимог споживачів.

При відмовах в електропостачанні сумарна кількість відпущеної електроенергії менше необхідної – це реальний вихідний ефект.

Таким чином, різниця між ідеальним і реальним вихідними ефектами є мірою оцінки надійності СЕП, тобто це кількість електроенергії, яка була невідпущена споживачам в результаті відмов в СЕП

$$W = E_{\text{потр}} - E_{\text{відп.ф.}},$$

де $E_{\text{потр}}$ – кількість енергії, яку потрібно було відпустити споживачу;

$E_{\text{відп.ф.}}$ – кількість енергії, яку було відпущено фактично.

Часто потрібно порівнювати між собою СЕП, які є різними за обсягом і кількістю енергії, що вони відпускають. В цьому випадку використовують відносну величину недовідпущення електроенергії, яка називають коефіцієнтом незабезпеченості електроенергією

$$\rho = W / E_{\text{потр}} .$$

В теорії надійності систем енергетики використовують коефіцієнт забезпеченості електроенергією

$$\pi = E_{\text{відп.ф.}} / E_{\text{потр}} = 1 - W / E_{\text{потр}} = 1 - \rho .$$

При оцінці надійності СЕП очікувана кількість електроенергії, яка може бути недовідпущеною споживачам за період часу (звичайно за рік), визначиться як сума очікуваного недовідпущення електроенергії всім споживачам, приєднаним до даної СЕП

$$W = \sum_{i=1}^m W_i ,$$

де m – кількість споживачів, які приєднані до даної СЕП.

Очікуване недовідпущення i -му споживачеві відповідає добутку середньої величини навантаження \bar{P}_i на еквівалентну тривалість простою за період часу

$$W_i = \bar{P}_i \theta_{Ei} .$$

Еквівалентна тривалість простою i -го споживача

$$\theta_{Ei} = \omega_i \tau_i + \xi v_i \eta_i ,$$

де $\omega_i, \tau_i, \nu_i, \eta_i$ – показники надійності i -го споживача;

ξ – коефіцієнт, що відбиває той факт, що наслідки від навмисних відключень менш важкі, чим від раптових відмов.

В практичних розрахунках $\xi = 0,33$.

Для визначення розрахункового коефіцієнта незабезпеченості потрібно знати кількість електроенергії, що була б відпущена споживачам, якби не було відмов в СЕП

$$E_{\text{потр}} = \sum_{i=1}^M E_{\text{потр},i} = \sum_{i=1}^M P_{ri} T_{\text{нбі}}$$

де P_{ri} – розрахункове навантаження i -го споживача;

$T_{\text{нбі}}$ – число годин використання максимуму енергії.

Показники надійності СЕП визначають в наступному порядку:

1) надійність електропостачання i -го споживача визначають за вище викладеними формулами;

2) установлюють величину очікуваного недовідпущення електроенергії i -му споживачу W_i , а також необхідну кількість електроенергії $E_{\text{потр},i}$;

3) визначають величини сумарного недовідпущення і необхідної кількості електроенергії для споживачів СЕП;

4) обчислюють коефіцієнт незабезпеченості.

ЛЕКЦІЯ 10

НАДІЙНІСТЬ І ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ УСТАТКУВАННЯ

Надійність устаткування визначається його конструкцією. Але в процесі експлуатації у зв'язку зі старінням і зносом надійність устаткування знижується, тобто в ході експлуатації устаткування треба проводити роботу по підтримці необхідного технічного стану.

Розрізняють декілька видів технічного стану об'єкту:

- справність(об'єкт повністю відповідає всім технічним вимогам);
- несправність(стан об'єкту при якому він не відповідає хоч би одній вимозі НТД);
- працездатність(стан об'єкту, коли технічним вимогам відповідають лише властивості, що характеризують здатність виконання заданих функцій);
- непрацездатність (об'єкт за наявності дефекту);
- правильне функціонування;
- неправильне функціонування.

Дефект – невідповідність механічним, реальним і дійсним властивостям.

Якщо об'єкт непрацездатний, то можливі два стани:

- можливість переходу у працездатний стан – пошкодження;
- перехід в непрацездатний стан – відмова.

Справний і несправний стан електроустаткування є працездатними. Одним з основних заходів визначення справності, тобто здатності виконання заданих функцій, є встановлення граничних значень параметрів, що характеризують їх працездатність(рис. 10.1). При виході параметрів за граничне значення, об'єкт вважається таким, що відмовив (розглядається зміна технічного стану елемента, об'єкту, системи).



Рисунок 10.1 – Граничне значення параметрів, що характеризують їх працездатність

P – параметр;

$P_{гр}$ – граничне значення, відповідно;

$P_{доп}$ – допустиме значення, відповідно справності;

N – стан відмови.

В умовах експлуатації необхідно забезпечити мінімальний працездатний стан. Це покладається на систему технічного огляду і ремонту.

Система технічних оглядів і ремонтів електричного устаткування і мереж – комплекс цілеспрямованих робіт, що складаються з (виробничого технічного обслуговування) ВТО, міжремонтного профілактичного обслуговування і планово-запобіжного ремонту устаткування для заданих умов експлуатації з метою підтримки технічних і експлуатаційних характеристик електричного устаткування в допустимих межах.

Основне завдання технічного огляду – стежити за станом устаткування і підтримувати справність (працездатність). Завдання ремонту – відновлення справності (працездатності).

Мета технічного огляду і ремонту:

$$P(t) \rightarrow \max \quad w(t) \rightarrow \min$$

$$K_{\Gamma} \rightarrow \max \quad Z_{TOiP} \rightarrow \min$$

Для будь-яких технічних систем, що знаходяться в експлуатації, повинні бути розроблені правила технічного обслуговування і ремонту. Від стратегій ТО і Р значно залежить надійність і тривалість технічного обслуговування і ремонту ел. устаткування і мереж.

Є багато різних стратегій ТО і Р. Серед них можна виділити:

1. **стратегія „not”** (наукова організація праці) (ТО устаткування призначається і проводиться періодично через визначений, заздалегідь встановлений, час. Момент проведення роботи ТО суворо регламентований і не залежить від числа позапланових ремонтів в період міжпланових ремонтів. Календарний час розраховується шляхом оптимізації споживачів статистикою, економічно-математичним моделюванням ТО).

2. **по напрацюванню** (ТО призначається по досягненню устаткуванням встановленого напрацювання. Напрацювання вказується в годинах, циклах, кілометрах.) Системи ТОіР, засновані на виконанні робіт через заздалегідь встановлені інтервали часу. Напрацювання незалежно від технічного стану об'єкту забезпечує слабку взаємодію між зміною технічного стану об'єкту і терміном проведення ТОіР. Недоліки таких стратегій: великий час ТОіР, оскільки багато робіт є регламентними (розбір). Крім того існує недолік таких стратегій - встановлені значення міжремонтних періодів застосовуються до кожної одиниці конкретного електричного устаткування. Розглянуті стратегії ТО і Р, які передбачають проведення ремонту через усереднені періоди без точного визначення технічного стану є неефективними. Тому треба орієнтуватися на використання сучасніших стратегій, які забезпечують зменшення витрат ТО і Р при одночасному підвищенні надійності роботи електричного устаткування.

3. **по параметру** (технічному стану) – прогрес найбільшої ефективності, при якій об'єм і зміст ТО і Р призначається відповідно до фактичного стану. Експлуатаційний контроль припускає, що мається спостережуваний параметр об'єкту, який прогнозує його відмову. Тому створення такої системи контролю можливе лише у разі, коли для кожного виду устаткування будуть виділені

прогнозуючі параметри, визначені межі їх допустимого значення і розроблені методи їх параметрів. Суть стратегії – ремонтна тривала експлуатація (ремонт застосовується дискретно), яка визначає працездатність елемента (об'єкту).

