

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій
та електроінженерії

Кафедра електричної інженерії

НАДІЙНІСТЬ І ДІАГНОСТИКА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

КУРС ЛЕКЦІЙ



Тернопіль 2022

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя
Факультет прикладних інформаційних технологій
та електроінженерії
Кафедра електричної інженерії

НАДІЙНІСТЬ І ДІАГНОСТИКА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

КУРС ЛЕКЦІЙ

Тернопіль 2022

Курс лекцій з дисципліни «Надійність та діагностика електрообладнання» для студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка освітнього рівня бакалавр, м. Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2022. – 152 с.

Укладач: к.т.н., доц. Костик Л.М.

Відповідальна за випуск: к.т.н., доц. Костик Л.М.

Курс лекцій розглянуто і затверджено на засіданні кафедри електричної інженерії
Протокол № 1 від 23.08.2022 р.

Схвалено методичною радою ФПТ Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.
Протокол № 1 від 30.08.2022 р.

Лекція 1

ПОНЯТТЯ, СКЛАДОВІ, ВЛАСТИВОСТІ, КІЛЬКІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДІЙНОСТІ

Перші дослідження в області надійності і розробка її концепцій відносяться до кінця другої світової війни. Приводом для організації робіт в цій галузі послужило розуміння в США того факту, що створена в роки війни техніка не забезпечувала достатньої ефективності її використання через багаточисельні відмови. Так, наприклад, до 60% літаків, призначених для Далекого Сходу, виявилися непрацездатними, 50% електронної апаратури виходило з ладу за час зберігання до використання за призначенням. Напрацювання до відмови електронних пристроїв у бомбардувальниках складало лише 20 год.; 70% електронних пристроїв у ВМФ виходили з ладу в початковий період експлуатації.

Досягнення науки і техніки, поява і розвиток нових галузей виробництва не тільки дозволяють постійно вдосконалювати продукцію, підвищувати всі її технічні характеристики, але й вимагають забезпечення зберігання експлуатаційних характеристик виробів протягом необхідного проміжку часу. Отже, надійність виробу - одна з основних складових якості, яка суттєво відрізняється від усіх інших властивостей виробу.

Розглянемо основні поняття і терміни, необхідні для вивчення питань теорії і розрахунку надійності елементів і систем технічних виробів (у основу подальшого переліку покладений ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки. Терміни та визначення»).

Надійність - здатність виробу виконувати задані функції, зберігаючи свої експлуатаційні показники у заданих межах протягом необхідного проміжку часу чи необхідного напрацювання.

У це визначення входять три важливі елементи: 1) виконання виробом своїх функцій; 2) час, протягом якого повинно бути забезпечено виконання цих функцій; 3) умови експлуатації, в яких може забезпечуватися виконання виробом заданих функцій.

Під станом або технічним станом об'єкта розуміють сукупність його властивостей, що характеризуються ознаками, встановленими технічною (конструкторською і нормативно-технічною) документацією для визначених умов і режимів використання об'єкта. До таких визначень можуть входити як числові та інші характеристики, що визначають властивості об'єкта, підтверджені змінам в процесі експлуатації, зберігання, транспортування або ремонту, так і характеристики, що визначають властивості об'єкта, зміна яких при розрахунках неможлива (або можлива в незначних межах). Прикладомостанніх є характеристики технічних об'єктів такі як: масогабаритні показники, марка матеріалу, типи комплектуючих виробів, параметри первинних елементів, способи установки і кріплення та ін., які приводяться в технічній документації на об'єкт, його складові елементи або класивідповідних

виробів і називаються технічними вимогами. Технічні вимоги зазвичай приводяться в таких документах: креслення, схеми, специфікації, програми випробувань, інструкції по обслуговуванню, технічні умови на поставку, стандарти тощо. Іноді для характеристики стану об'єкта замість терміну «ознака» використовують термін «показник». Однак він має більш обмежене застосування і фактично виражається у числовому або функціональному вигляді. Властивості об'єкта після його виготовлення постійно змінюються під дією факторів різного роду, таких, наприклад, як вплив зовнішньої середовища, внутрішні впливи, що визначаються характером і режимом функціонування, деградаційні процеси старіння і виявлення і т.п. Ступінь впливу основних факторів на зміну властивості об'єкта встановлюються на стадіях його проектування та випробування дослідних зразків. При цьому визначають мінімально необхідну кількість випробувань, контроль яких забезпечує достовірну оцінку найбільш характерних можливих змін властивостей об'єкта. Такі ознаки називаються діагностичними ознаками або діагностичними параметрами. Вони приводяться в технічну документацію на об'єкт і використовуються для контролю його стану. Відповідно до завдань надійності та технічної діагностики розглядаються наступні види стану:

Правильне функціонування виробу - стан, при якому виріб виконує задані йому функції.

Працездатність - стан виробу, при якому значення всіх заданих параметрів відповідають нормативно-технічній документації.

Справність - стан, при якому виріб відповідає всім вимогам нормативно-технічної документації.

Надійність є складною властивістю, і формується такими складовими: безвідмовність, довговічність, відновлюваність і збережуваність.

Безвідмовність - здатність виробу безперервно зберігати працездатний стан протягом певного часу без вимушеної перерви.

Довговічність - здатність виробу зберігати працездатний стан до граничного стану з необхідними перервами для технічного обслуговування і ремонту.

Ремонтопридатність - пристосовуваність виробу до попередження, виявлення і усунення відмов і несправностей шляхом проведення технічного обслуговування і ремонту.

Іноді термін «ремонтопридатність» трактується в ширшому сенсі, включаючи в себе і пристосовуваність об'єкта до контролю технічного стану і виявленню причин відмов. Частинним видом ремонтпридатності є **відновлюваність**, що характеризує здатність об'єкта до відновлення працездатності без виведення його з експлуатації.

За здатністю до відновлюваності всі вироби можна поділити на відновлювані і невідновлювані.

Відновлювані вироби - вироби, працездатність яких у випадку виникнення відмови можна відновити в даних умовах експлуатації ремонтом підручними засобами.

Невідновлювані вироби - вироби, працездатність яких у випадку виникнення відмови не підлягає або не піддається відновленню в даних умовах експлуатації.

Невідновлювані і відновлювані вироби мають загальні показники надійності, а відновлювані, крім загальних, мають додаткові, властиві тільки їм показники.

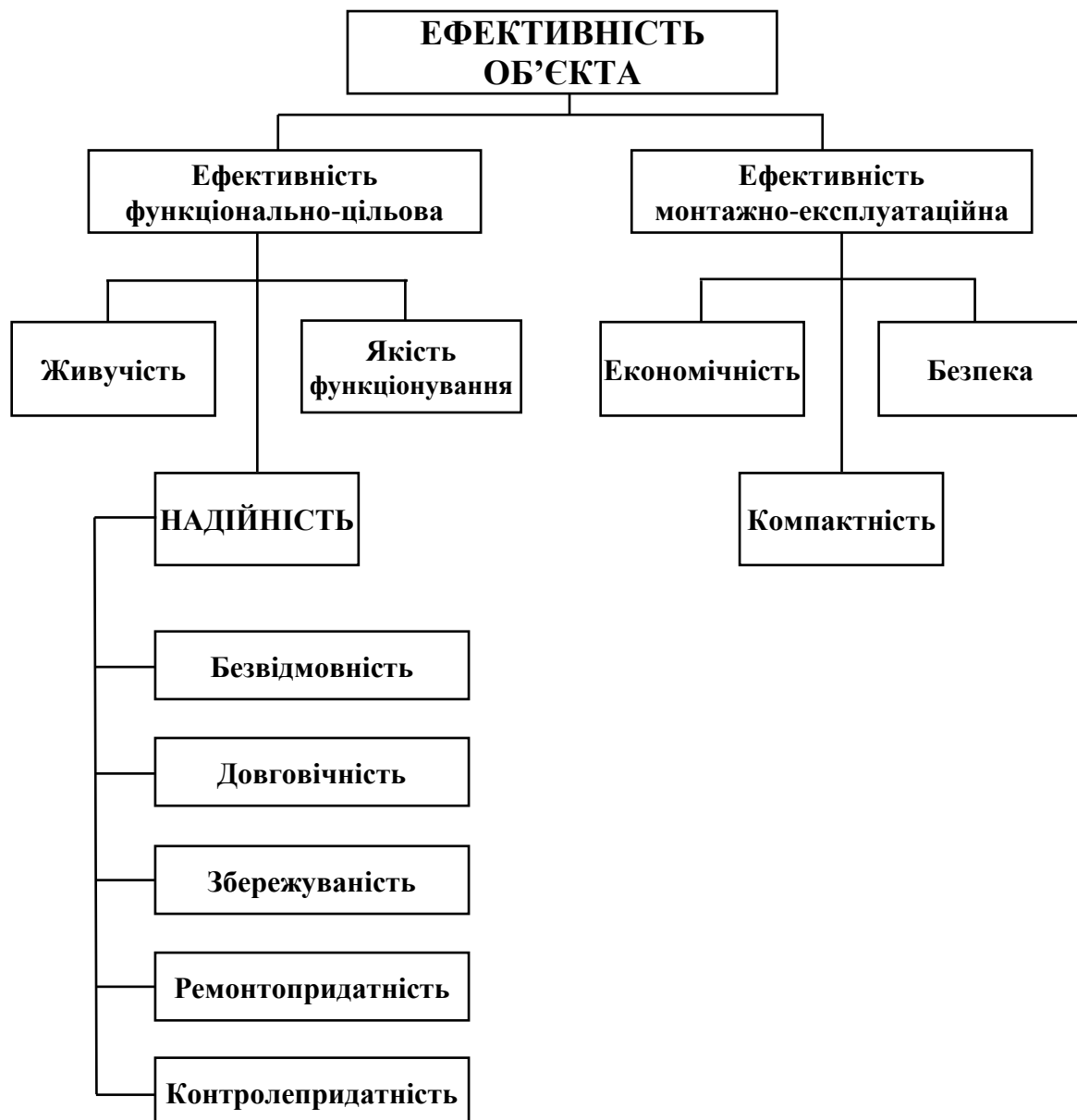
Контролепридатність- властивість об'єкта, що характеризує його пристосованість до діагностики, тобто контроль технічного стану, визначення працездатності, виявлення причини відмови, визначення місця та виду дефекту, викликаного відмовою, прогнозування зміни стану і показників надійності. При оцінці рівня контролепридатності використовуються діагностичні показники, технічні вимоги до засобів діагностики та конструктивному виконанню об'єкта.

Збережуваність - здатність виробу зберігати обумовлені експлуатаційні показники протягом і після терміну зберігання і транспортування, встановленого в технічній документації.

У свою чергу, надійність є однією із складових частин ширшого поняття – ефективність. Ефективність в даному випадку розуміється як узагальнена властивість об'єкта, що характеризує його здатність до виконання поставлених завдань з урахуванням придатності до експлуатації як у початкових, так і в екстремальних умовах, якості виконання заданого алгоритму дій, витрат на виготовлення і експлуатацію, характеру впливу на навколишнє середовище, ступеня безпеки експлуатації та ін. На рис.1.1 подана структурна схема зв'язуючих частин ефективності та надійності технічного об'єкта.

Живучість визначає властивість об'єкта зберігати стан працездатності або правильного функціонування при несприятливих впливах, які не відповідають розрахунковим умовам нормальної експлуатації.

Якість функціонування характеризує рівень виконання частини об'єкта або всіх функцій відповідно до заданого алгоритму. Показники, які забезпечують якість функціонування, приводяться в технічній документації і можуть входити в число діагностичних параметрів, що забезпечують контроль таких властивостей, як, наприклад, як швидкодія, точність, завадостійкість, пропускну здатність тощо.



Загальними показниками надійності, що характеризують безвідмовність, є:

1. Імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ - імовірність того, що в межах заданого напрацювання t відмови об'єкта не виникне:

$$P(t) = Im(T_n \geq t) = 1 - \int_0^t a(t) dt; \quad P(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right].$$

Статистична оцінка імовірності безвідмовної роботи:

$$\bar{P}(t) = \frac{N - n(t)}{N},$$

де N - кількість виробів на початку випробувань;
 $n(t)$ - кількість виробів, що відмовили за час t .

2. Імовірність протилежної події називається *імовірністю відмови* і доповнює імовірність безвідмовної роботи до одиниці:

$$Q(t) = Im(T_n \leq t) = 1 - P(t).$$

Статистична оцінка:

$$\bar{Q}(t) = \frac{n(t)}{N}$$

3. *Напрацювання на відмову* T_n - тривалість чи обсяг роботи об'єкта. Для невідновлюваних і відновлюваних виробів поняття напрацювання відрізняється: у першому випадку мають на увазі напрацювання до першої відмови (він же є й останньою відмовою), у другому - між двома сусідніми в часі відмовами (після кожної відмови відбувається відновлення працездатного стану). Математичне очікування випадкового напрацювання T_n :

$$M[T] = T_n = \int_0^{\infty} P(t) dt, \text{ год.}$$

Статистична оцінка:

$$\bar{T}_n = \frac{\sum_{i=1}^N t_{ni}}{N}, \text{ год.}$$

де t_{ni} - час безвідмовної роботи i -го зразка.

4. *Частота відмов* (інтегральна функція розподілу випадкового напрацювання t) $a(t)$ - відношення кількості виробів, що відмовили за одиницю часу до початкової кількості випробуваних виробів при умові, що всі вироби, які вийшли з ладу, не відновлюються:

$$a(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{d[1 - P(t)]}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}, \text{ год}^{-1}.$$

Статистична оцінка:

$$\bar{a}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N \cdot \Delta t}, \text{ год}^{-1}$$

де $n(\Delta t)$ - кількість виробів, що відмовили в інтервалі часу $\left[\left(t - \frac{\Delta t}{2} \right); \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right]$.

5. *Інтенсивність відмов* $\lambda(t)$ (умовна густина імовірності виникнення відмов виробу за умови, що до моменту t відмови не виникли) - відношення кількості виробів, що відмовили за одиницю часу, до середньої кількості виробів, що справно працюють у даний проміжок часу:

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)} = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}, \text{ год}^{-1}$$

Статистична оцінка:

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{n(\Delta t)}{n_{cp} \Delta t}, \text{ год}^{-1}$$

Додатковими показниками оцінки надійності відновлюваних виробів, які характеризують відновлюваність, є:

1. *Імовірність виконання ремонту в заданий час (імовірність відновлення)* – це імовірність того, що відмова виробу буде усунена в заданий час t :

$$P_{\epsilon}(t) = P(T_{\epsilon} < t), P_{\epsilon}(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t \mu(t) dt\right).$$

Статистична оцінка:

$$\bar{P}_{\epsilon}(t) = \frac{n_{\epsilon}(t)}{N_{\epsilon}},$$

де N_{ϵ} – кількість виробів, поставлених на відновлення,

$n_{\epsilon}(t)$ – кількість виробів, відновлених за час t .

2. *Імовірність невиконання ремонту в заданий час (імовірність не відновлення)* – це імовірність того, що відмова виробу не буде усунена в заданий час t :

$$Q_{\epsilon}(t) = P(T_{\epsilon} \geq t) = 1 - P_{\epsilon}(t).$$

Статистична оцінка:

$$\bar{P}_{\epsilon}(t) = \frac{N_{\epsilon} - n_{\epsilon}(t)}{N_{\epsilon}},$$

3. *Частота відновлення:*

$$a_{\epsilon}(t) = \frac{dP_{\epsilon}(t)}{dt}.$$

Статистична оцінка:

$$\bar{a}_{\epsilon}(t) = \frac{n_{\epsilon}(\Delta t)}{N_{\epsilon} \cdot \Delta t}, \text{ год}^{-1}$$

де $n_{\epsilon}(\Delta t)$ – кількість виробів, відновлених в інтервалі часу Δt .

4. *Інтенсивність відновлення* – величина, обернена до середнього часу відновлення:

$$\mu(t) = \frac{a_e(t)}{Q_e(t)} = \frac{a_e(t)}{1 - P_e(t)}, \text{ год}^{-1}$$

Статистична оцінка:

$$\bar{\lambda}_e(t) = \frac{n_e(\Delta t)}{N_{\text{нвср}} \cdot \Delta t}, \text{ год}^{-1}$$

де $N_{\text{нвср}}$ – середня кількість виробів, не відновлених в інтервалі часу Δt .

5. *Середній час відновлення* – математичне сподівання тривалості відновлення працездатності виробу після відмови:

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} t a_e(t) dt = \int_0^{\infty} (1 - P_e(t)) dt, \text{ год.}$$

Статистична оцінка:

$$\bar{T}_{\text{ср}} = \frac{1}{T_e} \sum_{i=1}^{N_e} t_{\text{в}i}, \text{ год.},$$

де $t_{\text{в}i}$ – тривалість відновлення i -го виробу з числа всіх виробів. Поставлених на відновлення.

6. *Коефіцієнт готовності* K_e – математичне сподівання частини часу нормального функціонування виробу; відношення часу справної роботи до суми часу справної роботи і вимушених простоїв виробу, взятих за однаковий календарний термін:

$$K_e = \frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{н}} + t_{\text{в}}},$$

де $t_{\text{н}}$ – напрацювання на відмову; $t_{\text{в}}$ – середній час відновлення.

Статистична оцінка:

$$\bar{K}_e = \frac{t_p}{t_p + t_n},$$

де $t_p = \sum_{i=1}^n t_{p_i}$; $t_n = \sum_{i=1}^n t_{n_i}$, t_{p_i} – час роботи виробу між $(i-1)$ -ою і i -ою відмовами;

t_{n_i} – час вимушеного простою після i -ї відмови; n – кількість відмов.

7. *Коефіцієнт оперативної готовності* K_{oz} – імовірність того, що виріб буде у працездатному стані у довільний момент часу, крім планових перерв у роботі, і, починаючи з цього моменту пропрацює безвідмовно протягом заданого часу τ :

$$K_{oz}(t, \tau) = K_z(t)P(\tau),$$

де $P(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи виробу в інтервалі заданого часу τ .

Статистична оцінка:

$$\bar{K}_{oz}(t, \tau) = \frac{N(t, \tau)}{N},$$

де $N(t, \tau)$ – кількість виробів, працездатних у момент часу t і які безвідмовно пропрацювали протягом часу τ .

8. *Коефіцієнт вимушеного простою* K_n – відношення часу вимушеного простою до суми часу справної роботи і вимушених простоїв виробу, взятих за однаковий календарний термін:

$$K_n = \frac{t_g}{t_n + t_g}.$$

Статистична оцінка:

$$\bar{K}_n = \frac{t_n}{t_p + t_n}.$$

Коефіцієнти готовності і вимушеного простою зв'язані між собою залежністю:

$$K_z = 1 - K_n.$$

9. *Коефіцієнт технічного використання* K_m – математичне сподівання часу перебування виробу в працездатному стані з урахуванням тривалості функціонування і простоювання з причин виявлення та усунення відмов, техобслуговування і ремонту.

Допускаючи, що інтенсивність відмов та інтенсивність відновлення є постійними величинами (період нормальної експлуатації), і що в момент часу $t=0$ система знаходиться у справному стані, тобто $P(0)=1$, імовірність застати систему у справному стані визначається як

$$P_z = K_z + (1 - K_z) \cdot e^{-\frac{t}{K_z t_g}}.$$

Загальними показниками довговічності є:

В термінах показників довговічності слід вказувати вигляд дій після настання граничного стану об'єкту (наприклад, середній ресурс до капітального ремонту; гамма-процентний ресурс до середнього ремонту і т. д.). Якщо граничним станом обумовлене остаточне зняття об'єкту з експлуатації, то показниками довговічності називаються: повний середній ресурс (термін служби), повний гамма-процентний ресурс (термін служби), повний призначений ресурс (термін служби). У повний термін служби входить тривалість всіх видів ремонту об'єкту.

1. Середній ресурс – математичне очікування ресурсу.

Середній технічний ресурс R – середнє сумарне напрацювання виробу від початку експлуатації або відновлення до його використання до граничного стану. У технічному ресурсі враховують тільки чистий час функціонування виробу, виключаючи будь-які перерви в його роботі, викликані організаційними причинами.

Цей показник використовується для характеристики надійності об'єкта відповідального призначення, для якого проводяться контрольні заміри параметрів.

2. Гамма-процентний ресурс – напрацювання, протягом якого об'єкт не досягне граничного стану із заданою імовірністю, вираженою у відсотках.

3. Призначений ресурс – сумарне напрацювання об'єкту, при досягненні якого вживання за призначенням повинно бути припинено.

4. Середній термін служби – математичне очікування терміну служби.

Термін служби N – календарна тривалість експлуатації виробу від початку експлуатації або його відновлення після ремонту до граничного стану.

Граничний стан – стан виробу, при якому подальший ремонт стає економічно невигідним, а пов'язані з ним затрати - невиправдані.

Термін служби не слід ототожнювати з безвідмовністю. Так, об'єкт, що є складною системою, може за час експлуатації мати велику кількість відмов, тобто характеризуватися низькими показниками безвідмовності, і водночас перебувати в експлуатації протягом тривалого часу. Це пояснюється тим, що термін служби складного об'єкта визначається нетерміном служби його елементів, а залежить переважно від рівня їх відновлюваності та технічного обслуговування. Часто наводять показник «гарантійний термін служби», який завжди менший за середній термін служби. Він не характеризує надійність об'єкта, а лише встановлює відповідальність постачальника перед споживачем.

Основне значення показника «середній термін служби» полягає в тому, що він визначає часовий інтервал, в якому оцінюється надійність об'єкта. Його статистична оцінка може бути отримана за результатами спостережень за групою однакових об'єктів у однорідних умовах експлуатації як середнє арифметичне їх термінів служби.

5. *Гамма-процентний термін служби* – календарна тривалість від початку експлуатації об'єкту, протягом якої він не досягне граничного стану із заданою вірогідністю γ , вираженою у відсотках.

6. *Призначений термін служби* – календарна тривалість експлуатації об'єкту, досягши якої вживання за призначенням має бути припинене.

7. *Гамма-процентне напрацювання* T_γ – час, протягом якого відмова не наступить з імовірністю $\gamma(\%)$:

$$T_\gamma = -\frac{\ln P_\gamma}{\lambda} = -T_n \ln P_\gamma, \quad P_\gamma = \frac{\gamma}{100}.$$

Показниками збережуваності є:

Середній термін збережуваності – це математичне очікування терміну збережуваності, тобто тривалість зберігання об'єкту в розрахункових умовах до переходу його в граничний чи непрацездатний стан.

Гамма-процентний термін збережуваності – це термін збережуваності, що досягається об'єктом із заданою вірогідністю, вираженою у відсотках.

Усі вироби з точки зору надійності розділяють на чотири класи та три групи:

Класи надійності

Перший клас – неремонтовані і не відновлювані вироби загального призначення, складові частини виробів, що не відновлюються на місці експлуатації і не підлягають ремонту.

Другий клас – відновлювані вироби, які не підлягають капітальному ремонту, але проходять технічне обслуговування, поточний або середній ремонт; а також вироби, які підлягають капітальному ремонту і ресурс яких повністю відновлюється після капітального ремонту.

Третій клас – відновлювані вироби, ресурс яких частково відновлюється після капітального ремонту.

Четвертий клас – вироби, призначені для виконання короткочасних (разових або періодичних) завдань.

Групи надійності

Перша група – вироби, відмова яких призводить до небезпеки для життя чи здоров'я людей, значних матеріальних збитків.

Друга група – вироби, при відмові яких матеріальні збитки від невиконання завдання або простоювання є співвартісні з самим виробом.

Третя група – вироби, для яких матеріальні збитки при відмові визначаються втратою самого виробу або витратами на його відновлення.

Лекція 2

ТЕОРІЯ ВІДМОВ. ЗАКОНИ РОЗПОДІЛУ ЧАСУ БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ ВИРОБУ

2.1 Випадкові події та їх потоки

Подія у теорії ймовірності – це будь-який факт, який у результаті досліду (спостережень) може відбутися чи не відбутися.

Події характеризуються ступенем можливості їх появи – ймовірністю події. Максимальна ймовірність властива будь-якій достовірній події, тобто такій події, яка в результаті досліду неодмінно має статися. Мінімальна ймовірність притаманна будь-якій неможливій події, яка у цьому досліді відбутися не може. Ці екстремальні значення ймовірностей оцінюють відповідно числами 1 та 0. Усі інші події – можливі, але не достовірні – будуть характеризуватись ймовірностями, числові значення яких знаходяться у цьому діапазоні. Такі події називаються випадковими.

Характерною ознакою випадкової події є те, що вона належить до категорії масових явищ, тобто існує можливість її оцінки за результатами неодноразового повторення досліду в заданих умовах.

Прикладами випадкових подій, які розглядаються у теорії надійності, є:

- 1) подія полягає в тому, що на деякому інтервалі часу від 0 до t об'єкт не втрачає своєї працездатності;
- 2) подія, яка полягає в тому, що на деякому інтервалі часу від 0 до t об'єкт переходить в непрацездатний стан (відбувається його відмова);
- 3) подія, яка полягає в тому, що працездатний до моменту часу t об'єкт перейде за малий проміжок часу Δt у непрацездатний стан тощо.

Випадкові події, що відбуваються одна за одною в деякій послідовності, утворюють потік випадкових подій. При цьому події можуть бути однорідними чи різними. В якості прикладу потоків однорідних подій можна навести потоки відмов та потоки відновлення відновлюваного об'єкта. Такий потік можна подати у вигляді послідовності точок $t_1, t_2, \dots, t_k, \dots$ на числовій осі часу, що відповідають моментам появи подій (рис. 2.1).

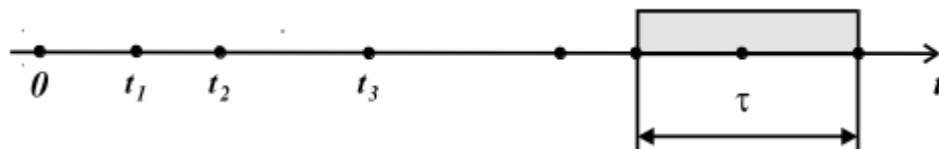


Рисунок 2.1 – Графічне представлення потоку однорідних випадкових подій.

Потоки подій відрізняються залежно від виду і характеру проявлення їх властивостей. **Потік подій** – це послідовність подій у часі. **Інтенсивність потоку подій** – кількість подій у потоці за одиницю часу. Розглянемо деякі потоки подій.

Регулярний потік – потік, у якому події відбуваються через певний проміжок часу.

Стационарний потік – потік випадкових подій, у якому число подій на досить тривалих проміжках часу буде приблизно однаковим. Для такого потоку густина потоку подій (середнє число подій за одиницю часу) – величина постійна у часі.

Ординарний потік – потік подій, у якому імовірність двох подій на нескінченно малому проміжку часу дуже мала, значно менша імовірності однієї події. Практично це означає, що в будь-який момент часу можлива лише одна подія.

Потік без післядії – потік подій, у якому імовірність подій на деякому проміжку часу не залежить від інтенсивності потоку на попередніх проміжках.

Найпростіший (пуассонівський) потік – потік, що об'єднує властивості стаціонарного, ординарного потоків і потоку без післядії. Саме такі властивості має потік відмов на етапі нормальної експлуатації системи з великою кількістю елементів.

Характеристики потоків відмов:

- 1) Параметр потоку відмов $\omega(t)$ – густина імовірності відмов для даного моменту часу, тобто границя відношення імовірності хоча б однієї відмови в інтервалі $(t, t + \Delta t)$ до цього інтервалу:

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q(t, t + \Delta t)}{\Delta t} = \frac{n(t, t + \Delta t)}{N \cdot \Delta t}, \text{ год}^{-1}$$

- 2) Інтенсивність потоку – математичне очікування числа відмов за одиницю часу:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[n(t, t + \Delta t)]}{\Delta t}, \text{ год}^{-1}$$

2.2 Випадкові величини

Випадкова величина – це величина, яка в результаті досліду може прийняти те чи інше значення, невідоме наперед. Залежно від виду можливих реалізацій випадкові величини поділяються на дискретні та неперервні.

Дискретна випадкова величина може приймати значення тільки з деякої дискретної множини, наприклад, кількість відмов виробів із вибірки за встановлений проміжок часу.

Неперервна випадкова величина може приймати будь-які значення на деякому скінченному чи нескінченному відрізку, наприклад, час роботи об'єкту до моменту настання відмови.

Випадкові величини позначають великими літерами латинського алфавіту ($X, Y, Z, \dots$), а їх можливі значення – відповідними малими літерами ($x, y, z, \dots$).

Повне уявлення про випадкову величину дає закон розподілу випадкової величини, що встановлює співвідношення між можливими її значеннями та їх ймовірностями.

Закон розподілу може бути заданий у різній формі. Так, наприклад, найпростішими формами його завдання є таблична та графічна, але вони можуть бути застосовані для опису лише дискретних випадкових величин.

Універсальною характеристикою, яка описує закон розподілу, є функція розподілу випадкової величини, що виражає ймовірність того, що величина X може приймати значення менше деякого встановленого (x):

$$F(x) = P(X < x).$$

Цей вираз є інтегральною формою закону розподілу.

При вирішенні деяких завдань надійності та технічної діагностики необхідно розраховувати ймовірність потрапляння випадкової величини на ділянку в діапазоні значень від α до β , тобто $P(\alpha < X < \beta)$.

Виразимо цю можливість через функцію розподілу величини X . Для цього розглянемо три події:

подія A , яка полягає в тому, що $X < \beta$;

подія B , що полягає в тому, що $X < \alpha$;

подія C полягає в тому, що $\alpha < X < \beta$.

Подія A включає у собі події B і C , тобто $A = B + C$. Події B і C несумісні, оскільки вони не можуть з'являтися разом. Для цього випадку може бути застосована теорема складання ймовірностей, яка формулюється так: ймовірність суми несумісних подій дорівнює сумі їх ймовірностей.

Отже, можна записати

$$P(X < \beta) = P(X < \alpha) + P(\alpha < X < \beta),$$

або

$$F(\beta) = F(\alpha) + P(\alpha < X < \beta),$$

звідки

$$P(\alpha < X < \beta) = F(\beta) - F(\alpha),$$

Тобто ймовірність потрапляння випадкової величини на задану ділянку дорівнює приросту функції її розподілу на цій ділянці.

Розглянемо в загальному випадку замість ділянки (α, β) ділянку $(x, x + \Delta x)$. Тоді

$$P(x < X < x + \Delta x) = F(x + \Delta x) - F(x)$$

Виразимо величину середньої ймовірності на цій ділянці та обчислимо її границю при $\Delta x \rightarrow 0$. В результаті отримаємо похідну від функції розподілу випадкової величини X :

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{F(x + \Delta x) - F(x)}{\Delta x} = F'(x)$$

Введемо позначення

$$F'(x) = f(x)$$

Функція $f(x)$ (похідна функції розподілу) характеризує щільність, з якою розподіляються значення довільної величини. Ця функція називається щільністю розподілу або щільністю імовірності випадкової величини. Вона існує лише для безперервної диференційованої функції $F(x)$, тобто лише для безперервних випадкових величин, і є диференційною формою закону розподілу.

Функцію $f(x)$ можна виразити графічно кривою розподілу, наприклад, як показано на рис. 2.2.

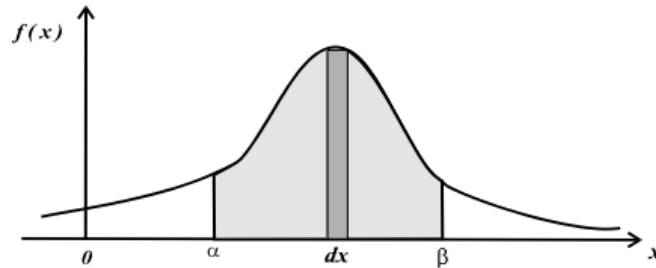


Рисунок 2.2 – Крива розподілу випадкової величини.

Імовірність потрапляння величини X на деяку ділянку (α, β)

$$P(\alpha < X < \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f(x) dx,$$

тобто дорівнює площі під кривою розподілу, що спирається на цю ділянку, як показано на рис. 2.2. Величина $f(x)dx$ називається елементом імовірності. Геометрично він є площею елементарного прямокутника, що спирається на відрізок dx .

Здамося зворотним завданням – виразимо функцію розподілу через густину розподілу. За визначенням

$$F(x) = P(X < x) = P(-\infty < X < x),$$

звідки

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx$$

Геометрично $F(x)$ є площею під кривою розподілу, що лежить ліворуч від поточної координати x .

