

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

для виконання контрольної роботи

з навчальної дисципліни

«НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ»

*(для магістрів заочної форми навчання за спеціальністю
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітні
програми «Електротехнічні системи електроспоживання» та
«Електротехнічні системи електроспоживання (освітньо-наукова)»)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. БЕКЕТОВА
2017

Методичні вказівки до виконання контрольної роботи з навчальної дисципліни «Надійність електричних мереж» (для магістрів заочної форми навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітні програми «Електротехнічні системи електроспоживання» та «Електротехнічні системи електроспоживання (освітньо-наукова)») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : П. П. Рожков, С. Е. Рожкова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 36 с.

Укладачі канд. техн. наук П. П. Рожков,
канд. техн. наук С. Е. Рожкова

Рецензент:

Д. М. Калюжний, кандидат технічних наук, доцент Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою електропостачання міст протокол № 10 від 26.06.2013 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Основні теоретичні положення.....	5
1.1 Причини й характер пошкоджень основних елементів систем електропостачання.....	5
1.2 Надійність елемента СЕП.....	9
1.3 Надійність структур.....	17
2 Приклади розв'язання задач.....	21
3 Варіанти завдань та вказівки до оформлення контрольної роботи.....	26
Список рекомендованої літератури.....	35

ВСТУП

Проблема надійності електричних станцій, підстанцій, ліній електропередачі, електричних мереж і систем – одна з першочергових проблем енергетики. В окремих енергетичних системах число аварій протягом року досягає декількох десятків, а річний обсяг електричної енергії, яку не отримав споживач в результаті аварій – декількох мільйонів кіловат-годин. Сумарна потужність генераторів, що одночасно простоюють в аварійному ремонті, становить мільйони кіловат. При такій високій аварійності в енергосистемах оцінка надійності окремих видів устаткування й установок, пошук шляхів підвищення надійності як у ході експлуатації, так і при проектуванні стають першочерговими завданнями.

З іншого боку, оцінивши збиток, нанесений споживачам перервою електропостачання, збитки, пов'язані з аварійним ремонтом, а також витрати на підвищення надійності, можна порушувати питання про оптимальний рівень надійності електроенергетичного устаткування, установок і систем.

Створення нових унікальних машин, апаратів, ліній електропередачі, великих енергетичних об'єднань і комплексів вимагає застосування таких методів аналізу й розрахунку надійності, які дозволили б при проектуванні об'єктивно врахувати досвід експлуатації, дані експериментів, розрахувати надійність, проаналізувати варіанти по забезпеченню надійності, обґрунтувати її підвищення, прогнозувати надійність, виключити можливість катастрофічного результату аварій для людей і навколишнього середовища.

Теорія надійності є науковою основою діяльності лабораторій, відділів, бюро й груп надійності на підприємствах, у проектних, науково-дослідних й експлуатуючих організаціях.

Із проблемою надійності в електроенергетиці зв'язані наступні практичні завдання: статистична оцінка й аналіз надійності діючого устаткування й установок, прогнозування надійності устаткування й установок, нормування рівня надійності, випробування на надійність, розрахунок й аналіз надійності, забезпечення надійності, оптимізація технічних рішень щодо забезпечення надійності при проектуванні, створенні й експлуатації електроенергетичного устаткування, установок і систем.

1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

1.1 Причини й характер пошкоджень основних елементів систем електропостачання

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

Класифікація відмов. За тривалістю розрізняють наступні відмови в електропостачанні:

- тривалі перерви в електропостачанні споживача, обумовлені ліквідацією масових пошкоджень у СЕП, викликаних, як правило, ожеледдям і вітровими руйнуваннями опор та проводів ЛЕП (на період до декількох діб);
- припинення живлення споживачів на час відновлення працездатності елемента, що відмовив, СЕП (4–24 годин);
- припинення живлення споживачів на час, необхідний для включення резервного живлення вручну діями оперативно - виїзних бригад підприємств електричних мереж (1,5–6 годин);
- припинення живлення на час оперативних перемикань, виконуваних черговим персоналом на підстанціях (кілька хвилин);
- короткочасна відмова в електропостачанні споживача на час автоматичного уведення резервного живлення або автоматичного відключення пошкодженої 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 споживач попереджається завчасно.

Стосовно до відмови й пошкодження застосовуються такі поняття, як критерій, причина, ознаки (прояву), характер і наслідки.

Критерій відмови – працездатний стан об'єкта визначається переліком заданих параметрів і припустимих меж їхньої зміни – допусками. Порушенням 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 й ремонтах, порушенні правил і норм експлуатації, різного роду пошкодження, а також природні процеси зношеності й старіння.

Ознаками відмови (пошкодження) називаються 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 (пошкодження) називають конкретні зміни в об'єкті, пов'язані з виникненням відмови (пошкодження), наприклад обрив проведення.

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

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

Основними причинами пошкоджень повітряних ліній (ПЛ) є: грозові перекриття ізоляції; ожеледдя та ізморозеві відкладення; навантаження від вітру; вібрація й танок проводів; загоряння дерев'яних опор; ослаблення механічної міцності деталей опор; пошкодження 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 й танку в результаті розлому окремих дротів, поломці деталей, падінню стійок разом із проводами. Найбільш важкі наслідки викликають ожеледдя і 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 й металу, порушення центрування арматури в залізобетонних виробках, неякісне просочення деревини антисептиками, неякісне з'єднання дротів при виготовленні проведення тощо);

- неправильним застосуванням типів проводів, опор, ізоляторів за природно - кліматичними зонами країни;
- використання глухих затискачів замість затискачів обмеженої міцності закладення тощо;
- порушенням правил монтажу й спорудження ПЛ (неправильне виведення стійок залізобетонних опор, недостатнє поглиблення опор при установці, розхитування проводів по траверсах опор; неправильна установка стріл прогину тощо);
- порушеннями при прийманні лінії в експлуатацію (невиконання перевірки дефектних ізоляторів і термосварних з'єднань, невідповідність застосованих типів виробів закладеним у проектах);
- недоліками експлуатації (недотримання строків, обсягів і складу перевірок, вимірів, заміни дефектного устаткування, капітальних ремонтів, фарбування, підтяжки й інших робіт на ПЛ);
- порушеннями сторонніми організаціями й особами (наїзди на опори, проїзди під ПЛ високогабаритних механізмів, накиди).