Використання системи ТО і Р можливо на основі використанні методів, їх порівняння, діагностування.

У типовому положенні про ТО і Р ел. устаткування перед підприємствами поставлено завдання по попередженню і зниженню відмов електричного устаткування. Для визначення оптимальних термінів ремонту устаткування необхідно розробляти і упроваджувати методи і засоби числення для контролю за його технічним станом. З цією метою на підприємствах повинні бути забезпечені такі організаційні заходи:

а) обробка режиму експлуатації з метою аналізу причин і характеру пошкоджень електричного устаткування;

б) підготовка і розробка програм технічної діагностики;

в) встановлення послідовності(діагностичні методи для різних ел. устаткувань);

г) визначення можливостей наявних стандартів (необхідності розробки спеціальних контрольних-вимірювальних приладів для створення цифрових комплексів для кожного виду електричного устаткування.

Технічна діагностика. Принципи побудови.

Суть і завдання діагностичного устаткування.

Предмет технічної діагностики (ТД) включає дослідження технічного стану устаткування, вивчення ознак різного технічного стану, розробку методів їх визначення, а також принципів побудови і використання систем діагностування. Основна мета діагностування: визначити технічний стан об'єкту, своєчасно виявити і виключити дефекти, тобто визначити їх наявність, характер і місцеположення.

Алгоритм діагностування – сукупність методів виконуваних з певною послідовністю для вирішення конкретних діагностичних завдань. По

суті, за допомогою алгоритму визначається об'єм випробування об'єкту.

Програма діагностування – певна послідовність заходів щодо встановлення фактичного стану об'єкту і характеру його змін.

Система діагностування – певна організація взаємодії об'єкту і засобів діагностування.

Діагностуюча модель – аналогове (графоаналітичне) представлення основних властивостей технічних об'єктів. Діагностичні моделі мають відмінності для безперервних і дискретних об'єктів.

Для безперервних об'єктів на початку діагностування моделі використовують діагностичний пристрій і алгебру логіки.

Для дискретних об'єктів на початку діагностування моделі використовують теорію автоматів.

Значення діагностичних параметрів, визначених при контролі характеристик технічного стану об'єкту в даний момент часу (технічна оцінка).

Браковочним критерієм є сукупність значень параметрів і інших ознак, достатніх для оцінки технічного стану і віднесення до діагностики, мають певний ефект.

У простому випадку, коли значення параметра однозначно пов'язане зі станом об'єкту, діагностування зводиться до порівняння вимірювань із встановленим граничним значенням, до браковочних нормативів.

ТД вивчає технічний стан різних об'єктів та розробляє методи їх визначення, а також принципи побудови та організацію використання систем діагностування.

Система діагностування – сукупність об'єктів діагностування, а також сукупність методів та засобів діагностування. Головна ціль ТД, тобто визначення технічного стану об'єкта з певною точністю, забезпечення найбільш економічної експлуатації обладнання при заданому рівні надійності та мінімізації витрат (технічного ремонту, часу, грошей) на проведення ТО і Р об'єкту. Технічний стан електричного обладнання змінюється в процесі експлуатації та залежить від режимів роботи та зовнішнього впливу. У зв'язку з

цим параметри роботи, які характеризують стан об'єкту, є змінними величинами.

Узагальнену схему діагностування обладнання можна представити наступною структурою(рис. 10.2):



Рисунок 10.2 – Узагальнена схема діагностування обладнання

Wз- зовнішній вплив

Wр- робочий вплив

ОД- об'єкт діагностики

БЗІ- блок об'єму (блок збору інформації)

БПІ- блок прийому (блок переробки інформації)

СД- система діагностування

З ОД через БЗІ на БПІ надходять сигнали, які характеризують стан об'єкту. Аналіз змін цих ознак та параметрів здійснюється в СД, яка видає результат діагностики, тобто оцінки фактичного стану об'єкта.

Види і системи діагностики.

Система перевірки технічного стану об'єкту поділяється на 4 етапи:

1. дослідження об'єкту ; ТО і Р.
2. побудова алгоритму перевірки
3. розробка способів та засобів діагностики
4. дослідження властивостей та характеристик систем взагалі

В залежності від функціональних (конструктивних) особливостей Узагальнену схему діагностування електричного обладнання, способу впливу на об'єкт для визначення його технічного стану використовують 3 види

діагностики:

- а) функціональна (ФТД)
- б) тестова (ТТД)
- в) комбінована (КТД)

ФТД здійснюється під час роботи (функціонування) ОД, на який надходить тільки робочий вплив. При такій системі діагностики вплив на об'єкт здійснюється в процесі роботи.

Узагальнююча структура схеми ФТД показана на рис. 10.3.

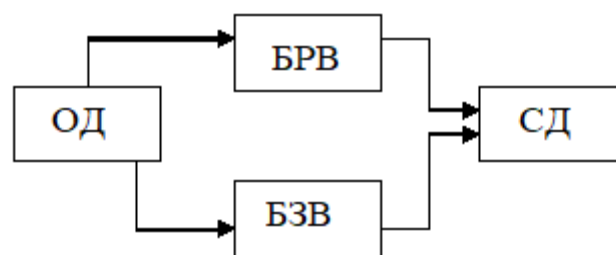


Рисунок 10.3 – Узагальнююча структура схеми ФТД

В цьому випадку без перерви роботи через БРВ (блок робочого впливу) на СД надходить робочий сигнал. За характером зміни робочого сигналу в момент функціонування об'єкта (за "відповіддю" об'єкта) через БЗВ (блок зняття відповіді) по впливу на робочий сигнал судять про технічний стан об'єкту діагностики (ОД).

У якості засобів ФТД в основному використовуються вимірювальні пристрої.

Головна перевага ФТД: можливість діагностики об'єкту без перерви технологічного процесу, що забезпечує зниження часу ремонту і створює основу для безперервного контролю за технічним станом об'єкту.

Недоліки ФТД: виявляє правильне функціонування тільки в даний момент і тільки в даному режимі. При цьому можуть бути невиявлені несправності роботи об'єкту в інших режимах.

ФТД можна також вести в режимі імітування функціонування

електричного обладнання. Для електричного обладнання ФТД – це його контроль без його вимкнення, тобто контроль під напругою. Використання таких методів суттєво підвищує ефективність контролю і здатність його автоматизації. Контроль за електричним обладнанням без відімкнення від мережі можна вести вимірюючи при цьому параметри об'єкту в процесі його функціонування.

Можливі 2 способи організації контролю за електричним обладнанням під напругою:

1. рання діагностика – виявлення ознак погіршення стану, які викликають зміни значення контролюючих параметрів
2. сигналізація граничних станів – виявлення ознак погіршення технічного стану, які є небезпечними з точки зору надійності роботи електричного обладнання.

ТТД здійснюється шляхом подачі на об'єкт спеціальних тестових впливів, які визначаються спеціальною програмою(рис. 10.4).