Функція розподілу та щільність розподілу повністю описують випадкову величину з імовірнісної точки зору. Однак при вирішенні низки практичних завдань немає необхідності в такій повній характеристиці. Найчастіше досить буває вказати лише окремі числові параметри, що характеризують деякі суттєві ознаки розподілу випадкової величини. Такі параметри називаються числовими характеристиками випадкової величини.

Найбільш часто використовуються характеристики, які визначають положення випадкової величини на числовій осі: математичне сподівання, дисперсія, середнє квадратичне відхилення.

Математичне сподівання M_x визначає центррозподілу випадкової величини, навколо якого групуються усі її можливі значення.

Для дискретної випадкової величини

$$M_x = \sum_{i=1}^n x_i p_i$$

де n – число можливих значень випадкової величини;

p_i – імовірність i -го значення випадкової величини x_i .

Для безперервної випадкової величини

$$M_x = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx$$

Дисперсія D_x характеризує розсіювання значень випадкової величини біля її математичного очікування.

Для дискретної величини

$$D_x = \sum_{i=1}^n (x_i - M_x)^2 p_i,$$

для безперервної

$$D_x = \sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - M_x)^2 f(x) dx$$

Середнє квадратичне відхилення випадкової величини X

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}.$$

На практиці числові характеристики випадкових величин часто визначають за результатами експерименту у вигляді статистичних оцінок:

$$M_x^* = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

$$D_x^* = s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2$$

де n – число спостережень;

$\bar{X}$ – середнє арифметичне результатів спостережень.

2.3 Види відмов

Подія переходу об'єкта зі справного в несправний, але працездатний стан, називається *пошкодженням*.

Відмова – це подія, що полягає в повній чи частковій втраті працездатності.

Відмови можна класифікувати за різними ознаками. Найчастіше при дослідженні надійності застосовують такі види відмов:

Раптова відмова – відмова, якій не передують направлені зміни одного або кількох діагностичних параметрів, які спостерігаються в об'єкті.

Поступова відмова – відмова, якій передують направлені зміни одного або кількох діагностичних параметрів, які спостерігаються в об'єкті, тобто має місце процес контрольованого зміни ступеня працездатності об'єкта.

Явна відмова – відмова, яка характеризується виходом об'єкта із стану правильного функціонування.

Прихована відмова – відмова, яка виявляється лише при проведенні технічного обслуговування об'єкта або спеціальними засобами і методами діагностики.

Часткова відмова – це перехід в непрацездатний стан одного або кількох елементів, який не приводить до загальної відмови об'єкта.

Збій – само усувна відмова, що приводить до короткочасного порушення працездатності.

Важливою задачею є не тільки встановлення факту відмови, але й визначення причин і способів її усунення.

Причинами відмови можуть бути природні процеси старіння і пошкодження матеріалів і вузлів елементів об'єкта, відхилення умов експлуатації, зберігання, транспортування від розрахункових, порушення правил експлуатації, помилки проектування і конструювання, порушення технології виготовлення та монтажу, дефекти у вихідних матеріалах і комплектуючих виробів тощо. Причинами самоусувних відмов можуть бути завади, дефекти програмного забезпечення, короткочасні суттєві зміни експлуатаційних умов і режимів. Безпосереднім наслідком цих причин є виникнення дефектів, деякі з яких призводять до порушення працездатності об'єкта.

Дефектом є кожна окрема невідповідність об'єкта, його елементів, комплектуючих виробів або матеріалів вимогам технічної документації. Прикладами деяких характерних дефектів є: механічне руйнування деталі або вузла, вихід розміру деталі для межі допусків, неправильна збірка або установка, застосування первинного елемента з параметрами, відмінними від зазначених у конструкторській документації, обрив в електричній схемі, порушення цілісності електричної ізоляції, подряпини на захисному або декоративному покритті тощо.

Подія переведення об'єкту, що відмовив, у працездатний стан шляхом усунення дефекту без виводу об'єкта з експлуатації, називається **відновленням**.

Усунення дефекту при цьому може проводитися за допомогою ремонту або заміни дефектних елементів.

Відмови можна розділити на відмови функціонування та параметричні.

Відмови функціонування – це відмови, при яких виконання виробом своїх функцій припиняється.

Відмови параметричні – це відмови, при яких деякі параметри виробу змінюються в недопустимих межах.

Причини відмов можуть бути випадкові і систематичні.

Випадкові причини непередбачувані навантаження, дефекти матеріалу, помилки обслуговуючого персоналу, збої системи управління. Випадкові

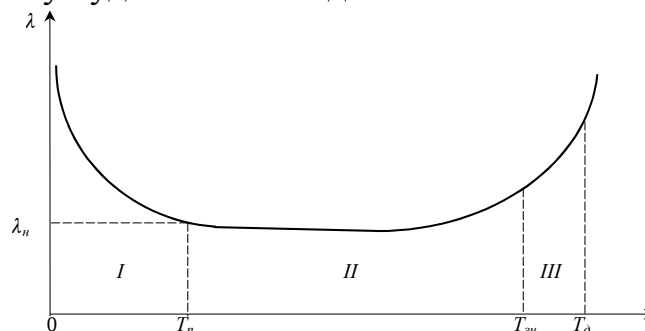
причини, як правило, викликають відмови при поєднанні кількох факторів (наприклад, тонша ізоляція + вищий струм).

Систематичні причини - закономірні явища, що спричиняють поступове нагромадження пошкоджень (вплив середовища, часу температури, опромінення → корозія, старіння, навантаження, тертя → втома, зношення → залипання контактів, втрати).

Поступова відмова є невідворотним закономірним результатом старіння. Процес поступової зміни будь-якого параметру відбувається постійно і неухильно. До тих пір, поки зміни не виходять за допустимі межі, вважається, що виріб продовжує зберігати свою працездатність. Коли фізико-хімічні процеси, що проходять в елементах виробу в результаті зношування і старіння, приведуть до виходу параметрів виробу за межі, що забезпечують нормальне виконання ним заданих функцій, відбудеться відмова. Поступова відмова не є випадковою і її ймовірність дорівнює 1. У виробках стаціонарного призначення, які працюють в умовах порівняно постійного впливу зовнішнього середовища і не піддаються інтенсивному впливу механічних навантажень, на поступові зношувальні відмови приходить $\approx 90\%$ усіх відмов. Поступові відмови безпосередньо пов'язані з терміном служби виробу: чим довший час експлуатується виріб, тим більша кількість поступових відмов.

Причиною *раптових відмов* у більшості випадків є раптова концентрація внутрішніх чи зовнішніх навантажень. Відмова настає тоді, коли діючі на виріб сумарні чи індивідуальні навантаження перевищують його міцність. Раптові відмови є випадковими і ймовірність їх виникнення не дорівнює 0 чи 1. Більше 50% від усіх відмов припадає на раптові відмови виробів, що працюють при різкій зміні впливу зовнішнього середовища, великих механічних та електричних навантажень. Кількість раптових відмов не залежить від тривалості експлуатації виробу.

Якщо складну систему або велику партію однотипних елементів відразу після виготовлення ввімкнути в роботу на тривалий термін, то інтенсивність відмов як функція часу буде мати вигляд:



T_n - час припрацювання, $T_{зн}$ - час зношування, T_d - середня довговічність з врахуванням зношування

Рисунок 2.3— Залежність інтенсивності відмов виробу від часу його експлуатації.

Інтервал I - інтервал припрацювання. Інтенсивність відмов значно вища за середнє значення. Відмови на цьому етапі називають «припрацьовочними», в основному вони зумовлені виробничим браком, дефектами окремих елементів. При нормальному технологічному процесі дефектних виробів небагато і з часом всі вони замінюються новими.

Природа виникнення припрацьовочних відмов має випадковий характер, як і для раптових. Для відмови дефектного елемента достатньо менших навантажень, ніж для відмови «нормального» елемента.

Інтенсивність відмов дефектних елементів є постійною, але більша, ніж для «нормальних елементів».

Надійність виробу на першому етапі повністю визначається імовірністю відмови дефектних виробів. Чим крутіший нахил кривої, тим вища надійність виробу, менша кількість дефектних елементів.

Шляхи підвищення надійності виробу на етапі припрацювання:

- ретельне відбракування елементів перед встановленням, попередні випробування елементів;
- використання типових стандартних елементів з відомою надійністю;
- перевірка якості зборки і монтажу виробу.

Інтервал II - етап нормальної експлуатації. Причинами відмов є граничні відхилення режиму роботи. Інтенсивність відмов є мінімальною і постійною. Вона визначається тільки випадковими відмовами повноцінних елементів, напрацювання на відмову яких є досить високе. Оскільки $\lambda_n = const$ у цьому періоді, то імовірність безвідмовної роботи виробу є однаковою для будь-яких рівних відрізків часу протягом всього нормального періоду. Основним засобом підвищення безвідмовної роботи виробу в період нормальної експлуатації є зменшення інтенсивності відмов (підвищення напрацювання на відмову) всіх складових елементів, зменшення розкиду їх параметрів, пристосовуваність елементів до різних режимів і умов роботи.

Надійність виробу на II етапі не залежить від «віку» виробу, але це справедливо при умові, що період припрацювання вже закінчився, а період зношування ще не настав. Тому заданий час напрацювання не повинен перевищувати період нормальної експлуатації.

На II етапі елементи замінюють тільки після їх відмови.

Основними засобами підвищення безвідмовної роботи виробу в період нормальної експлуатації є:

- зменшення інтенсивності відмов (збільшення напрацювання на відмову) всіх складових елементів, зменшення розкиду їх параметрів; пристосовуваність елементів до різних режимів і умов роботи;
- попереднє відбракування і тренування елементів, які призначені для замінитих, що відмовили;
- дотримання правил експлуатації виробу.

Інтервал III - період зношування. До раптових відмов додаються поступові зношувальні відмови і загальна сумарна інтенсивність відмов виробу швидко збільшується. Із збільшенням терміну експлуатації і наближенням його до середнього терміну служби виробу надійність виробу більшою мірою буде визначатися зношувальними відмовами. Момент часу T_0 на інтервалі III настає тоді, коли за час від T_{zn} до T_0 відмовить 50% всіх елементів. Тривалість часу від 0 до T_0 визначає середню довговічність виробу з врахуванням зношення.

Шляхи підвищення надійності виробу на етапі III:

- підвищення довговічності всіх елементів підвищення середнього терміну їх роботи;
- профілактична заміна елементів до настання їх зношувальної відмови.

2.4 Закони розподілу часу безвідмовної роботи виробу

Відмови, як випадкові події, і тривалості часу між відмовами, як випадкові величини, найповніше задаються законом розподілу імовірностей. Випадкова величина подається деяким рядом своїх значень, кожному з яких відповідає імовірність, з якою випадкова величина може прийняти це значення.

Закон розподілу імовірностей випадкової величини може задаватися: 1) у формі таблиць розподілу; 2) у формі багатокутника розподілу чи гістограми; 3) в аналітичній формі. Найбільш зручним способом задавання закону є аналітичний у вигляді диференціальної функції або густини розподілу.

2.4.1 Експонентний закон розподілу

Експонентний закон є справедливим для опису раптових відмов і добре описує роботу виробу на етапі нормальної експлуатації

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

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$a(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)} = \lambda$$

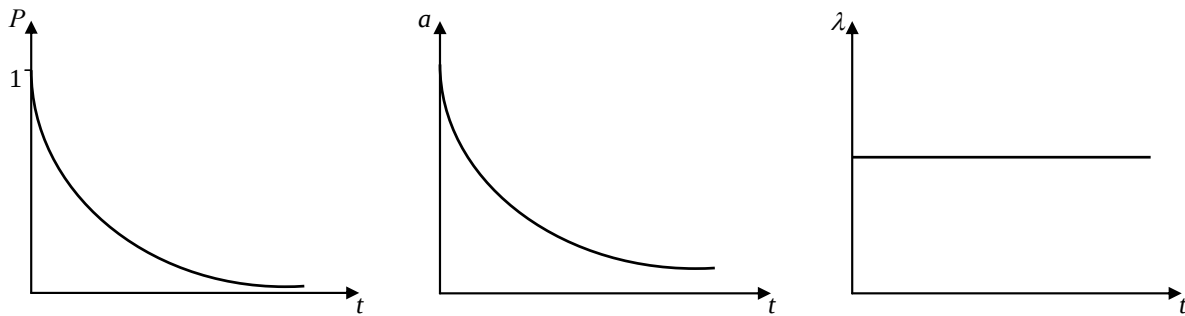
$$T_H = \int_0^{\infty} t P(t) dt = \frac{1}{\lambda}$$

$$D_t = 2 \int_0^{\infty} t P(t) dt - T_H^2 = \frac{1}{\lambda^2}$$

Для експонентного закону імовірність безвідмовної роботи на деякому інтервалі τ не залежить від часу попередньої експлуатації, а залежить від тривалості цього інтервалу τ .

$$\text{Якщо } t_2 = t_1 + \tau, \text{ то } P(t_2, t_1) = \frac{P(t_2)}{P(t_1)} = \frac{P(t_1 + \tau)}{P(t_1)} = \frac{e^{-\lambda(t_1 + \tau)}}{e^{-\lambda t_1}} = e^{-\lambda \tau}.$$

Тут $P(t_2, t_1)$ - імовірність безвідмовної роботи виробу в інтервалі часу (t_1, t_2) при умові, що на інтервалі часу $(0, t_1)$ виріб працював безвідмовно.



2.4.2 Нормальний закон розподілу

Нормальний закон характеризує імовірність відмови при тривалій зміні характеристик виробу (старіння, зношування), тобто він добре описує роботу виробу на етапі зношувальних відмов.

Щільність розподілу часу безвідмовної роботи виробу:

$$a(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_t}} e^{-\frac{(t-T_n)^2}{2D_t}}$$

де T_n - середній час безвідмовної роботи,

D_t - дисперсія випадкової величини t .

$$Q(t) = \int_{-\infty}^t a(t) dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_t}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-T_n)^2}{2D_t}} dt$$

Цей закон справедливий для

$$T_n \gg \sigma_t, \text{ де } \sigma_t = \sqrt{D_t}.$$

Введемо змінну z :

$$z = \frac{t - T_n}{\sigma_t}, dz = \frac{1}{\sigma_t} dt, z^2 = \frac{(t - T_n)^2}{\sigma_t^2}$$

Якщо $t = +\infty$, то $z = +\infty$. Відповідно

$$Q(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \sigma_t}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-T_n)^2}{2\sigma_t^2}} dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

Введемо нормовану функцію Лапласа

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz,$$

$$\Phi(\infty) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty e^{-\frac{z^2}{2}} dz, \quad \Phi(-\infty) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{-\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

Властивості функції Лапласа:

$$\Phi(0) = 0, \quad \Phi(-z) = -\Phi(z), \quad \Phi(\infty) = 0,5.$$

Запишемо імовірність відмови у вигляді

$$Q(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{z^2}{2}} dz + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 0,5 + \Phi(z)$$

Тоді імовірність безвідмовної роботи

$$P(t) = 1 - Q(t) = 0,5 - \Phi(z)$$

Імовірність безвідмовної роботи виробу в інтервалі часу (t_1, t_2) :

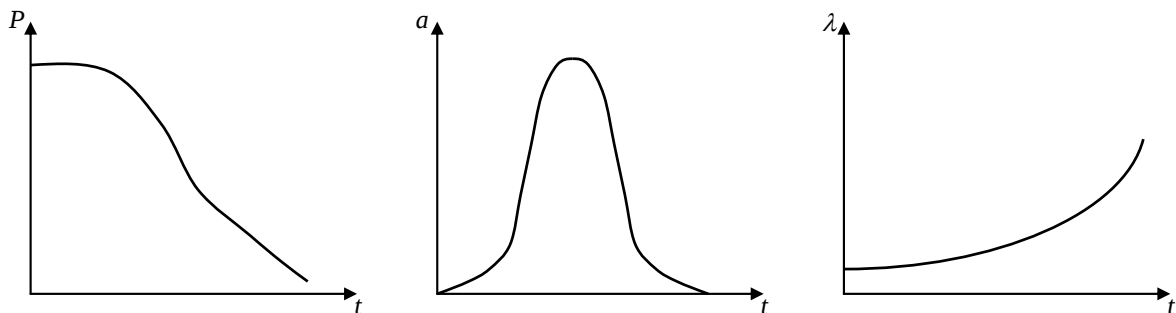
$$P(t_1 \leq t \leq t_2) = Q(t_2) - Q(t_1) = \Phi\left(\frac{t_2 - T_H}{\sigma_t}\right) - \Phi\left(\frac{t_1 - T_H}{\sigma_t}\right)$$

При умові, що в інтервалі часу $(0, t_2)$: виріб працював без відмов:

$$P(t_1, t_2) = \frac{P(t_2)}{P(t_1)} = \frac{0,5 - \Phi\left(\frac{t_2 - T_H}{\sigma_t}\right)}{0,5 - \Phi\left(\frac{t_1 - T_H}{\sigma_t}\right)}$$

Частоту відмов також можна визначити з допомогою табульованої функції $\varphi(z)$

$$a(t) = \frac{\varphi(z)}{\sigma_t}; \quad \varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}; \quad \varphi(-z) = \varphi(z); \quad \lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)}$$



2.4.3 Закон розподілу Вейбула

Густина розподілу часу безвідмовної роботи має вигляд:

$$a(t) = \lambda_0 k t^{k-1} e^{-\lambda_0 t^k}$$

де λ_0, k – параметри закону розподілу.

Імовірність відмови

$$Q(t) = \int_0^t a(t) dt = \lambda_0 k \int_0^t t^{k-1} e^{-\lambda_0 t^k} dt$$

Нехай $y = t^k$, $dy = k t^{k-1} dt$, тоді

$$Q(t) = \lambda_0 \int_0^{t^k} e^{-\lambda_0 y} dy = \lambda_0 \left(-\frac{e^{-\lambda_0 y}}{\lambda_0} \Big|_0^{t^k} \right) = 1 - e^{-\lambda_0 t^k}$$

Імовірність безвідмовної роботи буде

$$P(t) = 1 - Q(t) = e^{-\lambda_0 t^k}$$

Інтенсивність відмов

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)} = \frac{\lambda_0 k t^{k-1} e^{-\lambda_0 t^k}}{e^{-\lambda_0 t^k}} = \lambda_0 k t^{k-1}$$

Середній час безвідмовної роботи

$$T_H = \int_0^\infty P(t) dt = \int_0^\infty e^{-\lambda_0 t^k} dt$$

$$\text{Нехай } x = \lambda_0 t^k, t^k = \frac{x}{\lambda_0}, t = \left(\frac{x}{\lambda_0} \right)^{\frac{1}{k}} = \frac{x^{\frac{1}{k}}}{\lambda_0^{\frac{1}{k}}}, dt = \frac{\frac{1}{k} x^{\frac{1}{k}-1}}{\frac{x^{\frac{1}{k}}}{\lambda_0^{\frac{1}{k}}}} dx = \frac{\frac{1}{k} x^{\frac{1-k}{k}}}{\frac{x^{\frac{1}{k}}}{\lambda_0^{\frac{1}{k}}}} dx$$

Якщо $t=0$, то $x=0$;

якщо $t=\infty$, то $x=\infty$

$$T_H = \int_0^\infty e^{-\lambda_0 t^k} dt = \frac{1}{k \lambda_0^{\frac{1}{k}}} \int_0^\infty e^{-x} x^{\frac{1-k}{k}} dx$$

$$\Gamma\left(\frac{1}{k}\right) = \int_0^\infty e^{-x} x^{\frac{1}{k}-1} dx \text{ — Гамма-функція}$$

$$T_H = \frac{\frac{1}{k} \Gamma\left(\frac{1}{k}\right)}{\lambda_0^{\frac{1}{k}}}, \quad x \Gamma(x) = \Gamma(x+1)$$

Дисперсія безвідмовної роботи

$$D_t = \int_0^{\infty} (t - T_H)^2 a(t) dt = \int_0^{\infty} (t^2 - 2T_H t + T_H^2) a(t) dt =$$

$$= \int_0^{\infty} t^2 a(t) dt - 2T_H \int_0^{\infty} t a(t) dt + T_H^2 \int_0^{\infty} a(t) dt = \int_0^{\infty} t^2 a(t) dt - T_H^2$$

$$\int_0^{\infty} t^2 a(t) dt = \int_0^{\infty} t^2 \lambda_0 k t^{k-1} e^{-\lambda_0 t^k} dt = \int_0^{\infty} \lambda_0 k t^{k+1} e^{-\lambda_0 t^k} dt$$

Нехай $x = \lambda_0 t^k, t^k = \frac{x}{\lambda_0}, t = \left(\frac{x}{\lambda_0}\right)^{\frac{1}{k}} = \frac{x^{\frac{1}{k}}}{\lambda_0^{\frac{1}{k}}}$

Якщо $t=0$, то $x=0$;

якщо $t=\infty$, то $x=\infty$

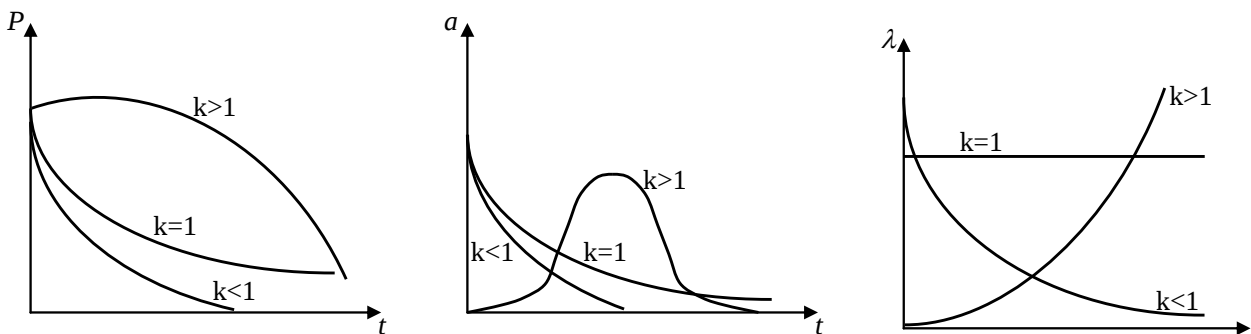
$$\int_0^{\infty} t^2 a(t) dt = \int_0^{\infty} \lambda_0 k \frac{x}{\lambda_0} \frac{x^{\frac{1}{k}}}{\lambda_0^{\frac{1}{k}}} e^{-x} \frac{1}{\lambda_0^{\frac{1}{k}}} \frac{1}{k} x^{\frac{1}{k}} x^{-1} dx = \frac{1}{\lambda_0^{\frac{2}{k}}} \int_0^{\infty} e^{-x} x^{\frac{2}{k}} dx$$

Для Гамма-функції відоме співвідношення $\Gamma\left(\frac{2}{k} + 1\right) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{\frac{2}{k}} dx$

$$\text{Відповідно } \int_0^{\infty} t^2 a(t) dt = \frac{1}{\lambda_0^{\frac{2}{k}}} \Gamma\left(\frac{2}{k} + 1\right)$$

$$\text{Тоді } D_t = \frac{1}{\lambda_0^{\frac{2}{k}}} \Gamma\left(\frac{2}{k} + 1\right) - \frac{1}{\lambda_0^{\frac{2}{k}}} \left[\frac{1}{k} \Gamma\left(\frac{1}{k}\right) \right]^2 = \frac{1}{\lambda_0^{\frac{2}{k}}} \left\{ \Gamma\left(\frac{2}{k} + 1\right) - \left[\frac{1}{k} \Gamma\left(\frac{1}{k}\right) \right]^2 \right\}$$

Якщо $k=1, \lambda_0 = \lambda$, то $a(t) = \lambda e^{-\lambda t}$, тобто експонентний закон розподілу.



2.4.3 Закон розподілу Релея

Якщо у розподілі Вейбулла $k = 2$, $\lambda_0 = \frac{1}{2\sigma_t^2}$. Тоді отримаємо розподіл

Релея. Щільність розподілу буде

$$a(t) = \frac{t}{\sigma_t^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}}$$

Імовірність безвідмовної роботи та імовірність відмови будуть, відповідно

$$P(t) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}}$$

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}}$$

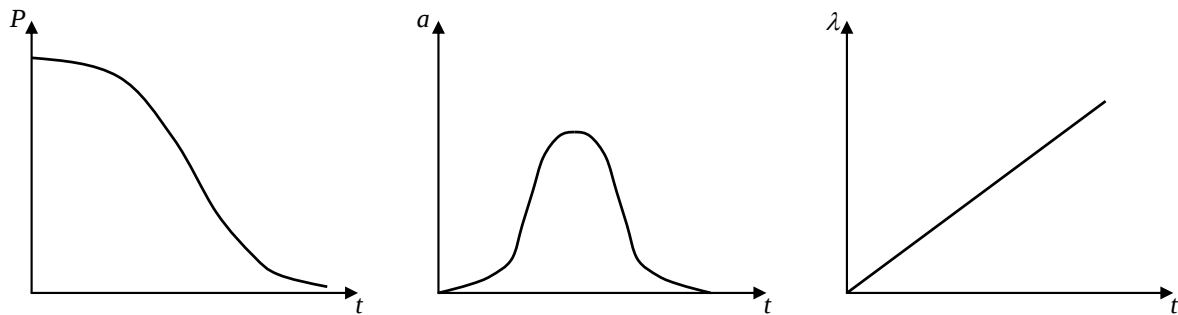
Інтенсивність відмов

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)} = \frac{t}{\sigma_t^2}$$

Час напрацювання

$$T_n = \frac{1}{k} \frac{\Gamma\left(\frac{1}{k}\right)}{\lambda_0^{\frac{1}{k}}}, \quad k = 2, \quad \lambda_0 = \frac{1}{2\sigma_t^2}, \quad \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi},$$

$$T_n = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2\sigma_t^2}}{1} \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{\sigma_t}{\sqrt{2}} \sqrt{\pi} = \sigma_t \sqrt{\frac{\pi}{2}}$$



Лекція 3

КРИТЕРІЇ НАДІЙНОСТІ ТА РОЗРАХУНОК ВІДНОВЛЮВАНИХ ВИРОБІВ

3.1 Випадкові процеси в теорії надійності

Якщо випадкова величина змінюється у процесі досліду у зв'язку із зміною деяких факторів, то її можна характеризувати випадковою функцією, тобто такою функцією, яка в результаті досліду набуває того чи іншого вигляду, невідомого заздалегідь. Конкретний вигляд, що приймається випадковою функцією під час проведення досліду називається її реалізацією.

Випадкова функція, аргументом якої є час, називається випадковим, чи імовірнісним процесом. Поняття «потік подій» та «процес» взаємопов'язані. Наприклад, процес зміни стану об'єкта викликається потоками відмов та відновлення.

Розглянемо деякий випадковий процес (випадкову функцію) $X(t)$. Допустимо, що в результаті проведення n незалежних дослідів одержано n її реалізацій (рис.2.5). Позначимо їх відповідно до номеру досліду як $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$. Кожна з цих реалізацій є звичайною (невипадковою) функцією часу.

Зафіксуємо деяке значення аргументу, наприклад, $t = t_j$. При цьому отримаємо n числових значень $x_1(t_j), x_2(t_j), \dots, x_n(t_j)$ випадкової величини $X(t_j)$ в момент часу t_j . Використовуючи m подібних перерізів по осі t , можна з деяким наближенням замінити розгляд випадкової функції розглядом системи m випадкових величин $X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_m)$. Із збільшенням числа таких січень подібна заміна дає дедалі більшу точність. Таким чином, поняття випадкової функції можна розглядати як узагальнене поняття системи випадкових величин. Отже, до випадкової функції застосовується таке поняття, як закон розподілу. Однак його вираз у вигляді функції нескінченної множини аргументів практично неможливо.

При вирішенні завдань надійності та діагностики використовують імовірнісні характеристики, аналогічні до законів розподілу випадкових величин, але для певних тимчасових січень. Ці показники в загальному випадку залежать від місця січення, тобто від значення t , і виражаються як $F(x, t)$. Функція такого виду називається одновимірною функцією розподілу випадкової функції $X(t)$ і виражає одномірний закон розподілу.

Зазвичай розглядають окремі властивості випадкових функцій, для опису яких використовують найпростіші характеристики, аналогічні числовим характеристикам випадкових величин, такі як математичне сподівання, дисперсія та середньоквадратичне відхилення, що розраховуються для різних моментів часу.

На відміну від числових характеристик випадкових величин, які є певними числовими значеннями, показники випадкових функцій у загальному випадку є не числами, а функціями часу, причому не випадкові.

Математичним сподіванням випадкової функції $X(t)$ називається не випадкова функція $M_x(t)$, яка при кожному значенні аргументу t дорівнює математичному очікуванню випадкової величини у відповідному січенні випадкової функції. Вона є деякою середньою функцією, біля якої варіюються всі можливі реалізації випадкового процесу.

Дисперсією випадкової функції $X(t)$ називається не випадкова функція $D_x(t)$, значення якої для кожного t дорівнює дисперсії випадкової величини у цьому січенні.

Відповідно до цих визначень $M_x(t)$ і $D_x(t)$ можуть бути розраховані за формулами для дискретних величин.

Середнє квадратичне відхилення випадкової функції визначається як

$$\sigma_x(t) = \sqrt{D_x(t)}$$

Якщо аргумент t набуває лише дискретних значень, то функцію $X(t)$ називають випадковим процесом з дискретним часом (випадкова послідовність подій), якщо ж t змінюється на деякому інтервалі, то $X(t)$ – випадковий процес з безперервним часом. У свою чергу, якщо випадкові величини із сукупності, яка утворює $X(t)$, приймають дискретні значення, то має місце процес з дискретними випадковими значеннями, якщо ж безперервні, то має місце процес з безперервними випадковими значеннями.

В теорії надійності та технічної діагностики найбільше поширення набули пуассонівські потоки таких подій, як відмови, відновлення, непланові простої, переведення в режим діагностування та ін. Всі вони характеризують зміни стану об'єкта в процесі його використання і є ймовірнісними процесами з дискретними значеннями реалізованих станів за відсутності післядії. Такі процеси належать до класу марківських випадкових процесів.

Марківським процесом називають такий випадковий процес, в якого для кожного моменту часу ймовірність будь-якого стану об'єкта в майбутньому залежить тільки від його стану в даний момент часу і не залежить від того, яким чином об'єкт прийшов у цей стан. При цьому обов'язковою умовою є експонентний розподіл часу перебування об'єкта у кожному з можливих станів.

Марківські процеси з дискретним часом, для яких різниця суміжних моментів спостереження $t_i - t_{i-1}$ приймаються однаковими, рівними постійній величині Δt , а ймовірності переходу зі стану в стан залежать лише від величини кроку і залежить від того, де на осі часу відбувається перехід, називаються однорідними марківськими процесами або ланцюгами Маркова. Такий процес може бути проілюстрований часовою діаграмою переходів або графом станів.

В теорії надійності та технічної діагностики розглядають переважно стаціонарні марківські процеси, тобто такі процеси, в яких ймовірність знаходження об'єкта у можливих станах залишаються незмінними у часі.

Значення цих можливостей можуть бути отримані в результаті рішення алгебраїчної системи рівнянь, що описують граф станів.

3.2 Показники надійності відновлюваних об'єктів

До відновлюваних виробів відносяться такі, які після відмови можуть бути відремонтовані і знову виконувати свої функції. При розробці складних систем зустрічаються такі випадки відновлюваності виробів:

1) *резервування з відновленням* - резервування, коли блоки, що відмовили, ремонтують під час виконання системою своїх функцій;

2) *системи з часовою надлишковістю* - системи, які мають резерв часу для проведення ремонту.

Якщо в системі допускаються перерви, то як показники надійності застосовують функції готовності і простою або коефіцієнти готовності і простою:

$$K_z = \lim_{t \rightarrow \infty} K_z(t); \quad K_n = \lim_{t \rightarrow \infty} K_n(t);$$

$$K_z(t) + K_n(t) = 1; \quad K_z + K_n = 1.$$

При кількох працездатних станах:

$$K_z(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t); \quad K_n(t) = \sum_{l=1}^{k+1-n} P_l(t),$$

де n - кількість працездатних станів;

$P_i(t)$ - імовірність i -го працездатного стану;

$P_l(t)$ - імовірність l -го непрацездатного стану;

$(k+1)$ - загальна кількість станів.