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

Пошкоджуваність КЛ залежить від способу прокладки КЛ (у землі, блоках, трубах, тунелях), різниці горизонтальних рівнів ділянки КЛ (при більших перепадах відбувається набрякання масла й осушення ізоляції), агресивності навколишнього середовища, величини блукаючих струмів і наявності захисту від них, інтенсивності ведення будівельних робіт у 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.

Силкові трансформатори пошкоджується значно рідше, ніж лінії електропередачі, однак відмова трансформатора веде до важких наслідків і відновлення його працездатності вимагає тривалого часу.

Основні причини пошкодження трансформаторів:

– пошкодження ізоляції обмоток трансформатора через дефекти конструкції й виготовлення, при впливі зовнішніх перенапруг у мережі, струмів коротких замикань;

– пошкодження перемикачів (в основному регульованих під навантаженням), також викликаних конструктивними й технологічними дефектами;

– пошкодження вводів, в основному при впливі зовнішніх перенапруг у мережі (перекриття зовнішньої або внутрішньої ізоляції, механічні пошкодження, неякісні контактні з'єднання).

Ремонт трансформаторів більших габаритів виконується 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 виконується централізовано в майстернях підприємств електричних мереж. Пошкоджений трансформатор замінюється іншим, працездатним.

Основні способи підвищення надійності експлуатації трансформаторів:

– ретельне приймання в експлуатацію з виконанням контрольних випробувань;

– періодичні огляди й перевірки в процесі експлуатації з виконанням необхідних строків й 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 у стаціонарному стані.

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

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

1.2 Надійність елемента СЕП

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

Значення показників надійності елементів електричних мереж наведені в довідковій літературі.

Перелічимо основні показники надійності.

Інтенсивність відмов – це ймовірність того, що елемент, який раніше проробив безвідмовно до моменту t , відмовить у відрізок $(t + \Delta t)$ за умови, що інтервал 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. Статистична інтенсивність відмов визначається 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.

Імовірність 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 $N(0)$:

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

Імовірність 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 імовірності відмови – похідна величина від імовірності 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 $f(t)$ визначається як відношення числа елементів $n(t, \Delta t)$, що відмовили за інтервал Δt часу, до первісного числа спостережуваних елементів:

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

Середній час безвідмовної роботи

$$T = M(\varphi_1) = \int_0^{\infty} R(t) dt.$$

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

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, які перебувають під спостереженням $N(t)$, за умови, що всі елементи, які вийшли з ладу, замінюються працездатними:

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

Імовірність 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 $G(t)$ визначається 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:

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

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

Коефіцієнт готовності K_G визначає ймовірність знаходження елемента в працездатному стані в сталому режимі. Для будь-яких законів розподілу

$$K_G = \frac{T}{(T + \tau)}.$$

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

Очевидно, що

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

Коефіцієнт технічного використання обчислюють за формулою

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

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

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

$$K_{OG} = K_G R(t).$$

На основі аналізу великої кількості статистичних даних про відмови елементів СЕП доведено, що $\lambda(t)$ в часі описується кривою, що наведена на рисунку 1. На цій кривій можна виділити три фази з різними закономірностями зміни інтенсивності відмов.

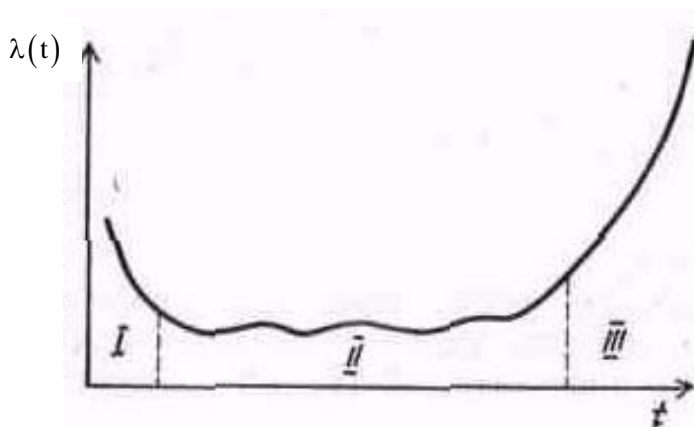


Рисунок 1 – Залежність інтенсивності відмов від часу

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 й відмови відбуваються в основному за рахунок перевищення розрахункових значень факторів, що впливають. У цей період функція не залежить від часу початку спостереження й описується експоненціальним розподілом.

Третя фаза – старіння елемента. Внаслідок зношеності, втоми, 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 й 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 із 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 .

Розглянемо процес функціонування елементів, який зображений на рисунку 2. Елемент, проробивши випадковий час T_1 , відмовляє й потім відновлюється протягом τ_1 . Після відновлення він функціонує знову й, проробивши якийсь час T_2 , знову виходить із ладу, відновлюється за час τ_2 тощо

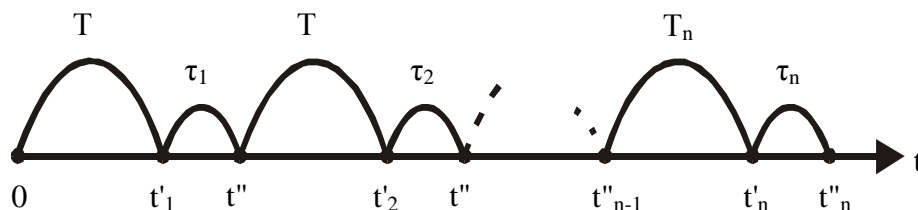


Рисунок 2 – Процес функціонування елемента

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 у 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 у той самий момент часу дуже мала

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

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

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.

У реальних умовах електричних мереж жодна із зазначених властивостей у точності не дотримується. При відмові одного з елементів може відбутися перерозподіл навантаження на елементи, що залишилися таким чином, що й ці елементи відмовлять, тобто порушиться відсутність післядії. Фактично небезпека відмови елемента з його «віком» збільшується (нестационарність процесу). Порушується й 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 й ординарності, називають найпростішим потоком.

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

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

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

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

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

– ймовірність безвідмовної роботи в інтервалі від 0 до t

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

– ймовірність відмови

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

– щільність ймовірності відмови

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

– 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 устаткування, 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. Тому в електроенергетиці при рішенні практичних завдань інтенсивність відмов вважається постійною протягом тривалого часу.

Як параметр експоненціального розподілу відновлення використовується 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 приймається, що час безвідмовної роботи T і час відновлення t розподіляються за експоненціальним законом.