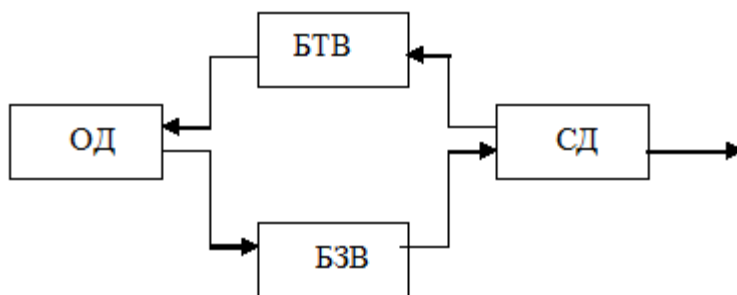


Рисунок 10.4 – Узагальнююча структура схеми ТТД

З СД через БТВ (блок тестового впливу) на ОД подається тестовий сигнал. За характером "відповіді" ОД, який прямує в СД через БЗВ судять про технічний стан цього об'єкту. В якості засобів вимірювання ТТД, крім засобів вимірювання аналогічних ФТД, потрібно джерело тестових впливів. Зміст та послідовність подачі тестових впливів вибирають виходячи з вимог точності і умов ефективності діагностики. ТТД проводять як в закритому стані електричного обладнання, так і під час його роботи. Однак в більшості випадків при ТТД припиняється робота об'єкту. Тому забезпечити безперервний контроль

за його технічним станом фактично неможливо. Але при ТТД можна отримати більш повне визначення технічного стану ОД та домогтися більшої глибини та точності контролю.

В *КТД* використовується як робочий, так і тестовий вплив на об'єкт, тобто такі системи дають найбільш точне уявлення про об'єкт як при експлуатації, так і під час ремонту.

За ступенем автоматизації системи ТД поділяють на:

1. постійно діючі;
2. періодично діючі;
3. разової дії.

Разовий контроль використовується тільки за необхідністю отримання додаткової інформації. *Виходячи з вимог до діагностики головними етапами розробки діагностики ел. обладнання є:*

1. визначення елементів, які організують роботу ел. обладнання і які підлягають діагностиці;
2. визначення діагностичних параметрів та розробка методів діагностики;
3. визначення і розробка засобів для діагностики;
4. розробка технології діагностики;
5. пошук несправностей.

1) Визначення елементів, які підлягають діагностиці. Вірний підбір діагностичних елементів – одне з важливих питань розробки систем діагностики. Дійсно, від цього підбору залежить напрямок і зміст роботи по визначенню параметрів розробки методів і засобів, технології діагностики, тобто в кінцевому рахунку – ефективність діагностики. Для визначення вузлів і елементів, які підлягають діагностиці звичайно збирають дані про відмову електрообладнання в умовах експлуатації. На підставі аналізу цих елементів та відмов визначається перелік елементів, які обмежують ресурс електричного обладнання. Діагностику електричного обладнання доцільно вести тільки при отриманні відповідного економічного ефекту, забезпечення безпеки експлуатації.

Ефективність діагностики визначається на підставі економічного ефекту :

$$Z = Z_{ei} - Z_{ed}$$

Збиток при розрахунку економічної ефективності діагностики рахують виходячи з простою робочих машин. Діагностика доцільна, якщо дотримується нерівність $Z_{ei} > Z_{ed}$, тобто приведені затрати при експлуатації об'єкту без використання діагностики більше приведених витрат при використанні діагностики.

2.) *Визначення параметрів діагностики електричного обладнання.* Ознаки дефектів об'єкту проявляються в застосуванні параметрів об'єкту, тобто при розробці методів діагностики. Складною задачею є визначення і встановлення оптимального набору діагностичних параметрів, їх компонентів і кількості у зв'язку з наявністю і ступенем розвитку дефектів.

Об'єкти діагностики діляться на 2 класи:

1. об'єкт безперервної дії (параметри якого змінюються в часі безперервно);
2. об'єкт дискретної дії (параметри якого змінюються в часі дискретно).

Для останнього об'єкту розглядаються 2 види відмов:

- a.) відмови функціонування
- б.) відмови в статичному стані

Значення діагностичних параметрів характеризує тех. стан об'єкту в даний момент часу, тобто задача діагностики включає в себе вимірювання сукупності параметрів діагностики, які несуть інформацію про стан об'єкту.

Параметри, величину яких вимірюють при діагностиці, характеризуються номінальним значенням, полем допусків, залежністю значень від зовнішнього середовища, закономірностями підсумовування в залежності від часу експлуатації. Для відношення об'єкту до відповідної групи станів необхідно встановити граничні значення параметрів. Ці значення є ознаками дефекту. Для виявлення передвідмовного стану позначаються попереджувальні допуски на діагностичні параметри.

Попереджувальний допуск – сукупність значень параметрів, які укладені

між собою граничним та передвідмовним рівнем параметрів. Вихід параметру за граничний рівень означає відмову, а досягнення передвідмовного рівня – необхідність виконання ТО і Р.

За природою діагностичні параметри електричного обладнання, які підлягають вимірюванню, в більшості випадків представляють собою електричні величини, в меншій мірі – неелектричні величини.

При цьому всі електричні величини можна (доцільно) вимірювати, тому що виникає необхідність перетворення неелектричних і електричних величин в більш зручні для подальших вимірювань.

Застосовані при діагностиці параметри, які характеризують технічний стан об'єкту, можна класифікувати:

1. параметри, які виражені електричними величинами і дозволяють вимірювати їх значення безпосередньо (R, L, C, U, T, P, F, γ і т. д);
2. параметри, які виражені електричними величинами, але потребують для вимірювання масштабні перетворення (за допомогою посилювачів, ТТ, ТН);
3. параметри, які виражені неелектричною величиною і потребують перетворення для вимірювання неелектричних величин в електричні.

- Механоелектричні

- а.) резистивні

- б.) індуктивні

- в.) ємнісні

- г.) п'єзо

- Термоелектричні

- а.) термопара

- б.) термоопір

- Оптичні

- а.) фотодіод

- б.) фотоелемент

- Гальванічні

За інформативністю всі діагностичні параметри можна умовно поділити на

2 групи:

1. узагальнюючі (несуть велику кількість інформації і характеризують стан вузлів, елементів);
2. локальні (локальний параметр характеризує стан тільки одного об'єкту).

Природно, що найкращі для діагностики – узагальнюючі, тому що їх використання дозволяє спростити засоби діагностики, зменшити час вимірювання і обробки інформації.

Для оцінки технічного стану електричного обладнання можна виміряти десятки параметрів, але це потребує більше цифрових приладів та часу, що є неефективним, оскільки для вирішення задач необхідно вибрати оптимальне число параметрів, які забезпечують вірогідність результатів вимірювань для даного виду обладнання. Тому задача оцінки зводиться до рішення задачі оптимізації набору цих параметрів.

При цьому при різних діагностичних параметрах треба керуватися такими положеннями:

1. *вимога однозначності* - кожному значенню контролюючого параметру повинно відповідати тільки одне значення діагностичного параметра;
2. *вимога доступності і зручності вимірювання* - діагностичні параметри повинні відносно легко вимірюватись, за необхідністю малими засобами вимірювання;
3. *вимога широти області вимірювання* - діагностичні параметри повинні мати як можна більше діапазонів вимірювання, що дозволить підвищити точність вимірювання и вірогідність діагностики;

При різній номенклатурі діагностичних параметрів зазвичай проводять аналіз усіх параметрів, характерних технічному стану ел. обладнання, які не потребують перетворення (складних вимірювальних засобів).

При цьому віддається перевага параметрам, які мають функціональний зв'язок з технічним станом діагностичного елемента (об'єкта).

ЛЕКЦІЯ 11

ВІРОГІДНІСТЬ ДІАГНОСТИКИ

Ціль експлуатаційного контролю в загальному випадку – визначення технічного стану об'єкту і прогнозування його змін, а також виявлення дефектів і визначення їх характеру. В результаті повинна бути встановлена можливість подальшої експлуатації об'єкту (необхідність його ремонту), похибка контролю повинна бути мінімальною.

Застосовані методи діагностики не забезпечують повної вірогідності оцінки технічного стану об'єкта. Результати вимірювань включають в себе похибки засобів вимірювання, додаткову похибку від умов експлуатації, похибку відліку, метода вимірювань.

Крім похибок вимірювань вірогідність оцінки технічного стану об'єкта (елементу) залежить від впливів перешкод.