Якщо в роботі системи перерви недопустимі, то як показники надійності використовують умовні імовірності неперервної безвідмовної роботи протягом заданого напрацювання $\tilde{P}(t_i)$:

$$\tilde{P}(t_i) = \sum_{j=0}^k P_j(t_i).$$

Середній час безвідмовної роботи системи:

$$T_n = \int_0^{\infty} \tilde{P}(t) dt = \int_0^{\infty} \sum_{j=0}^k P_j(t) dt.$$

При експонентному розподілі тривалості процесу відновлення:

- імовірність працездатного стану елемента $P_p(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}$;
- імовірність стану відновлення елемента $P_s(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}$.

3.3 Розрахунок станів відновлюваних систем

Показники надійності визначаються при умові, що в момент ввімкнення системи всі елементи працездатні. Найчастіше для розрахунків використовують метод диференціальних рівнянь. Спочатку перераховують можливі стани системи і складають її математичну (логічну) модель у вигляді схеми станів, за якою складають систему диференціальних рівнянь для імовірностей станів. Для цього користуються такими правилами:

- 1) ліві частини рівнянь містять похідні за часом імовірностей відповідних станів $\frac{dP_i(t)}{dt}$, а кожний доданок правої частини рівняння отримують множенням інтенсивності переходу, що стоїть над стрілкою, пов'язаною з даним станом, на відповідну імовірність стану;
- 2) знак доданка залежить від напрямку стрілки: "+", якщо стрілка направлена до відповідного стану, "-" - від відповідного стану;
- 3) число рівнянь дорівнює числу станів, а для розв'язку система доповнюється нормованою умовою: сума імовірностей всіх станів дорівнює 1.

У будь-який момент часу система може знаходитися в одному з двох станів:

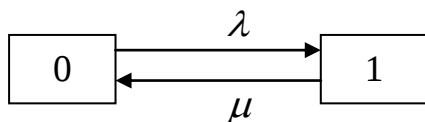
0 – стан працездатності;

1 – стан відмови (ремонт);

$P_0(t)$ – імовірність перебування системи в стані «0»;

$P_1(t)$ – імовірність перебування системи в стані «1».

Граф станів має вигляд:



Необхідно визначити функцію готовності $K_z(t)$ і функцію простою $K_n(t)$

Функція готовності співпадає з імовірністю працездатного стану, тобто

$$K_z(t) = P_0(t).$$

Функція простою співпадає з імовірністю відмови, тобто

$$K_n(t) = P_1(t).$$

Складемо систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda P_0(t) - \mu P_1(t); \\ P_0(t) + P_1(t) = 1. \end{cases}$$

У загальному випадку запишемо, підставивши в перше рівняння $P_1(t) = 1 - P_0(t)$:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) + \mu [1 - P_0(t)]$$

або

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -(\lambda + \mu) P_0(t) + \mu.$$

Знайдемо загальний розв'язок рівняння.

$$P_0(t) = \exp(-(\lambda + \mu)t) P_0(0) + \int_0^t \exp[-(\lambda + \mu)(t - \tau)] \mu d\tau$$

або

$$\begin{aligned} P_0(t) &= \exp(-(\lambda + \mu)t) + \mu \exp[-(\lambda + \mu)t] \int_0^t \exp[(\lambda + \mu)\tau] d\tau = \\ &= \exp(-(\lambda + \mu)t) + \mu \exp[-(\lambda + \mu)t] \frac{1}{\lambda + \mu} \exp[(\lambda + \mu)t] \Big|_0^t = \\ &= \exp(-(\lambda + \mu)t) + \mu \exp[-(\lambda + \mu)t] \left[\frac{1}{\lambda + \mu} \exp[(\lambda + \mu)t] - \frac{1}{\lambda + \mu} \right] = \\ &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp[-(\lambda + \mu)t] \end{aligned}$$

Тобто

$$K_e(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \exp[-(\lambda + \mu)t].$$

Імовірність стану $P_1(t)$:

$$P_1(t) = 1 - P_0(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}.$$

Тобто

$$K_e(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \exp[-(\lambda + \mu)t].$$

При тривалій експлуатації, тобто при $t \rightarrow 0$ значення похідної $\frac{dP(t)}{dt}$ дорівнює 0. В результаті отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} 0 = -\lambda P_0 + \mu P_1; \\ 0 = \lambda P_0 - \mu P_1; \\ P_0 + P_1 = 1. \end{cases}$$

Тоді, розв'язавши систему, отримаємо:

$$\begin{cases} P_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu}; \\ P_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \end{cases} \quad \text{або} \quad \begin{cases} K_z = \frac{\mu}{\lambda + \mu}; \\ K_n = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \end{cases}$$

Враховуючи, що

$$T_n = \frac{1}{\lambda}, \quad T_v = \frac{1}{\mu},$$

отримаємо

$$K_z = \frac{\frac{1}{T_v}}{\frac{1}{T_n} + \frac{1}{T_v}} = \frac{T_n}{T_n + T_v}, \quad K_n = \frac{\frac{1}{T_n}}{\frac{1}{T_n} + \frac{1}{T_v}} = \frac{T_v}{T_n + T_v}.$$

Тобто, коефіцієнт готовності характеризує час, протягом якого система є працездатною. Коефіцієнт простою характеризує час, протягом якого система відновлюється.

Розглянемо систему, яка складається з більшої кількості елементів.

Система, яка складається з основного і k резервних елементів, може знаходитися в одному з $(k + 2)$ станів:

0 – всі елементи працездатні;

1 – один елемент несправний;

...

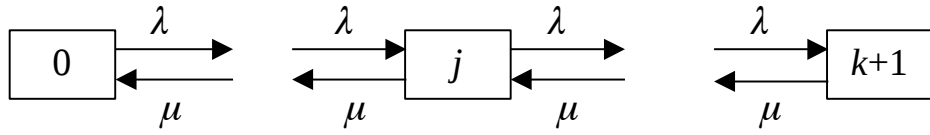
j – j елементів несправні;

...

$(k + 1)$ – $(k + 1)$ елементів несправних.

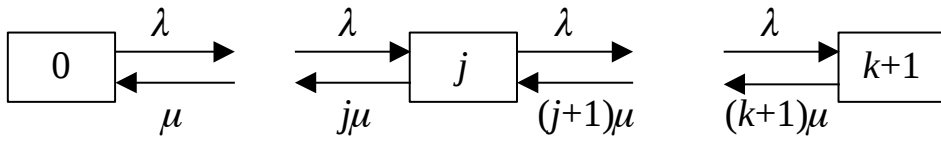
Відновлення системи може бути обмежене і необмежене. *Обмежене відновлення* означає, що існує тільки одна ремонтна бригада, тобто, якщо кількість несправних елементів > 1 , то існує черга на ремонт. *Необмежене відновлення* означає, що для системи з $(k + 1)$ елементів є $(k + 1)$ ремонтних бригад, тобто черги на ремонт немає.

1. Ненавантажений резерв, обмежене відновлення



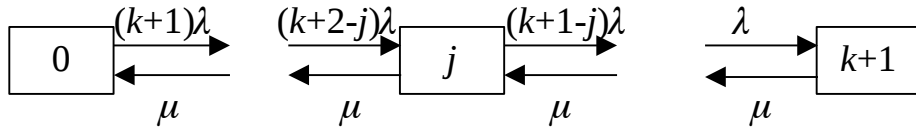
$$K_n = \frac{1}{\sum_{j=0}^{k+1} \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^j}$$

2. Ненавантажений резерв, необмежене відновлення



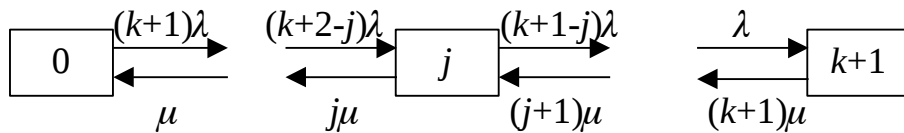
$$K_n = \frac{1}{\sum_{j=0}^{k+1} \frac{(k+1)!}{j!} \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{k+1-j}}$$

3. Навантажений резерв, обмежене відновлення



$$K_n = \frac{1}{\sum_{j=0}^{k+1} \frac{1}{j!} \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^j}$$

4. Навантажений резерв, необмежене відновлення



$$K_n = \left(\frac{\lambda}{\lambda + \mu}\right)^{k+1}$$

Лекція 4

РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК НАДІЙНОСТІ НЕВІДНОВЛЮВАНИХ ВИРОБІВ З РІЗНИМ ВИДОМ З'ЄДНАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ У СИСТЕМУ. СТРУКТУРНЕ РЕЗЕРВУВАННЯ

4.1 Структурно-логічний аналіз технічних систем

Кінцевою метою розрахунку надійності технічних пристроїв є оптимізація конструктивних рішень і параметрів, режимів експлуатації, організація технічного обслуговування і ремонтів. Тому вже на ранніх стадіях проектування важливо оцінити надійність об'єкта, виявити найбільш ненадійні вузли і деталі, визначити найефективніші міри підвищення показників надійності. Рішення цих задач можливе лише після попереднього структурно-логічного аналізу системи.

Більшість технічних об'єктів є складними системами, що складаються з окремих вузлів, деталей, агрегатів, пристроїв контролю, керування і т.д. *Технічна система* - сукупність технічних пристроїв (елементів), призначених для виконання певної функції чи функцій. Відповідно, *елемент* - складова частина системи.

Розчленовування технічної системи на елементи досить умовне і залежить від постановки задачі розрахунку надійності. Наприклад, при аналізі працездатності технологічної лінії її елементами можуть вважатися окремі установки, верстати, транспортні і завантажувальні пристрої і т.д. У свою чергу верстати і пристрої також можуть вважатися технічними системами, і при оцінці їхньої надійності вони повинні бути розділені на елементи - вузли, блоки, що, у свою чергу, - на деталі і т.д.

При визначенні структури системи в першу чергу необхідно оцінити вплив кожного елемента і його працездатності на працездатність системи в цілому. При аналізі надійності технічної системи доцільно розглядати тільки елементи, відмови яких самі по собі чи в поєднанні з відмовами інших елементів призводять до відмови системи. Всі елементи системи можна розділити на чотири групи:

- елементи, відмова яких практично не впливає на працездатність системи (наприклад, деформація корпусу, дефекти покриття тощо);
- елементи, працездатність яких під час експлуатації практично не змінюється і ймовірність безвідмовної роботи приблизно рівна одиниці (наприклад, деталі корпусу, малонавантажені елементи з великим запасом міцності тощо);
- елементи, ремонт або регулювання яких можливі при роботі виробу або під час планового технічного обслуговування (наприклад, налагодження чи заміна технологічного інструменту обладнання тощо);

- елементи, відмова яких сама по собі чи в поєднанні з відмовами інших елементів приводить до відмови системи.

Для розрахунків параметрів надійності зручно використовувати *структурно-логічні схеми надійності* технічної системи, що графічно відображають взаємозв'язок елементів і їхній вплив на працездатність системи в цілому. Структурно-логічна схема є сукупністю раніше виділених елементів, з'єднаних один з одним послідовно чи паралельно. Критерієм для визначення виду з'єднання елементів при побудові схеми є вплив їх відмов на працездатність системи.

Послідовним з'єднанням (з погляду надійності) вважається з'єднання, при якому відмова будь-якого елемента приводить до відмови всієї системи (рис.4.1,а).

Паралельним з'єднанням (з погляду надійності) вважається з'єднання, при якому відмова будь-якого елемента не приводить до відмови системи до тих пір, поки не відмовлять усі з'єднані елементи (рис.4.1,б).

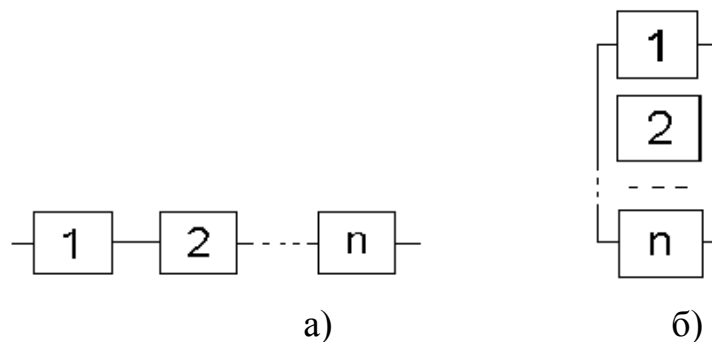


Рисунок 4.1 - Види з'єднання елементів:
а) послідовне з'єднання; б) паралельне з'єднання.

Не завжди структурна схема надійності аналогічна конструктивній чи електричній схемі розміщення елементів. Наприклад, підшипники на валу редуктора працюють конструктивно паралельно один з одним, однак вихід з ладу кожного з них приводить до відмови системи. Аналогічна дія індуктивності і ємності паралельного коливного контуру в каскадах електронної апаратури. Зазначені елементи з погляду надійності утворюють послідовне з'єднання.

Також на структуру схеми надійності впливає тип відмов, які виникли в обладнанні. В електрообладнанні основними типами відмов є обрив (неможливість замикання ланцюга) і коротке замикання (неможливість розриву з'єднання). У випадку відмови елемента типу «обрив» схема надійності відповідає електричній схемі системи – при послідовному з'єднанні елементів виникає відмова системи, при паралельному – функції системи будуть виконувати інші працездатні елементи. У випадку відмови елемента типу «коротке замикання» схема надійності протилежна електричній схемі системи – при послідовному з'єднанні елементів відмова системи не виникає, при паралельному – настає відмова системи.

На рис.4.2 показано вплив різного типу відмов на структурну схему надійності.

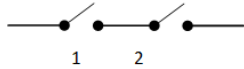
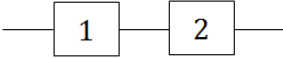
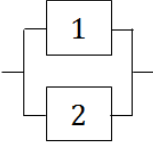
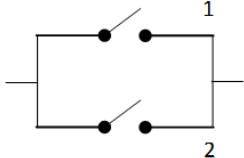
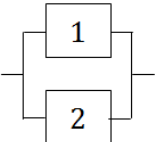
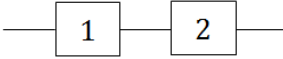
Електрична схема	Структурна схема надійності при відмові типу	
	обрив	коротке замикання
		
		

Рисунок 4.2 – Вплив типу відмов на структурну схему надійності

4.2 Розрахунки структурної надійності систем

Розрахунки показників безвідмовності технічної системи звичайно проводяться з припущенням, що як уся система, так і будь-який її елемент можуть знаходитися тільки в одному з двох можливих станів - працездатному чи непрацездатному, і відмови елементів незалежні одна від одної. Стан системи визначається станом елементів і їхнім з'єднанням.

4.2.1 Системи з послідовним з'єднанням елементів

Послідовне з'єднання (рис.4.1,а) елементів у техніці зустрічається найчастіше, тому його називають *основним з'єднанням*.

У системі з послідовним з'єднанням для безвідмовної роботи протягом деякого напрацювання t необхідно і достатньо, щоб кожний з її n елементів працював безвідмовно протягом цього напрацювання. Вважаючи відмови елементів незалежними, імовірність одночасної безвідмовної роботи n елементів визначається за теоремою множення імовірностей: імовірність спільної появи незалежних подій дорівнює добутку імовірностей цих подій:

$$P(t) = p_1(t) p_2(t) \dots p_n(t) = \prod_{i=1}^n p_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - q_i(t)).$$

(надалі аргумент t у дужках, що показує залежність показників надійності від часу, опускаємо для скорочення записів формул).

Відповідно, імовірність відмови такої системи:

$$Q = 1 - P = 1 - \prod_{i=1}^n p_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i).$$

Якщо система складається з рівнонадійних елементів ($p_i = p$), то

$$P = p_i^n, \quad Q = 1 - (1 - q_i)^n.$$

З наведених формул очевидно, що навіть при високій надійності окремих елементів надійність системи при послідовному з'єднанні є тим нижчою, чим більше число елементів системи. Крім того, оскільки всі співмножники не перевищують одиниці, імовірність безвідмовної роботи ТС при послідовному з'єднанні не може бути вищою, ніж імовірність безвідмовної роботи самого ненадійного з її елементів (принцип «гірше гіршого»), і з малонадійних елементів не можна створити високонадійну систему із послідовним з'єднанням елементів.

Якщо всі елементи системи працюють у періоді нормальної експлуатації і має місце найпростіший потік відмов, напрацювання елементів і системи підлягає експонентному розподілу. Тоді імовірність безвідмовної роботи можна записати

$$P = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t} = e^{-\Lambda t},$$

де $\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \text{const}$ - інтенсивність відмов системи.

Для системи з n рівнонадійних елементів:

$$\Lambda = n\lambda, \quad T_n = \frac{T_{ni}}{n},$$

тобто інтенсивність відмов системи у n разів більша, а середнє напрацювання у n раз менше, ніж окремого елемента.

4.2.2 Системи з паралельним з'єднанням елементів

Такі системи зустрічаються самотійно (наприклад, паралельне ввімкнення діодів у потужних випрямлячах) або у системах, де елементи дублюються чи резервуються.

Для відмови системи з паралельним з'єднанням елементів (рис.4.1,б) протягом напрацювання t необхідно і достатньо, щоб усі її елементи відмовили протягом цього напрацювання. Оскільки відмова системи полягає в загальній відмові всіх елементів, то її імовірність (при допущенні незалежності відмов) може бути знайдена за теоремою множення імовірностей як добуток імовірностей відмов елементів:

$$Q = q_1 q_2 \dots q_n = \prod_{i=1}^n q_i = \prod_{i=1}^n (1 - p_i).$$

Відповідно, імовірність безвідмовної роботи

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i).$$

Для систем з рівнонадійних елементів:

$$Q = q_i^n, \quad P = 1 - (1 - p_i)^n,$$

тобто надійність системи з паралельним з'єднанням підвищується при збільшенні числа елементів. Крім того, імовірність відмови системи не може бути вища, ніж імовірність найнадійнішого її елемента («краще кращого»), і навіть з порівняно ненадійних елементів можлива побудова цілком надійної системи.

При експонентному розподілі напрацювання імовірність безвідмовної роботи такої системи приймає вигляд:

$$P = 1 - [1 - e^{-\lambda t}]^n.$$

Середнє напрацювання системи визначається:

$$T_n = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=0}^m \frac{1}{1+i},$$

де $m = n - 1$ - кількість резервних елементів (кратність резервування)

При великих значеннях n справедлива наближена формула:

$$T_n = T_{ni} \left(\ln n + \frac{1}{2n} + 0,577 \right).$$

Отже, середнє напрацювання системи з паралельним з'єднанням більше, ніж середнє напрацювання її елементів.

4.2.3 Резервування технічних систем

Структура об'єкта на стадії його проектування визначається його функціональним призначенням відповідно до вимог технічного завдання і містить мінімально необхідну для цього кількість елементів. У процесі подальшого проектування і конструювання для досягнення заданих показників, у т.ч. надійності, структурна схема об'єкта ускладнюється за рахунок введення додаткових елементів для покращення якості функціонування.

Одним з методів забезпечення функціонування складних чи малонадійних систем є введення додаткових, надлишкових елементів, що включаються в роботу при відмовах основних. Застосування додаткових засобів і можливостей з метою збереження працездатного стану об'єкта при відмові одного чи декількох його елементів називається **резервуванням**.

Виділяють кілька видів резервування (часове, інформаційне, функціональне й ін.).

Часове резервування – це використання надлишкового часу, тобто можливість продовження перерваного внаслідок відмови функціонування об'єкта після його відновлення при обов'язковому виконанні всіх дій відповідно заданого алгоритму.

Інформаційне резервування – це використання надлишкової інформації, наприклад, застосування контрольних програм в цифрових пристроях, повторення повідомлень по каналах зв'язку тощо. Інформаційне резервування звичайно передбачає введення додаткових елементів.

Структурне резервування – це введення в структуру об'єкта додаткових елементів, що виконують функції основних елементів у випадку їхньої відмови.

Класифікація різних способів структурного резервування здійснюється за такими ознаками:

1) за схемою ввімкнення резерву:

- загальне резервування, при якому резервується об'єкт у цілому;
- роздільне резервування, при якому резервуються окремі елементи чи їхні групи;
- змішане резервування, при якому різні види резервування поєднуються в одному об'єкті;

2) за способом ввімкнення резерву:

- постійне резервування, без перебудови структури об'єкта при виникненні відмови його елемента;
- динамічне резервування, при якому при відмові елемента відбувається перебудова структури схеми. У свою чергу підрозділяється на:
 - а) резервування заміщенням, при якому функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови основного;
 - б) ковне резервування, при якому кілька основних елементів резервується одним чи декількома резервними, кожний з яких може замінити будь-який основний (тобто групи основних і резервних елементів ідентичні).

3) за станом резерву:

- навантажене резервування, при якому резервні елементи (чи один з них) знаходяться в режимі основного елемента;
- полегшене резервування, при якому резервні елементи (принаймні один з них) знаходяться в менш навантаженому (полегшеному) режимі в порівнянні з основними;
- ненавантажене резервування, при якому резервні елементи до початку виконання ними функцій знаходяться в ненавантаженому режимі.

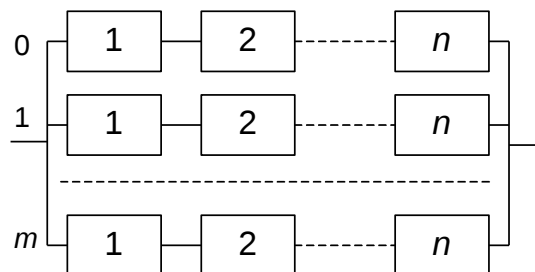
Основною характеристикою структурного резервування є *кратність резервування* – відношення кількості резервних елементів до кількості резервованих ними основних елементів, виражене дробом, що не скорочується. Резервування n основних елементів n резервними (тобто з кратністю 1:1) називається *дублюванням*.

Кількісно підвищення надійності системи в результаті резервування чи застосування високонадійних елементів можна оцінити за **коефіцієнтом виграшу надійності G** – відношенням показника надійності до і після перетворення системи.

4.2.4 Розрахунок надійності систем з резервуванням

Розрахунок кількісних характеристик надійності систем з резервуванням окремих елементів або груп елементів визначається видом резервування. Далі розглянуто схеми розрахунків різних схем резервування. Для розрахунків прийнято допущення, що всі перемикачі, які перерозподіляють навантаження між основними і резервними елементами є «ідеальними», тобто імовірність їх безвідмовної роботи дорівнює 1.

Резервування загальне з постійно ввімкненим резервом і цілою кратністю



При такому резервуванні резервні ланцюги 1, 2, ..., m з'єднані паралельно з основним протягом всього періоду роботи системи. Всі ланцюги з'єднані постійно, перебудови схеми при відмовах не відбувається, ланцюг, що відмовив, не відключається. Кратність резервування m .

Імовірність безвідмовної роботи системи:

$$P = 1 - \prod_{j=0}^m \left(1 - \prod_{i=1}^n p_{ij} \right);$$

У випадку, коли основний і резервні ланцюги рівнонадійні:

$$P = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^n p_i \right)^{m+1}$$

При експонентному законі надійності:

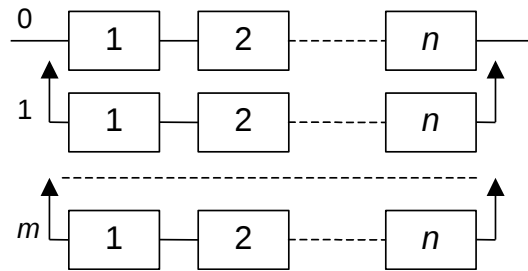
$$P = 1 - \left(1 - e^{-\lambda_0 t} \right)^{m+1};$$

де $\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ - інтенсивність відмов основного ланцюга.

$$a = \lambda_0 (m+1) e^{-\lambda_0 t} (1 - e^{-\lambda_0 t})^m; \quad \lambda = \frac{a}{P} = \frac{\lambda_0 (m+1) e^{-\lambda_0 t} (1 - e^{-\lambda_0 t})^m}{1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^{m+1}};$$

$$T_H = T_{H0} \sum_{j=0}^m \frac{1}{1+j} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{j=0}^m \frac{1}{1+j}.$$

Резервування загальне заміщенням з полегшенням (недовантаженим)
резервуванням і цілою кратністю



У такій схемі резервні ланцюги знаходяться в режимі недовантаження до моменту їх ввімкнення в роботу. Надійність резервного ланцюга вища, ніж надійність основного.

Характеристики надійності при експонентному законі такої системи:

$$P = e^{-\lambda_0 t} \left(1 + \sum_{i=1}^m \frac{x_i}{i!} (1 - e^{-\lambda_1 t})^i \right), \quad x_i = \prod_{j=0}^{i-1} \left(j + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right),$$

де λ_1 - інтенсивність відмови резервного ланцюга в режимі недовантаження до моменту ввімкнення його в роботу; λ_0 - інтенсивність відмови резервного ланцюга в стані роботи (чи основного ланцюга у випадку дублювання).

$$a = \lambda_0 e^{-\lambda_0 t} \left(1 + \sum_{i=1}^m \frac{x_i}{i!} (1 - e^{-\lambda_1 t})^i - \frac{\lambda_1}{\lambda_0} e^{-\lambda_1 t} \sum_{i=1}^m \frac{x_i}{(i-1)!} (1 - e^{-\lambda_1 t})^{i-1} \right);$$

$$\lambda = \frac{a}{P} = \lambda_0 \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_0} e^{-\lambda_1 t} \frac{\sum_{i=1}^m \frac{x_i}{(i-1)!} (1 - e^{-\lambda_1 t})^{i-1}}{1 + \sum_{i=1}^m \frac{x_i}{i!} (1 - e^{-\lambda_1 t})^i} \right); \quad T_H = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^m \frac{1}{1 + i \frac{\lambda_1}{\lambda_0}}.$$

Резервування загальне заміщенням з ненавантаженим резервуванням і цілою кратністю

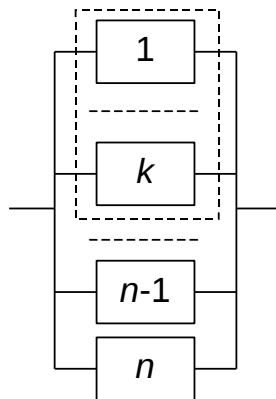
У такій схемі резервні ланцюги знаходяться в ненавантаженому режимі до моменту їх ввімкнення в роботу, тобто $\lambda_1 = 0$. Схема зображається так само, як для резервування загального заміщенням з полегшеним резервуванням і цілою кратністю.

Характеристики надійності при експонентному законі такої системи:

$$P = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}, \quad a = \frac{\lambda_0^{m+1}}{m!} t^m e^{-\lambda_0 t};$$

$$\lambda = \frac{a}{P} = \frac{\lambda_0^{m+1} t^m}{m! \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}}; \quad T_n = \frac{m+1}{\lambda_0}.$$

Резервування загальне з постійно ввімкненим резервом і дробовою кратністю



Резервована система складається з n окремих систем. Для її нормальної роботи необхідно, щоб працездатними були не менше k систем. Передбачається, що всі системи рівнонадійні. Кратність резервування такої системи:

$$m = \frac{n-k}{k}$$

Імовірність безвідмовної роботи такої системи може бути знайдена за теоремою додавання імовірностей для $k=m, m+1, \dots, n$:

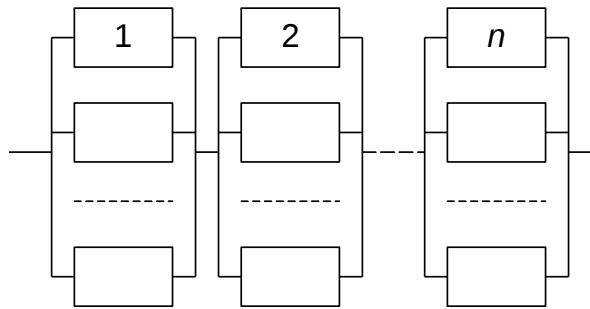
$$P = \sum_{k=m}^n C_n^k p^k (1-p)^{n-k}.$$

де $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ - біноміальний коефіцієнт “число сполучень по k з n ”

(тобто скількома різними способами можна реалізувати ситуацію “ k з n ”)

p_i - імовірність безвідмовної роботи i -го елемента чи ланцюга.

Резервування роздільне (поелементне) з постійно ввімкненим резервом і цілою кратністю



При роздільному резервуванні елементи системи резервуються окремо.
Імовірність безвідмовної роботи системи:

$$P = \prod_{i=1}^n \left(1 - \prod_{j=0}^{m_i} (1 - p_{ij}) \right),$$

де m_i - кратність резервування окремого елемента.

Для рівнонадійних елементів системи і $m_i = m = \text{const}$: $P = \left(1 - (1 - p_{ij})^{m+1} \right)^n$.

Якщо $p_{ij} = p_i$, то $P = \prod_{i=1}^n \left(1 - (1 - p_i)^{m_i+1} \right)$.

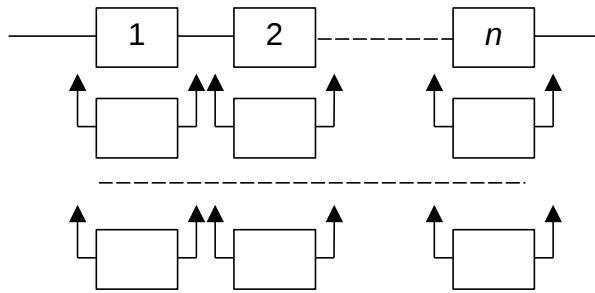
При експонентному законі $P = \prod_{i=1}^n \left(1 - (1 - e^{-\lambda_i t})^{m_i+1} \right)$;

для рівнонадійних елементів $P = \left(1 - (1 - e^{-\lambda t})^{m+1} \right)^n$.

Середній час безвідмовної роботи системи:

$$T_n = \frac{(m-1)!}{\lambda(m+1)} \sum_{j=0}^m \frac{1}{v_j(v_j+1)\dots(v_j+n-1)}, \text{ де } v_j = \frac{j+1}{m+1}.$$

Резервування роздільне (поелементне) заміщенням з цілою кратністю

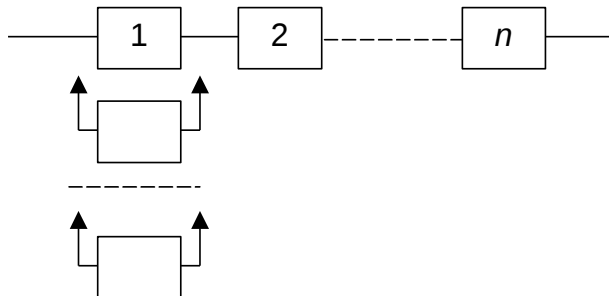


Імовірність безвідмовної роботи системи

$$P = \prod_{i=1}^n p_i,$$

де p_i - імовірність безвідмовної роботи елементів i -го типу, резервованих методом заміщення: $p_i = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}$,
 λ_0 - інтенсивність відмови i -го елемента основного ланцюга.

Резервування ковзне при експонентному розподілі



Для резервування систем, що складаються з однакових елементів, можна використати невелике число резервних елементів, які підключаються замість будь-яких, що відмовили. Відмова системи настає тоді, коли кількість елементів, що відмовили, перевищить кількість резервних.

Імовірність безвідмовної роботи такої системи:

$$P = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{m_0} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!},$$

де λ_0 - інтенсивність відмов нерезервованої системи; m_0 - кількість резервних елементів у ненавантаженому стані.

Кратність резервування системи $m = \frac{m_0}{n}$.

Час напрацювання на відмову: $T_n = T_{n0}(m_0 + 1)$, T_{n0} - середній час безвідмовної роботи нерезервованої системи.

4.2.5 Розрахунок мостових схем

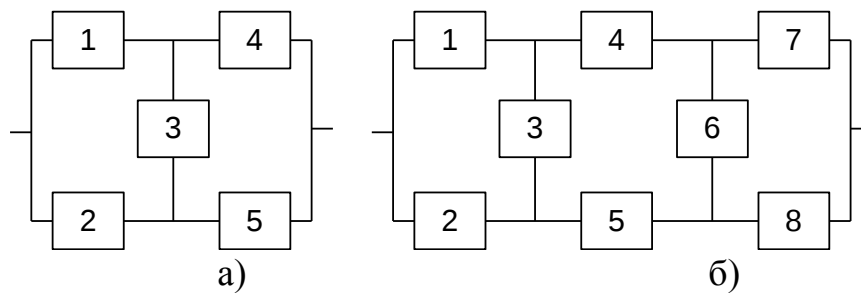


Рисунок 4.3 - Схема мостової системи

Мостова структура є паралельним з'єднанням послідовних ланцюгів елементів з діагональними елементами, включеними між вузлами різних паралельних віток. Працездатність такої системи визначається не тільки кількістю елементів, що відмовили, але і їхнім положенням у структурній схемі.