1.3 Надійність структур

Розглянемо електричну мережу як якусь абстрактну структуру поза залежністю від її фізичної природи, але яка має наступні закономірності:

- структура має вхід і вихід;
- показники надійності структури визначаються на вході;
- елементи перебувають тільки у двох станах – працездатному й непрацездатному;
- відмови елементів розглядаються як незалежні події;
- потоки відмов і відновлення елементів є найпростішими потоками подій;
- пропускна здатність елементів не є обмеженою.

Послідовним з'єднанням називається така структура, відмова якої настає при виході з ладу хоча б одного елемента, тобто послідовна структура працездатна, якщо всі її елементи працездатні.

Нехай подія X_i означає, що i -й елемент послідовної структури працездатний, а \bar{X}_i – зворотна подія. Тоді структура, що складається з n послідовно з'єднаних елементів, працездатна, якщо X_1, X_2, \dots, X_n працездатні.

Оскільки події X_i є незалежними, за законом добутку ймовірностей імовірність того, що послідовна структура працездатна, обчислимо за формулою

$$P(X_1 \wedge X_2 \wedge \dots \wedge X_n) = p(X_1) \cdot p(X_2) \cdot \dots \cdot p(X_n) = \prod_{i=1}^n p(X_i),$$

а ймовірність безвідмовної роботи

$$R_c(t) = R_1(t)R_2(t)\dots R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t),$$

або ймовірність відмови

$$F_c(t) = 1 - R_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n R_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i(t)).$$

Оскільки $R_i(t) \leq 1$, то

$$R_c(t) \leq R_i(t) \text{ й } F_c(t) \geq F_i(t).$$

Оскільки

$$R_i(t) = e^{-t \int_0^t \lambda_i(x) dx},$$

то

$$R_c(t) = e^{-t \sum_{i=1}^n \lambda_i(t)},$$

$$F_c = 1 - e^{-t \sum_{i=1}^n \lambda_i(t)}.$$

Для випадку $\lambda(t) = \lambda = \omega$

$$R_c = e^{-t \sum_{i=1}^n \omega_i} \text{ і } F_c = 1 - e^{-t \sum_{i=1}^n \omega_i}.$$

Тоді частота відмов структури

$$\omega_c = \sum_{i=1}^n \omega_i.$$

Середній час безвідмовної роботи

$$T_c = \frac{1}{\omega_c}.$$

Середній час відновлення

$$\tau_c = \frac{1}{\omega_c^{-1}} \sum_{i=1}^n \omega_i \tau_i$$

є математичним очікуванням часу відновлення, зваженим за частотою відмов n послідовно з'єднаних елементів.

Паралельним з'єднанням називається структура, відмова якої настає при відмові всіх елементів, що входять у структуру.

Паралельну структуру називають ще надлишковою або резервованою структурою, оскільки вона містить елементів більше, ніж це необхідно для її нормального функціонування. При відмові одного або декількох елементів функція структури виконується елементами, що залишилися в роботі.

Відмова паралельної структури припускає, що всі m елементів перебувають у стані простою

$$P(\overline{X}_1 \wedge \overline{X}_2 \wedge \dots \wedge \overline{X}_m) = P(X_1) \cdot P(X_2) \cdot \dots \cdot P(X_m) = \prod_{j=1}^m p(\overline{X}_j).$$

Імовірність відмови

$$F_c(t) = F_1(t) \cdot F_2(t) \cdot \dots \cdot F_m(t) = \prod_{j=1}^m F_j(t).$$

Імовірність безвідмовної роботи

$$R_c(t) = 1 - F_c(t) = 1 - \prod_{j=1}^m F_j(t) = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - R_j(t)).$$

Оскільки $F_j(t) \leq 1$, то $F_c(t) \leq F_j(t)$, $R_c(t) \geq R_j(t)$.

У загальному випадку для структури, що складається з m паралельно з'єднаних елементів, частота відмов

$$\omega_c = \prod_{j=1}^n \omega_j \tau_j \sum_{j=1}^m \frac{1}{\tau_j},$$

або

$$\omega_c = 8760^{1-m} \prod_{j=1}^m \omega_j \tau_j \sum_{j=1}^m \frac{1}{\tau_j} \text{ 1/рік.}$$

Середній час відновлення

$$\tau_c = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{\tau_j}}.$$

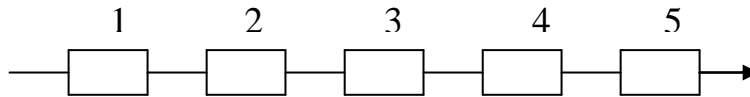
Для системи з рівнонадійними елементами

$$\omega_c = m \omega^m \tau^{m-1}; \quad \tau_c = m^{-1} \tau.$$

У наступному розділі будуть розглянуті приклади розв'язання задач розрахунку показників надійності структур.

2 ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Визначити показники надійності системи, що складається з послідовно з'єднаних елементів.



$$\omega_1 = 0,5 \text{ 1/рік}; \quad \tau = 16,0 \text{ год};$$

$$\omega_2 = 0,32 \text{ 1/рік}; \quad \tau = 8,0 \text{ год};$$

$$\omega_3 = 0,3 \text{ 1/рік}; \quad \tau = 6,0 \text{ год};$$

$$\omega_4 = 0,64 \text{ 1/рік}; \quad \tau = 12,0 \text{ год};$$

$$\omega_5 = 0,001 \text{ 1/рік}; \quad \tau = 15,0 \text{ год}.$$

Розв'язання.

Частота відмов

$$\omega_c = \sum_1^5 \omega_i = 0,5 + 0,32 + 0,3 + 0,64 + 0,001 = 1,761 \text{ 1/рік}.$$

Середній час відновлення, год

$$\begin{aligned} \tau_c &= \frac{1}{\omega_c} \sum_1^5 \omega_i \tau_i = \\ &= \frac{1}{1,761} (0,5 \cdot 16 + 0,32 \cdot 8 + 0,3 \cdot 6 + 0,64 \cdot 12,5 + 0,001 \cdot 15) = 11,57. \end{aligned}$$

Середній час безвідмовної роботи

$$T_c = \frac{1}{\omega_c} = \frac{1}{1,761} = 0,568 \text{ років},$$

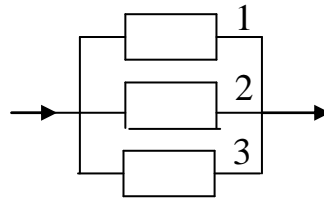
або

$$T_c = 0,568 \cdot 8760 = 4974 \text{ год}.$$

Імовірність відмови системи за $t=1$ рік

$$F_c(1) = 1 - e^{-\omega_c t} = 1 - e^{-1,761 \cdot 1} = 1 - 0,172 = 0,83.$$

Задача 2. Визначити показники надійності системи, що складає із трьох паралельно з'єднаних елементів.



$$\omega_1 = 1,2 \text{ 1/рік}; \quad \tau_1 = 16 \text{ год};$$

$$\omega_2 = 2,7 \text{ 1/рік}; \quad \tau_2 = 6 \text{ год};$$

$$\omega_3 = 5,2 \text{ 1/рік}; \quad \tau_3 = 24 \text{ год}.$$

Розв'язання.