Перешкода – величина, яка викликає перекручений вплив на вимірювання.

Розрізняють 2 види помилок (контролю):

1. справний об'єкт (елемент) буде визнаний непридатним, таким що відмовив – це помилка першого роду – помилковий дефект.
2. несправний об'єкт буде визнаний справним – помилка другого роду – невиявлений дефект.

Графічне формування результату діагностики при такому двоальтернативному контролі можна представити(рис..11.1):

Помилка контролю призводить до різних наслідків. Якщо від 1-го роду тільки підвищується об'єм роботи, то від 2-го тягне за собою аварійне пошкодження обладнання.

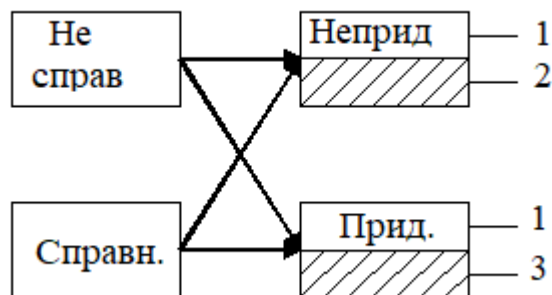


Рисунок 11.1 – Графічне формування результату діагностики

- 1- вірогідний результат
- 2- від 1-го роду
- 3- від 2-го роду

Заштриховані площі відповідають ймовірностям отримання невірогідного результату (1-го, 2-го роду)

Вірогідність методу діагностики визначається ступенем зв'язку технічних параметрів, які відображають його стан. Взагалі цей зв'язок - вірогідний (стохастичний зв'язок), а не функціональний. Крім того є неоднозначність зв'язку значень, які контролюються параметрами, зі станом об'єкту при різних видах дефектів, тобто створюються помилки діагностування.

Підвищити вірогідність діагностики можна шляхом використання для контролю декількох параметрів, які характеризують тех.. стан об'єкту.

Причому кожний параметр дає інформацію про певну характеристику об'єкту. Сукупність параметрів забезпечує підвищення вірогідності виявлення дефектів та можливість більш точнішої оцінки їх небезпеки.

Одним із джерел помилок діагностики є використання вимірюваних значень, які контролюються параметрами без приведення їх до нормальних умов (залежності характеристик ізоляції від температури та інших факторів).

Тому при діагностиці треба результати вимірювань приводити до однакових базисних умов у співставному вигляді). Помилки діагностики, які обумовлені похибкою вимірювань повинні враховувати всі відповідні види похибок.

Похибки:

- систематичні (виправляються, практично виключаються за рахунок виправлення $S = -\Delta$ – абсолютна похибка);
- випадкова (випадкову похибку виключити неможливо, але її можна значно знизити шляхом статистичної обробки багаторазових вимірювань).

В експлуатаційній практиці враховується можливість виключення погрішності, точність діагностики як правило, визначається впливом зовнішніх факторів перешкод, специфічних для кожного виду вимірювань.

Перешкоди, які викликані паразитними струмами в схемах вимірювань та струми впливу. Паразитні струми (струми витoku) - виникають під дією напруги установки вимірювання та протікають через її вимірювальні об'єкти (елементи), минаючи при цьому об'єкт вимірювання. Ці струми протікають по так званим паразитним зв'язкам джерела напруги вимірювальної установки із елементами пристроїв вимірювання.

Струм впливу (струм наведення) – виникає під дією робочої напруги елементів установки, що містить об'єкт діагностики і протікає через вимірювальний елемент пристрою вимірювання. До них відносять струми промислової частоти і гармоніки, які протікають по елементам, зв'язкам.

Для зниження похибок, які обумовлені перешкодами, треба підвищити захист від перешкод на вимірювальних установках.

Крім перешкод та похибок, які впливають на результат діагностики важливою властивістю є чутливість методу вимірювання – це характеристика, яка представляє собою найменше виявлене вимірювання параметру, яке може слугувати для судження про зміну характеристик об'єкту діагностики. В простому випадку в якості чутливості використовують поняття " поріг чутливості" (те мінімальне X , при якому буде Y на виході)



$$S = \frac{dy}{dx} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad - \text{чутливість.}$$

Розробка методів та засобів діагностики електричного обладнання.

Метод діагностики – сукупність технічних засобів, прийомів та способів, які дозволяють дати об'єкту висновок про ТО і Р.

В основі методу діагностики може бути покладений чи специфічний фізичний процес, який характерний для певного класу об'єкту, чи певний вид засобів вимірювання.

В основі використання дві групи методів діагностики відрізняються наступними діагностичними ознаками:

1. метод діагностики за параметрами робочих процесів, які безпосередньо характеризують стан об'єкту;

2. методи діагностики за параметрами супутніх процесів, які побічно характеризують стан об'єкту.

Загальні вимоги до розробки різних методів діагностики

а) повинні бути прості та не потребувати для реалізації застосування та розробки складних діагностичних засобів;

б) повинні забезпечувати потрібну вірогідність результатів діагностики;

в) не вимагати режимів роботи електрообладнання, які важко здійснити на практиці;

г) забезпечити скорочення часу та витрат, засобів на діагностику.

При діагностиці електричного обладнання використовують різні засоби вимірювання:

1. міри;

2. вимірювальне перетворення;

3. вимірювальні прилади;

4. вимірювальні установки (сукупність мір, вимірювальних перетворень, приборів та допоміжних установ, які дозволяють здійснити вимірювання);

5. вимірювально – інформаційні комплекси (в цих засобах вимірювання здійснюється обробка та логічні операції з вимірюваною інформацією).

Діагностика і прогнозування роботи електричного обладнання може здійснюватись за допомогою вимірювальних пристроїв ручного керування, пристроїв діагностики (вимірювальної установки), яка може здійснювати (періодичний) автоматичний контроль за технічним станом і сигналізувати про настання попереднього стану. Автоматичний діагностичний пристрій доцільно встановлювати для контролю за ел. обладнанням, відмови якого призводять до більшого збитку, а також за ел. обладнанням, доступ до якого утруднений (неможливий). В окремих випадках для унікального обладнання доцільно переходити до діагностики систем. В цьому випадку більшість записів ведеться автоматично та напівавтоматично. При цьому автоматично видається результат діагностики і прогнозу.

Засоби діагностики електричного обладнання доцільно розділяти за наступним принципом:

1. прості засоби для діагностики по обмеженому діагнозу узагальнених діагностичних параметрів, які дозволяють визначити загальний технічний стан електрообладнання . До таких засобів відносяться прості мобільні прилади (вимірювальний міст);

2. засоби для проведення повної діагностики і прогнозування, які дозволяють визначити технічний стан всіх елементів, які обмежують ресурс ел. обладнання.

Засоби діагностики умовно поділяють на:

- автоматизовані;
- автоматичні ручного управління.

Оптимізація різних засобів повинна забезпечувати мінімальну вартість стану об'єкту , мінімум витрат від похибок перевірки, а також техніко-економічну ефективність використовуваних засобів.

Пошук несправностей при діагностиці електричного. обладнання.

Знаходження несправностей допоможе встановити причину відмов та

встановити роботу здатність електричного обладнання з мінімальним и витратами. Пошук несправностей порівняно простого за конструкцією електричного обладнання не викликає труднощів. Для виявлення несправностей складного електричного обладнання та складних систем треба скласти алгоритм пошуку несправності, який дозволить визначити послідовність виконання операцій. При цьому повинні забезпечуватися мінімальні витрати часу і засобів на проведення пошуку.

Алгоритм пошуку виникнення несправності – сукупність перетворень та логічних умов.