Для розрахунку надійності мостових систем можна скористатися **методом прямого перебору**. Слід пам'ятати, що при аналізі працездатності кожного стану системи необхідно враховувати не тільки число елементів, що відмовили, але і їхнє положення в схемі (табл.4.1).

Таблиця 4.1 - Таблиця станів мостової системи (рис.3, а)

N стану	Стан елементів					Стан системи	Імовірність стану	
	1	2	3	4	5		у загальному випадку	при рівнонадійних елементах
1	+	+	+	+	+	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	p^5
2	+	+	+	+	-	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 q_5$	$p^4 q = p^4 (1 - p)$
3	+	+	+	-	+	+	$p_1 p_2 p_3 q_4 p_5$	
4	+	+	-	+	+	+	$p_1 p_2 q_3 p_4 p_5$	
5	+	-	+	+	+	+	$p_1 q_2 p_3 p_4 p_5$	
6	-	+	+	+	+	+	$q_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
7	+	+	+	-	-	-	$p_1 p_2 p_3 q_4 q_5$	$p^3 q^2 = p^3 (1 - p)^2$
8	+	+	-	+	-	+	$p_1 p_2 q_3 p_4 q_5$	
9	+	-	+	+	-	+	$p_1 q_2 p_3 p_4 q_5$	
10	-	+	+	+	-	+	$q_1 p_2 p_3 p_4 q_5$	
11	+	+	-	-	+	+	$p_1 p_2 q_3 q_4 p_5$	

12	+	-	+	-	+	+	$p_1 q_2 p_3 q_4 p_5$	
13	-	+	+	-	+	+	$q_1 p_2 p_3 q_4 p_5$	
14	+	-	-	+	+	+	$p_1 q_2 q_3 p_4 p_5$	
15	-	+	-	+	+	+	$q_1 p_2 q_3 p_4 p_5$	
16	-	-	+	+	+	-	$q_1 q_2 p_3 p_4 p_5$	
17	+	+	-	-	-	-	$p_1 p_2 q_3 q_4 q_5$	$p^2 q^3 = p^2 (1-p)^3$
18	+	-	+	-	-	-	$p_1 q_2 p_3 q_4 q_5$	
19	-	+	+	-	-	-	$q_1 p_2 p_3 q_4 q_5$	
20	+	-	-	-	+	-	$p_1 q_2 q_3 q_4 p_5$	
21	-	+	-	-	+	+	$q_1 p_2 q_3 q_4 p_5$	
22	-	-	-	+	+	-	$q_1 q_2 q_3 p_4 p_5$	
23	+	-	-	+	-	+	$p_1 q_2 q_3 p_4 p_5$	
24	-	+	-	+	-	-	$q_1 p_2 q_3 p_4 q_5$	
25	-	-	+	-	+	-	$q_1 q_2 p_3 q_4 p_5$	
26	-	-	+	+	-	-	$q_1 q_2 p_3 p_4 q_5$	
27	+	-	-	-	-	-	$p_1 q_2 q_3 q_4 q_5$	$p q^4 = p (1-p)^4$
28	-	+	-	-	-	-	$q_1 p_2 q_3 q_4 q_5$	
29	-	-	+	-	-	-	$q_1 q_2 p_3 q_4 q_5$	
30	-	-	-	+	-	-	$q_1 q_2 q_3 p_4 q_5$	
31	-	-	-	-	+	-	$q_1 q_2 q_3 q_4 p_5$	
32	-	-	-	-	-	-	$q_1 q_2 q_3 q_4 q_5$	$q^5 = (1-p)^5$

Імовірність безвідмовної роботи системи визначається як сума імовірностей усіх працездатних станів:

$$\begin{aligned}
 P = & p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 p_3 p_4 q_5 + p_1 p_2 p_3 q_4 p_5 + p_1 p_2 q_3 p_4 p_5 + \\
 & + p_1 q_2 p_3 p_4 p_5 + q_1 p_2 p_3 p_4 p_5 + p_1 p_2 q_3 p_4 q_5 + p_1 q_2 p_3 p_4 q_5 + \\
 & + q_1 p_2 p_3 p_4 q_5 + p_1 p_2 q_3 q_4 p_5 + p_1 q_2 p_3 q_4 p_5 + q_1 p_2 p_3 q_4 p_5 + \\
 & + p_1 q_2 q_3 p_4 p_5 + q_1 p_2 q_3 p_4 p_5 + q_1 q_2 q_3 p_4 p_5 + p_1 q_2 q_3 p_4 q_5.
 \end{aligned}$$

У випадку рівнонадійних елементів:

$$P = p^5 + 5p^4 q + 8p^3 q^2 + 2p^2 q^3 = 2p^5 - 5p^4 + 2p^3 + 2p^2.$$

Метод прямого перебору ефективний тільки при малій кількості елементів n , оскільки число станів системи складає 2^n .

Для аналізу надійності ТС, структурні схеми яких не зводяться до паралельного чи послідовного типу, можна скористатися також **методом логічних схем із застосуванням алгебри логіки**. Застосування цього методу зводиться до складання для ТС формули алгебри логіки, що визначає умову працездатності системи. При цьому для кожного елемента і системи в цілому розглядаються дві протилежних події - відмова і збереження працездатності.

Для складання логічної схеми можна скористатися двома методами - мінімальних шляхів і мінімальних перетинів.

Розглянемо **метод мінімальних шляхів** для розрахунку імовірності безвідмовної роботи на прикладі мостової схеми (рис.4.3,а).

Мінімальним шляхом називається послідовний набір працездатних елементів системи, що забезпечує її працездатність, а відмова кожного з них приводить до її відмови. Мінімальних шляхів у системі може бути один чи декілька. Для мостової системи з п'яти елементів (рис.3,а) мінімальних шляхів чотири: (елементи 1 і 4), (2 і 5), (1, 3 і 5), (2, 3 і 4). Логічна схема такої системи складається так, щоб всі елементи кожного мінімального шляху були з'єднані один з одним послідовно, а всі мінімальні шляхи паралельно (рис.4.4).

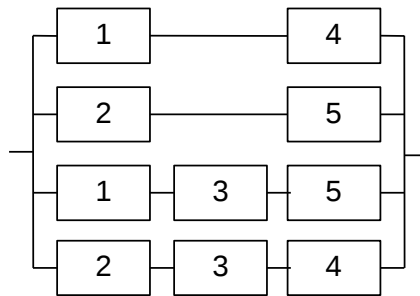


Рисунок 4.4

Потім для логічної схеми складається функція алгебри логіки A за загальними правилами розрахунку імовірності безвідмовної роботи, але замість символів імовірностей безвідмовної роботи елементів p_i і системи P використовуються символи події (збереження працездатності елемента a_i і системи A). Послідовне з'єднання елементів логічної схеми відповідає логічному множенню ("І"), паралельне - логічному додаванню ("АБО"). Отже, схема рис.4 відповідає твердженню: система працездатна, якщо працездатні елементи 1 і 4, чи 2 і 5, чи 1, 3 і 5, чи 2, 3 і 4. Функція алгебри логіки запишеться:

$$A = 1 - (1 - a_1 a_4)(1 - a_2 a_5)(1 - a_1 a_3 a_5)(1 - a_2 a_3 a_4).$$

У цьому виразі змінні a розглядаються як булеві, тобто можуть прийматися тільки два значення: 0 чи 1, тобто $a_i^k = a_i$ і

$$A = a_1 a_4 + a_2 a_5 + a_1 a_3 a_5 + a_2 a_3 a_4 - a_1 a_2 a_3 a_4 - a_1 a_2 a_3 a_5 - 2a_1 a_2 a_4 a_5 - a_2 a_3 a_4 a_5 + 2a_1 a_2 a_3 a_4 a_5.$$

Замінивши символи подій a_i їхніми імовірностями p_i , рівняння для визначення імовірності безвідмовної роботи системи запишеться так:

$$P = p_1 p_4 + p_2 p_5 + p_1 p_3 p_5 + p_2 p_3 p_4 - p_1 p_2 p_3 p_4 - \\ - p_1 p_2 p_3 p_5 - 2 p_1 p_2 p_4 p_5 - p_2 p_3 p_4 p_5 + 2 p_1 p_2 p_3 p_4 p_5.$$

Для системи рівнонадійних елементів:

$$P = p^5 + 5p^4 q + 8p^3 q^2 + 2p^2 q^3 = 2p^5 - 5p^4 + 2p^3 + 2p^2.$$

Метод мінімальних шляхів дає точне значення тільки для порівняно простих систем з невеликим числом елементів. Для більш складних систем результат розрахунку є нижньою границею імовірності безвідмовної роботи.

Для розрахунку верхньої границі імовірності безвідмовної роботи системи служить **метод мінімальних перетинів**.

Мінімальним перетином називається набір непрацездатних елементів, відмова яких приводить до відмови системи, а відновлення працездатності кожного з них - до відновлення працездатності системи. Мінімальних перетинів може бути кілька.

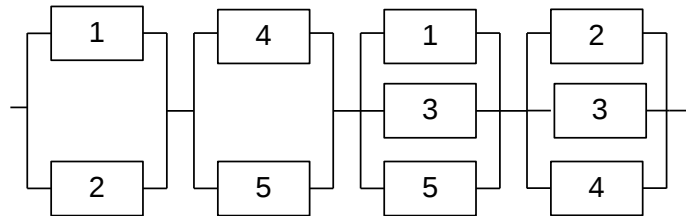


Рисунок 4.5

У мостовій системи (рис.4.3,а) мінімальних перетинів чотири (елементи 1 і 2), (4 і 5), (1, 3 і 5), (2, 3 і 4). Логічна схема системи (рис.4.5) складається таким чином, щоб всі елементи кожного мінімального перетину були з'єднані один з одним паралельно, а всі мінімальні перетини - послідовно. Аналогічно методу мінімальних шляхів, складається функція алгебри логіки. Безвідмовна робота логічної системи полягає в безвідмовній роботі усіх послідовних ділянок, а відмова кожного з них - в одночасній відмові всіх паралельно включених елементів. Схема рис.4.5 відповідає формулюванню: система відмовить, якщо відмовлять елементи 1 і 2, чи 4 і 5, чи 1, 3 і 5, чи 2, 3 і 4. Функція алгебри логіки запишеться так:

$$A = [1 - (1 - a_1)(1 - a_2)][1 - (1 - a_4)(1 - a_5)] \times \\ \times [1 - (1 - a_1)(1 - a_3)(1 - a_5)][1 - (1 - a_2)(1 - a_3)(1 - a_4)].$$

Після перетворень аналогічно методу мінімальних шляхів, ця формула для рівнонадійних елементів набуває вигляду:

$$P = p^5 + 5p^4 q + 8p^3 q^2 + 2p^2 q^3 = 2p^5 - 5p^4 + 2p^3 + 2p^2.$$

Для мостовій системи з п'яти елементів верхня і нижня границі імовірності безвідмовної роботи, отримані методами мінімальних перетинів і мінімальних

шляхів, збіглися з точними значеннями, отриманими методом прямого перебору. Для складних систем це може не відбутися, тому методи мінімальних шляхів і мінімальних перетинів варто застосовувати спільно.

Іноді для аналізу надійності ТС удається скористатися **методом розкладання щодо особливого елемента**, заснованим на теоремі про розкладання функції логіки по будь-якому аргументу. Відповідно до неї, можна записати:

$$P = p_i P(p_i = 1) + q_i P(p_i = 0),$$

де p_i і $q_i = 1 - p_i$ - імовірності безвідмовної роботи і відмови i -го елемента, $P(p_i = 1)$ і $P(p_i = 0)$ - імовірності працездатного стану системи за умови, що i -й елемент абсолютно надійний і що i -й елемент відмовив.

Для мостової схеми (рис.4.3,а) як особливий елемент доцільно вибрати діагональний елемент 3. При мостова схема перетворюється в паралельно-послідовне з'єднання (рис.4.6,а), а при $p_3 = 0$ - у послідовно-паралельне (рис.4.6,б).



Рисунок 4.6 - Перетворення мостової схеми при абсолютно надійному - а) і такому, що відмовив - б) центральному елементу

Для перетворених схем можна записати:

$$P(p_3 = 1) = [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_4)(1 - p_5)],$$

$$P(p_3 = 0) = 1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5).$$

$$P = p_3 [1 - (1 - p_1)(1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_4)(1 - p_5)] + (1 - p_3) [1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5)].$$

4.2.6 Розрахунок надійності систем, які не зводяться до послідовно-паралельних схем

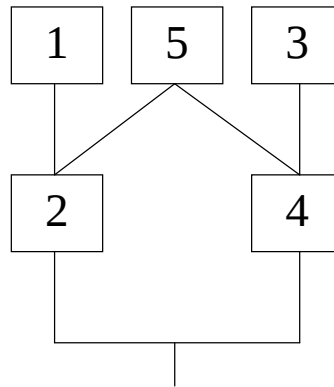
Теорема Байєса: Якщо A - подія, яка залежить від однієї з двох несумісних подій B_i та B_j , з яких хоча б одна обов'язково відбувається, то імовірність появи події A дорівнює:

$$P(A) = P(A \text{ за умовою } B_i)P(B_i) + P(A \text{ за умовою } B_j)P(B_j)$$

Якщо подія A – відмова системи, B_i – безвідмовна робота деякого елемента системи, B_j – відмова деякого елемента системи, то теорема Байєса формулюється так:

Імовірність відмови системи дорівнює імовірності відмови системи при умові, що деякий елемент справний, помножену на імовірність того, що цей елемент справний, плюс імовірність відмови системи при умові, що той самий елемент несправний, помножену на імовірність того, що цей елемент несправний:

$$Q = Q(x=1)p_x + Q(x=0)q_x, \text{ де } X - \text{особливий елемент.}$$



Нехай «5» – особливий елемент.

Якщо елемент «5» справний, то система відмовить при одночасній відмові елементів (2; 4):

$$Q(p_5 = 1) = (1 - p_2)(1 - p_4)$$

Якщо елемент «5» несправний, то система відмовить при одночасній відмові елементів (1; 2) і (3; 4):

$$Q(p_5 = 0) = (1 - p_1 p_2)(1 - p_3 p_4)$$

Імовірність відмови системи:

$$Q = (1 - p_2)(1 - p_4)p_5 + (1 - p_1 p_2)(1 - p_3 p_4)(1 - p_5)$$

Імовірність безвідмовної роботи системи:

$$P = 1 - [(1 - p_2)(1 - p_4)p_5 + (1 - p_1 p_2)(1 - p_3 p_4)(1 - p_5)]$$

Лекція 5

ОЦІНКА І КОНТРОЛЬ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИПРОБУВАНЬ

5.1 Випробування на надійність

На різних етапах виготовлення технічних пристроїв проводяться їх випробування, мета яких полягає в експериментальній перевірці відповідності фактичних характеристик встановленим технічним вимогам. Частиною таких випробувань є випробування на надійність, що забезпечують отримання інформації про властивості надійності виробів, які виготовляються, їх складових частин, вузлів та деталей.

Основне завдання випробувань на надійність – отримання кількісної оцінки показників надійності випробуваних об'єктів. Отримані результати використовуються для перевірки виробів на відповідність встановленим вимогам по надійності для коригування проектної та робочої документації, а також для проектування аналогічних і складніших пристроїв, до складу яких входять випробувані об'єкти.

Іншим, не менш важливим завданням, є виявлення та аналіз причин відмов та пошкоджень та розробка заходів щодо їх усунення.

Складні відновлювані вироби одиничного або дрібносерійного виробництва піддаються випробувань на надійність в індивідуальному порядку. В умовах великосерійного та масового виробництва випробуванням піддається деяка вибірка з генеральної сукупності (партії) однакових виробів, виготовлених в єдиному технологічному процесі. Режим випробувань повинен відповідати або бути максимально наближеним до реальних умов експлуатації, транспортування або зберігання (залежно від виду визначених показників надійності) випробуваних об'єктів.

В результаті випробувань фіксується так звана первинна статистика - □ результати спостережень: тривалість знаходження кожного об'єкта у працездатному стані; час виникнення відмов, їх характер та причини; тривалість відновлення; моменти переходу в граничний стан та ін.

Стандартами на випробування з метою скорочення їх тривалості допускається штучне прискорення випробувального процесу у часі за рахунок посилення одного чи кількох основних факторів, які впливають на пристрій, у порівнянні з їх розрахунковими значеннями. Для електротехнічних пристроїв такими факторами є температура, вологість та вібрація.

При імітації експлуатаційних умов випробування проводять, як правило, в циклічному режимі, коли протягом кількох однакових повторюваних проміжків часу (циклів) до об'єктів прикладаються одночасно або послідовно встановлені програмою випробувань впливи з фіксацією результатів спостережень за їх станом після завершення кожного циклу. Переклад тривалості випробувань у циклах у фізичний час проводиться з урахуванням коефіцієнта прискорення

випробувань. При цьому повинні бути відомі (або попередньо отримані) залежності контрольованих показників надійності від зміни цих факторів.

Випробування на надійність поділяються на визначальні, контрольні та спеціальні.

Визначні випробування проводяться з метою встановлення фактичного рівня надійності випробуваних об'єктів на основі отриманих статистичних оцінок показників надійності.

Контрольні випробування проводяться з метою перевірки відповідності фактичного рівня надійності випробуваних об'єктів необхідному шляхом порівняння одержаних статистичних оцінок деяких показників надійності із значеннями, встановленими технічною документацією. При цьому можуть використовуватись і непрямі показники такі, наприклад, як кількість відмов у випробуваній вибірці за встановлений час, тривалість безвідмовної роботи всіх виробів вибірки тощо. Об'єм та трудомісткість контрольних випробувань менші, ніж визначальних.

Спеціальні випробування проводяться з метою дослідження характеру та ступеня впливу на надійність деяких явищ або факторів, а також конструктивних, схемних або технологічних рішень при опрацюванні різних варіантів розробки чи модернізації.

Характерною особливістю випробувань на надійність є те, що за результатами спостережень показники надійності отримують у вигляді статистичних оцінок, а не їх справжніх значень. Це пояснюється обмеженістю числа спостережень (обмеженістю вибірки випробуваних об'єктів). Розраховані за результатами випробувань показники називаються вибірковими або емпіричними. Їх значення отримують у вигляді точкових або інтервальних оцінок.

Точкові оцінки – це числові характеристики стану випадкових величин, якими є зумовлені показники надійності. Найбільш поширеними точковими оцінками є вибіркові середнє значення та дисперсія.

Інтервальні оцінки. Точкові оцінки показників надійності не дозволяють оцінювати точність та достовірність одержаних результатів, тобто ступінь їх відхилення від дійсних значень.

Якщо позначити отриману точкову оцінку показника надійності θ , а допустиму похибку $\pm\delta$, то дійсне значення досліджуваного показника θ_0 повинно знаходитися в інтервалі

$$\theta - \delta \leq \theta_0 \leq \theta + \delta$$

Оскільки величина δ випадковою, точні межі цього інтервалу встановити неможливо. Їх визначають з деякою заздалегідь прийнятою ймовірністю γ **довірчою ймовірністю**, яка є ймовірністю того, що інтервал у встановлених межах перекриє дійсне значення досліджуваного показника

$$\gamma = P(\theta_H \leq \theta_0 \leq \theta_B),$$

де θ_H, θ_B - відповідно нижня та верхня границі, в межах яких знаходиться дійсне значення досліджуваного показника. Границі такого інтервалу, встановлені з довірчою ймовірністю γ , називаються **довірчими границями**, а сам інтервал - **довірчим інтервалом**.

Довірчий інтервал характеризує **величину помилки** при оцінці показника надійності, довірна ймовірність - **достовірність оцінки**. Найчастіше величину довірчої ймовірності обирають з ряду чисел 0,8; 0,9; 0,95; 0,99; 0,995; 0,999. Ймовірність того, що довірчий інтервал не перекриє справжнє значення досліджуваного показника, називається **рівнем значимості** ψ

$$\psi = P(\theta_H \geq \theta_0 \geq \theta_B) = 1 - \gamma$$

Якщо потрібно встановити лише одну з границь довірчого інтервалу - □ нижню або верхню (односторонній інтервал), задаються відповідно довірчою ймовірністю γ_1 або γ_2 , де

$$\gamma_1 = P(\theta_0 \geq \theta_H),$$

$$\gamma_2 = P(\theta_0 \leq \theta_B)$$

Ймовірності $\gamma, \gamma_1, \gamma_2$ зв'язані між собою співвідношенням

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - 1$$

При визначенні довірчих границь широко використовуються методи квантилів. Квантилем у теорії ймовірностей називається числове значення такої величини x_p , для якої виконується умова

$$F(x_p) = p,$$

де $F(x_p) = P(X < x_p)$ - □ функція розподілу випадкової величини X , p -задане значення ймовірності.

Значення квантилів для найбільш поширених законів розподілу випадкових величин табульовані в залежності від величини p та числа спостережень n . У деяких випадках квантилі розглядають з умови

$$P(X > x_p) = 1 - p = q$$

Використання методів квантилів вимагає апіорного знання або попереднього визначення закону розподілу за результатами випробувань.

5.2 Контроль надійності

Контроль надійності має за мету перевірити гіпотезу про те, що надійність випробуваних виробів є не нижчою встановленого рівня. При цьому кінцевим результатом є одне з двох рішень: прийняти партію, вважаючи надійність виробів задовільною, чи забракувати партію виробів, що контролюється, як ненадійну.

Оскільки контроль надійності проводиться на основі випробувань вибірки, то при прийнятті рішення можливі два види помилок:

а) помилка першого роду - коли добра партія бракується - ризик постачальника α ;

б) помилка другого роду - коли погана партія приймається - ризик замовника β .

Залежно від параметрів виробів вони поділяються на три категорії:

1 – хороша продукція;

2 – продукція з допустимими параметрами;

3 – брак.

Є три основних статистичних методів контролю надійності:

- метод однократної вибірки;

- метод двократної вибірки;

- послідовний метод.

Метод однократної вибірки легко проводиться і планується. Проте це найменш економічний метод, оскільки він потребує відносно великого обсягу контролю, особливо для партій з високою чи низькою надійністю. Метод полягає в тому, що з партії береться одна випадкова вибірка, для якої встановлюються оціночні нормативи.

Нехай оцінка вибірки з n виробів виконується по деякому параметру X_n цієї вибірки. Нехай партія виробів відноситься до першої категорії при умові

$$X_0 \leq X_1$$

і до третьої категорії при умові

$$X_0 \geq X_2,$$

де X_1, X_2 – деякі сталі.

При застосуванні методу однократної вибірки встановлюють два оціночних нормативи: об'єм вибірки n і оціночний норматив c . Партія виробів приймається при умові

$$X_n \leq c$$

і бракується при умові

$$X_n > c.$$

У цьому випадку імовірність помилок першого і другого роду записують так:

$$\alpha = \text{Im}(X_n > c \text{ при } X_0 = X_1)$$

$$\beta = \text{Im}(X_n \leq c \text{ при } X_0 = X_2)$$

Якщо величини α, β, X_1, X_2 задані, то контрольні нормативи n і c можна визначити з приведених формул.

Метод двократної вибірки. При використанні методу двократної вибірки встановлюють п'ять контрольних нормативів: об'єм вибірок n_1 і n_2 і оціночні нормативи c_1, c_2, c_3 .

Спочатку робиться вибірка об'ємом n_x і визначається виморочний параметр X_{n1} . Якщо

$$X_{n1} \leq c_1,$$

то партія виробів приймається і повторна вибірка не проводиться.

Якщо

$$X_{n1} > c_2,$$

то партія виробів бракується і повторна вибірка не проводиться.

Якщо

$$c_1 < X_{n1} < c_2,$$

то проводиться повторна вибірка об'ємом n_2 , по якій визначається виморочний параметр X_{n2} .

Далі складається функція $f(X_{n1}, X_{n2})$ і її значення порівнюється з оціночним нормативом c_3 .

Якщо

$$f(X_{n1}, X_{n2}) \geq c_3,$$

то партія приймається, в іншому випадку партія бракується.

При цьому методі контролю можна записати:

$$\alpha = \text{Im}(X_{n1} > c_2 \text{ або } f(X_{n1}, X_{n2}) > c_2 \text{ при } X_0 = X_1)$$

$$\beta = \text{Im}(X_{n1} \leq c_1 \text{ або } f(X_{n1}, X_{n2}) \leq c_2 \text{ при } X_0 = X_2).$$

Для визначення величин n_1, n_2, c_1, c_2, c_3 за заданими α, β, X_1, X_2 додають умови $n_1 = n_2$ або $n_2 = 2n_1$. Іноді приймають певні співвідношення між c_1, c_2, c_3 .

Головна перевага контролю за методом двократної вибірки проявляється лише при контролі великих партій з дуже низькою чи дуже високою

надійністю. Розрахунки є складнішими, ніж при одиничному контролі, а час, необхідний для контролю, збільшується.

Послідовний метод є найбільш економічним методом контролю надійності. Середній об'єм вибірки звичайно складає 50-65% об'єму при одиничному контролі для партій з високою надійністю. Єдиним недоліком цього методу є більший час контролю. Послідовний метод контролю не передбачає попереднього визначення об'єму вибірки. Інформація про надійність досліджуваних виробів накопичується при послідовно зростаючому об'ємі випробувань. На кожному етапі випробувань відношення правдоподібності порівнюється з певними оціночними нормативами. При послідовному методі контролю можливі два способи контролю – контроль кількості дефектних виробів і контроль за напрацюванням.

Нехай густина розподілу випадкової величини X_n при $X_0 = X_1$ і $X_0 = X_2$ буде $f(X_n, X_1)$ і $f(X_n, X_2)$.

Відношенням правдоподібності є відношення

$$\gamma_n = \frac{f(X_n, X_2)}{f(X_n, X_1)}.$$

При випробуваннях послідовно збільшують n і для кожного n визначають γ_n .

Якщо виконується умова

$$\gamma_n \leq \frac{\beta}{1-\alpha},$$

то випробування припиняються і партія приймається.

Якщо виконується умова

$$\gamma_n \geq \frac{1-\beta}{\alpha},$$

то випробування припиняються і партія бракується.

При виконанні умови

$$\frac{\beta}{1-\alpha} < \gamma_n < \frac{1-\beta}{\alpha}$$

Випробування проводять до тих пір, поки не будуть виконуватися умови прийому чи бракування партії.

5.3 Встановлення закону розподілу

Встановлення закону розподілу проводиться на основі статистичних даних результатів випробувань. Для випробувань беруть репрезентативну вибірку, за результатами випробувань якої судять про надійність всієї генеральної сукупності.

Вичерпною характеристикою надійності системи з неперервним характером роботи є закон розподілу часу безвідмовної роботи, з якого дослідним шляхом можна знайти оцінку параметрів закону, а потім і необхідні характеристики надійності.

При встановленні виду закону розподілу дотримуються такого порядку:

- підготовка дослідних даних;
- побудова гістограми деякої кількісної характеристики надійності;
- перевірка допустимості передбачуваного закону розподілу відмов, використовуючи певні критерії згоди. Найчастіше застосовують критерій χ^2 Пірсона і критерій Колмогорова.

Дослідні та розрахункові дані заносять у таблицю:

Δt_i	$n(\Delta t_i)$	$P(t)$	$a(t)$	$\lambda(t)$

За даними таблиці будують гістограму будь-якої характеристики надійності і апроксимують її кривою. За виглядом кривої роблять припущення про імовірний закон розподілу характеристики надійності.

Для експонентного закону розподілу:

$$\lambda = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i},$$

де n – кількість відмов (кількість елементів, які відмовили за даний проміжок часу).

Для нормального закону:

$$a(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_t}} e^{-\frac{(t-T_n)^2}{2D_t}}, \quad D_t = \sigma_t^2,$$

$$T_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i, \quad D_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - T_n)^2.$$

Для оцінки ступеня розходження статистичного закону розподілу з теоретичним, знаходять міру розходження Δ , по величині якої можна судити

про те, що розходження викликано розходження випадковими причинами чи вибраний теоретичний розподіл є неприйнятним.

Міру розходження можна визначити різними способами:

$$\Delta = \max_t |\bar{f}(t) - f(t)|,$$

$$\Delta = \int_0^{\infty} [\bar{f}(t) - f(t)]^2 df(t),$$

$$\Delta = \sum_{i=1}^k \frac{n}{P_i} (\bar{P}_i - P_i)^2,$$

де $\bar{f}(t), f(t)$ – статистична та імовірнісна функції розподілу випадкової величини:

$\bar{P}_i(t), P_i(t)$ – імовірність та частота попадання випадкової величини в інтервал Δt_i ;

k – кількість інтервалів розбиття часу випробувань.

Міра розходження повинна бути якомога меншою.

Перевірка допустимості прийнятого закону розподілу за критерієм Колмогорова. На основі критерію згоди Колмогорова експериментальний розподіл узгоджується з вибраним теоретично, якщо виконується умова:

$$\Delta \sqrt{n} \leq 1,$$

де $\Delta = \max_t |\bar{f}(t) - f(t)|$ – найбільше відхилення теоретичної кривої розподілу від експериментальної:

n – загальна кількість експериментальних точок (кількість відмов).

Перевірка допустимості прийнятого закону розподілу за критерієм χ^2 Пірсона:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{n}{P_i} (\bar{P}_i - P_i)^2.$$

Для використання χ^2 при різній кількості стовпців гістограми існують таблиці квантилів розподілу χ^2 з числом степенів свободи:

$$\nu = m - 1 - r,$$

де r – кількість параметрів, необхідних для суміщення моделі і гістограми. Як правило $r = 2$, тому

$$\nu = m - 3.$$

По таблиці визначають імовірність P і рівень значимості $q = 1 - P$.

5.4 Оцінка середнього напрацювання на відмову

Середнє напрацювання на відмову використовують для оцінки як невідновлюваних елементів, так і відновлюваних. При розрахунках надійності технічної системи на етапах проектування значення T_n чи λ вибирається з довідників. Якщо система складається з нових елементів, дані по яких відсутні, то ці дані можна отримати за результатами випробувань. Випробування проводяться також після виготовлення дослідних зразків для порівняння розрахункових значень з реальними. Оцінка T_n проводиться для роботи виробу на етапі нормальної експлуатації (експонентний закон розподілу). Для розрахунку необхідно спланувати експеримент, для якого визначити число і тривалість випробувань. Дане завдання можна розв'язати кількома методами.

1) Метод послідовних наближень

Нехай для випробування взято партію з n елементів. Якщо випробування проводити до того часу, поки не відмовлять всі n елементів і потім знайти середнє арифметичне часу напрацювання, то воно не дасть справжньої оцінки, тому що невідомо скільки елементів відмовили раптово, а скільки через зношування. Тому необхідно зменшити тривалість випробувань, щоб виключити імовірність зношувальних відмов. Випробування припиняють в момент часу t_r після r -ї відмови. Середнє напрацювання:

$$T_n = \frac{\left(\sum_{i=1}^r t_i \right) + t_r (n - r)}{r - k}, \quad k - \text{кількість зношувальних відмов.}$$

Точність оцінки T_n залежить від кількості відмов, що відбулися за час випробування, тому, щоб збільшити точність, необхідно випробування проводити з достатньо великою вибіркою. Якщо t - час випробування без заміни елементів, λ - очікувана інтенсивність відмов, r - кількість раптових відмов, достатня для очікуваної точності, то кількість елементів, що виставляються на випробування:

$$n = \frac{r}{1 - e^{-\lambda t}} = \frac{1}{P(t)}.$$

2) Випробування без заміни елементів (випробування на відсоток відмов).

Ця методика застосовується у випадку, коли моменти кожної відмови не фіксуються, а випробування припиняють в момент t_r після r -ої відмови.

Значення середнього напрацювання на відмову і інтенсивності відмов знаходять з відношення:

$$\frac{r}{n} = Q(t) = 1 - e^{-\frac{t_r}{T_n}},$$

$$\text{де } T_n = \frac{t_r}{\ln n - \ln(n-r)}, \quad \lambda = \frac{\ln n - \ln(n-r)}{t_r} = \frac{1}{T_n}.$$

Якщо відношення $\frac{r}{n}$ виразити у %, то частота відмов $a = \frac{r}{n} \cdot 100$.

$$\text{Тоді } \lambda = \frac{\ln 100 - \ln(100-a)}{t_r} = \frac{4,6052 - \ln(100-a)}{t_r}.$$

3) Метод із заміною елементів, що відмовили.