Частота відмов

$$\omega_c = 8760^{1-3} \omega_1 \tau_1 \omega_2 \tau_2 \omega_3 \tau_3 \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_3} \right) = 1,37 \cdot 10^{-4} \text{ 1/рік}.$$

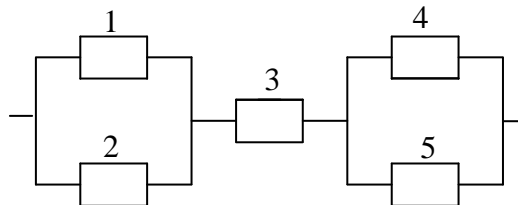
Середній час відновлення

$$\tau_c = \frac{1}{\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_3}} = 3,69 \text{ год}.$$

Імовірність відмови за рік

$$F_c = 1 - e^{-0,000137 \cdot 1} = 0,000137.$$

Задача 3. Визначите показники надійності системи.



$$\lambda_1 = 0,1 \text{ 1/рік}; \quad t_{e1} = 16 \text{ год};$$

$$\lambda_2 = 0,5 \text{ 1/рік}; \quad t_{e2} = 8 \text{ год};$$

$$\lambda_3 = 0,6 \text{ 1/рік}; \quad t_{e3} = 10 \text{ год};$$

$$\lambda_4 = 0,2 \text{ 1/рік}; \quad t_{e4} = 4 \text{ год};$$

$$\lambda_5 = 0,2 \text{ 1/рік}; \quad t_{e5} = 4 \text{ год}.$$

Розв'язання.

Розрахунок показників надійності виконується поетапними еквівалентними перетвореннями послідовно й паралельно з'єднаних елементів. Еквівалентний елемент 6, що представляє паралельне з'єднання елементів 1 й 2, має інтенсивність відмов (1/рік)

$$\begin{aligned}\lambda_6 &= 8760^{-1} \cdot \lambda_1 \cdot t_{e1} \cdot \lambda_2 \cdot t_{e2} \left(\frac{1}{t_{e1}} + \frac{1}{t_{e2}} \right) = \\ &= 8760^{-1} \cdot 0,05 \cdot 24 = 0,1368 \cdot 10^{-3};\end{aligned}$$

$$t_{e6} = \frac{1}{\frac{1}{t_{e1}} + \frac{1}{t_{e2}}} = \frac{t_{e1} \cdot t_{e2}}{t_{e1} + t_{e2}} = \frac{16 \cdot 8}{16 + 8} = 5,333 \text{ год.}$$

Еквівалентний елемент 7, що представляє паралельно з'єднані елементи 4 і 5, має інтенсивність відмов (1/рік)

$$\begin{aligned}\lambda_7 &= 8760^{-1} \cdot \lambda_4 \cdot t_{e4} \cdot \lambda_5 \cdot t_{e5} \left(\frac{1}{t_{e4}} + \frac{1}{t_{e5}} \right) = \\ &= 8760^{-1} \cdot 0,2 \cdot 4 \cdot 0,2 \cdot 4 \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4} \right) = \\ &= 8760^{-1} \cdot 0,2 \cdot 0,2 \cdot 8 = 0,03648 \cdot 10^{-3} \text{ 1/рік};\end{aligned}$$

$$t_{e7} = \frac{1}{\frac{1}{t_{e4}} + \frac{1}{t_{e5}}} = \frac{1}{\frac{1}{4} + \frac{1}{4}} = 2 \text{ год.}$$

Показники надійності системи для послідовно з'єднаних елементів 6, 3 й 7

$$\begin{aligned}\lambda_c &= \lambda_6 + \lambda_3 + \lambda_7 = \\ &= 0,1386 \cdot 10^{-3} + 0,6 + 0,03648 \cdot 10^{-3} = 0,6 \text{ 1/рік},\end{aligned}$$

$$t_{ec} = \frac{1}{\lambda_c} \cdot (\lambda_6 \cdot t_{e6} \cdot \lambda_3 \cdot t_{e3} \cdot \lambda_7 \cdot t_{e7}) = \frac{1}{0,60017328} \times$$

$$\times (0,1368 \cdot 10^{-3} \cdot 5,333 + 0,6 \cdot 10 + 0,03648 \cdot 10^{-3} \cdot 2) = 9,998 \text{ год.}$$

Середній час безвідмовної роботи системи

$$T_c = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{0,60017328} = 1,667 \text{ рік.}$$

Імовірність відмови системи за один рік

$$F_c(1) = 1 - e^{-\lambda_c \cdot 1} = 1 - e^{-0,6} = 0,45.$$

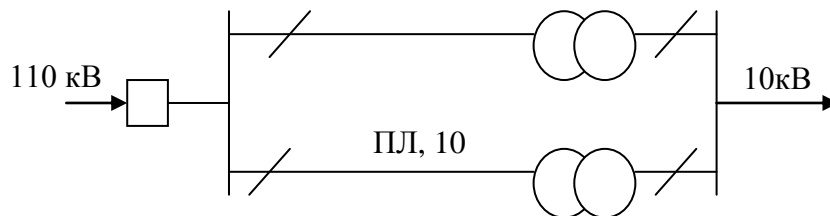
Коефіцієнт готовності

$$K_{\Gamma} = \frac{T_c}{T_c + t_{\text{вс}}} \approx 1.$$

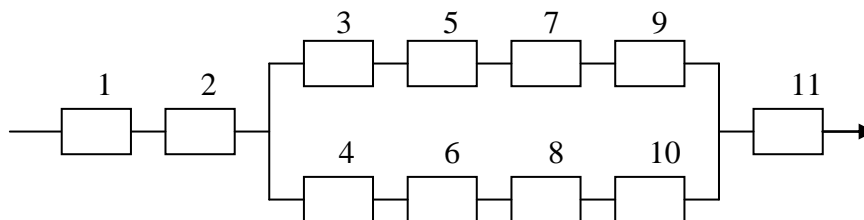
Коефіцієнт змушеного простою

$$K_{\text{пр}} = 1 - K_{\Gamma} \approx 0.$$

Задача 4. Визначити показники надійності системи.