В технічній діагностиці відомо значне число методів побудови алгоритмів пошуку несправності. Їх сутність - отримання максимально можливої інформації про технічний стан обладнання.

Процедура пошуку відмов – логічна процедура, яка може бути розділена на 3 етапи:

1. виділення симптому відмов (симптоми відмови електричного обладнання - запах горілої ізоляції тощо.);
2. використання ознак допустимого нормативного функціонування із множини, в якій вид відмови можна визначити на підставі логічного аналізу станів шляхом оцінки засобів індикації;
3. виконання контрольних кроків перевірки елементів (виправлений - невиправлений).

Найбільш розповсюджені алгоритми пошуку несправностей:

1.) *послідовного функціонального аналізу* - заснований на визначенні функції контрольованого об'єкту

Переваги: простота, наочність результатів, які не вимагають докладної інформації.

Недоліки : послідовність пошуку несправностей неоптимальна.

2.) *половинного розбиття* - групова перевірка елементів. Система при кожному кроці перевірки ділиться на 2 рівні частини. Після послідовного ділення навпіл зменшуються групи, наближаючи їх до тієї, в якій є несправний елемент.

Проста побудова алгоритму пошуку – метод середньої точки, яка забезпечує максимум інформації, якщо ймовірність кожного елемента системи приблизно рівні.

Розглянемо систему, яка складається з 8 елементів(рис.11.2):

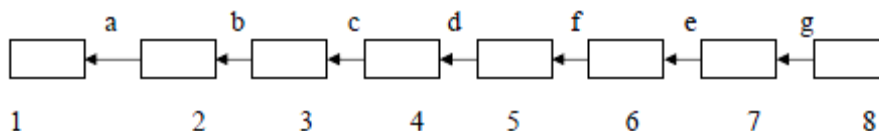


Рисунок 11.2 – Серія точок перевірок

На рисунку виділена серія точок перевірок, які необхідно випробувати при індивідуальній перевірці. Якщо процес перевірки побудувати згідно з методом середніх точок, то замість 7 достатньо буде 3-х перевірок (a, b(c), d(c)).

3.) *імовірісно-часового* - випробування для об'єкту, в якому функціональні елементи зосереджені вільно. Він передбачає перевірку елементів за визначеному раніше заданому алгоритму. Спосіб оснований на випробуванні споживачів, який характеризує надійність елемента. Найбільш загальним методом перевірки є метод "час - ймовірність". При цьому випробується чи $P(t)$ чи $Q(t)$ елемента, віднесені за часом:

$$\frac{P_1(t)}{t_1} > \frac{P_2(t)}{t_2} \dots > \frac{P_i(t)}{t_i}; t_i t_i - \text{час пошуку несправності } i\text{-того елемента.}$$

Прогнозування технічного стану електрообладнання.

Прогнозування технічного стану об'єкту – процес пророкування зміни параметрів в майбутньому.

Необхідність прогнозу зміненого стану об'єкту особливо важлива для об'єктів, на яких дозволені відповідні функції і ціна яких достатньо велика.

Проблема прогнозування технічного стану об'єкту виникає на всіх етапах створення об'єкту (проекування, виготовлення). Використання методів прогнозування в період експлуатації дає змогу обґрунтувати строки проведення

профілактичних робіт.

Проблема прогнозування має фізичні і математичні аспекти.

Фізична побудова аспекту технічного стану об'єкту – основа, яка пояснює походження кількісних змін в об'єкті та можливість переходу в інший кількісний стан.

В будь яких об'єктах протікають процеси, які характеризують його деградацію.

Математичне рішення проблем прогнозування засновано на різноманітності математичного апарату, який залежить від розглянутої системи і закону розвитку деградації (детермінація). В багатьох випадках прогнозування здійснюється за допомогою використання залишкового ресурсу елементу (об'єкту). Для параметрів, абсолютне значення яких підвищується в процесі експлуатації електричного обладнання визначається коефіцієнтом технологічного ресурсу:

$$K_{тр} = \frac{P_{гр} - P_i}{P_{нр}} * 100\%$$

P_i – поточне значення вимірюваного параметру,

$P_{гр}$ – граничне значення параметру.

Спосіб прогнозування технічного стану об'єкту суттєво залежить від періодичності діагностики. Головний метод - безперервний контроль - використовується для складних відповідальних об'єктів (об'єктів з функціональною діагностикою). Застосування до елементів СЕП безперервний контроль здійснюється без відключення електричного обладнання від мережі. Для певного кроку послідовних діагностичних процедур використовують різні математичні вирази, які враховують значення контрольованого параметра.

ЛЕКЦІЯ 12

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З ВИСОКОЮ НАПРУГОЮ.

Дефекти, контрольовані явища і діагностичні параметри ел. обладнання високої напруги

Основні види обладнання СЕП (Т, АТ, пристрої захисту від перевантаження) суттєво відрізняються своїми функціями, умовами випробування, видом експлуатаційних впливів, характером типових дефектів.

Основні причини пошкоджень розглянутого електричне обладнання можна представити таблицею.

З таблиці видно, що різноманітність видів електричного обладнання і причин пошкоджень визначають різноманітність використаних методів і засобів діагностики (тобто немає універсальних засобів).

Вид ел.обладнання	Елементи конструкцій	Причини пошкоджень
Т, АТ	ізоляція	Зволоження, термічно-електричне руйнування, зміна функціональних властивостей, забруднення масла
	Обмотки і магнітопровід	Динамічна нестійкість при к.з, перегрів, виткові короткі замикання
QF	Контрольна система та її привод	Перегрівання, розрегулювання
ОПН і розрядники	Ізоляція	См. УТ і АТ
	Раб. НЛ резистивна, шунт. НЛ	Зношування, зволоження
	Іскровий проміжок	Зміна пробивної напруги джерела (збільш. зазору)

Надійність електричного обладнання високої напруги в значній мірі

визначається працездатністю ізоляції. Старіння ізоляції – поступове не зворотне її погіршення, супроводжується повною втратою ізоляційних властивостей. Воно викликається рядом процесів, які зв'язані з ним хімічною, механічною, електричною взаємодією.

Хімічні процеси, які знижують властивості ізоляційних матеріалів: окислення та інші хімічні реакції в агресивних середовищах (NH_3, O_3). Цьому сприяє присутність вологи та підвищення температури. Ізоляційні властивості знижуються під дією нагрівання, яке викликано зовнішніми причинами та діелектричними явищами в самій ізоляції (всередині ізоляції $\Delta P = U^2 W t g \sigma$ – вплив електричного поля). В результаті температурних впливів виникає зношування, яке супроводжується руйнуванням матеріалу, появою крихкості та зниженням електричної міцності.

Причини електричного характеру, які призводять до старіння ізоляції:

- вплив робочого струму
- вплив перенапруги може викликати іонізовані процеси (часткові розряди)

Механічний вплив: порушення цілісності матеріалів (розрив, розшарування). Це призводить до зниження електричної міцності ізоляції.

Ізоляційне (в окремому випадку ТМ) масло є одним з елементів ізоляції конструкцій. При окислюванні масло старіє, що призводить до появи органічних кислот, які не розчиняються в маслі (знаходяться у виді осаду). Наявність в маслі бульбашок сприяє виникненню окремих розрядів. Кінцевий вплив перелічених факторів на ізоляційну конструкцію – це зміна структури діелектриків, їх властивостей, та поява дефектів (пошкоджень).

Інші групи причин погіршення ізоляції зв'язані з повітрям. Процес порушення ізоляції суттєво підвищується при наявності вологості. Перегрів ізоляції призводить до зниження її механічної міцності, що створює умови для розвитку пошкоджень.