Кожний елемент, який відмовив, відразу замінюють новим, що пройшов етап припрацювання. У цьому випадку кількість елементів весь час залишається незмінною. Якщо випробування припиняють в момент t_r після r -ої відмови, то повне напрацювання для n елементів дорівнює nt_r . Середнє напрацювання на відмову:

$$T_n = \frac{nt_r}{r}.$$

Ця ж формула використовується тоді, коли середньостатистичні оцінки параметрів надійності отримують за результатами, зібраними в процесі експлуатації елементів у працюючих системах.

5.5 Оцінка довговічності при зносових відмовах

Зношувальні відмови визначають довговічність елементів та системи в цілому. Найчастіше для оцінки надійності виробів при наявності поступових зношувальних відмов використовується нормальний закон розподілу.

Випробування партії елементів проводять, використовуючи припрацьовані елементи. Як правило, етап припрацювання є досить малий порівняно з довговічністю, тому він зараховується в загальний час роботи. Випробування тривають доти, поки не відмовлять всі або значна більшість елементів. Якщо під час випробувань трапляються раптові відмови, то вони не враховуються при цих випробуваннях. Для оцінки інтенсивності зносових відмов потрібні менші партії елементів, ніж для раптових відмов, але тривалість випробувань потрібна значно більша. Після закінчення випробувань математичне сподівання середнього напрацювання до зносової відмови і стандартне відхилення знаходять за формулами:

$$M[T_n] = \frac{\sum_{m=1}^{r_{3n}} t_{i_{3n}}}{r_{3n}}; \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{r_{3n}} (t_{i_{3n}} - M)^2}{r_{3n}}},$$

де $t_{i_{3n}}$ - напрацювання i -го елемента до зношувальної відмови;

r_{3n} - кількість елементів, які відмовили.

Після знаходження цих величин можна стверджувати, що істинне значення довговічності елемента з імовірністю 0,997 знаходиться в інтервалі $M - 3\sigma \leq T_0 \leq M + 3\sigma$.

Лекція 6

ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ НА ЕТАПАХ ПРОЕКТУВАННЯ І КОНСТРУКТОРСЬКОЇ РОЗРОБКИ. ЗАЛЕЖНІСТЬ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ВІД ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ

6.1 Вихідні умови забезпечення надійності

Головним завданням проектування нової техніки є проектування виробу із заданими характеристиками функціонування так, щоб він не відмовив при експлуатації. Проектування включає в себе:

- встановлення цілей і задач розробки виробу, умов і способів його застосування;
- проектне припрацювання можливих опорних варіантів елементів, оцінку технічних можливостей реалізації кожного варіанта і необхідних затрат ресурсів;
- вибір найефективнішого варіанта виробу і кожного елемента;
- детальна подальша розробка вибраного варіанту, включаючи випуск конструкторської документації, виготовлення дослідних зразків і випробування.

Дослідження надійності, як складова частина проектування, має пошуковий прогностичний характер. Основні завдання дослідження надійності полягають у встановленні обґрунтованих вимог по надійності до виробу і його елементів, виборі принципів напрямків і раціональних способів проектного забезпечення надійності для наступних стадій створення і використання техніки, встановленні порядку контролю на кожній стадії створення досягнутого рівня надійності.

Проектування складається з таких етапів:

- 1) розробка технічного завдання - встановлення групи і класу надійності виробу, номенклатури показників надійності та їх числових значень;
- 2) ескізне проектування - попередній аналіз різних можливих варіантів і вибір кінцевого варіанту;
- 3) технічне проектування - розрахунок надійності вибраного варіанту для підтвердження, що кінцевий варіант задовольняє всі вимоги по надійності;
- 4) контроль надійності - випробування дослідних зразків, результати яких порівнюються з результатами розрахунків, виконаних на попередніх етапах.

Попередні відомості з вибору вигляду виробу і його основних елементів, встановлення необхідності, умов і способів застосування є вихідними даними для оцінки можливості створення виробу у визначені терміни з врахуванням досягнутої на період розробки системи надійності матеріалів, комплектуючих елементів, виробів-аналогів. Проектне припрацювання можливих опорних варіантів елементів виробу і оптимізація основних проектних параметрів

кожного з них повинні проводитися з врахування надійності і наслідків відмов. Процедуру встановлення вимог з надійності елементів виробу з врахуванням вимог з надійності до виробу в цілому і затрат ресурсів на їх забезпечення називають *нормуванням вимог з надійності елементів виробу*.

Порівняльний аналіз і вибір технічних рішень і заходів, направлених на забезпечення надійності виробу і його елементів, здійснюють попередньо при розробці технічних пропозицій. На цій же стадії розробляють попередню програму забезпечення надійності.

На стадіях розробки ескізного і технічного проектів заходи із забезпечення надійності містять: вибір матеріалів і елементів та режимів їх використання в складі виробів, резервування, використання контролепридатної та ремонтпридатної конструкції, вибір раціональних засобів контролю і діагностики при відпрацюванні, у виробництві та експлуатації, уточнення програми забезпечення надійності і обґрунтування програми експериментального відпрацювання, обґрунтування системи забезпечення надійності у виробництві і експлуатації, уточнення порядку підтвердження надійності і виконання кількісних і якісних вимог з надійності на наступних стадіях створення.

Після вибору основних проектних, схемних і конструкторсько-технологічних рішень перед кінцевим оформленням проекту здійснюється оцінка результатів проектування з позицій забезпечення надійності і коректування прийнятих рішень.

Основними причинами можливої ненадійності технічних систем і їх елементів є:

- недостатній рівень надійності вихідних матеріалів і комплектуючих елементів, який неможливо компенсувати резервуванням;
- недостатнє врахування умов експлуатації техніки, що приводить до відмов;
- неповна відповідність технічних характеристик виробів пред'явленим вимогам в технічному завданні, пов'язана з нераціональним вибором принципової, структурної, конструктивної схем елементів, неправильним вибором чи використанням в недопустимих режимах комплектуючих виробів, недостатнім врахуванням можливостей розробки, експериментального відпрацювання і очікуваної якості виготовлення виробів, недостатнім врахуванням реальних умов експлуатації і призначення, помилками при проектуванні, конструюванні, експериментальному відпрацюванні виробу (проектно-конструкторські відмови);
- неповна відповідність рівня якості виготовлення виробів вимогам конструкторської документації, недостатня кількість вихідних матеріалів, неправильний вибір технології і помилки в технологічній документації, порушення при виготовленні вимог конструкторської і технологічної документації та системи контролю якості продукції (виробничі умови);

- помилки при реалізації правил експлуатації виробів, передбачених конструкторською документацією (експлуатаційні відмови).

Задання вимог з надійності системи та її елементів містить:

- вибір номенклатури показників надійності;
- нормування надійності – встановлення необхідних кількісних значень показників надійності елементів системи;
- нормування довірчих імовірностей чи середніх квадратичних відхилень, з якими нормативні значення показників надійності системи повинні бути підтверджені до моменту завершення випробувань;
- формування для елементів системи організаційних і технічних вимог із забезпечення надійності;
- встановлення порядку підтвердження вимог з надійності по стадіях створення елементів системи.

Вимоги з надійності, що задаються в технічному завданні на систему і її елементи, повинні бути підтверджені до кінця розробки, перед початком серійного виробництва і експлуатації. Крім того, вимоги з надійності необхідно використовувати для управління надійністю на кожній стадії створення системи та її елементів.

Проте практична реалізація задачі постадійного підтвердження надійності має такі труднощі:

- вимоги і задачі ранніх стадій створення елементів системи не співпадають із завданням підтвердження високих значень імовірнісних показників надійності;
- умови проведення випробувань при конструкторському відпрацюванні не повністю відповідають умовам експлуатації виробів;
- конструкція об'єктів випробувань істотно відрізняється від конструкції майбутнього реального виробу;
- взаємодію і взаємовплив елементів системи перевіряють на пізніших стадіях і тому вони не можуть бути повністю враховані при автономному відпрацюванні елементів.

Тому підтвердження надійності елементів на всіх стадіях створення має неточний прогностичний характер. Тим не менше, воно повинно проводитися для того, щоб не втратити інформацію про надійність за результатами випробувань елементів системи і використовувати її при плануванні кінцевих випробувань. Це дозволяє суттєво скоротити затрати виробів, часу і засобів на експериментальне відпрацювання в цілому, бути впевненим у можливості та доцільності переходу до наступної, складнішої стадії випробувань елементів у складнішій структурі, а також у тому, що проведення цих випробувань не створює підвищеної небезпеки для людей і навколишнього середовища.

Вихідні умови досягнення високої надійності будь-якого виробу зводяться до того, щоб забезпечити значне перевищення його міцності над діючим на нього навантаженням. Умовно навантаження, що діють на виріб, можна розділити на дві групи:

- 1) робочі навантаження – такі, які діють на виріб тільки в процесі його роботи: механічні (удари, вібрація тощо), електричні (напруга, частота, сила струму), теплові (які виникають в результаті дії тепла, що виділяє елемент в процесі роботи). Такі навантаження, якщо їхні межі перевищують допустимі межі, приводять звичайно до раптових відмов, а також сприяють пришвидшенню зношування виробу та його елементів і підвищенню інтенсивності поступових відмов.
- 2) Неробочі навантаження – навантаження, що діють на виріб незалежно від того працює він, чи знаходиться у неробочому стані: температура навколишнього середовища, вологість, атмосферний тиск, забруднення атмосфери, радіація та ін. Такі навантаження звичайно не викликають відмови, але при тривалій систематичній дії можуть пришвидшити старіння.

Важливими умовами надійної роботи проєктованих виробів є:

- полегшення електричних режимів роботи елементів;
- врахування роботи елементів у критичних умовах (ввімкнення, комутація, форсування, перевантаження;
- врахування теплових навантажень елементів;
- вдосконалення конструкції виробів для зменшення ударів, вібрації;
- збільшення площі контакту окремих елементів виробу для зменшення питомого тиску у місцях з'єднання;
- використання по можливості рівнонадійних елементів, або підбір вузлів чи елементів, близьких за термінами служби, розбивши ці терміни на кілька діапазонів, кратних один одному.

6.2 Розрахунки надійності при проєктуванні нових виробів

Надійність електрообладнання залежить не тільки від вибору схеми та технічних характеристик елементів, а й від режимів роботи та умов експлуатації; від технології виробництва та систем контролю якості виробів; від якості вихідних матеріалів та комплектуючих елементів; від рівня кваліфікації працівників. Забезпечити високу надійність обладнання можна поєднанням заходів, що виконуються на всіх етапах розробки, виробництва та експлуатації. Особливе місце у цьому процесі належить етапу розробки, оскільки основні принципи забезпечення надійності вибираються на цьому етапі. Вимоги до надійності виробу, що розробляється, задаються в технічному завданні. На ранніх стадіях розробки виробу складається план забезпечення надійності, що на наступних стадіях розробки деталізується та уточнюється. Одним із елементів цього плану є розрахунок надійності виробу, що проєктується. Перші розрахунки надійності роблять на ранніх стадіях розробки, а з уточненням відомостей про виріб уточнюються і розрахунки надійності.

Існуючі методи дозволяють отримати розрахунковим шляхом кількісні характеристики надійності виробу, що розробляється і зіставити ці характеристики із заданими у технічному завданні.

Залежно від повноти врахування факторів, які впливають на роботу виробу, розрізняють прикидочний, орієнтовний і кінцевий розрахунки надійності.

Прикидочний розрахунок надійності базується на таких принципах:

- всі елементи виробу рівнонадійні;
- загрози відмов всіх виробів не залежать від часу, тобто $\lambda_t = \text{const}$;
- відмова будь-якого елемента призводить до відмови всієї системи.

Прикидочний розрахунок надійності проводиться у таких випадках:

- при перевірці вимог по надійності, висунутих замовником в технічному завданні на проектування виробу;
- при розрахунку нормативних даних по надійності окремих блоків, пристроїв і приладів системи (розрахунок норм надійності окремих частин системи);
- для визначення мінімально допустимого рівня надійності елементів проектного виробу;
- при порівняльній оцінці надійності окремих варіантів виробу на етапах передескізного і ескізного проектування.

Прикидочний розрахунок надійності дозволяє оцінювати принципову можливість забезпечення надійності виробу, що вимагається.

Характеристики надійності розраховуються за формулами наближеного обчислення, при цьому $\lambda_c = N \lambda_{\text{екв}}$, де $\lambda_{\text{екв}}$ - еквівалентне значення інтенсивності відмов елементів, що входять в систему.

Орієнтовний розрахунок надійності враховує вплив на надійність тільки кількості і типів використаних елементів і базується на таких принципах:

- всі елементи даного типу рівнонадійні;
- всі елементи працюють в номінальному режимі;
- інтенсивності відмов всіх елементів не залежать від часу, тобто протягом терміну служби в елементів відсутні старіння і зношування;
- відмови елементів виробу є подіями випадковими і незалежними;
- всі елементи виробу працюють одночасно.

Для визначення надійності виробу необхідно знати:

- 1) вид з'єднання елементів і розрахунку надійності;
- 2) типи елементів, що входять у виріб;
- 3) величини інтенсивностей відмов елементів, що вибираються за відповідними таблицями.

Кінцевий розрахунок надійності виконується тоді, коли відомі режими роботи елементів після лабораторних досліджень і основних вузлів виробу чи після ретельного розрахунку схеми.

При розробці та виготовленні елементів звичайно передбачають «нормальні» умови експлуатації: температура $+25 \pm 10^\circ\text{C}$, відносна вологість $60 \pm 20\%$, номінальний електричний режим, відсутність механічних

перевантажень тощо. Проте елементи виробу як правило перебувають в різних режимах роботи, які значно відрізняються від номінальних. Це впливає на надійність як окремих елементів, та і системи в цілому. Виконання кінцевого розрахунку надійності можливе лише за наявності даних про коефіцієнти навантаження окремих елементів і графіків залежностей інтенсивності відмов елементів від електричного навантаження, температури навколишнього середовища та інших факторів.

Для визначення надійності виробу необхідно знати:

- 1) кількість елементів з розбивкою їх по типах і режимах роботи;
- 2) залежності інтенсивностей відмов елементів від електричного режиму роботи і заданих зовнішніх умов $\lambda_i = f(K_n, T^\circ, \dots)$ (вибирається за таблицями);
- 3) структуру системи.

Найістотнішими впливовими факторами є: навколишня температура і швидкість її зміни, електричне навантаження, механічні перевантаження, викликані вібрацією, ударами і лінійним прискоренням.

Методика розрахунку надійності зводиться до:

- 1) визначення типу елемента і його характеристики;
- 2) вибору методу розрахунку, підбору номограм, таблиць, графіків, поправочних коефіцієнтів;
- 3) визначення електричного навантаження, впливу зовнішнього середовища на кожний елемент;
- 4) визначення за відповідною таблицею чи графіком інтенсивностей відмов кожного елемента;
- 5) визначення інтенсивності відмов усього виробу.

6.3 Залежність показників надійності від впливу зовнішніх факторів

Надійність виробу залежить від якості вихідних матеріалів, стану технології виробництва, рівня впливу зовнішніх факторів, які викликають зміну початкового стану і відмови виробу. На зростання імовірності відмов виробу найбільше впливають такі фактори:

Фактор впливу	Пошкодження
підвищена температура	нестабільність і деградація електричних параметрів, тепловий пробій ізоляції обвиток, тепловий пробій діелектрика конденсаторів, <i>p-n</i> переходів, втрата герметичності і механічної міцності корпусів
понижена температура, різкі коливання температури	нестабільність і деградація електричних параметрів, обриви і короткі замикання, корозія внутрішніх провідників, втрата герметичної та механічної міцності

підвищена вологість	корозія виводів і паянь, порушення контактів, втрата електроізоляційних властивостей пластмас, зниження електричної міцності матеріалів, зміна фізичних властивостей, збільшення питомих електричних втрат, підвищення інтенсивності зношування
понижений атмосферний тиск	погіршення теплообміну, перегрівання, нестабільність електричних параметрів
механічні навантаження	руйнування елементів конструкції, амплітудні переміщення на резонансних частотах
іонізуюче випромінювання	зниження діелектричних властивостей, утворення струмів втрат, іонізаційних струмів, зміни електричних параметрів елементів

Найбільший вплив на надійність виробу чинити дія тепла і холоду, яка визначається місцями установки і відстанню від зовнішніх джерел теплових впливів. Розрізняють неперервний (стаціонарний), періодичний і аперіодичний впливи. Пошкодження виробів, викликане стаціонарним тепловим впливом зумовлене в основному перевищенням при експлуатації гранично допустимих значень температури. Висока швидкість зміни температури (тепловий удар) при аперіодичному впливі тепла може призвести до виникнення пошкоджень. Це часто проявляється при недостатньому врахуванні коефіцієнтів лінійного розширення контактних матеріалів, що приводить до утворення тріщин, порожнин, втрати еластичності.

Від температури і вологості істотно залежать електроізоляційні властивості полярних пластмас. Волога, потрапляючи на поверхню чи потрапляючи в об'єм електротехнічних виробів і матеріалів, може спричинити зниження поверхневого чи об'ємного опору ізоляції, зниження електричної міцності матеріалів, накопичення і міграцію об'ємних зарядів у біполярних напівпровідникових інтегральних схемах, зміну фізичних властивостей матеріалів, їх густини, температури плавлення, зміну розмірів і короблення окремих деталей, прискорене старіння, окислення і корозію матеріалів, підвищення інтенсивності зношування деталей, покриттів, ізоляції, збільшення рівня питомих електричних втрат в матеріалах і виробках.

У процесі експлуатації вироби піддаються впливу різних механічних навантажень: вібраціям, ударам, динамічному впливу при транспортуванні, акустичним шумам тощо, що викликають механічні напруження в окремих елементах конструкції. Кожний з вказаних видів механічних впливів має різні фізичні властивості, які по-різному впливають на вироби.

В умовах впливу тривалих вібраційних навантажень проявляються ефекти втоми матеріалів, що викликають руйнування елементів в конструкції та відмови виробів.

Удари збуджують в елементах конструкції коливання в широкому спектрі частот, що може викликати великі амплітудні переміщення цих елементів на власних (резонансних) частотах і привести до відмови об'єкта.

Акустичні шуми за характером впливу подібні до вібрацій і ударів тільки у вищому діапазоні діючих частот. Вони створюють амплітудно-частотну модуляцію коливань, додаткові шуми і можуть внаслідок переміщень елементів конструкції привести до відмов виробу.

Для захисту виробів від впливу механічних навантажень застосовують спеціальні віброізолюючі пристрої – віброізолятори, які встановлюють між виробом і опорою, що вібрує (пасивна ізоляція) чи виробом, що вібрує, ф опорою (активна ізоляція).

Одним з важливих факторів, що впливають на довговічність технічних виробів, є корозія металів. Актуальність задачі боротьби з корозією зростає по таких причинах:

- 1) значне підвищення агресивності атмосфери і водойм внаслідок забруднення їх промисловими відходами;
- 2) ріст питомої ваги металів у галузях промисловості, де металовироби використовуються в агресивних середовищах.

Корозія протікає при взаємодії металу з корозійним середовищем, під яким розуміють сухі гази і неелектроліти (хімічна корозія) і електроліти (електрохімічна корозія).

Для захисту металів від корозії застосовують різні методи, що враховують особливості самого металу і умови його експлуатації. За характером впливу методи захисту від корозії поділяють на три типи:

- методи впливу на метали: легування металу, використання захисних покриттів (органічних і неорганічних) введення інгібіторів в корозійне середовище, електрохімічний захист;
- методи впливу на середовище: осушення атмосфери спеціальними сорбентами в закритому просторі для консервації виробів;
- методи впливу на конструкцію: характер контакту (з металами і неметалами), характер щілин і зазорів у виробі, що сприяє накопиченню вологи, характер з'єднання елементів конструкції.

Суттєвий вплив на параметри надійності обладнання має дотримання електричного режиму. При роботі виробу при значеннях електричних параметрів, вищих за номінальні, термін служби виробу скорочується, зменшується його напрацювання на відмову. Режим електричного навантаження оцінюється коефіцієнтом режиму. При проектуванні високонадійних виробів слід вибирати такі елементи, щоб режим їх роботи був полегшений ($K_p < 1$). Крім того, в полегшеному електричному режимі кількість тепла, що виділяється під час роботи різних елементів є меншою, ніж у номінальному чи обтяженому режимах, що також сприяє довшому терміну служби окремих елементів і виробів у цілому.

6.4 Типи відмов електрообладнання

Відмови обладнання залежать від конструктивного виконання і від умов використання. Причинами появи відмов є помилки конструювання, порушення технологічних процесів, помилки обслуговування.

Конструктивні недоліки зумовлені в основному відсутністю достатнього припрацювання питань застосування комплектуючих виробів, недостатньою увагою до питань проектування з врахуванням захисту елементів і вузлів від впливу зовнішніх факторів.

Виробничі відмови зумовлені недостатньою якістю виконання технологічних операцій і помилками при виконанні збиральних і монтажних робіт.

До *експлуатаційних відмов* відносяться відмови, викликані порушенням умов і режимів експлуатації виробів, недосконалістю профілактичного обслуговування. Характерними експлуатаційними відмовами є:

- помилки обслуговуючого персоналу при проведенні ремонтно-відновлюваних робіт;
- неправильне налаштування, пов'язане з помилками при виборі точок підключення приладів, неузгодженість вхідних опорів приладів і схем;
- комутація не знеструмлених мереж, внаслідок чого з'являються перехідні процеси (кидки струму, перенапруга, іскріння тощо);
- встановлення запобіжників невідповідного номіналу;
- необґрунтовано часті включення і виключення апаратури.

Лекція 7

ЗАВДАННЯ, МЕТОДИ, ЗАСОБИ, СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ. ПЛАНУВАННЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

7.1 Завдання і методи технічної діагностики

Одним з основних шляхів підвищення надійності технічних систем, що широко використовуються на практиці, є збільшення рівня їхньої безвідмовності. Це досягається за рахунок застосування надійніших елементів та використання різного виду надлишковості. Однак конструктивні, схемні та технологічні можливості, які лежать в основі такого підходу, є обмежені, особливо для складних систем.

Підвищувати надійність і загальну ефективність використання об'єктів різного призначення та будь-якої складності можна за рахунок вдосконалення їх технічного обслуговування у процесі експлуатації. При цьому вирішуються такі завдання:

- 1) покращення безвідмовності за допомогою своєчасного проведення профілактичних заходів;
- 2) скорочення експлуатаційних витрат за рахунок встановлення оптимального обсягу та термінів проведення підтримуючих та відновлювальних операцій;
- 3) підвищення рівня безпеки за рахунок запобігання непередбачених відмов та пов'язаних з ними аварійних ситуацій;
- 4) постійна підтримка на оптимальному рівні якості функціонування об'єкта з допомогою оперативного усунення дефектів, викликають зниження його працездатності.

Для вирішення цих завдань потрібна розробка раціональних методів та засобів, що забезпечують достовірну оцінку фактичного стану об'єкта, прогнозування його зміни та оперативний пошук можливих дефектів, що є предметом дослідження технічної діагностики

Технічна діагностика є науковою дисципліною, яка досліджує стан технічних об'єктів, причини та закономірності їх зміни, а також розробляє методи та засоби визначення технічних станів.

Технічне діагностування є процесом визначення технічного стану об'єкта діагностування з певною точністю. Закінченням процесу діагностування є встановлення виду його технічного стану: справність/несправність, працездатність/непрацездатність, правильне функціонування/неправильне функціонування.

Об'єкт технічного діагностування - це виріб, його складові частини чи заготовка, технічний стан яких підлягає перевірці.

Завдання діагностування - своєчасне виявлення дефектів, визначення місця і причин їх виникнення, відновлення відповідності виробу технічним вимогам, порушеної дефектами.

Пошук дефектів - це технічне діагностування з метою визначення місць, причин і видів дефектів виробу.

Система технічного діагностування - це сукупність засобів і об'єкта діагностування і, при необхідності, виконавців, підготовлена до діагностування, чи здійснююча його за правилами, встановленими відповідною документацією. Розрізняють системи тестового і функціонального діагностування.

При *тестовому* діагностуванні існує можливість подання на об'єкт діагностування спеціальних тестових впливів від засобів діагностування.

При *функціональному* діагностуванні на об'єкт діагностування поступають тільки робочі впливи.

Системи тестового діагностування працюють, як правило, в тому випадку, коли об'єкт не застосовують за прямим призначенням. Використання систем тестового діагностування при працюючому об'єкті можливе, але при цьому тестові впливи можуть бути тільки такими, що не заважають нормальному функціонуванню об'єкта.

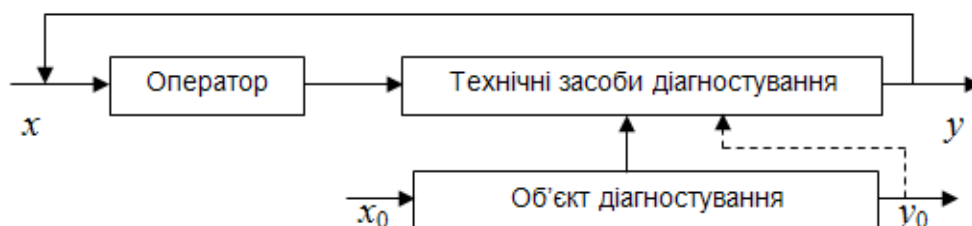
Системи функціонального діагностування використовують для перевірки правильності функціонування об'єкта і пошуку несправностей, які порушують нормальне функціонування. Ці системи працюють при застосуванні об'єкта за призначенням. В протилежному випадку необхідна імітація умов функціонування об'єкта.

7.2 Структурні схеми діагностування

Залежно від задач, які вирішуються в процесі діагностування, характеру використання і експлуатації, а також конструктивних особливостей об'єктів діагностування елементи в системі діагностування можуть мати різну структуру. Усі відомі структури можна звести до п'яти характерних типів.

1. Схема функціонального діагностування

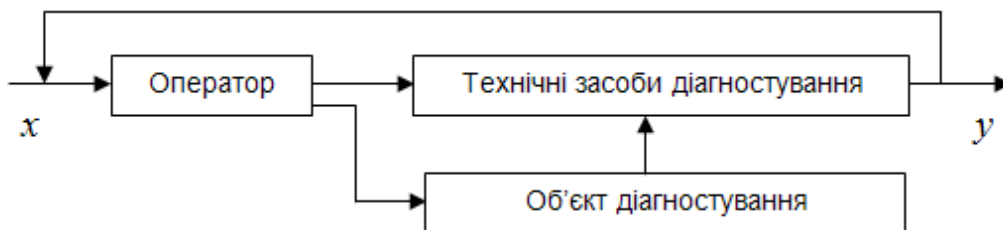
Ця схема має найпростішу структуру. У цьому випадку об'єкт діагностування функціонує, тобто на нього надходять вхідні впливи, на які він реагує (реакція y_0). На засоби діагностування з робочого чи контрольного виходів об'єкту поступають сигнали з інформацією про якість виконання об'єктом своїх функцій. Оператор сприймає із засобів діагностування інформацію про стан об'єкта і впливає на засоби діагностування, уточнюючи діагноз.



Характерною особливістю структури системи є відсутність зв'язків оператора з об'єктом діагностування і односторонній зв'язок технічних засобів діагностування з об'єктом діагностування.

2. Схема функціонального діагностування в контрольному режимі

Для діагностування об'єкту оператор управляє об'єктом, що знаходиться в контрольному режимі (іноді контрольний режим може співпадати з робочим). У структурній схемі системи діагностування з'являється додатковий зв'язок оператора з об'єктом діагностування, що розширює можливості діагностування, дозволяючи вибрати той режим об'єкта, при якому будуть досягнуті найбільші достовірність і ефективність діагностування.



Особливістю структури системи є відсутність можливості впливу на об'єкт діагностування з допомогою технічних засобів діагностування.

3. Схема тестового діагностування

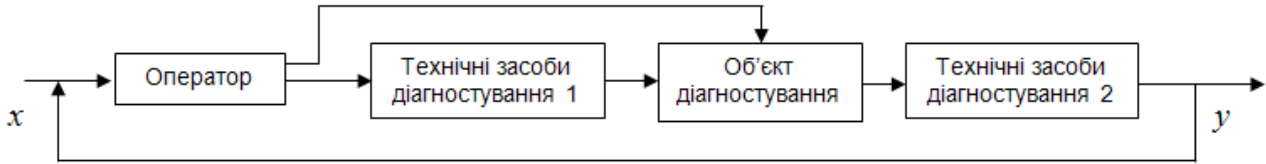
У цій схемі засоби діагностування використовують для впливу на об'єкт з метою здійснення тестового діагностування. При цьому технічні засоби діагностування фактично складаються з двох частин: 1 - технічні засоби, що формують тестові впливи, які подаються на об'єкт; 2 - технічні засоби, з допомогою яких здійснюється знімання і обробка інформації про стан об'єкту з метою формування діагнозу. У цьому випадку з'являються два замкнутих контури, які створюються ланцюгами зворотних зв'язків - 1 - для регулювання впливів, що надходять на об'єкт з технічних засобів діагностування 1; 2 - для передачі оператору, який управляє процесом діагностування, інформації із засобів діагностування 2 про стан об'єкту.



Особливістю структури системи є відсутність безпосереднього зв'язку між оператором і об'єктом. Зв'язок з об'єктом діагностування оператор здійснює через технічні засоби діагностування.

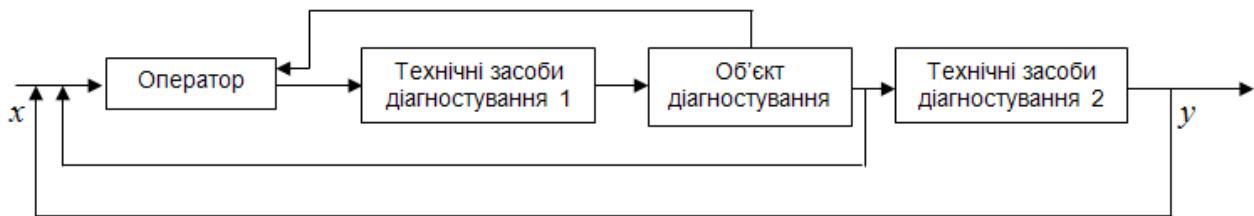
4. Схема тестового діагностування при управлінні об'єктом діагностування

У цій схемі, на відміну від схеми 3, існує додатковий зв'язок між об'єктом і оператором, що дозволяє оператору змінювати режим роботи при діагностуванні. На схемі відсутній зв'язок з технічними засобами діагностування, що робить неможливим узгодження тестових впливів з вихідною реакцією об'єкта діагностування.



5. Схема тестового діагностування при наявності зв'язку об'єкт діагностування - оператор

У цій схемі показаний зв'язок виходу об'єкта дослідження з оператором, що дає оператору додаткові можливості отримання інформації про об'єкт при аналізі його стану.



Функціональне діагностування (схема 1) застосовують у випадку, коли необхідно оцінити стан об'єкта в процесі виконання поставлених перед ним задач. При цьому не допускається втручання оператора з метою діагностування в робочий режим об'єкта, він лише за допомогою технічних засобів діагностування визначає стан об'єкта і приймає рішення про його подальше використання без втручання в робочі функції.

Структура другого типу (схема 2) характерна для систем діагностування, призначених для використання в процесі підготовки об'єктів до застосування, коли об'єкти знаходяться в спеціальному контрольному режимі. При цьому оператор управляє об'єктом діагностування і засобами діагностування, забезпечуючи вирішення задач діагностування. Таким чином організовується діагностування об'єктів періодичного застосування, які повинні перевірятися перед використанням.

Системи тестового діагностування (схеми 3-5) застосовують для оцінки стану об'єкта діагностування, на які можлива подача тестових впливів. Аналіз реакції на тестовий вплив дозволяє визначити, в якому стані знаходиться об'єкт, чи як його стан змінюється з часом.

Діагностування може здійснюватися неперервно чи періодично. Періодичне діагностування може бути регулярним чи випадково-періодичним. При діагностуванні об'єкт переводиться у спеціальний контрольний режим, або діагностування проводиться в робочому (черговому) режимі.

7.3 Засоби технічного діагностування

Засоби технічного діагностування (ЗТД) можуть бути вмонтованими і зовнішніми.

Вмонтовані ЗТД можуть працювати за двома підходами. При першому підході вмонтовані у кожний змінний блок локальні засоби діагностування порівнюють контрольовані параметри з допустимими значеннями і формують узагальнений результат у вигляді "здатний/не здатний". При виникненні дефектів загальні засоби діагностування визначають несправний змінний блок з вказанням його оператору і, можливо, запасний режим роботи об'єкта. При другому підході кожний змінний блок обладнують лише тими елементами, які необхідні для нормалізації контрольованих параметрів.