Перейдемо до еквівалентної схем, показники надійності відповідних елементів наведемо в таблиці 1.



Таблиця 1 - Показники надійності елементів

№ з/п	Елемент	Умовн. позн.	Частота відмов ω , 1/рік	Середн. час відновл., год	Прим.
1	Осередок вимик. 35, 110 кВ	В110	0,02	5,5	
2	Шини ВРП 35, 110 кВ	Ш110	0,002	8	0,001·2; 4·2
3, 4	Осередок роз'єд. 35, 110 кВ	Р110	0,005	4,5	
7, 8	Трансформатор 35, 110 кВ	Т110	0,03	30	
9, 10	Осередок роз'єд. 6, 10 кВ	РВ10	0,002	4	
11	Шини РП 6, 10 кВ	Ш10	0,02	7	0,001·2; 3,5·2
5, 6	Повітр. лінія одн. на 1км	Л110	0,8	8	0,08·10

Для послідовно включених елементів 3, 5, 7, 9

$$\omega_{12} = \omega_3 + \omega_5 + \omega_7 + \omega_9 = 0,005 + 0,8 + 0,03 + 0,002 = 0,837 \text{ 1/год};$$

$$\tau_{12} = \frac{1}{0,837} (0,005 \cdot 4,5 + 0,8 \cdot 8 + 0,03 \cdot 30 + 0,002 \cdot 4) = 8,75 \text{ год.}$$

Для резервованої частини ланцюга

$$\begin{aligned} \omega_{13} &= 8760^{-1} \cdot \omega_{12} \cdot \omega_{12} \cdot \tau_{12} \cdot \tau_{12} \cdot \left(\frac{1}{\tau_{12}} + \frac{1}{\tau_{12}} \right) = \\ &= \frac{\omega_{12}^2 \cdot 2 \cdot \tau_{12}}{8760} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/рік}; \end{aligned}$$

$$\tau_{13} = \frac{1}{\frac{1}{\tau_{12}} + \frac{1}{\tau_{12}}} = \frac{\tau_{12}^2}{2\tau_{12}} = \frac{\tau_{12}}{2} = 4,379 \text{ год.}$$

Для послідовно з'єднаних 1, 2, 13, 11

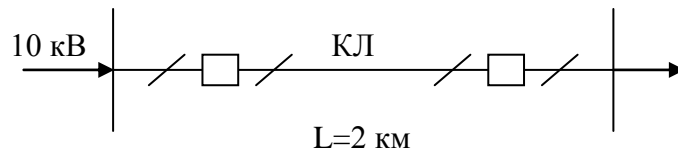
$$\omega_c = \omega_1 + \omega_2 + \omega_{13} + \omega_{11} = 0,0254 \text{ 1/рік};$$

$$\tau_c = 5,7531 \text{ год.}; \quad T_c = 39,37 \text{ рік}; \quad F_c = 2,51 \cdot 10^{-2}; \quad K_{\Gamma} \approx 1; \quad K_{np} \approx 0.$$

3 ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ ТА ВКАЗІВКИ ДО ОФОРМЛЕННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

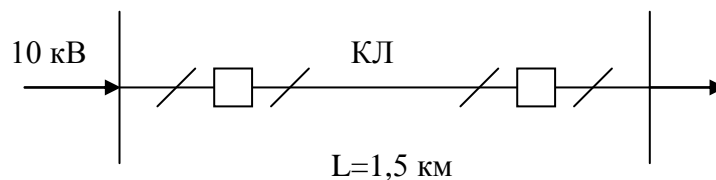
Завдання 1

1. Проблема надійності в електроенергетиці. Задачі надійності.
2. Моделі надійності устаткування при постійному резервуванні й обмеженому відновленні.
3. Визначити показники надійності системи без урахування надійності роз'єднувачів.



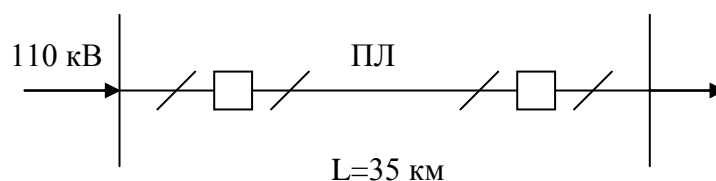
Завдання 2

1. Термінологія. Загальні поняття і визначення процесів, властивостей, станів і подій у теорії надійності.
2. Моделі надійності устаткування при резервуванні заміщенням.
3. Визначити показники надійності системи з урахуванням надійності роз'єднувачів.



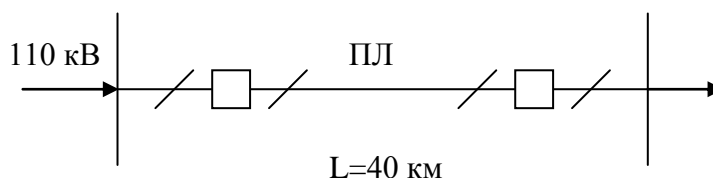
Завдання 3

1. Показники надійності. Визначення.
2. Модель надійності устаткування з відновленням і профілактикою. Миттєвий попереджувальний ремонт.
3. Визначити показники надійності системи без урахування надійності роз'єднувачів.



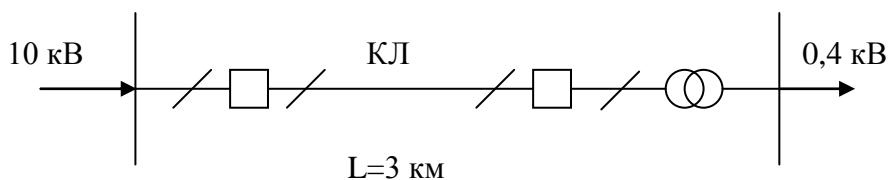
Завдання 4

1. Причини й характер пошкоджень повітряних і кабельних ліній електропередачі.
2. Модель надійності устаткування з відновленням і плановою профілактикою.
3. Визначити показники надійності системи з урахуванням надійності роз'єднувачів.