Зараз немає ще придатних до експлуатації прямих методів визначення вологості та ступеня старіння твердої ізоляції (використовуються побічні

методи діагностики). Для цього використовується ряд параметрів ізоляції, значення яких визначає процеси, які відбуваються в діелектриках :

- поляризація (за рахунок електронів та іонів неполярних діелектриків - швидкі види діполей, полярних діелектриків – повільні види);
- абсорбція
- іонізація
- провідність

При перемінній напрузі й абсорбція буде постійною

Для діагностики використовують також залежності вказаних процесів від температури, прикладеної напруги, часу. Значна кількість дефектів виявляється по зміні функціональних властивостей масла та наявності в ньому продуктів розпаду матеріалів даної ізоляції.

Основні контролюючі явища в ізоляції та відповідність їм діагностичних параметрів можна представити в таблиці 12.1.

Таблиця 12.1 – Основні контролюючі явища в ізоляції

Контролюючі явища	Діагностичні параметри
Зміна діелектричних х-к	Струм через ізоляцію, комплексна провідність, діелектричні втрати, ємність
Поява часткових розрядів	Імпульс U, I _{пп} (пробій), імпульс тиску в навколишньому середовищі
Зміна функціональних х-к ізоляційного масла	Ел. міцність, діелектричні втрати, колір, кислотне число, вологостійкість
Інші явища	

Кислотне число – кількість КОН в(г) на (1кг) масла.

До другої групи порушень відносять відмови функціонування, а також недопустиме нагрівання провідних частин. Відмови функціонування, які викликані в основному механічними дефектами елементів конструкції характерні

для комутаційних апаратів (QF, QS, QR, QK).

Головний спосіб оцінки працездатності та виявлення дефектів комутаційних апаратів – комплексне випробування, при якому перевірки та зміни, які характеризують готовність обладнання до нормальної роботи є обов'язковими. Розроблено багато чисельних методів діагностики, орієнтовано на виявлення окремих дефектів.

Вимірювання діелектричних характеристик ізоляції конструкцій

Діагностичний метод	Виявлені дефекти
Вимірювання опору ізоляції	Зволожені, забруднені
Вимір. комплексних провідів, ємність ізоляції, діел. провідність	Зволоження, місцеве руйнування частковими розрядами, погірш. характеристик масла
Вимірювання абсорбційних характеристик	Зволоження
Визначення функціональних характеристик масла	Старіння, перегрів, забруднення
Вимірювання часткових розрядів	Місцеві включення, ел.руйнування
Вимірювання втрат х.х.	Порушення ізоляції елементів магнітопроводу
Вимірювання U_k	Деформація обмоток (зміна геометрії)
Інші	

Контрольовані параметри

- поляризація
- ел. провідність
- діелектричні втрати

Основна характеристика, яка визначає ступінь поляризації діелектрика –

це відносна діелектрична проникність (ϵ)

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0}$$

Q -заряд при знаходженні між електродами діелектрика

$$Q = C \cdot U : E = \frac{C}{\epsilon_0}$$

Для контролю ізоляції конструкцій зручно розглядати ϵ , а с. Як відомо, діелектрики поділяють на неполярні та поляризовані. При цьому має місце декілька видів поляризації:

- електронна
- іонна
- дипольна
- міграційна

Види поляризації розрізняють за часом, який необхідний для її встановлення: час релаксації діелектрика – час, за який впорядковується диполь. Зняття напруги знижує в ϵ раз по відношенню до початкових значень ізоляції:
 $i = R_3 \cdot C = g \cdot E$

Вимірювання ємності ізоляції, крім інформації про зміну структури діелектрика, яку викликано зміною процесу поляризації, дозволяє також побачити місцеві грубі дефекти. При докладанні до ізоляції конструкції напруги, через неї протікає струм. Поляризаційні процеси в діелектриках створюють струми зміщення. Струм зміщення різних видів уповільненої поляризації, спостерігається у технічних діелектриках за абсорбційного впливу. Електрична провідність діелектрика характеризується питомим об'ємом опору (g_i) по поверхні (S^3)

Стан ізоляції характеризується значенням струму провідності.

Інтенсивність та тривалість абсорбційних процесів в ізоляції конструкцій визначається діелектричними характеристиками неоднорідних шарів. Дефекти, які змінюють ступінь її неоднорідності (збільшення, розшарування) змінюють

хід процесу міжшарової поляризації; характеристики струму абсорбції - абсорбційні характеристики ізоляції. При цьому контрольовані параметри: I_{abc} і C_{abc} .

$\frac{dI_{abc}}{dt}$ - залежність від відношення параметрів пошкодженої ізоляції. Один з найбільш головних діагностичних параметрів – коефіцієнт абсорбції (у порівнянні ступеня абсорбції через 15 і 60 с):

$$K_{abc} = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{L_{abc60}}{L_{abc15}}$$

конденсатора в момент включення до джерела.

Крім того в якості діагностичного випробування інших параметрів, приймає участь зміна L_{abc} – коефіцієнт стану:

$$K_c = \frac{di_{abc}}{q_b \cdot dt}$$

q_b - ємнісний заряд об'єкту; $q_b = C_b \cdot U$ - заряд, який з'являється на електродах. При положенні U струм провідності ланцюга ізолюваних конструкцій містить:

- безінерційний струм зміщення, який обумовлений різними видами поляризації (I_b);
- струм зміщення (i_m), який обумовлений процесами слабких видів поляризації;
- струм адекватної провідності (i_n), який обумовлений опором ізоляції, вільними носіями.

$$I_x = I_b + I_m + I_n$$

Втрати діелектричної потужності: $P_d = U^2 \cdot \text{ctg} \sigma$

Для кількості діагностичного контролю зазвичай використовуються значення $\text{tg} \sigma$, який не залежить від розміщення ізоляції конструкцій, але залежить від стану ізоляції (температура нагріву, відстань). Проте треба пам'ятати, що величина $\text{tg} \sigma$ дає середню об'ємну характеристику стану

ізоляції. В основному вимірювання $\text{tg}\sigma$ дозволяє знайти загальні погіршення ізоляції, місцеві дефекти з допомогою $\text{tg}\sigma$ не виявляються.

Вимірювальні установки та схеми вимірювання характеристик ізоляції.

Установка для вимірювання характеристик ізоляції електричного обладнання в загальному випадку складається із засобу вимірювання, джерела вимірювальної напруги і провідників для з'єднання їх з діагностичним об'єктом (рис. 12.1). Джерело напруги може бути зовнішнім (ТТД), а у випадку контролю електричного обладнання без виводу з експлуатації вимірюється $U=U_{\text{роб}}$ об'єкту. За місцем положення в ланцюгу вимірювальної установки розрізняють:

1. пряму
2. перевернуту
3. зворотну

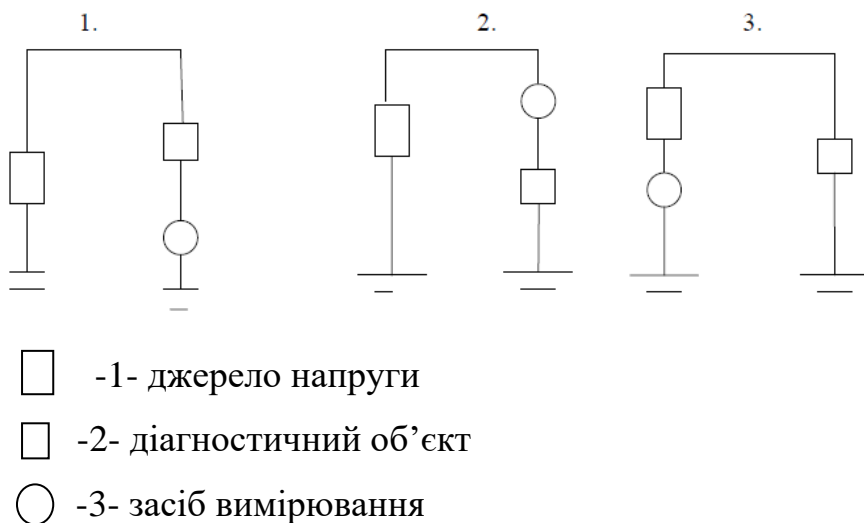


Рисунок 12.1 – Схеми вимірювання

Пряма – схема в якій засіб вимірювання знаходиться між виводом ізолюваного об'єкта і заземленням. Засіб вимірювання знаходиться під невеликим потенціалом відносно зменшення. Схема має найбільшу перешкодозаміняємість і використовується у всіх випадках, коли є можливість під'єднання до загальних виводів об'єкту.