Зовнішні ЗТД виконані окремо від конструкції об'єкта діагностування.

За степенню впливу на об'єкт зовнішні ЗТД можуть бути активними і пасивними. Активні ЗТД впливають на об'єкт, подаючи на відведені для діагностування входи сигнал, що стимулює реакцію об'єкта, яка потім оцінюється. Ці засоби містять генератори стимулюючих впливів, що формують імпульсні, ступінчасті, синусоїдальні сигнали, цифрові коди тощо. Пасивні ЗТД служать для обробки і оцінки діагностичних ознак, які характеризують стан об'єкту шляхом аналізу інформації, що надходить від нього в процесі діагностування.

За способом отримання інформації про стан об'єкта зовнішні ЗТД можна розділити на: 1) засоби, які визначають стан об'єкта за сукупністю параметрів; 2) засоби, які служать для оцінки стану об'єкта по реакції на виході об'єкта. У першому випадку обробляється інформація, яка знімається в контрольних точках об'єкта. У другому випадку для можливості оцінки реакції на робочих виходах об'єкта в склад засобів включають еквівалентну модель об'єкта, а діагноз встановлюють шляхом порівняння реакцій моделі на однакові вхідні впливи.

За типом вирішуваних задач зовнішні ЗТД поділяють на засоби для: визначення працездатності; пошуку дефекту; прогнозування зміни стану; перевірки справності об'єкта.

За степенню універсальності зовнішні ЗТД поділяють на спеціалізовані та універсальні.

Основні елементи технічних засобів діагностування. У склад ТЗД включають: генератори стимулюючих сигналів (при тестовому діагностуванні), засоби знімання і первинного перетворення інформації про стан об'єкту, обробки інформації, комутації та відображення інформації.

Генератори стимулюючих сигналів формують сигнали, що стимулюють в об'єкта діагностування реакцію, зміни якої свідчить про зміну стану об'єкта. При діагностуванні дискретних об'єктів для формування тестових впливів використовують фазоімпульсну і амплітудно-імпульсну модуляції.

Засоби знімання інформації є перетворювачами різних фізичних величин (тиску, струму, температури тощо) в яку-небудь одну уніфіковану величину

(наприклад, напругу постійного струму), чи у 2-3 величини, зручні для введення у засоби обробки (наприклад, напругу постійного струму і частоту імпульсів). Засоби знімання інформації поділяють на дві групи: перетворювачі електричних величин і перетворювачі неелектричних величин в електричні.

Засоби обробки інформації виконують такі функції: перетворення вимірюваних чи контрольованих величин з однієї форми в іншу, виконання логічних операцій порівняння вимірюваної чи контрольованої величин з еталонними значеннями, видача відповідних сигналів за результатами порівняння в управляючий пристрій для прийняття рішень про припинення чи продовження діагностування, видача рекомендацій з усунення дефектів чи аварійного використання об'єкта діагностування. За формою обробки вимірюваних чи контрольованих величин засоби обробки інформації поділяють на аналогові та цифрові.

Засоби комутації, які використовуються у складі ТЗД, характеризуються такими параметрами: числом входів і виходів; числом каналів; часом переключення одного каналу; абсолютною похибкою; відносною похибкою; приведеною похибкою. За структурою засоби комутації поділяють на спеціалізовані та універсальні.

Як *засоби індикації* у складі ТЗД використовують різноманітні прилади і пристрої: лампи розжарення, світлові табло, газорозрядні прилади, електронно-променеві трубки, плазмові індикаторні панелі, рідкокристалічні індикатори, електролюмінесцентні та напівпровідникові прилади.

7.4 Етапи розробок з діагностування електрообладнання

Технічний стан вузлів і деталей електрообладнання змінюється в процесі експлуатації і залежить від режимів роботи і зовнішніх впливів. У зв'язку з цим параметри, що характеризують стан вузлів і деталей, є змінними величинами.

Для того щоб установити, у якому стані знаходиться дане електрообладнання, при діагностуванні визначають його працездатність. Аналіз справного стану електрообладнання дозволяє встановити ступінь працездатності і момент його переходу в область несправних станів, тобто прогнозувати стан електрообладнання. Якщо електрообладнання знаходиться в області несправних станів, то однією з головних задач діагностування є пошук несправностей і причин їхнього виникнення.

Основними етапами розробок по діагностуванню електрообладнання є:

- 1) визначення вузлів і деталей, що обмежують ресурс роботи електрообладнання і підлягають діагностуванню;
- 2) вибір параметрів і розробка методів діагностування електрообладнання;
- 3) вибір і розробка засобів для діагностування електрообладнання;
- 4) розробка технологій діагностування електрообладнання;
- 5) пошук несправностей електрообладнання.

7.4.1 Визначення вузлів і деталей, що підлягають діагностуванню

Правильний вибір вузлів і деталей (елементів) електрообладнання, що підлягають діагностуванню, є одним з важливих питань розробки загальної системи діагностування. Від нього залежить напрямок і зміст подальших робіт з визначення параметрів, вимірюваних при діагностуванні, розробці методів і засобів діагностування, розробці технології, економічна ефективність діагностування даного типу електрообладнання.

Розробка технології проводиться для виробів, що випускаються серійно і пропрацювали визначений час, або для нового електрообладнання. У першому випадку для визначення вузлів і деталей, що підлягають діагностуванню, звичайно збирають дані про відмови електрообладнання в умовах експлуатації; у другому випадку для одержання вихідних даних проводять випробування дослідної партії нового електрообладнання.

На підставі аналізу кількості і причин відмов визначається перелік елементів конструкції, що обмежують ресурс чи працездатність електрообладнання. Діагностування електрообладнання доцільно проводити тільки при одержанні відповідного економічного ефекту чи забезпеченні безпеки експлуатації.

Методика визначення номенклатури деталей і вузлів (елементів), які підлягають діагностуванню.

Приведені витрати на експлуатацію елемента електричної машини чи апарату без застосування діагностування визначають з виразу

$$B_{ei} = B_{mi} + B_{pi} + B_{ei} + Z_i,$$

де B_{mi}, B_{pi} — приведені витрати відповідно на технічне обслуговування і ремонти (поточний і капітальний) елемента, грн.; B_{ei} — приведені витрати на усунення відмов елемента, грн.; Z_i — приведений збиток від відмов елемента, грн.

Збиток внаслідок відмов елементів електрообладнання, як правило, зв'язаний із простоем робочих машин, механізмів і технологічних ліній чи установок. Простій викликає зменшення кількості вироблюваної продукції, її псування й інші негативні наслідки.

Приведені витрати при експлуатації електричної машини чи апарату

$$B_m = \sum_{i=1}^n B_{ei}, \quad (1)$$

де n — кількість елементів електричної машини чи апарату.

На першому етапі приймають, що діагностуванню підлягають елементи, що обмежують ресурс роботи електрообладнання, тобто в яких у процесі експлуатації виникають відмови, що викликають витрати на їхнє усунення.

Оцінкою для порівняння наслідків відмов елементів машини чи апарату є відношення

$$G = \frac{B_{ei} + Z_i}{B_m}. \quad (2)$$

В першу чергу подальшому аналізу повинні піддаватися елементи, у яких відношення (2) має найбільше значення, тобто:

$$G_1 \geq G_2 \geq \dots \geq G_n$$

У зв'язку з тим, що діагностування зв'язане з певними витратами, доцільність його проведення для елемента визначають за наявності економічного ефекту. Застосування діагностування приводить до зміни витрат на технічне обслуговування, зменшенню витрат на ремонт і усунення відмов, звичайно знижує збиток від простоїв.

Приведені витрати при експлуатації елемента з застосуванням діагностування $B_{e,di}$ записуються виразом

$$B_{e,di} = B_{m,di} + B_{p,di} + B_{s,di} + Z_{di} + B_{di} \quad (3)$$

де $B_{m,di}, B_{p,di}$ — приведені витрати відповідно на технічне обслуговування і ремонт елемента при застосуванні діагностування, грн.; $B_{s,di}$ — приведені витрати на усунення відмов елемента, грн.; Z_{di} — приведений збиток від відмов елемента при застосуванні діагностування, грн.; B_{di} — приведені витрати на діагностування елемента, грн.

Приведені витрати при експлуатації електричної машини чи апарату з застосуванням діагностування записуються аналогічно виразу (1):

$$B_{m,d} = \sum_{i=1}^n B_{e,di} \quad (4)$$

Економічний ефект при застосуванні діагностування елемента електричної машини чи апарату $E_{e,di}$ визначається з виразу $E_{e,di} = B_{ei} - B_{e,di}$. Зменшення витрат, пов'язаних з експлуатацією елемента електричної машини чи апарату, при діагностуванні досягається збільшенням ресурсу і безвідмовності, а також встановленням оптимальної періодичності обслуговування.

Діагностування елемента доцільно, якщо приведені витрати при експлуатації елемента без застосування діагностування більші, ніж приведені витрати при застосуванні діагностування. У протилежному випадку діагностування елемента (вузла чи деталі) недоцільно.

Економічний ефект при застосуванні діагностування електричної машини чи апарата:

$$E_{m,d} = \sum_{i=1}^{n_i} E_{e,di},$$

де n_i — кількість елементів машини чи апарату, діагностування яких забезпечує одержання економічного ефекту.

Відносна ефективність діагностування елементів визначається з виразу:

$$G_o = \frac{E_{e.di}}{E_{мюд}}$$

Обчислені частки G_o ефективності діагностування кожного елемента в загальній ефективності діагностування електричної машини чи апарату розташовують у ряд:

$$G_{o1} \geq G_{o2} \geq \dots \geq G_{on}$$

Отриманий ряд характеризує елементи, що підлягають діагностуванню, і вказує на порівняльну ефективність їхнього діагностування, а також створює можливість ухвалення рішення про черговість робіт з розробки методів і засобів для діагностування елементів (деталей і вузлів) електричної машини чи апарату.

7.4.2 Вибір параметрів і розробка методів діагностування електрообладнання

Параметри, величини яких доцільно вимірювати при діагностуванні електрообладнання, характеризуються номінальними значеннями і полем допусків, залежностями номінальних значень від зовнішнього середовища, закономірностями зміни в залежності від часу експлуатації чи напрацювання, необхідною точністю вимірів і ін. В електричних машинах і апаратах значне число параметрів можна виміряти безпосередньо, для виміру інших параметрів застосовують перетворювачі. Параметри, що характеризують технічний стан вузлів і деталей електричної машини чи апарата, можна класифікувати так:

- параметри, виражені електричними величинами, що дозволяють вимірювати їхнє значення безпосередньо (напруга і сила змінного чи постійного струмів, частота, тривалість й амплітуда імпульсів, індуктивність, ємність, опір й ін.);
- параметри, виражені електричними величинами і потребуючі для свого виміру додаткового перетворення (великі чи малі струми і напруги, модуляція й ін.);
- параметри, вимірювані непрямим шляхом;
- параметри, виражені неелектричними величинами і потребуючі для свого виміру первинного перетворення (температура переміщення й ін.);
- параметри, оцінка яких проводиться візуально (наявність слідів перегріву чи нагару на контактних поверхнях, наявність раковин на поверхні колектора чи контактних кілець і ін.).

За інформативністю параметри можна умовно розділити на дві групи: узагальнені і локальні. Узагальнений параметр несе велику кількість інформації

і характеризує стан кількох чи одного вузла, кількох деталей, а локальний - тільки однієї деталі (елемента).

Із сукупності параметрів вибирають оптимальне їхнє число і поєднання, що забезпечує необхідну вірогідність результатів діагнозу при мінімальних витратах. Отже вибір діагностичних параметрів для даної електричної машини чи апарату зводять до рішення задачі оптимізації набору цих параметрів.

При виборі діагностичних параметрів керуються такими основними положеннями:

- кожному значенню параметра вузла, що перевіряється, чи деталі електрообладнання повинно відповідати тільки одне значення діагностичного параметру (*вимога однозначності*);
- діагностичний параметр повинен відносно легко вимірюватися по можливості простими засобами (*вимога доступності і зручності виміру*);
- діагностичний параметр повинен мати якомога більший діапазон виміру при зміні контрольованого параметру вузла чи деталі в процесі роботи електрообладнання, що дозволяє підвищити точність виміру і вірогідність діагностування (*вимога широти області зміни*).

Після визначення діагностичних параметрів наступним етапом робіт є вибір і розробка методів і засобів для діагностування, після чого можна уточнити вартість діагностування й остаточно установити номенклатуру діагностичних параметрів. Спочатку вибирають методи, які відповідають вимогам діагностування електрообладнання без розбирання і забезпечують вимірювання діагностичних параметрів. Оскільки відомими методами звичайно не можна вимірювати всі необхідні діагностичні параметри, то часто виникає необхідність розробки нових методів, викликана наступними причинами:

- непристосованість конструкції електрообладнання до діагностування;
- неможливість через конструктивні особливості електрообладнання використання окремих параметрів, що несуть великий обсяг інформації і забезпечують високу вірогідність результатів, у якості діагностичних;
- труднощі застосування для діагностування деяких методів, розроблених для визначення технічного стану деталей і вузлів електрообладнання після розбирання;
- доцільність використання при діагностуванні певного сполучення двох і більш параметрів.

Загальні вимоги до розробки чи вибору методів діагностування наступні:

- методи діагностування повинні бути простими і не вимагати для своєї реалізації чи застосування розробки складних і дорогих діагностичних засобів;
- повинні забезпечувати необхідну вірогідність результатів діагностування;
- при проведенні вимірів не вимагати режимів роботи електрообладнання, що важко здійснити на практиці;

- порівняно з іншими методами і способами повинні забезпечувати скорочення часу і витрат засобів на діагностування.

При розробці методів у першу чергу для спрощення процесу вимірювання і підвищення ефективності діагностування стараються використовувати деталі і вузли електрообладнання як датчики чи засоби переміщення одних деталей щодо інших.

Розробка методів звичайно ведеться на підставі статистичних даних про режими роботи, функціональних залежностей величин параметрів від часу роботи електрообладнання, а також даних теоретичних і експериментальних досліджень.

7.4.3 Вибір і розробка засобів для діагностування електрообладнання

На рис.7 подано класифікацію засобів, застосовуваних при діагностуванні електрообладнання.

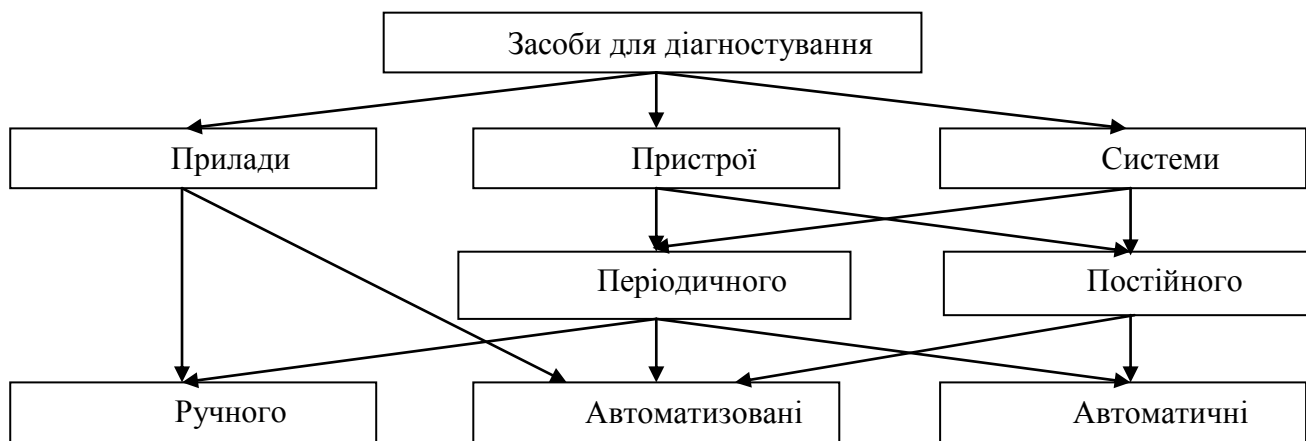


Рисунок 7.1 - Класифікація засобів, застосовуваних при діагностуванні електрообладнання

При розробці діагностичних засобів прагнуть створити конструкції і схеми, що забезпечують мінімальну трудомісткість і вартість діагностування, а також задану точність вимірювань. Велике значення при розробці засобів для діагностування електрообладнання має форма представлення результатів, що повинна бути зручною для аналізу і прогнозування.

Засоби діагностування доцільно розділити за наступними принципами:

1. Прості засоби для діагностування за обмеженим числом узагальнених діагностичних параметрів, що дозволяють визначати загальний технічний стан електрообладнання. Ці засоби призначаються для визначення технічного стану електрообладнання при технічному обслуговуванні, а також для виявлення найпростіших несправностей. До таких засобів відносяться прості переносні прилади.
2. Засоби для проведення повного діагностування і прогнозування, що дозволяють визначати технічний стан всіх елементів, що обмежують ресурс

роботи чи працездатність електрообладнання. Ці засоби призначені для проведення планового діагностування і пошуку несправностей електрообладнання.

3. Засоби для проведення доремонтного і післяремонтного діагностування, призначені для застосування в спеціалізованих електроремонтних підприємствах чи ділянках з метою визначення номенклатури підлягаючих ремонту вузлів і деталей і якості ремонту електрообладнання за параметрами, що характеризують післяремонтний ресурс.

Оптимальний вибір діагностичних засобів повинний забезпечувати мінімальну вартість перевірки елементів, мінімум витрат від похибки перевірки елементів, а також максимальну економічну ефективність застосовуваних засобів. Економічна ефективність застосування розроблювального засобу тим вища, чим більшу кількість електрообладнання можна продіагностувати з його допомогою, тобто чим вища його продуктивність.

7.4.4 Розробка технологій діагностування електрообладнання

При діагностуванні електрообладнання в основному вирішуються три задачі: 1) визначення працездатності, 2) встановлення залишкового ресурсу, 3) пошук причин відмов. Відповідно до цих задач розробляють і технології діагностування, що повинні забезпечувати рішення поставлених задач з мінімальними витратами засобів при заданому рівні вірогідності результатів.

Звичайно технологія діагностування розробляється у вигляді технологічних карт, у яких приведені найменування і зміст операцій, порядок проведення операцій, технічні вимоги до проведення операцій, зазначено якими діагностичними засобами необхідно проводити виміри, а також приведені номінальні, граничні і допустимі значення діагностичних параметрів. Технологічні карти взаємопов'язуються таким чином, щоб забезпечувалася безперервність робіт при діагностуванні.

Основні труднощі, що зустрічаються при розробці технології діагностування, полягають у встановленні послідовності діагностування вузлів і деталей електрообладнання і у встановленні послідовності операцій при визначенні причин відмов електрообладнання.

Розроблювальна технологія діагностування повинна забезпечувати мінімальні сумарні приведені витрати при експлуатації деталей і вузлів (елементів) електрообладнання, включаючи і витрати на діагностування.

Таким чином, оптимальну структуру діагностування визначають за критерієм мінімуму сумарних приведених витрат $B_{м.д}$ при експлуатації електрообладнання за формулою

$$B_{м.д} = \min \sum_{i=1}^n B_{e.ди} ,$$

де $B_{e,di}$ — приведені витрати при експлуатації елементів електрообладнання з застосуванням діагностування, грн.; n — число елементів електрообладнання.

При цьому варто враховувати, що витрати на діагностування будуть оптимальними, коли обсяг і періодичність діагностування відповідають технічному стану машини чи апарату.

При розробці технології враховується її цільове призначення. При проведенні технічного обслуговування в основному визначається працездатність і правильність функціонування електрообладнання. У цьому випадку обсяг і глибину діагностування встановлюють у такий спосіб. Серед діагностичних параметрів вибирають параметри, що несуть інформацію про загальний технічний стан кількох чи окремого елемента контрольованої електричної машини чи апарату, тобто так звані узагальнені діагностичні параметри. Діагностування проводять, починаючи з вимірювання цих узагальнених параметрів, а потім вимірюють параметри, що характеризують стан елементів, яке не можна визначити за допомогою узагальнених параметрів. Якщо результати вимірювань узагальнених параметрів свідчать про задовільний стан контрольованих елементів чи вузлів, подальше поглиблене діагностування електрообладнання не проводиться. До таких узагальнених діагностичних параметрів для електричних машин можна віднести вібрацію і структуру шуму при роботі, споживані з мережі струми й ін. Якщо дані вимірів узагальнених параметрів вказують на порушення працездатності чи на відхилення в правильності функціонування, то додатково проводять вимірювання певного числа діагностичних параметрів для уточнення діагнозу, пошуку несправності чи її причини.

Основною задачею планового діагностування, крім перевірки працездатності, є встановлення залишкового ресурсу вузлів і деталей електрообладнання. У цьому випадку крім виміру обов'язкових параметрів для визначення працездатності необхідно виміряти визначене число діагностичних параметрів, за якими проводять прогнозування залишкового ресурсу роботи електричної машини чи апарату.

Отже, одним з важливих етапів робіт при розробці технології діагностування є складання мінімального діагностичного тесту, тобто визначення мінімального числа перевірок, при яких забезпечується необхідна вірогідність визначення і прогнозування технічного стану електричної машини чи апарату (розрізнення станів).

Мінімальний діагностичний тест складають після побудови діагностичної матриці (таблиці функцій несправностей). При складанні матриці у верхній частині (у стовпцях) розташовують найменування вузлів і елементів електрообладнання, що підлягають діагностуванню, а в рядках — діагностичні параметри, обрані з множини параметрів, що характеризують технічний стан даного виду електрообладнання. Наявність зв'язку між діагностичним параметром і технічним станом діагностованого елемента чи вузла позначають цифрою "1", а відсутність зв'язку — "0". Звичайно для зручності роботи з діагностичною матрицею нулі опускають.

Мінімальне число перевірок встановлюють, вибираючи мінімальну множину рядків матриці, так, щоб кожний стовпчик мав позначення "1" не менше, ніж в одному з рядків матриці. Вибір найкращої множини рядків проводять за критерієм мінімальної вартості діагностування чи питомої вартості діагностування на одиницю напрацювання електрообладнання. При цьому попередньо враховують оптимальну послідовність діагностування елементів чи вузлів. Слід зазначити, що мінімальний діагностичний тест встановлює мінімальне число перевірок, що повинні обов'язково виконуватися при діагностуванні елемента, вузла машини чи апарату в цілому.

Якщо при діагностуванні електричної машини необхідно виміряти n діагностичних параметрів, то для їхнього виконання можна скласти $n!$ послідовностей виконання. При наявності п'яти і більше діагностичних параметрів встановити простим перебором варіантів, при якій послідовності перевірок трудомісткість діагностування мінімальна, практично неможливо. Тому при встановленні послідовності діагностування спочатку визначають загальні вимоги до проведення діагностування, наприклад, вихідний стан чи режим роботи електричної машини чи апарату (машина повинна працювати чи бути відключена від мережі, бути холодною чи прогрітою і т.д.). Потім складають матрицю режимів діагностування, у верхній частині якої (у стовпцях) поміщають усі діагностичні параметри (відповідно до мінімального тесту діагностування), а в рядках — режими виконання чи окремі вимоги, запропоновані до виконання діагностування. Аналізуючи дану матрицю, знаходять зв'язок між діагностичними параметрами і режимами, при яких вони вимірюються, тобто вимірювання діагностичних параметрів класифікуються по групах. При цьому вимірювання при діагностуванні звичайно проводять по групах параметрів при заданому вихідному стані чи режимі роботи електричної машини чи апарату.

Для оптимізації алгоритму діагностування на наступному етапі встановлюють послідовність виконання робіт із груп параметрів. Як правило, ця послідовність також залежить від теплового стану електричної машини чи апарату під час діагностування. Спочатку вимірюють групу параметрів, вимірювання яких необхідно провести у відключеному і практично холодному стані машини чи апарату, потім групу, що вимірюється під час пуску чи прогріву машини, а після неї - групу, що вимагає номінального нагрівання чи номінального режиму роботи і т.д.

7.4.5 Пошук несправностей електрообладнання

Швидкий пошук несправностей дозволяє встановити причини відмов і відновити працездатність електрообладнання з мінімальними витратами. Пошук несправностей порівняно простого по конструкції електрообладнання не викликає особливих труднощів, а для виявлення несправностей складного електрообладнання і складних схем керування потрібно складати алгоритми пошуку несправностей, що дозволяють визначити найбільш раціональну

послідовність виконання операцій. При цьому повинні забезпечуватися мінімальні витрати часу і засобів на проведення пошуку.

До найбільш розповсюджених способів пошуку несправностей відносяться способи: послідовного функціонального аналізу, половинної розбивки, ймовірно-часовий.

1) Спосіб послідовного функціонального аналізу заснований на визначенні основних функцій контрольованого об'єкта. Перевіряючи параметри цих функцій, відшукують відхилення і, таким чином, встановлюють елемент, що відмовив. Спосіб простий, відрізняється наочністю результатів і не вимагає докладної вихідної інформації, основним недоліком є те, що послідовність пошуку несправності не оптимальна.

2) Спосіб половинної розбивки застосовують для об'єктів контролю з послідовно з'єднаними елементами. Він базується на визначенні параметра, що характеризує технічний стан елемента, що незалежно від результатів контролю (позитивних чи негативних) розділяє об'єкт контролю на дві частин, імовірності станів яких однакові. Потім вибирають наступний елемент, що розділяє несправну половину об'єкта також на частини з однаковою імовірністю станів. Операції проводяться доти, поки не буде виявлений несправний елемент.

3) Для об'єктів, у яких функціональні елементи з'єднані довільно, при визначенні послідовності перевірок застосовують ймовірно-часовий спосіб, що використовує показники, що характеризують надійність елементів. Вихідною інформацією відповідно до ймовірно-тимчасового способу пошуку несправностей є імовірність відмов (безвідмовної роботи) елементів; час, необхідний на перевірку елемента; а також відношення часу перевірки елемента до імовірності його відмови чи відношення імовірності безвідмовної роботи до часу перевірки. Алгоритм пошуку складається з урахуванням функціональної моделі і матриці несправностей об'єкта контролю.

Функціональну модель будують по структурній чи електричній схемі електрообладнання, причому для об'єктів контролю тільки з послідовним чи тільки з паралельним з'єднанням елементів функціональна модель і структурна схема збігаються.

При побудові функціональної моделі приймаються наступні вимоги: для кожного функціонального елемента відомі допустимі значення вхідних і вихідних сигналів, їхні функціональні залежності і спосіб вимірювання; несправним вважається функціональний елемент, у якого при номінальних вхідних сигналах на виході з'являється сигнал, що виходить за поле допуску; якщо на вхід функціонального елемента подати хоча б один сигнал, що вийшов за поле допуску, вихідний сигнал буде відрізнятися від номінального; зовнішні вхідні сигнали мають тільки номінальні значення. Звичайно функціональна модель зображується графічною схемою, що складається з прямокутників чи кружків і стрілок між ними. Прямокутниками чи кружками позначають функціональні елементи, стрілками, що входять у них, позначають вхідні

сигнали, а вихідними стрілками — вихідні. Вхідних стрілок в один функціональний елемент може бути кілька, а вихідних — тільки одна.

Матриця несправностей будується в такий спосіб. У верхній частині матриці наводять перелік всіх основних ознак несправностей A_i , а в рядках — перелік причин відмов d_i чи елементів, що відмовили, зміна стану яких може викликати згадані вище ознаки. Форма матриці несправностей показана в таблиці 7.1. Цифрою "1" у матриці позначають наявність зв'язку між ознаками несправностей (стан об'єкта) і елементами об'єкта чи причинами відмов. Побудова матриці дозволяє мати наочну інформацію про можливі стани об'єкта і класифікувати ці стани. У матриці кожній ознаці несправності відповідає своя множина причин відмов. Значення імовірностей відмов чи безвідмовної роботи встановлюються статистичним шляхом і використовуються для визначення послідовності виконання перевірок. Послідовність перевірки елементів відповідно до ймовірно-часового способу пошуку несправностей установлюється по зростанню відношення

$$\frac{t_1}{Q_1} < \frac{t_2}{Q_2} < \dots < \frac{t_n}{Q_n},$$

чи по зменшенню відношення

$$\frac{P_1}{t_1} > \frac{P_2}{t_2} > \dots > \frac{P_n}{t_n}$$

де $t_1, t_2, \dots, t_n$ - час, затрачуваний на перевірку i -го елемента; $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ — імовірність відмови i -го елемента; $P_1, P_2, \dots, P_n$ — імовірність безвідмовної роботи i -го елемента.

Таблиця 7.1 - Матриця несправностей

Причини відмови чи елемент електрообладнання	Ознака несправності (відмови)					
	A_1	A_2	A_3	A_4	...	A_n
d_1		1	1			
d_2	1			1		1
...						
d_n	1					

Одним з основних критеріїв для визначення оптимальної послідовності пошуку несправностей є мінімум середніх витрат на проведення пошуку, які можна виразити формулою

$$B_{\Pi c} = \sum_{i=1}^n C_i g_i$$

де g_i — імовірність того, що відмова об'єкта обумовлена відмовою i -го елемента;

C_i — загальна вартість перевірок, необхідних для виявлення i -го елемента, що відмовив, при даній послідовності перевірок.

Відомий також критерій мінімакса, відповідно до якого найкращою послідовністю є послідовність перевірок, при якій максимальна вартість виявлення елемента, що відмовив, є найменша порівняно з іншими послідовностями.

Поряд з використанням показників надійності при визначенні послідовності пошуку несправностей вводять також показник — вартість перевірки. Тоді доцільна послідовність перевірок для виявлення несправностей встановлюється для випадку наявності одного елемента, що відмовив, у порядку зменшення відношення

$$\frac{Q_1}{B_1} > \frac{Q_2}{B_2} > \dots > \frac{Q_n}{B_n},$$

де $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ - імовірність відмови i -го елемента, що перевіряється; $B_1, B_2, \dots, B_n$ - вартість перевірки i -го елемента. При імовірності одночасної наявності декількох елементів, що відмовили, послідовність пошуку несправностей встановлюється в порядку зменшення відношення

$$\frac{Q_1}{B_1(1-Q_1)} > \frac{Q_2}{B_2(1-Q_2)} > \dots > \frac{Q_n}{B_n(1-Q_n)}.$$

7.5 Діагностування при експлуатації електрообладнання

Основною метою технічного обслуговування і ремонтів є підтримка експлуатаційних показників електрообладнання на заданому рівні протягом визначеного часу. З цього випливає, що надійність забезпечується не тільки особливістю конструкції і якістю виготовлення, але і значною мірою визначається якістю експлуатації електрообладнання.

При експлуатації електрообладнання діагностування застосовується в наступних основних випадках:

- для визначення технічного стану при контролі електрообладнання в плановому порядку;
- для визначення причин виникнення відмов чи порушення нормальної роботи електрообладнання при неплановому діагностуванні;
- для визначення термінів поточних і капітальних ремонтів;
- при проведенні технічного обслуговування; при проведенні поточних і капітальних ремонтів.

Схема застосування методів і засобів діагностування при проведенні планового контролю, технічного обслуговування і поточних ремонтів електрообладнання показана на рис.7.2.



Рисунок 7.2 - Схема застосування методів і засобів діагностування електрообладнання

Лекція 8

5. УПРАВЛІННЯ ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

8.1 Управління технічним станом електрообладнання

У всіх областях техніки велика увага приділяється питанню діагностики технічного стану різних машин, механізмів, виробів. При діагностуванні визначають, яким впливам необхідно піддати електрообладнання для запобігання відмов і відновлення рівня його працездатності. До таких дій відносять регулювання, ремонт або заміну деталей та вузлів, просочення обмоток, сушіння ізоляції, забарвлення поверхонь, обкатку, тобто операції, спрямовані на підвищення або відновлення ресурсу окремих деталей і вузлів та електрообладнання в цілому. Крім того, для управління технічним станом електрообладнання необхідно знати динаміку зміни параметрів стану елементів, зв'язок між показниками швидкості зміни параметрів та ймовірністю відмов, середнім ресурсом елемента по контрольованому параметру та інші показники.

При управлінні технічним станом за допомогою діагностування отримують інформацію про технічний стан електрообладнання, проводять обробку і аналіз інформації та готують рішення. Основна інформація про технічний стан електрообладнання надходить при вимірюванні діагностичних параметрів. Обробку і аналіз інформації проводять перетворенням отриманих при діагностуванні сигналів і величин, а також їх порівнянням з допустимими та номінальними значеннями. Прийняття рішення про впливи на електрообладнання проводять на підставі порівняння результатів вимірювання діагностичних сигналів з їх допустимими значеннями. За цими даними визначають, яким конкретним ремонтним чи іншим діям необхідно піддати електрообладнання і в які терміни.