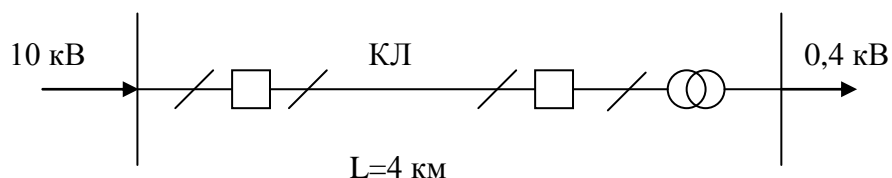
Завдання 5

1. Причини та характер пошкоджень силових трансформаторів і комутаційних апаратів.
2. Надійність структур. Послідовне з'єднання елементів.
3. Визначити показники надійності системи без урахування надійності роз'єднувачів.



Завдання 6

1. Відмовлення в системах електропостачання. Класифікація відмовлень.
2. Надійність структур. Паралельне з'єднання елементів.
3. Визначити показники надійності системи з урахуванням надійності роз'єднувачів.

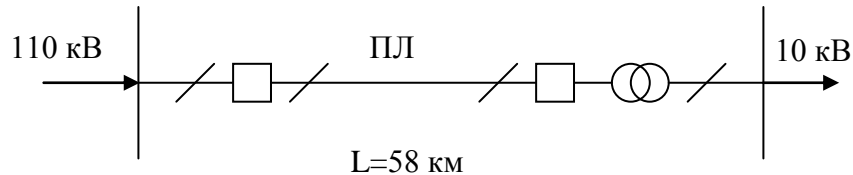


Завдання 7

1. Нормативно-технічна документація з відмовлень об'єктів енергетики.
2. Закони розподілу випадкових величин у задачах надійності.

Рівномірний розподіл. Експоненціальний розподіл.

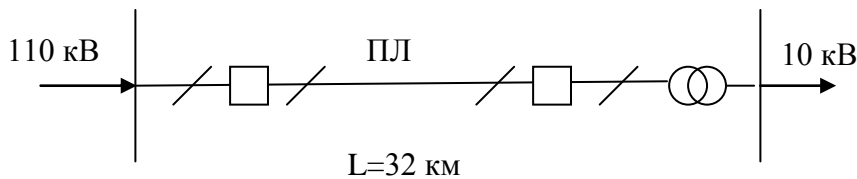
3. Визначити показники надійності системи без урахування надійності роз'єднувачів.



Завдання 8

1. Обробка статистичних даних щодо надійності елементів.
2. Алгоритм розрахунку надійності складних структур.
3. Визначити показники надійності системи з урахуванням надійності роз'єднувачів.

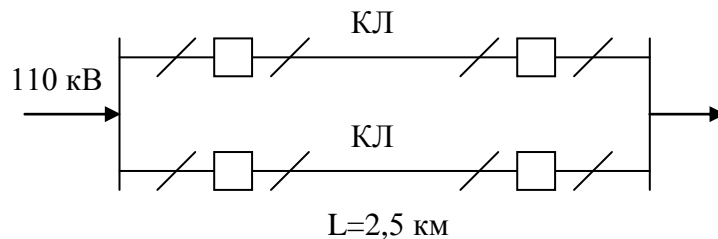
роз'єднувачів.



Завдання 9

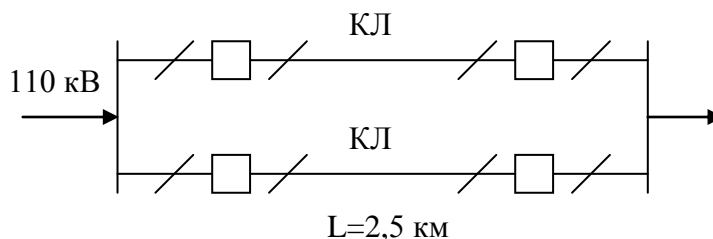
1. Визначення параметрів закону розподілу за статистичними даними.
2. Надійність складних структур. Мінімальні перетини.
3. Визначити показники надійності системи без урахування надійності роз'єднувачів.

роз'єднувачів.



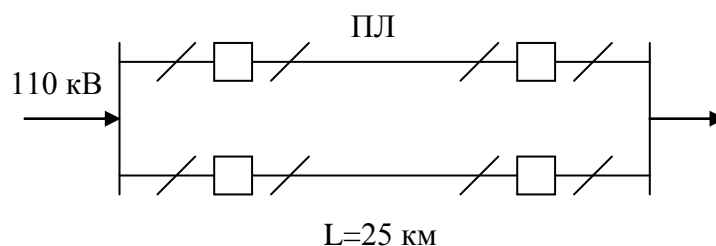
Завдання 10

1. Перевірка погодженості теоретичного і статистичного законів розподілу.
2. Визначення коефіцієнта незабезпеченості електроенергією.
3. Визначити показники надійності системи з урахуванням надійності роз'єднувачів.



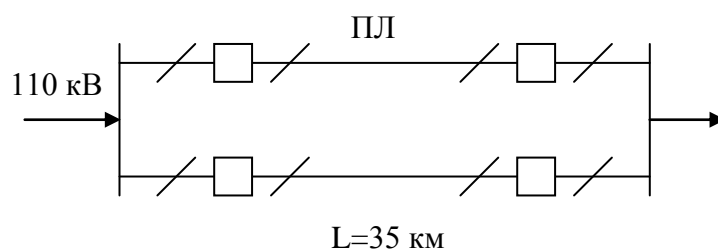
Завдання 11

1. Побудова довірчих границь.
2. Збиток від порушення електропостачання. Величина збитку.
3. Визначити показники надійності системи без урахування надійності роз'єднувачів.



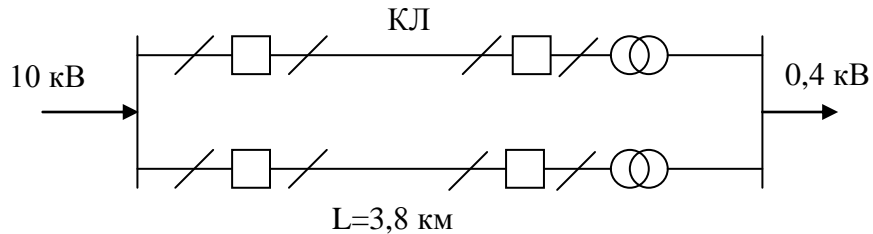
Завдання 12

1. Визначення мінімального числа об'єктів спостереження.
2. Збиток від порушення електропостачання. Загальні принципи визначення збитку.
3. Визначити показники надійності системи з урахуванням надійності роз'єднувачів.