Перевернута – схема з включенням засобу вимірювання в ланцюг між

джерелом та об'єктом. Схема використовується для об'єкту, у якого один з виводів не може бути відімкнений від заземлення.

Недоліки : засіб вимірювання під високою напругою відносно землі.

Зворотна – схема з засобом вимірювання, який включений в ланцюг заземлення джерела. Схема також дозволяє здійснювати вимірювання об'єкту з одним заземленим виводом. Схема у зв'язку зі складністю конструкції засобу вимірювання практично не використовується.

Вимірювання опору ізоляції

Опір ізоляції визначається за значенням струму, що протікає через неї при постійно прикладеній напрузі. В основному вимірювання опору ізоляції здійснюється за допомогою мегомметра(рис. 12.2). Він побудований на 2-х принципах:

1. логометр МЕС
2. електронна схема

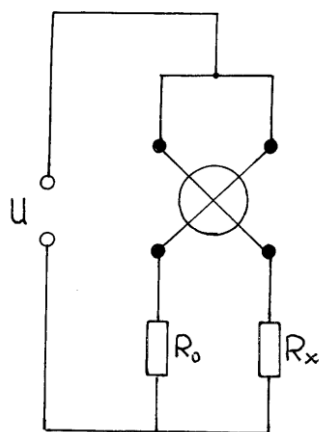


Рисунок 12.2 – Вимірювання опору ізоляції за допомогою мегомметра

$$\alpha = f \frac{i_x}{i_0} \quad \text{мегомметром вимірюють } R_{\text{зм.}}$$

Вимірювання характеристик абсорбції ізоляції

Ведеться при постійно прикладеній до ізоляції напрузі. В основу покладена наступна схема для вимірювання струму абсорбції (рис. 12.3).

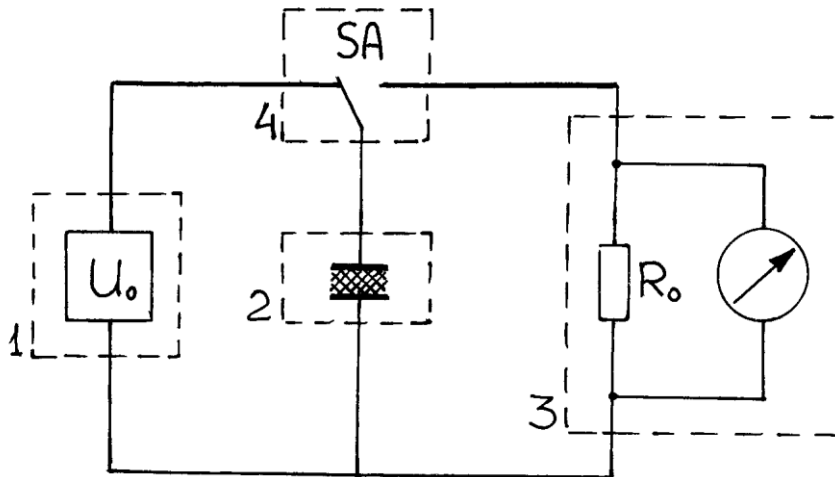


Рисунок 12.3 – Схема для вимірювання струму абсорбції

1 - джерело напруги; 2 - об'єкт діагностики; 3 - вимірювальний прилад;
4 - комутатор

Попередньо розряджена джерелом напруги схема об'єкту комутатором SA скорочується і вимикається на вихід 3, який в заданий момент часу вимірюється ΔU на R_0 . При малому значенні R_0 , вимірюється $U=I_{\text{абс}}$. Крім того, в момент заряду q_0 , для визначення K_c , який характеризується швидкістю зміни струму абсорбції проводять розрахунки за результатами 2-х кратного вимірювання значень струму через 0,0 і 0,1 після переключення. Тому значення K_c можна визначити :

$$K_c = \frac{\Delta i}{q_0 * \Delta t} = \frac{i_{\text{абс}} 0,06 - i_{\text{абс}} 0,1}{0,04 q_0}$$

Вимірювання C і $\text{tg}\sigma$ ізоляції

Найбільш широке розповсюдження отримала мостова схема. Вона застосовується для ланцюгів високої напруги (рис.12.4).

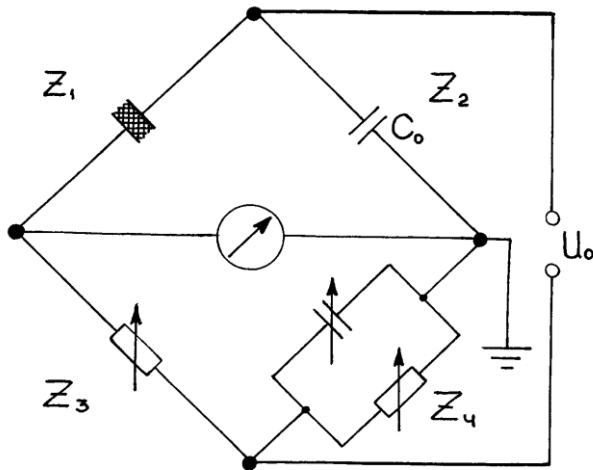


Рисунок 12.4 – Мостова схема вимірювань C і $\text{tg}\sigma$ ізоляції

Комплексний опір z мосту може бути представлений в алгебраїчній та експоненційній формі. Якщо використовувати експоненційну форму, то можна правильно сформулювати:

$$z_1 * z_4 = z_2 * z_3, \quad z_1, z_4 e^{-i(\gamma_1 - \gamma_4)} = z_2 * z_3 e^{-i(\gamma_2 - \gamma_3)}$$

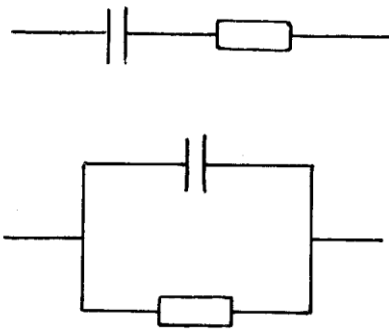
З виразу виходить 2 умови :

1. рівність (z) протилежних гілок : $z_1 z_4 = z_2 * z_3$
2. рівність фазових втрат: $\gamma_1 - \gamma_4 = \gamma_2 - \gamma_3$

Заземлення вершини мосту робить безпечним роботу, при живленні мосту від джерела.