Таким чином, питання діагностики тісно пов'язані з критеріями працездатності вузлів електричних машин. На підставі вимірюваних критеріїв формується діагноз про технічний стан машини. Для процесу діагностики електрообладнання необхідно виявити найбільш інформативні параметри з ряду критеріїв працездатності таких величин, як напруга, струми, моменти і інші електромагнітні та електромеханічні параметри електричних машин. Для кожного класу електричних машин, а також залежно від напруги і потужностей інформативність тих або інших параметрів міняється і повинна визначатися у кожному конкретному випадку спеціально.

Для підвищення ефективності як тестового, так і функціонального діагностування, доводиться пристосовувати електрообладнання до діагностування, роблячи додаткові виводи. На практиці до таких додаткових виводів відносяться зроблені спеціально для цілей діагностування електричні виводи з певних точок електричної схеми електрообладнання. Крім того,

застосовують додаткові спеціально встановлені пристрої (давачі вібрації, лінійного переміщення, температури та ін.).

Також слід враховувати, що деталі й вузли електрообладнання при експлуатації зношуються і старіють, причому інтенсивність зношування і старіння залежить від багатьох факторів. Так, інтенсивність зношування і старіння ізоляційних конструкцій електричних машин залежать не тільки від тривалості роботи і властивостей застосовуваних матеріалів, але і від механічних впливів, температури, впливів зовнішнього середовища та ін.

Зношування та старіння – це процеси, що характеризують зміну технічного стану електрообладнання в часі. Вони відображають зміни, що відбуваються в електрообладнанні і призводять до погіршення його властивостей. Таке погіршення властивостей при експлуатації зумовлює наявність детермінованої (визначальної) складової у процесах зношування і старіння деталей та вузлів. Вплив великої кількості різних чинників призводить до прискорення або до уповільнення процесів зносу або старіння в часі, тобто накладає на процес випадкову складову. Тому приймають, що процеси зносу і старіння деталей і вузлів в основному містять детерміновану і випадкову складові. Вплив кожної з них для кожного конкретного випадку може бути переважаючим, що відбивається на характері процесу зношування або старіння.

Незважаючи на те, що на кожну окрему електричну машину або апарат впливає певне, притаманне тільки даній машині або апарату поєднання факторів, що зумовлюють ту чи іншу швидкість втрати експлуатаційних властивостей, результати впливу кожного фактору на втрату властивостей підкоряються певним законам.

Механічні напруги, яким піддаються матеріали ізоляційної конструкції електрообладнання як у процесі виготовлення, так і при експлуатації, також приводять до старіння ізоляції. Зменшення терміну служби ізоляції під дією механічних напруг і при зміні структури матеріалу підпорядковується певному закону. Слід зазначити, що термін служби ізоляції може значно змінюватися не тільки під впливом механічних напруг і температури, але і під впливом інших факторів. Таким чином, фізичні та хімічні процеси, що відбуваються в ізоляції електроустаткування, підпорядковані певним законам, що зумовлює можливість з певним ступенем точності заздалегідь передбачати (прогнозувати) на підставі даних відповідних вимірів технічний стан ізоляції в майбутньому.

У роботах багатьох дослідників показано, що зношування деталей в сполученнях машин і механізмів пропорційне до роботи сил тертя, тобто добуток сил нормального тиску на коефіцієнт тертя і шлях дії сил тертя. У свою чергу, кожен з множників залежить від ряду чинників. Сила нормального тиску залежить в основному від навантаження машини або від режиму її роботи, коефіцієнт тертя – від стану поверхонь тертя і якості мастила, шлях дії сил тертя – в основному від тривалості роботи при заданих режимах. Це положення поширюється і на деталі механічної частини електроустаткування.

Таким чином можна зробити висновок, що фізико-хімічні процеси зміни властивостей і розмірів деталей і вузлів механічної частини електричних машин

і апаратів також підкоряються певним законам і їх технічний стан з певним ступенем точності можна прогнозувати.

Прогнозування технічного стану електрообладнання, тобто процес передбачення зміни параметрів в майбутньому, є порівняно складним технічним завданням. Це пов'язано з тим, що на технічний стан навіть однотипних деталей та вузлів електрообладнання впливає поєднання великого числа факторів, частину з яких важко врахувати.

За умовами технології виробництва деталі і вузли електричних машин і апаратів, як і інших технічних пристроїв, виготовляються з певними допусками за розмірами, хімічному та структурному складовим матеріалів. Це також впливає на інтенсивність зношування або старіння деталей та вузлів.

Крім того, на інтенсивність зношування деталей та вузлів електрообладнання суттєво впливає організація і періодичність технічного обслуговування та поточного ремонту. Якщо технічне обслуговування та ремонти проводять нерегулярно або взагалі не проводять, швидкість зношування вузлів і деталей значно збільшується і зношування швидко досягає своїх граничних значень.

В результаті всі вищеперераховані фактори впливають на достовірність прогнозування роботи електроустаткування.

Прогнозування технічного стану виробу може здійснюватися як у процесі його розробки, так і в період експлуатації. В останньому випадку метою прогнозування є своєчасне виявлення несприятливого стану виробу та розробка рекомендацій щодо підвищення його надійності.

Слід зазначити, що розроблені до цього часу методи прогнозування не дають можливості передбачити раптові відмови, тобто відмови, що характеризуються стрибкоподібною зміною параметрів стану деталі або вузла електрообладнання до граничного значення. Прогнозувати з певним ступенем точності можна поступові відмови, що характеризуються поступовою зміною параметрів технічного стану і обумовлені зносом або старінням матеріалу деталей або вузлів електрообладнання.

Основним завданням прогнозування є визначення залишкового ресурсу елементів електричних машин і апаратів. Завданнями прогнозування в процесі експлуатації електрообладнання є скорочення трудомісткості і вартості робіт, які виконуються при поточних ремонтах, тому що вони проводяться лише за необхідності, тобто заповного вичерпання ресурсу деталей та вузлів.

Слід також мати на увазі, що вивчення питань прогнозування і оцінки працездатності технічного стану електричних машин вказує на існування взаємозв'язків між якістю перетворення енергії, станом ізоляції, підшипників і довговічністю електричної машини в цілому. Особливо це актуально для електромеханічних систем, що використовують електричну енергію змінного струму, яка визначається якістю електричної енергії в мережах живлення. Якість використовуваної електроенергії регламентується існуючим міждержавним стандартом ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної

призначеності». Як показує аналіз, якість електроенергії впливає на нагрівання струмоведучих частин та ізоляції електрообладнання, тому результати розрахунків по класичним співвідношенням будуть завжди надмірно завищеними. Зниження якості електроенергії в порівнянні з діючими нормативами на станції є причиною появи в струмоведучих частинах і ізоляції електрообладнання додаткових втрат активної потужності, які є джерелом додаткового нагрівання як ізоляції так і машини в цілому. Тому реальний строк служби ізоляції електрообладнання буде зменшеним.

У зв'язку з тим, що діагностування є складовою частиною системи ППР (планово-попереджувальних робіт) електрообладнання, при розробці методів та засобів для діагностування потрібно послідовно вирішувати технічні та організаційні питання, що забезпечують не тільки отримання достовірних результатів і створюють можливість прогнозування технічного стану, але й високу ефективність застосування діагностування.

Система ППР передбачає регламентний режим експлуатації, коли проводиться періодичне технічне обслуговування, встановлення видів ремонту, їх послідовності та періодів між ремонтами.

Основним недоліком системи ППР є велика трудомісткість робіт, пов'язана з тим, що розбирання електрообладнання є регламентною операцією, що виконується найчастіше для визначення технічного стану вузлів і деталей, тому що після розбирання нерідко виявляється, що електрообладнання знаходиться в задовільному стані і проводити ремонт немає необхідності. Крім того, відповідно до системи ППР трудомісткість ремонту пропорційна кількості обслуговуваного електроустаткування, що вимагає при збільшенні кількості електрообладнання пропорційного зростання чисельності ремонтного персоналу.

В даний час із збільшенням кількості, удосконалюванням конструкції електрообладнання, а також з урахуванням останніх досягнень вимірювальної техніки настав час переходу від регламентної форми системи ППР за періодичністю до нової форми – *за технічним станом*. Це дозволить більш повно використовувати технічний ресурс в цілому і забезпечити надійну роботу електрообладнання при мінімальних витратах.

8.2 Принципи та напрями прогнозування відмов основних елементів електричних машин

Можливість рішення задачі прогнозування стану виробів зумовлюється тією обставиною, що в більшості випадків їх відмови є наслідком поступового накопичення пошкоджень, поступового старіння і зношування. Вказане відноситься як до поступових відмов, так і до раптових. Поняття «раптова відмова» відносне, так як стрибкоподібної зміни параметрів технічних пристроїв передують поступова зміна будь-яких фізичних величин, про які відсутня інформація.

Обчисленню прогнозованої характеристики завжди повинні передувати досвід, експеримент, дані якого використовуються спільно з інформацією. Саме ця особливість відрізняє прогноз від розрахунку.

У теорії надійності є два напрямки кількісної оцінки надійності виробів на основі результатів їх випробувань і експлуатації: констатація рівня надійності і проектування надійності. Констатація рівня надійності ґрунтується на результатах дослідження (визначальні і контрольні випробування на надійність, дані експлуатації). Для групи однотипних виробів може бути оцінена «вірогідність безвідмовної роботи», «середній час напрацювання повністю» і так далі. Оцінка надійності стає такою, що прогнозує, коли на основі аналізу фізичних процесів, вивчення закономірностей, яким підпорядковується процес формування показників надійності, робиться припущення про майбутній стан надійності виробу.

Зазвичай розрізняють процедури прогнозування надійності і технічного стану. Завданням прогнозування технічного стану є передбачення технічних параметрів або віднесення цих параметрів до якого-сь класу, а також визначення вірогідності виходу цих параметрів за межі допуску, тобто прогнозування відмов.

Завданням прогнозування надійності є прогноз кількісних показників надійності виробу на основі прогнозування поступових і раптових відмов.

Прогнозування може бути груповим і індивідуальним. При груповому прогнозуванні вивчається сукупність виробів. При індивідуальному – у якомусь інтервалі часу спостерігається зміна параметра одного конкретного виробу з даної сукупності. Використовуючи отримані дані, визначають імовірність безвідмовної роботи до якого-сь моменту часу в майбутньому. До методів групового прогнозування можна віднести статистичну оцінку терміну служби однотипних виробів на основі результатів випробувань. У цьому випадку шляхом обробки результатів випробувань на термін служби деякого числа виробів обчислюється кількісна середньоквадратична оцінка терміну служби всієї партії в цілому. Перевагою методу індивідуального прогнозування є можливість оцінки надійності (технічного стану) кожного конкретного виробу.

В електричних машинах найбільш детально досліджені і мають ряд практичних співвідношень для прогнозування відмов наступні важливі питання - розрахунок довговічності ізоляції обмотки і стану підшипників.

Далі розглянемо послідовно деякі сучасні дослідження з питань розрахунку ресурсу та прогнозування відмов цих основних та відповідальних за працездатність електричної машини елементів.

За умовами технології виробництва ізоляційні конструкції електрообладнання виготовляються з певними допусками за розмірами, хімічному і структурному складу матеріалів ізоляції. Це впливає на інтенсивність зносу або старіння ізоляції електрообладнання. Крім того, на інтенсивність зносу ізоляції електрообладнання суттєво впливає організація і періодичність технічного обслуговування та поточного ремонту. Якщо технічне обслуговування і ремонти проводять нерегулярно або взагалі не проводять,

швидкість зносу ізоляції вузлів значно збільшується і зноси швидко досягають своїх граничних значень. Тому всі переховані вище фактори впливають на достовірність прогнозування роботи електрообладнання.

Слід відзначити, що розроблені до теперішнього часу методи прогнозування не дають можливості передбачати раптові відмови, тобто відмови, які характеризуються стрибкоподібною зміною параметрів стану ізоляції електрообладнання до граничного значення. Прогнозувати з певним ступенем точності можна поступові відмови, які характеризуються поступовою зміною параметрів технічного стану і обумовлені зношуванням або старінням матеріалу ізоляції електрообладнання. Вплив багатьох різних факторів призводить до прискорення або уповільнення процесів зношування та старіння ізоляції у часі, тобто накладає на процес випадкову складову. Тому приймають, що процеси зношування та старіння ізоляції в основному містять детерміновану і випадкову складові. Вплив кожної з цих складових для кожного конкретного випадку може бути переважаючим, що відображається на характері і процесу зношування.

Основним завданням прогнозування є визначення залишкового ресурсу ізоляції електрообладнання, що дає можливість скоротити трудомісткість й вартість робіт, які виконуються при поточних ремонтах, встановлених лише за необхідністю, встановити терміни (періодичність) проведення діагностування. Визначення залишкового ресурсу ізоляції електрообладнання дозволяє об'єктивно визначити момент необхідності ремонтного впливу, який відповідає найповнішому використанню її ресурсу. При цьому можна користуватися поняттям коефіцієнту технічного ресурсу. За допомогою цього коефіцієнта оцінюють залишковий ресурс ізоляції електрообладнання. Для параметрів, абсолютні значення яких збільшуються в процесі експлуатації електрообладнання, коефіцієнт технічного ресурсу підраховується за формулою:

$$k_{\text{зал}} = \frac{(P_{\text{гр}} - P_{\text{с}})}{(P_{\text{гр}} - P_{\text{н}})},$$

де $P_{\text{гр}}$ – граничне значення параметра;

$P_{\text{н}}$ – номінальне значення параметра;

$P_{\text{с}}$ – виміряне значення параметра.

Якщо у процесі експлуатації значення параметра зменшується, то коефіцієнт залишкового ресурсу визначається за виразом:

$$k_{\text{зал}} = \frac{(P_{\text{с}} - P_{\text{гр}})}{(P_{\text{н}} - P_{\text{гр}})}$$

Для нової ізоляції електрообладнання $k_{\text{зал}}=1$, а для тої, що повністю вичерпала свій ресурс $k_{\text{зал}}=0$.

Згідно з аналізом наукових публікацій, доцільно виділити три методи прогнозування: аналітичного прогнозування, імовірнісного прогнозування та

статистичної класифікації, які повністю охоплюють означені вище підходи щодо прогнозування технічного стану ізоляції електрообладнання.

Метод аналітичного прогнозування доцільно використовувати для завдань, коли зміна параметра, який контролюється, інерційна учасі і всі зміни поступово накопичуються. Таку зміну параметру P , який контролюється, можна представити функцією $P(t)$. При цьому потрібно використовувати вимірювання деяких значень функцій $P(t_0)$, $P(t_1)$ і $P(t_2)$ відповідно в моменти часу t_0 , t_1 і t_2 . Завданням прогнозування є визначення за відомими значеннями функції $P(t)$ у минулому і у теперішньому часі величини функції у майбутньому, тобто в моменти часу t_i , а також визначення моменту часу, коли параметр досягне свого припустимого значення P_{np} .

Метод імовірнісного прогнозування застосовують для завдань, де необхідно визначити ймовірність виходу або невиходу діагностичного параметру P за встановлені межі. Задача формулюється наступним чином. Є значення параметра P у моменти часу t_0 , t_1 , t_2 , у яких стани елемента, який прогнозується, характеризуються відповідними функціями розподілу $F_i(P)$. За цими відомими значеннями необхідно визначити ймовірність збереження ізоляції працездатності у майбутньому, тобто що функція $P(t)$ не вийде за своє припустиме значення P_{np} .

При вирішенні завдань прогнозування методами статистичної класифікації відомі значення параметру в певні моменти часу відносять до одного із класів, тобто до свого роду еталону, а потім, виходячи із закономірності зміни параметрів даного класу, вирішують, як буде змінюватися даний параметр у майбутньому. При цьому поділ значень параметрів на класи може бути часовим (за часом або напруцюванням) або параметричним (за величинами параметрів, які контролюються). Число і діапазон зміни параметрів у кожному класі залежить від особливостей конструкції та умов роботи елемента електрообладнання, який діагностується.

Нижче наведений опис найпростіших методів прогнозування, які достатньо легко пристосовувати для прогнозування ресурсу роботи електрообладнання і не вимагають використання складного математичного апарату.

Метод лінійного прогнозування. В його основу покладено припущення, що у процесі експлуатації зовнішні впливи на ізоляцію електрообладнання, яка діагностується, є незмінними, а залежність зміни величини діагностичного параметру від часу – лінійна. Для застосування методу необхідно мати дані про напруцювання об'єкта з початку експлуатації до моменту діагностування, а також про граничне і номінальне значення параметра. Напруцювання об'єкта діагностування до настання граничного стану $t_{зал}$ визначають за формулою

$$t_{зал} = t \frac{k_{зал}}{1 - k_{зал}}$$

де t – напруцювання від початку експлуатації до моменту діагностування, год.;
 $k_{зал}$ – коефіцієнт залишкового ресурсу.

Метод доцільно використовувати для орієнтовного визначення залишкового ресурсу вузлів електрообладнання (в першу чергу електричних машин).

Метод багатоступінчатого лінійного прогнозування. Метод базується на даних вимірювань, які проводяться при систематичних діагностуваннях через будь-які проміжки часу. Визначення терміну безвідмовної роботи ізоляції електрообладнання, яка діагностується, за цим методом проводиться до наступного діагностування. Метод багатоступеневого лінійного прогнозування враховує дійсну закономірність зношування або старіння об'єкта діагностування у даних конкретних умовах експлуатації. Крім того, при прогнозуванні на період до наступного діагностування приймається, що об'єкт діагностування буде працювати у більш несприятливих умовах, у зв'язку з чим ресурс безвідмовної роботи визначається за максимально можливою середньою інтенсивністю зміни параметра за період між двома останніми діагностуваннями. Після наступного діагностування знову встановлюють гарантований ресурс безвідмовної роботи ізоляції електрообладнання.

Діагностування проводять таким чином до повного вичерпання ресурсу об'єкта. Метод багатоступінчатого лінійного прогнозування не потребує даних про напрацювання і зміну величини параметрів з початку експлуатації електричної машини або апарату. В результаті лінійної апроксимації і екстраполяції зміни параметрів на деякий проміжок часу отримують величину періоду безвідмовної роботи завжди меншу дійсного, тобто завжди резервується певний запас надійності результатів прогнозу.

Гарантований ресурс безвідмовної роботи деталей, вузлів ісполучень, технічний стан яких характеризується параметрами, що мають лінійні або криволінійні залежності від часу роботи, визначається із виразу:

$$t_{\text{гар}} = \frac{(P_{\text{гр}} - P_{\text{с}})}{(P_{\text{с}} - P_{\text{с-1}})} t_0 k_0,$$

де $t_{\text{гар}}$ – гарантований ресурс безвідмовної роботи,

$P_{\text{гр}}$ – граничне значення параметра;

$P_{\text{с}}, P_{\text{с-1}}$ – виміряна величина параметра відповідно при даному і попередньому діагностуванні;

t_0 – період між даними і попередніми діагностуванням, од. напрацювання;

k_0 – коригувальний коефіцієнт.

Якщо, наприклад, діагностування проводилося у моменти часу t_1, t_2, t_3 і при цьому отримані значення параметра відповідно P_1, P_2, P_3 , то середня інтенсивність зміни параметру за відрізок часу між 1-м і 2-м, 2-м і 3-м діагностуваннями складає:

$$t_{\text{ср1-2}} = \frac{(P_2 - P_1)}{(t_2 - t_1)},$$

$$t_{\text{ср2-3}} = \frac{(P_3 - P_2)}{(t_3 - t_2)}.$$

Після кожного діагностування коректують результат прогнозування з урахуванням середньої інтенсивності зміни параметру за час між останнім і попереднім діагностуванням. При цьому припускається, що за період часу, який прогнозується, до наступного діагностування інтенсивність зміни параметра не може перевищити інтенсивність, яка була у попередньому періоді. В іншому випадку закономірність зміни параметра повинна змінитися, тобто спадна інтенсивність повинна змінитися на зростаючу. Якщо діагностичний параметр змінюється за зростаючою криволінійною залежністю із зростаючою інтенсивністю, то коригувальний коефіцієнт визначається як відношення значень параметра при попередньому і даному діагностуванні, тобто:

$$k_0 = \frac{P_{e-1}}{P_e}$$

У випадках зменшення параметра при роботі об'єкта діагностування із зростаючою інтенсивністю, коригувальний коефіцієнт визначають за формулою:

$$k_0 = \frac{P_{поч} + P_{ep} - P_{e-1}}{P_{поч}},$$

де $P_{поч}$ — початкове значення параметру.

Таким чином, для підвищення достовірності даних при прогнозуванні ресурсу ізоляції електрообладнання за допомогою багатоступінчатого лінійного методу прогнозування необхідно попередньо знати загальну закономірність зміни діагностичних параметрів. Якщо загальна закономірність параметрів невідома, то розрахунок гарантованого ресурсу безвідмовної роботи проводиться з урахуванням коригувального коефіцієнта, обчисленого за формулою, яка відповідає закономірності зі зростаючою інтенсивністю зміни параметра. При цьому гарантований ресурс роботи до наступного діагностування буде скоригований у бік зменшення.

Розглядаючи питання ресурсу ізоляції, необхідно відмітити, що також досить часто відбуваються пошкодження ізоляції не пов'язані зі зношуванням та старінням, а має місце бути продавлювання, прорізання її гострими крайками сердечника статора, біля виходу провідника з паза, утворення тріщин внаслідок напружень при розтягуванні ізоляції внаслідок вигину і т.п. Такі місцеві дефекти часто розвиваються порівняно швидко і призводять до пробою ізоляції задовго до істотного погіршення її властивостей внаслідок процесів перегріву та природного старіння. Ізоляція пазової частини обмотки випробовує стиснення під дією електродинамічних зусиль, при наявності зазорів у пазу вона також схильна до ударів і стирання об стінки паза. Якщо свобода переміщення відсутня, то в ізоляції крім розтягування і стиснення можлива поява деформації зсуву.

При вигині лобових частин обмотки найбільші напруги виникають у місцях виходу стержнів або катушок з пазів, де ізоляція випробовує напруження стиснення і розтягування. Крім того, вона заминається на прокладках і місцях зіткнення з бандажами. В більшості випадків перелічені

зусилля мають циклічний характер, причому характерною є вібрація з частотою 100 Гц.

Дія вібрації – вібраційне старіння на всипні обмотки, виражається в поступовому руйнуванні просочувального лаку, в результаті чого порушується цементация обмотки і окремі провідники набувають деяку свободу переміщення. Це веде до руйнування виткової ізоляції в точках дотику сусідніх провідників, в результаті чого збільшується ймовірність виткових замикань. Помічено, що старіння ізоляції низьковольтних машин, що працюють при помірних температурах обмоток, взагалі не може бути пояснено з позицій електричних або теплових явищ. У цих випадках найбільш суттєвими причинами, що викликають поступове руйнування ізоляції, є механічні навантаження. Коефіцієнт зниження довговічності визначається з виразу:

$$k_t = k_m^n$$

З урахуванням цього може бути отримане розрахункове значення k_m , при якому термін служби ізоляції знижується вдвічі:

$$k_m = \sqrt[n]{2}$$

Тоді контроль за вібраційним старінням ізоляції може здійснюватися на основі значень індексу:

$$C_i = \frac{k_m}{\sqrt[n]{2}}$$

При $C_i \geq 1$ варіація моменту перевищує допустиму і подальша експлуатація двигуна не бажана;

При $C_i < 1$ процес старіння ізоляції вимагає уваги, так як може відбутися вихід двигуна з ладу.

Таким чином, отримані коефіцієнти дають можливість спрогнозувати час роботи ізоляції.

Для більшості електричних машин друге за значенням (після обвитки) джерелом відмов є підшипники.

Підшипники кочення також досить чутливі до вібрації, але насамперед до перевантажень. Відомо, що при збільшенні навантаження на підшипник удвічі його довговічність зменшується приблизно в 10 разів.

При розрахунку підшипників кочення визначають їх типорозміри при заданих термінах служби, навантаженні і частоті обертання.

Найбільше – радіальне навантаження на підшипник.

Довговічність підшипника за наявності змінної складової навантаження може бути розрахована за виразом:

$$nT_{pm} = \left(\frac{C}{Q'} \right)^k,$$

де n – швидкість обертання, об/хв; C – коефіцієнт працездатності; $k=3,33$;

$Q' = kf(M_n)$ – динамічне навантаження на підшипник при наявності змінної складової.

З урахуванням розрахункового терміну служби $T_{pm\ n}$ (зазвичай приймають 12000 год.) коефіцієнт зниження довговічності підшипника:

$$k_t = \frac{1}{nT_{pm.n}} \left(\frac{C}{Q'} \right)^k$$

Отриманий коефіцієнт дає можливість спрогнозувати час роботи підшипникових вузлів під навантаженням, але точніше можна отримати за даними ІБР з урахуванням різних умов експлуатації.

Для розрахунку підшипників на заданий ресурс застосовують ідею зниження контактних напружень σ_H зі зростанням числа циклів N контактного навантаження, що має математичний виразу вигляді:

$$\sigma_H^m N = const$$

Оскільки величина N пропорційна числу обертів n підшипника, а його довговічність L вимірюється мільйонами обертів ($L=10^6 n$), то цей вираз може бути записаний як:

$$\sigma_H^m L = const$$

Переходячи від напружень у контакті σ_H до радіальної сили F_r , що викликала ці напруження, одержимо вираз наступного вигляду:

$$F_r^p L = const$$

Спеціальні залежності дозволяють для кожного, наприклад, радіального підшипника, визначити постійне радіальне навантаження при $L=1$. Це навантаження при нерухомому зовнішньому кільці називається *динамічною радіальною вантажністю*, позначається « C_r » і наводиться в довідниках.

Динамічна радіальна вантажність підшипника – умовно нерухома постійна радіальна сила, яку може сприймати підшипник без появи ознак втоми на поверхнях контакту кілець і тіл кочення протягом одного мільйона обертів внутрішнього кільця при імовірності безвідмовної роботи 90%.

З урахуванням поняття динамічної радіальної вантажності останній вираз має вигляд:

$$F_r^p L = C_r^p \cdot 1 = const ,$$

звідки вираз для *базового розрахункового ресурсу* підшипника в мільйонах обертів при його 90% безвідмовній роботі з деталями зі сталі ШХ-15 звичайної технології отримання (без очищення металу від різних сторонніх включень) і при звичайних умовах експлуатації визначається виразом:

$$L_0 = \left(\frac{C_r}{F_r} \right)^p ,$$

де p – показник степеня: для кулькових підшипників $p=3$, для роликопідшипників $p=10/3$.

Якщо на підшипник діють спільно радіальна й осьова сили, вводять поняття *еквівалентного радіального динамічного навантаження* P_r . Це таке умовне постійне радіальне навантаження, наприклад, для радіальних і радіально-упорних підшипників, під дією якого підшипник з рухомим

внутрішнім кільцем і нерухомим зовнішнім буде мати той же ресурс, що й в умовах дійсного навантаження і обертання. Тоді доцільно використовувати вираз:

$$L_{\sigma} = \left(\frac{C_r}{P_r} \right)^p$$

У загальному випадку, якщо умови експлуатації підшипників відрізняються, наприклад, розподілом навантажень на тіла кочення, застосуванням нових матеріалів для деталей чи присадок та домішок до мастильних матеріалів у ГОСТ 18855-94 (аналог ДСТУ на цей час не встановлений) передбачений так званий *відкорегований ресурс* $L_{\sigma,p}$:

$$L_{\sigma,p} = a_1 a_2 a_3 L_{\sigma},$$

де a_1 – коефіцієнт, що корегує ресурс залежно від рівня надійності підшипника ($a_1=1$ при $L_{\sigma}=90\%$);

a_2 – коефіцієнт, що корегує ресурс залежно від спеціальних властивостей підшипника;

a_3 – коефіцієнт, що корегує ресурс залежно від спеціальних умов експлуатації.

Конкретні значення коефіцієнтів a_2 і a_3 потрібно вибирати шляхом експлуатаційних випробувань.

На практиці ресурс підшипників визначають не в мільйонах циклів навантаження, а в годинах роботи:

$$L_{p,n} = \frac{L_{\sigma}}{60n},$$

тоді перевіірочний розрахунок підшипників зводиться до порівняння розрахункового ресурсу $L_{p,n}$ з потрібним (заданим) ресурсом L за умовою:

$$L_{p,n} > L$$

Перевагами розрахунку на заданий ресурс підшипників кочення є відносна простота, комплексність та осередненість в урахуванні багатьох технологічних та експлуатаційних факторів, що пов'язані з розсіюванням фізико-механічних властивостей матеріалів, параметрів технології виготовлення деталей, супутніми деградаційними процесами (зміна властивостей контактних поверхонь, забруднення та втрата несучої здатності мастильного матеріалу). Вдосконалення технологічних процесів виготовлення та контролю підшипників і, особливо, підвищення якості сталі (зменшення числа домішок, підвищення структурної однорідності) останнім часом дозволили збільшити фактичний ресурс підшипників і, навіть, перевищити розрахунковий ресурс.

Таким чином, розглянуті вище питання показують деякі напрями та можливості розрахунку та прогнозування відмов елементів електричних машин. Подальше проведення досліджень і розробок з розвитку питань прогнозування дозволить підвищити надійність електроустаткування і звести до мінімуму

раптові відмови, а отже ізбиток в господарствах країни, викликаний раптовими зупинками аварійного характеру.

Лекція 9

ВИДИ ВІДМОВ ДЕТАЛЕЙ І ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

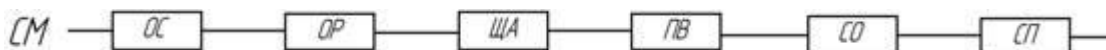
9.1 Статистика відмов електричних машин

При дослідженні надійності технічних систем або окремих виробів користуються методом структуризації: система умовно «розбивається» на блоки, визначається надійність кожного блоку і результуюча надійність всієї системи. «Розбиття» на блоки здійснюється за принципом функціонального призначення та на основі дослідження фізичних процесів, які відбуваються у системі в цілому та кожному блоці зокрема. При цьому враховується можливість відмов окремих блоків та їх вплив на результуючу надійність. Тому, при складанні структурних схем користуються методом «слабкої ланки», виділяючи тільки ті блоки, надійність яких в даних умовах є мінімальною.

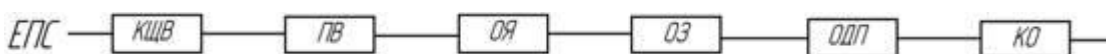
Розглянемо причини відмов електричних машин різного типу. *В асинхронних електродвигунах* при дослідженні їх надійності слід виділяти к «слабкі ланки» обмотку статора й підшипниковий вузол. Відмова кожного з них (раптовачи поступова) зумовить вихід з ладу електродвигуна за наступними наслідками для його навантаження. Тому, структурна схема асинхронного електродвигуна за надійністю матиме вигляд цих послідовно з'єднаних ланок:



В синхронних машинах виділяють обмотку статора й ротора, щітковий апарат, контактні кільця, підшипниковий або під'ятниковий вузол (в залежності від конструктивного виконання електродвигуна), системи охолодження й пожежогащення. Тому, структурна схема синхронної машини за надійністю матиме вигляд:



Електродвигун постійного струму з точки зору його надійності представляють таким, що складається з блоків: колекторно-щіткової й підшипникового вузлів, обмотки якоря, збудження, додаткових полюсів й компенсаційної:



При оцінюванні надійності електричної машини, яка працює в складі деякої системи, необхідно також враховувати надійність **пуско-регулювальної апаратури**.

Проаналізуємо причини відмов електричних машин різних типів.

Асинхронні електродвигуни. В переважній більшості випадків 85-95% відмов асинхронних електродвигунів потужністю більше 5кВт відбуваються через пошкодження обмотки статора та розподіляються таким чином:

- міжвиткові замикання - 90-93%;
- пробій міжфазної ізоляції - 5%;
- пробій фазової ізоляції - 2%.

На підшипниковий вузол припадає 5-8%

відмов; невеликий відсоток пов'язаний з такими причинами, як розпайка ввідних кінців, скручування валів, розрив стрижнів ротора та ін.

Причини відмов можна диференціювати таким чином: технологічні - біля 35%; експлуатаційні (головним чином через незадовільний захист електродвигунів) - 50%; конструкційні - 15%. В середньому протягом року піддають капітальному ремонту біля 20% встановлених електричних машин, в тому числі, в будівництві - 50%, у видобувній промисловості - 30%, в машинобудуванні - 20%, в чорній металургії - 13%, в хімічній промисловості - 9%.