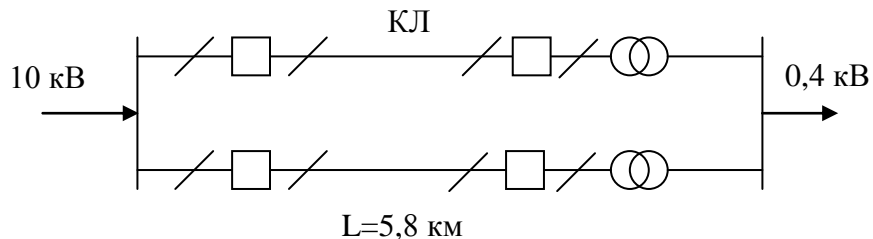
Завдання 13

1. Організація випробувань на надійність.
2. Надійність функціонування пристроїв релейного захисту й автоматики, комутаційної апаратури.
3. Визначити показники надійності системи без урахування надійності роз'єднувачів.



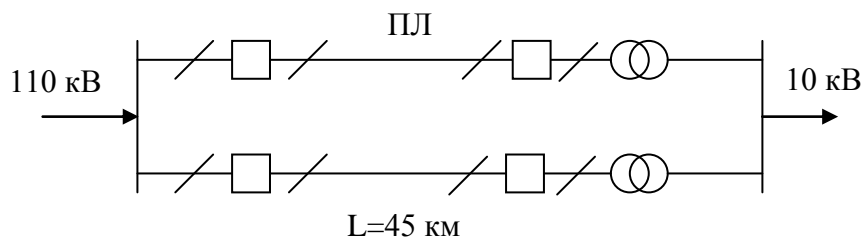
Завдання 14

1. Формування планів іспитів.
2. Облік навмисних відключень.
3. Визначити показники надійності системи з урахуванням надійності роз'єднувачів.



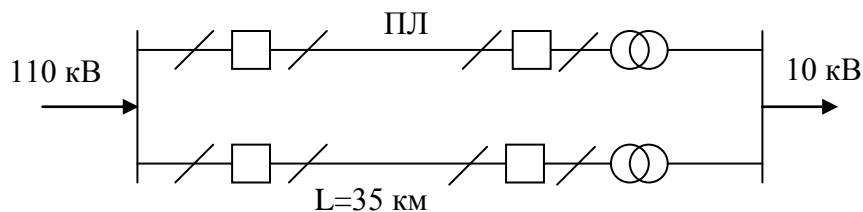
Завдання 15

1. Загальні методи оцінки показників надійності за результатами іспитів.
2. Закони розподілу випадкових величин у задачах надійності. Біноміальний розподіл. Розподіл Пуассона. Нормальний розподіл.
3. Визначити показники надійності системи без урахування надійності роз'єднувачів.



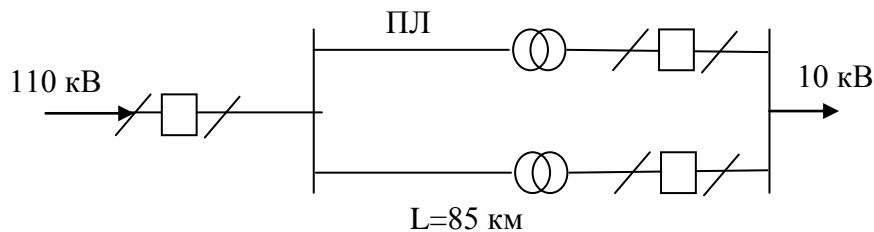
Завдання 16

1. Елемент у системі електропостачання. Інтенсивність відмовлень як характеристика елемента.
2. Закони розподілу випадкових величин у задачах надійності. Розподіл Вейбулла. Гамма-розподіл.
3. Визначити показники надійності системи з урахуванням надійності роз'єднувачів.



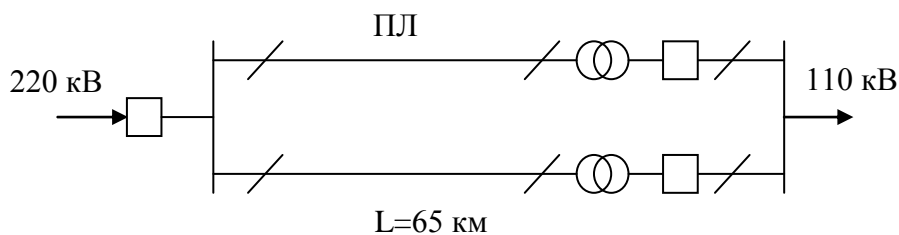
Завдання 17

1. Зміна інтенсивності відмовлень елемента в часі.
2. Моделі надійності устаткування при постійному резервуванні й обмеженому відновленні.
3. Визначити показники надійності системи без урахування надійності роз'єднувачів.



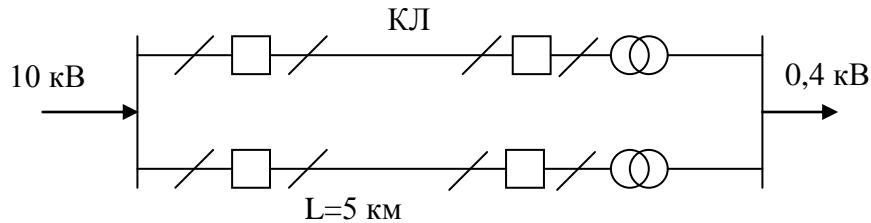
Завдання 18

1. Показники, що характеризують надійність елемента, їхній зв'язок між собою.
2. Моделі надійності устаткування при резервуванні заміщенням.
3. Визначити показники надійності системи з урахуванням надійності роз'єднувачів.



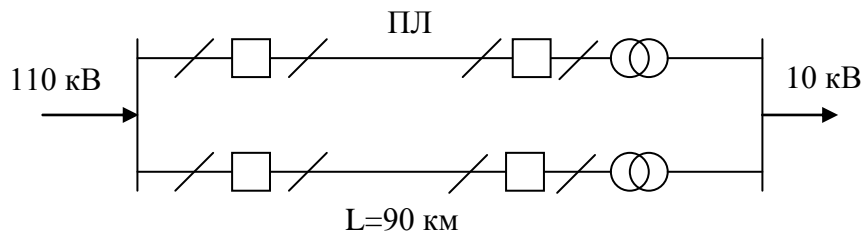
Завдання 19

1. Потік відмовлень, його властивості й параметри.
2. Модель надійності устаткування з відновленням і профілактикою. Миттєвий попереджувальний ремонт.
3. Визначити показники надійності системи без урахування надійності роз'єднувачів.