Мостова схема складається із контрольованого об'єкту діагностики, який має $C_x, \text{tg}\sigma_x$; зразкового C_0 , ланцюга вирівнювання (2->1/-) (1->1/-), (3->1.-)

Умови рівності мосту застосовують до елементів схеми



1.-з низькими втратами

2.-з великими втратами

Для надійної ізоляції :

$$z1 = R_x + \frac{1}{j\omega C_x};$$

$$z3 = R_x;$$

$$z2 = \frac{1}{j\omega C_0};$$

$$z4 = Z_{екв}.$$

Після операції множення виділяють 2 рівні (для дійсної та уявної частини) $\text{tg}\sigma_x = R_x/C_x$

Для вимірювання C_x та $\text{tg}\sigma_x$ можна використовувати ватметр:

$$P_\delta = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \text{tg}\sigma$$

$$\text{tg}\sigma = \frac{P_\delta}{U^2 \cdot \omega \cdot C}$$

При малих σ $\text{tg}\tilde{\sigma} = \cos \gamma = P_d/V_i$

Діагностика електричного обладнання за робочими напругами

Підвищення ефективності контролю при зниженні витрат на його проведення можливе на основі контролю параметрів без вимкнення обладнання з використанням методів вимірювання, виконання контролю під робочою напругою об'єкту. Ефективність такого контролю підвищується як за рахунок

підвищення частоти вимірювання, так і за рахунок того, що ізоляція при цьому випробовується в більш тяжких умовах.

Можливі 2 способи організації контролю ізоляції обладнання без його вимкнення:

1. періодичний (для виявлення погіршення стану ізоляції, яке викликає певні зміни значень контрольованих параметрів);
2. безперервний (виявлення суттєвих змін контрольованих параметрів та віддача сигналу з досягненням граничних значень).

Вже багато років у системах з ізольованою нейтраллю (до 35 кВ включно) для контролю ізоляції мережі по відношенню до землі та визначення пошкодженої фази застосовують схему з'єднання трансформатора напруги, що показана на рис. 12.5.

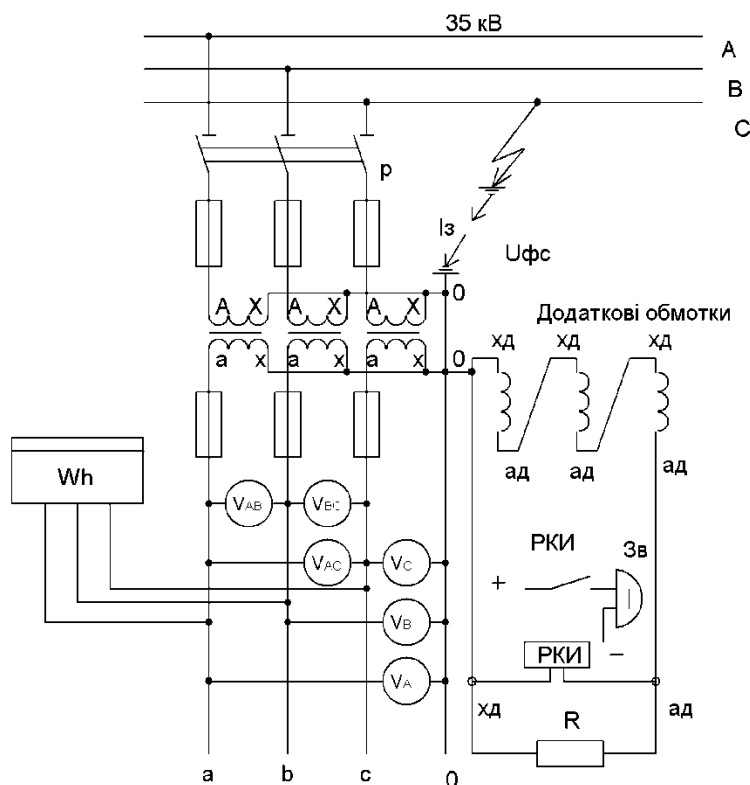


Рисунок 12.5 – Схема для контролю ізоляції мережі по відношенню до землі та визначення пошкодженої фази

За допомогою цієї схеми можна вимірювати як міжфазні напруги, так і напруги фаз по відношенню до землі. Вона використовується для підключення

лічильників, вольтметрів, реле напруги та деяких інших приладів. Визначення фази, що має замикання на землю, здійснюють по показанням фазних вольтметрів. При відсутності замикання на землю всі фазні вольтметри показують фазні напруги. При глухому (металевому) замиканні, наприклад, фази С на землю струм замикання на землю I_z проходить від точки замикання фази через землю до точки заземлення нейтралі. Первинні обмотки фаз А і В трансформатора напруги виявляються під лінійною напругою по відношенню до землі, а обмотка фази С – нуль. По нульовому показанню вольтметра визначають фазу замкнену на землю.

Робота мережі з ізольованою нейтраллю при однофазному замиканні на землю у зв'язку з невеликим значенням струму I_z ($I_z = 0,1-50A$) допускається протягом 2 годин.

До затисків а, б, с, 0 основних обмоток ЗНОМ-35 підключають один вольтметр з перемикачем, який забезпечує вимірювання будь-якої лінійної та фазної напруги. До затисків $a_d - x_d$ додаткових обмоток, з'єднаних в розімкнений «трикутник», в вершину «трикутника» підключають реле контролю ізоляції РКІ. В нормальному режимі роботи геометрична сума фазних напруг трифазної системи, з'єднаної в «трикутник», повинна бути рівна нулю, тому на затисках розімкненого «трикутника» $a_d - x_d$, між якими ввімкнено реле РКІ, приблизно рівна нулю і реле РКІ не збуджене. Коли одна з фаз первинної мережі, наприклад фаза С, замикається на землю, то внаслідок шунтування землею фази С первинної обмотки ТН на затисках розімкненого « трикутника» з'являється напруга, рівна геометричній сумі напруг двох неушкоджених фаз. Збуджується реле РКІ та своїми контактами створює ланцюг на дзвоник Зв. Після цього вольтметром з перемикачем знаходять фазу з замиканням на землю.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Матвійчук В. А. Діагностування електрообладнання. Навч. посіб. / В. А. Матвійчук, О. Є.Рубаненко, І.О. Гунько – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 138 с.
2. Конспект лекцій з дисципліни «Надійність і діагностика електрообладнання» для студентів за напрямом 6.050702 “ Електромеханіка”/ Укл.: к.т.н., доцент Ключев О.В. - Дніпродзержинськ: ДДТУ,2013, 143 стор.
3. Кутін В.М. Діагностика електрообладнання : навчальний посібник /В. М. Кутін, М. О. Ілюхін, М. В. Кутіна – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 161 с.
4. Монтаж, наладка і експлуатація електрообладнання. Конспект лекцій (для студентів 5 курсу денної і 6 курсу заочної форм навчання спеціальності 7.0906003 – «Електричні системи електроспоживання») / Авт. А.В. Хитров – Харків: ХНАМГ, 2009. – 328 с.
5. Васілевський, О. М. Нормування показників надійності технічних засобів : навчальний посібник / О. М. Васілевський, О. Г. Ігнатенко. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 160 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. 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» та «Електротехнічні системи електроспоживання (освітньо-наукова)») / 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.
8. Діагностика стану електротехнічного обладнання: Курс лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141

«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійних програм «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О. Р. Проценко Я. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,06 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 162 с.

9. Журахівський А.В. Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж: підручник/ А.В. Журахівський, С.В. Казанський, Ю.П. Матеєнко, О.Р. Пастух.–Київ.:КПІім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. –456с.–Бібліогр.:с. 450-452.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

курс лекцій з дисципліни

"НАДІЙНІСТЬ І ДІАГНОСТИКА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ"

*(для здобувачів вищої освіти рівня бакалавр спеціальності 141
Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Укладач: Н. М. Філімоненко

Оригінал-макет

Підписано до друку _____

Формат 60x84^{1/16}. Папір типограф. Гарнітура Times.

Друк офсетний. Умов. друк. арк. №. Облік. вид. арк. ____.

Тираж ____ екз. Вид. № ____ . Замов. № ____ . Ціна договірна.

Видавництво Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля

Адреса видавництва: вул. Іоанна Павла II, 17

Тел.+38(050)218 04 78, факс (06452) 4 03 42

e-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com