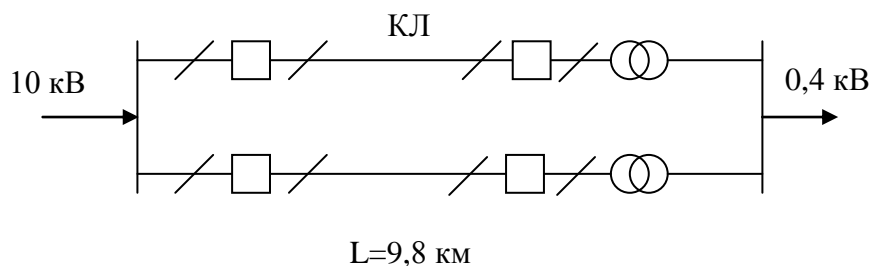
Завдання 20

1. Потік відновлень та його параметри.
2. Модель надійності установки з відновленням і плановою профілактикою.
3. Визначити показники надійності системи з урахуванням надійності роз'єднувачів.



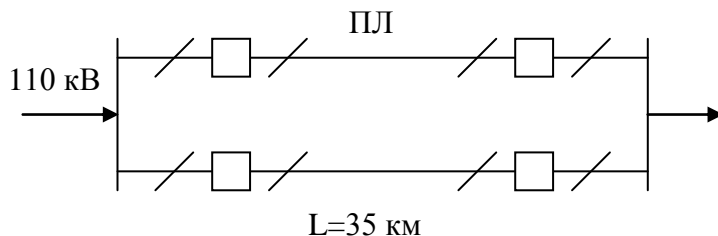
Завдання 21

1. Коефіцієнти, що характеризують надійність елемента.
2. Організація випробувань на надійність.
3. Визначити показники надійності системи з урахуванням надійності роз'єднувачів.



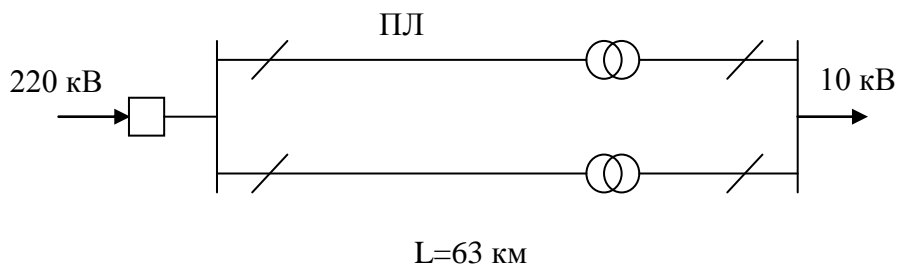
Завдання 22

1. Моделі відмовлень устаткування.
2. Побудова довірчих границь.
3. Визначити показники надійності системи без урахування надійності роз'єднувачів.



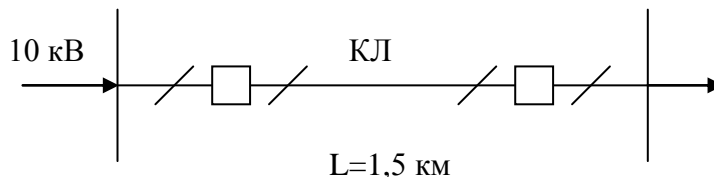
Завдання 23

1. Модель відмовлень з урахуванням зносу і старіння.
2. Перевірка погодженості теоретичного і статистичного законів розподілу.
3. Визначити показники надійності системи з урахуванням надійності роз'єднувачів.



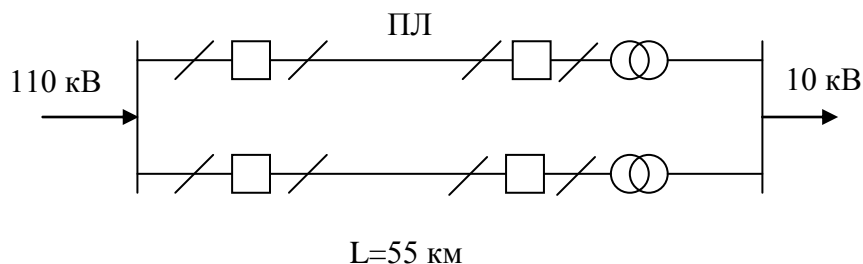
Завдання 24

1. Марківські ланцюги.
2. Повний факторний експеримент.
3. Визначити показники надійності системи з урахуванням надійності роз'єднувачів.



Завдання 25

1. Модель надійності установки з відновленням і плановою профілактикою.
2. Побудова регресійних моделей.
3. Визначити показники надійності системи без урахування надійності роз'єднувачів.



Контрольну роботу виконують письмово на аркушах розміром А4. Теоретичні питання розкривають повністю, формули та рисунки супроводжують коментарями. Розрахунки виконують з точністю до трьох значущих цифр.

Номер варіанта контрольної роботи необхідно вибрати за двома останніми цифрами номера залікової книжки студента. Усього варіантів 25. Якщо дві останні цифри залікової книжки перевершують число 25, то номер варіанта визначають відніманням 25, 50 чи 75 відповідно. Наприклад, номеру залікової книжки, що закінчується цифрами 84, відповідає варіант 9 ($84-75=9$).

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Журахівський А. В. Надійність електричних систем і мереж: [навчальний посібник для студ. вищих навч. закл. електротехн. спец.] / А. В. Журахівський, Б. М. Кінаш, О. Р. Пастух ; Національний університет «Львівська політехніка». – Львів : Вид. Львівської політехніки, 2012. – 280 с.
2. Гук Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике : учеб. пособие / Ю. Б. Гук. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1990. – 234 с.
3. Надежность систем электроснабжения : учеб. пособие / [В. В. Зорини др.]. – Киев : Вища школа, 1984. – 192 с.

Навчальне видання

Методичні вказівки
для виконання контрольної роботи
з навчальної дисципліни

«НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ»

*(для магістрів заочної форми навчання за спеціальністю
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітні
програми «Електротехнічні системи електроспоживання» та
«Електротехнічні системи електроспоживання (освітньо-наукова)»)*

Укладачі: **РОЖКОВ** Петро Павлович,
РОЖКОВА Світлана Едуардівна

Відповідальний за випуск *П. П. Рожков*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *К. А. Алексанян*

План 2013, поз. 211 М

Підп. до друку 29.10.2013
Друк на різнографі
Зам. №

Формат 60×84/16
Ум. друк. арк. 0,9
Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач :
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи :
ДК 5328 від 11.04.2017 р.