Під незадовільним захистом електродвигунів слід розуміти відсутність теплового захисту або його відмова. Дослідженням встановлено, що розкид часу спрацювання теплового захисту, навіть достатньо налаштованого, практично не впливає на аварійність. При захисті асинхронних електродвигунів плавкими вставками вони відмовляють внаслідок роботи надвох фазах. Аналіз матеріалів експлуатації свідчить, що 80%

аварій відбуваються при роботі в неповнофазному режимі (надвох фазах) через відсутність теплового захисту тільки 20% - від його несправності.

Якість обмотки асинхронних електродвигунів залежить від теплових показників обмотувальних проводів, а також їх сумісності з просочувальними компаундами. Одна з розповсюджених причин підвищеної інтенсивності відмов асинхронних електродвигунів -

вібрація агрегату, яка спричинює відмови підшипників, обмотки, тріщини у чавунній оболонці «лапах» двигуна.

Часто до відмов призводить невідповідність конструктивного виконання електродвигунів умов експлуатації, наприклад, застосування електродвигунів простого захищеного виконання в умовах виробництва з підвищеним вмістом чавунного пилю. Це суттєво збільшує кількість відмов у порівнянні із застосуванням у тих же умовах електродвигунів захищеного виконання з обдувом внутрішнього об'єму.

Синхронні

машини. Джерелом інформації для одержання показників надійності великого вибору синхронних машин є дані експлуатації, оскільки організація випробувань таких машин надійністю неможлива. Однак, додатковий матеріал може бути отриманий шляхом поелементних випробувань окремих деталей та вузлів: стрижнів, обмоток, ущільнень, охолоджувачів та ін.

Особливістю експлуатації синхронних машин є періодичні капітальні та планово-попереджувальні ремонти, а також випробування, в процесі яких виявляється певна кількість різноманітних пошкоджень.

Статистичні дані свідчать про те, що однією з основних **причин відмов** великовагових синхронних машин є технологічні дефекти при їх виготовленні. Протягом першого періоду роботи (5-10 тис. год. або 1-1,5 роки) має місце припрацювання, коли замінюються і ремонтуються деталі із заводськими дефектами. Потім настає наступний період - нормальної експлуатації, тривалість якого у звичайних умовах складає 10-15 років. У кінці цього періоду починається поступове збільшення частотності відмов, пов'язане із зношуванням та старінням ізоляційних матеріалів й елементів конструкції синхронної машини. При цьому, на ізоляцію обвитки статора припадає 2,0-2,5% відмов (турбогенератори) і 3,5-4,0% відмов (гідрогенератори); на місця пайки - 0,35-0,40% відмов і 0,9-1,0% відмов, на пошкодження активної сталі статора - 0,15-0,20% відмов і 0,65-0,70% відмов, відповідно.

Аналіз причин пошкоджень основних вузлів великовагових синхронних машин вказує на такі характерні джерела.

Відмови синхронних машин внаслідок пошкодження обвитки статора, як правило, відбуваються через пробій ізоляції обвитки. Ділянки пониженої електричної міцності в ізоляції обвитки можуть з'явитися внаслідок дефектів при виготовленні ізоляції обмотувальних проводів, пошкоджень при монтажі обвитки або в процесі експлуатації, включно з ремонтними роботами.

На процес руйнування ізоляції прискорювальний вплив мають концентрації навантажень: підвищення механічних зусиль при перехідних процесах, перенавантаження по струму, перенапруги, вібрації та ін. В такому разі наявність ділянок з пониженою електричною міцністю зумовлює пошкодження обвитки, оскільки амплітуди практично можливих перенапруг недостатні для пробою якісної ізоляції.

Недостатньо надійне кріплення лобових частин обвитки статора створює умови для пошкодження ізоляції переважно у місцях виходу стержнів з пазів. З плином часу відбувається опускання корзинки лобових частин обвитки, у зв'язку з чим з'являються додаткові напруження в ізоляції, а самі лобові частини стають більш вразливими до вібрацій та ударів під дією раптових електродинамічних зусиль (короткі замикання й несинхронні вмикання - для генераторів, пуски й реверси - для двигунів).

Серйозній небезпеці ізоляція обвитки статора піддається також при теплових перенавантаженнях, зумовлених причинами місцевого характеру. Так, при руйнуванні ізоляції листів активної (електротехнічної) сталі й місцевому замиканні її сегментів температура в такій зоні може сягати 200-300°C. Причиною пошкодження активної сталі є, в основному, послаблення чи нерівномірність її запресування (від 100-170 до 1000-1200 Н/см²). Пошкодженню ізоляції обвитки статора сприяє також проникнення в синхронну машину води чи оливи.

Механічні пошкодження роторів відбуваються дещо рідше, ніж пошкодження нерухомих частин синхронних машин, але зумовлюють аварії з важкими наслідками. Причинами аварій можуть бути заклинювання ротора, розповсюдження тріщин, а також температурні напруги в тілі ротора внаслідок несиметричного розподілу теплових потоків. Наприклад, внаслідок різниці температур окремих ділянок ротора в $90-100^{\circ}\text{C}$ напруженість розриву, направлена вздовж осі ротора, може складати величину $\sim 16000-18000 \text{ Н/см}^2$.

Пошкодження обвитки ротора внаслідок її переміщень при змінах температури є однією з основних причин аварій турбогенераторів з непрямым охолодженням. Застосування безпосереднього охолодження обмоток ротора, а також легованої міді (легуючий елемент - срібло) дозволяє суттєво зменшити температурні деформації обвитки. Так, якщо для нелегованої міді марки М1 границя текучості становить $2000-3000 \text{ Н/см}^2$, то для легованої – $15000-20000 \text{ Н/см}^2$.

До 30–40% відмов роторів зумовлені пошкодженнями й несправностями струмопроводів та струмознімних вузлів. Доволі часто в явнополюсних машинах, зокрема гідрогенераторах, відбуваються розриви струмопроводу або міжполюсних з'єднань, а також перегрів і розплавлення місць паяння міжполюсних з'єднань при тривалому форсуванні збудження. Розповсюдженою несправністю є зменшення опору ізоляції на корпус ланки ротора через забруднення струмопроводу оливою й вугільним пилом, а також забруднення обвитки ротора.

Найчастіше пошкодження підшипників та підп'ятників синхронних машин супроводжуються виплавленням бабіту, пошкодженням вкладок й цапф наведеними у підшипниках струмами, а також витіканням оливи системи охолодження.

Пошкодження підп'ятників гідрогенераторів становить суттєвий відсоток відмов електричних машин цього типу. Найбільш характерними пошкодженнями підп'ятників є знос, задирки, виплавлення бабітового шару на поверхні сегментів, а також пошкодження від підшипникових струмів.

Підвищена вібрація синхронних машин свідчить про наявність недоліків конструкції, дефектів виготовлення й збирання, а також про виникнення пошкоджень. Внаслідок підвищеної вібрації відбувається послаблення запресування активної сталі, порушення щільності з'єднань, руйнування зварних швів і деталей, прискорений знос ізоляції, порушення герметичності в системах водо– й оливопостачання, підвищення втрат й нагрів підшипників, знос контактних кілець й щіткового апарату та ін.

Робота з підвищеною вібрацією шкідлива не тільки для синхронної машини та її фундаменту, але й для оточуючих машин, контрольно–вимірювальних приладів і персоналу. Діючі стандарти визначають такі допустимі значення амплітуди вібрації:

- для турбогенераторів - не більше 40мкм;
- для синхронних компенсаторів - не більше 80мкм;

– для гідрогенераторів - не більше 100-180мкм залежно від частоти обертання валу.

Статистика надійності синхронних генераторів невеликої потужності, що використовуються в автономних системах електроживлення, також достатньо досліджена. Так, ймовірність безвідмовної роботи генераторів потужністю до 100 кВт в період припрацювання тривалістю до 4 тис. год. відповідає розподілу Вейбулла, а в період нормальної роботи тривалістю 4-12 тис. год. - експонентному розподілу відмов. Основними причинами відмов є: порушення технології виготовлення, неякісне налаштування систем регулювання напруги, порушення експлуатації, а також конструктивні недоліки.

Машини постійного струму. Найбільша частка відмов у машинах постійного струму припадає на колекторно–щітковий та підшипниковий вузли. Статистика експлуатації вказує на 25% відмов машин через несправності колекторів. В деяких випадках, наприклад на транспорті, ця цифра сягає 45-65%. В тягових двигунах електровозів найбільше число відмов (до 70%) відбувається через виникнення колекторного кругового вогню.

Дослідження двигунів постійного струму прокатних станів показало такий розподіл відмов відповідно до вузлів: колекторний вузол - 56%, механічні пошкодження - 34%, обвитки якоря і полюсів - 10%.

В результаті аналізу статистичних даних відмов тягових електродвигунів постійного струму типу ДК–717А великовагових автомобілів марки БелАЗ–549 (БелАЗ–7420) встановлено, що найменш надійними елементами двигунів є обвитка якоря й колекторно–щітковий вузол. Число відмов по причині виходу з ладу останнього становить 20-40%. В цілому закон розподілу відмов таких двигунів представляється суперпозицією двох законів Вейбулла з відповідними ваговими коефіцієнтами.

Машини постійного струму виходять з ладу з таких причин:

- пошкодження колектора внаслідок зміни його форми через нерівномірне зношування, подряпини, підгоряння й оплавлення пластин круговим вогнем. Відмови таких колекторів пов'язані з електричним пробоем чи дуговим перекриттям ізоляційної частини корпусу;

- пошкодження обвитки якоря внаслідок електричного пробоя корпусної ізоляції, міжвиткових замикань, розпайки з'єднань, руйнування бандажів, утримуючих обвитку якоря;

- пошкодження обвиток збудження, додаткових полюсів й компенсаційної (доволі рідкісні події) внаслідок електричного пробоя корпусної ізоляції;

- пошкодження підшипників й шийки валу через знос вкладишів, витікання мастила, порушення роботи мастильних кілець, руйнування підшипників;

- пошкодження щіткової траверси внаслідок розладу положення щіткотримачів на траверсі, руйнування деталей траверси.

Електричні машини малої потужності. Найбільше число відмов припадає на обвитки, підшипникові й колекторно–щіткові вузли. Відмови обвиток зумовлені струмами к. з. між витками або на корпус, обривом проводів

чи руйнуванням місць паяльних з'єднань. Пошкодження підшипникових вузлів відбуваються внаслідок механічного руйнування підшипникових вузлів, погіршення змащення, неякісної посадки підшипників на вал. В колекторних електродвигунах відмови підшипників відбуваються, в основному, з боку колекторно–щіткового вузла через несприятливий вплив вугільного пилу, вібрацій та нагріву колектора. Наробіток колекторно–щіткового вузла визначається переважно зносом щіток: для низькошвидкісних машин - це ~1000 год., для високошвидкісних машин – 100-150 год.

В таблиці 9.1 подані узагальнені статистичні дані про інтенсивність відмов деяких елементів і деяких типів електричних машин малої потужності.

Таблиця 9.1-Інтенсивність відмов електричних машин та компонентів

Елементи і типи електричних машин	Інтенсивність відмов, $\lambda \cdot 10^{-6}$, год ⁻¹
Колектори електричних машин	2,9
Підшипники ковзання	0,2
Підшипники шарикові	0,9
Передачі зубчасті: – циліндричні	2,2
– редукторні	0,2
Щити підшипникові	0,1
Генератори: – постійного струму	0,9
– змінного струму	0,7
звукової частоти	0,35
Сельсини (відслідковуючі системи автомат. регулювання)	0,35
Електродвигуни: – асинхронні	8,6
– синхронні	0,36
– постійного струму	9,4
– систем керування	0,23
– крокові	0,37
– вентиляторів	0,2

9.2 Зношування і пошкодження деталей і вузлів електрообладнання в процесі експлуатації

Незважаючи на різноманітність призначення, конструкційних форм, матеріалів, навантажень, умов експлуатації та інших факторів, процеси зношування деталей, вузлів електричних машин і апаратів, як і інших машин і механізмів, що мають спільні закономірності. Звичайно процес зношування деталей умовно поділяють на три періоди (рис. 9.1).

У періоді припрацювання I інтенсивність зношування досить висока, тому що відбувається стирання нерівностей обробки і як би «пригін» сполучених поверхонь деталей.

У періоді II (нормального зношування) відбувається рівномірне зношування деталей з відносно постійною швидкістю. Зазвичай це найтриваліший період експлуатації деталі або вузла.

Період III (інтенсивного зношування) характеризується різким збільшенням швидкості зношування даної деталі або вузла і пов'язаних з ними інших деталей і вузлів, збільшення зазорів тощо. У періоді III найбільш імовірний вихід деталі з ладу, або вона може послужити причиною виходу з ладу іншої, пов'язаної з нею деталі чи вузла. У деяких випадках таке зношування деталі та вузла не створює аварійну ситуацію, тобто не призводить до відмови, але робить роботу електричної машини або апарата економічно не вигідним

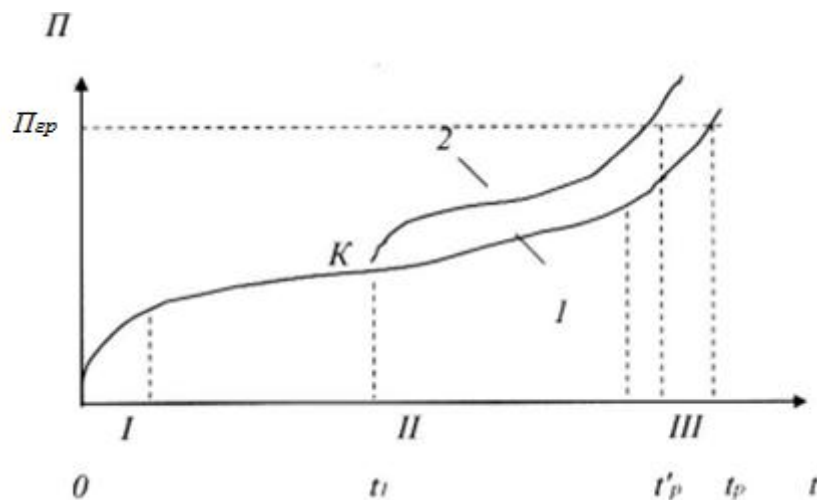


Рисунок 9.1 - Класична крива зношування: I – період припрацювання; II – період нормального зношування; III – період інтенсивного зношування

Одним із основних заходів визначення справності деталі або вузла є встановлення граничних значень зношування або інших параметрів, що характеризують їх працездатність. Якщо зношування й інші параметри ще не вийшли за свої граничні значення, вважається, що деталь або вузол працюють задовільно. При виході зношування або параметрів за граничні значення деталь або вузол вважаються такими, що вийшли з ладу. На рис.7.11 граничне значення зносу позначена на осі ординат $\Pi_{гр}$. Число відмов будь-якого технічного пристрою за певний період (інтенсивність відмов за одиницю часу) є основною кількісною характеристикою його надійності.

Відмови електрообладнання поділяються на конструктивні, технологічні, експлуатаційні та зношувальні.

Конструктивні відмови – це результат помилок і прорахунків при розробці конструкцій обладнання. Ці відмови найчастіше виникають у I період експлуатації електрообладнання. До особливостей конструктивних відмов

можна віднести і те, що вони виникають майже у всіх машин або апаратів певного типу. Прикладом може бути вихід з ладу підшипників електродвигунів з алюмінієвими підшипниковими щитами, в які не запресовані сталеві втулки для посадки підшипників. Посадочні місця під підшипники в таких щитах швидко зношуються і частки металу підшипникового щита потрапляють у підшипник. Одночасне зношування посадочних місць під підшипники, доріжок і тіл кочення підшипників призводить до збільшення асиметрії положення ротора щодо розточування статора і в результаті – до зачіпання ротора за статор.

Технологічні відмови електроустаткування зумовлені порушенням технологічних процесів виготовлення деталей та вузлів. Технологічні відмови, як правило, виникають у I період експлуатації електрообладнання. Прикладом технологічних відмов можуть бути відмови асинхронних електродвигунів, викликані обривами стрижнів короткозамкнених обвиток роторів. Навіть при невеликих відхиленнях від температурного режиму заливки короткозамкненої обвитки в її стрижнях виникають несплавлення, порожнечі і тріщини.

Експлуатаційні відмови виникають у випадках порушення правил технічної експлуатації електрообладнання, при невідповідності конструкції електрообладнання умовам зовнішнього середовища або режимів роботи. Наприклад, несвоєчасна заміна мастила в підшипниках електричних машин призводить до відмов підшипникових вузлів, а установка електродвигунів захищеного виконання на відкритому повітрі або у вологих приміщеннях - до їх виходу з ладу.

Відмови зношування електроустаткування зумовлені старінням матеріалів ізоляційної конструкції, виникненням корозії, зношуванням робочих поверхонь деталей та іншими причинами. Прикладом зношувальної відмови може бути відмова магнітного пускача в результаті зношування напайок нерухомих або рухомих контактів.

За даними практики експлуатації термін служби електрообладнання, як і процес зношуваності деталей, можна умовно розділити на три періоди. Прикладом такого поділу є дані про відмови асинхронних електродвигунів. Першим періодом є період припрацювання, який відноситься до початку роботи електродвигунів і в якому спостерігається найбільше число відмов, зумовлених технологічними дефектами. У результаті вивчення характеру і причин відмов встановлено, що для асинхронних електродвигунів одної серії потужністю від 0,6 до 100 кВт період припрацювання складає приблизно 1000 годин роботи.

Період II (нормальної експлуатації) характеризується приблизною сталістю інтенсивності відмов за одиницю часу. У цей період основною причиною відмов є випадкові явища: робота на двох фазах при відсутності або неправильно налаштованому захисті, технологічні перевантаження, аварії механізму, приводом якого є електродвигун та ін.

Протягом періоду III відмови виникають внаслідок зношування і старіння вузлів та деталей електродвигунів, особливо ізоляції обвиток. Слід зазначити,

що розбирання електрообладнання чинить шкідливий вплив на процеси зношування деталей і вузлів. Як і для будь-якої машини або механізму, для електричних машин і апаратів передчасне розбирання негативно впливає на подальшу працездатність. Особливо шкідливі розбирання, при яких порушується взаємне розташування сполучених деталей. Після демонтажу та наступної збірки, як би ретельно вони не були проведені, внаслідок зміни затягування з'єднань, деформації деталей, зміни у взаємному розташуванні знову відбувається припрацювання сполучених деталей, тобто виникає період підвищеної інтенсивності зношування. На рис.7.1 крива 1 характеризує зношування деталі для випадку, коли за період роботи до вичерпання свого ресурсу в момент часу t_p , тобто до досягнення граничного значення зносу Π_{zp} деталь працювала в конструкції, яка не розбиралася. Якщо через певний час після початку експлуатації, наприклад, в момент часу t_1 , конструкцію було розібрано, то залежність зношування цієї деталі від напруження, починаючи з моменту часу t_1 , буде відображати крива 2, оскільки в точці K знов почнеться період припрацювання деталі після збирання конструкції. З рисунку також видно, що зношування деталі після розбирання та складання виробу досягає свого граничного значення Π_{zp} в момент часу t_p , тобто ресурс роботи деталі зменшиться.

9.2.1 Старіння, дефекти та пошкодження ізоляції обвиток електричних машин і апаратів

Обвитки є найбільш важливою і складною частиною електричних машин і апаратів за умовами роботи. Вихід обвиток з ладу в більшості випадків зумовлений пошкодженнями ізоляції. Аналізом причин виходу з ладу обвиток електричних машин і апаратів в різних галузях народного господарства займалися багато дослідників. На підставі збору і статистичної обробки даних про експлуатацію близько 5,5 тис. асинхронних двигунів на промислових підприємствах встановлено, що понад 84% всіх відмов відбувається через різні пошкодження обвиток. Згідно з даними в електродвигунів, які працюють в сільському господарстві, 80% відмов виникають в результаті пошкодження ізоляції. На обвитки, і особливо на їх ізоляцію в процесі експлуатації діють електромагнітні сили, вібрація, температура, навколишнє середовище та інші фактори. Спільна дія вищеперерахованих факторів призводить до незворотних процесів зміни структури та хімічного складу ізоляції, тобто до старіння ізоляції. Крім того, в ізоляції можуть бути дефекти, що виникають як у процесі виготовлення матеріалів, з яких складається ізоляційна конструкція електричної машини або апарату (наприклад, шпилькові отвори або сторонні вclusions в шарі ізоляційного покриття обмотувальних проводів), так і при виготовленні самої ізоляційної конструкції. Особливо часто при укладанні обвиток пошкоджується виткова ізоляція, що значно скорочує термін їх служби. Використання металевих інструментів при укладанні обвиток часто призводить до продавлювання і прорізування ізоляційного шару проводів. Різкі

перегини обмотувального дроту під час намотування також сприяють утворенню в ізоляції значних механічних напружень, внаслідок чого виникають тріщини.

Кількість дефектів у витковій ізоляції знижується при зменшенні коефіцієнта заповнення паза. Зменшення коефіцієнта заповнення паза на 2,5% і застосування «м'якого» інструменту при укладанні обвиток дозволяє підвищити надійність ізоляції електродвигунів на 5,5%.

Утворення місцевих дефектів зазвичай призводить до пошкоджень ізоляційних конструкцій після введення електричних машин в експлуатацію у I період роботи. Як правило, такі ушкодження виникають у вигляді пробою міжвиткової ізоляції. На надійність роботи обвиток також негативно впливає розтягнення проводів при намотуванні котушкових груп на намотувальних верстатах. Це розтягнення може досягати 5-7% довжини дроту.

У процесі роботи на обвитки електричних машин впливають електродинамічні і механічні зусилля, що досягають більших значень при пуску і реверсуванні. Так, пускові струми короткозамкнених електродвигунів перевищують номінальні в 5-7 разів, у зв'язку з чим на обвитки діють значні електродинамічні сили, значення яких пропорційні квадрату струмів. Під дією цих зусиль в ізоляції виникають тріщини, а також механічні пошкодження.

Особливо небезпечною для ізоляції обвиток електричних машин є вібрація, яка виникає у зв'язку з невірноваженістю обертових частин, вигином валу, при зношуванні підшипників, при обриві стрижнів короткозамкнених обвиток роторів і з інших причин. Вібрація може також передаватися на електричні машини з боку механізмів, приводом яких вони є. Викликані вібрацією сили діють протягом усього періоду роботи електричних машин і призводять до втрати механічної та електричної міцності ізоляції обмотувальних проводів і компаундів, якими просочують обвитку для її цементації. Все це може також призвести до пошкодження ізоляції. Вібрація може скоротити термін служби ізоляції в кілька разів.

До зношування виткової ізоляції може приводити тертя між витками і витків об корпусну ізоляцію, що виникає в електричних машинах через різні коефіцієнти теплового розширення міді обвиток і активної сталі сердечників. Зазвичай таке тертя відбувається при нагріванні електричних машин під час пуску і роботи, а також після її вимикання з мережі при охолодженні.

Певний вплив на технічний стан ізоляції електричних машин чинить теплове та електричне старіння. Важливими характеристиками ізоляційних конструкцій електричних машин і апаратів є теплостійкість і нагрівостійкість. Теплостійкість характеризує здатність ізоляційних матеріалів зберігати свої властивості при короткочасному нагріванні, а нагрівостійкість – зберігати властивості протягом тривалого періоду без істотного погіршення, якщо температура не перевищує допустимих значень, встановлених для даного температурного індексу ізоляції. Нагрівостійкість в основному визначається швидкістю старіння ізоляції.

Найважливішим показником, що використовується при експлуатації, діагностуванні та прогнозуванні працездатності ізоляції є термін її служби. Особливу увагу з боку дослідників було приділено встановленню залежності терміну служби ізоляції від її робочої температури. У результаті було сформульовано «правило восьми градусів». Згідно з цим правилом, підвищення температури на кожні вісім градусів призводить до скорочення терміну служби ізоляції вдвічі. Аналітично «правило восьми градусів» записується так:

$$T = T_0 \cdot 2^{\frac{\Theta}{\Delta\Theta}} = T_0 e^{-0,0866\Theta}$$

де Θ – температура нагрівання ізоляції;

T – термін служби ізоляції, років;

T_0 – термін служби ізоляції при температурі $\Theta=0$, років;

$\Delta\Theta$ – підвищення температури, при якій термін служби скорочується в два рази.

Згодом було уточнено, що для ізоляційних матеріалів з температурним індексом (ТІ) 105°C $\Delta\Theta=8^\circ\text{C}$, для матеріалів з ТІ 180°C $\Delta\Theta=10^\circ\text{C}$, а для ТІ більше 180°C $\Delta\Theta=12^\circ\text{C}$.

Незважаючи на те, що даний вираз встановлено на підставі великого обсягу експериментальних даних, його використання при прогнозуванні ресурсу роботи електрообладнання у багатьох випадках не дає достатньо достовірних результатів.

Іншим шляхом визначення терміну служби ізоляції з урахуванням впливу температури є використання загальних законів кінетики хімічних реакцій, встановлених Вант Гоффом і Арреніусом. Якщо відомий термін служби ізоляції T_1 при температурі θ_1 , то термін служби T_2 при температурі θ_2 можна визначити за формулою:

$$T_2 = T_1 e^{\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{\theta_2} - \frac{1}{\theta_1} \right)},$$

де E_a – енергія активації, Дж;

R – універсальна газова стала, $R=8,31446261815$ Дж/(моль·К).

Ізоляція високовольтних машин схильна до електричного старіння під впливом електричних полів, причому практичний вплив полів виявляється в ізоляції обмоток електричних машин напругою 6 кВ і вище. Особливу загрозу для електричних машин, що пропрацювали певний час, ізоляція яких має певний ступінь старіння, мають комутаційні перенапруги, так як електрична міцність їх ізоляції знижена. Комутаційні перенапруги можуть перевищувати амплітудне значення напруги живлення в 7 разів.

Великий вплив на прискорення процесу старіння ізоляції чинить волога. В основному проникнення вологи в ізоляцію обмоток електричних машин відбувається в неробочі періоди, особливо при охолодженні машин, коли тиск в

порах і капілярах ізоляції нижчий ніж атмосферний. Проникнення вологи викликає гідролітичні руйнування ізоляційних матеріалів, особливо тих, що мають волокнисту структуру. Періодичне проникнення вологи в ізоляцію та її видалення підсушуванням під час роботи електричних машин сприяє розвитку пор в ізоляції. При цьому просочування обвиток компаундними лаками тільки сповільнює процес зволоження і підсушування ізоляції, а не виключає його. Зволоження є однією з головних причин пробою ізоляції обвиток електричних машин, особливо намотаних проводами з бавовняним оплетенням, що має високу гігроскопічність. Волога, яка проникає в пори і тріщини, значно знижує електричну міцність ізоляції. Небезпечним є також зволоження забруднених обвиток. В місцях дефектів при зволоженні напруга пробою різко знижується і тим самим створюються умови для виникнення дугових розрядів при порівняно низьких значеннях перенапруг. Експериментальні дослідження показали, що при зволоженні обвиток з дефектами в ізоляції опір ізоляції знижується в кілька десятків разів і при цьому різко збільшуються струми витoku через ізоляцію. У цих випадках через дефекти в ізоляції під дією напруги проходить струм, що руйнує ізоляцію, внаслідок чого виникає коротке замикання між витками обвиток або замикання обвиток на землю. Електричні машини, що мають такі дефекти ізоляції, потребують заміни обвиток, тобто капітального ремонту.

Процес розвитку дефектів у міжвитковій ізоляції всипних обвиток електричних машин можна представити таким чином. Якщо ізоляція не має технологічних дефектів, то під дією температури, вібрації, зволоження, зовнішнього середовища та інших факторів протягом якогось часу відбувається поступове старіння ізоляції, що виражається в її усиханні, випаровуванні летких компонентів, втрати еластичності, виникненні пор і тріщин. У найбільш «слабких» місцях ізоляції виникають місцеві дефекти, що мають мале значення напруги пробою. У моменти перенапруг (атмосферних або комутаційних) в місці дефекту виникають іскрові розряди, які повторюються при кожному наступному перенапруженні, значення якого перевищує напруга пробою місця дефекту. Внаслідок дії розрядів пробивна напруга поступово зменшується до тих пір, поки в місці дефекту починає виникати дуговий розряд від робочої напруги між витками. У цьому випадку відбувається повне міжвиткове замикання і обвитка електродвигуна виходить з ладу.

У заглибних електродвигунів, що застосовуються для приводу електронасосів водопідйомних свердловин, обвитки статорів намотують проводом ПЕВВП, що має двошарову ізоляцію. Зовнішній шар ізоляції товщиною від 0,4 до 0,8 мм (залежно від розміру дроту) виготовляють з полівінілхлоридного пластикату ПХВ-489, а внутрішній (товщиною 0,05 мм) – з емальлаку «вініфлекс». Застосовуючи двошарову ізоляцію, розробники намагалися підвищити працездатність дроту, так як обвитки заглибних електродвигунів працюють у воді.

Результати аналізу пошкоджень ізоляції заглибних електродвигунів, які поступають на капітальний ремонт, показують, що 72,6% ушкоджень ізоляції відноситься до пробоїв в пазах і в лобових частинах. Слід зазначити, що

зношування радіальних підшипників заглибних електродвигунів також приводить до зачеплення активної сталі ротора за статор і, як наслідок, до пошкодження ізоляції в місці зачеплення. Тому можна припускати, що 24,16% випадків відмов ізоляції обвиток викликано надмірним зношуванням підшипників електродвигунів.

Дослідження працездатності 80 макетів обвиток протягом 21 тис. годин роботи в умовах, що імітують умови роботи обвиток заглибних електродвигунів, дозволило встановити основну причину пробою ізоляції обвиток – розвиток місцевих дефектів ізоляції. Цей висновок підтверджується тим, що напруга пробою ізоляції пошкоджених макетів (при виключенні місця пошкодження) перевищувала 5 кВ, а ізоляція проводів більшості непошкоджених макетів обвиток після напрацювання 12 тис. год. витримувала без пробою випробувальну напругу 10 кВ.

Було встановлено, що пробій ізоляції обвиток статорів, як правило, викликаний не загальним старінням, а розвитком місцевих дефектів в ізоляції, які виникають при виготовленні дроту (сторонні включення) і механічними пошкодженнями під час намотування обвиток. Внаслідок розвитку місцевих дефектів у полівінілхлоридному шарі ізоляції виникають канали і тріщини, через які надходить вода до 2-го шару ізоляції з емальлаку. У зв'язку з тим, що емальлак не пристосований до роботи у воді, то через певний час спільний вплив води, напруги і температури руйнує і цей ізоляційний шар.

Також слід зазначити, що у заглибних електродвигунах дефекти ізоляції місць з'єднань, що зустрічаються в умовах експлуатації, в переважній більшості випадків виникають внаслідок неякісного намотування ізоляційної стрічки та перегрівання ізоляції під час проходження великих струмів при перевантаженні електродвигунів і при короткому замиканні через місце з'єднання. Так, при підвищенні температури ізоляції від 15 до 50°C струми виток збільшуються в 10-15 разів.

Аналіз пошкоджень електричних машин показує, що ізоляція обвиток є одним з найважливіших елементів конструкції, що обмежують працездатність машин. Технічний стан ізоляції необхідно контролювати в процесі експлуатації.

9.2.2 Пошкодження і дефекти обвиток роторів і якорів електричних машин

Характер старіння і пошкоджень ізоляції всипних обвиток роторів і якорів електричних машин змінного і постійного струмів аналогічний зносу і пошкодженню ізоляції обвиток статорів, тому дані про старіння і пошкодження ізоляції не наводяться.

У колекторних машинах найчастіше спостерігаються порушення контактів у місцях пайки виводів обвиток до колектора. В асинхронних електродвигунів з фазним ротором також спостерігаються порушення контактів у місці приєднання виводів обвиток роторів до контактних кілець. У короткозамкнених обвитках роторів асинхронних електродвигунів найчастіше виникають обриви і

ослаблення перерізу стрижнів обвитки. Обстеження електродвигунів показало, що 3,8% електродвигунів серій АІР та АІУ мають обриви стрижнів короткозамкненої обвитки. З них 1,05% електродвигунів мають обрив одного стрижня, 0,55% – двох і 2,2% – трьох і більше стрижнів. Обриви стрижнів призводять до виникнення вібрації електродвигунів і виходу їх з ладу.

Порівняно велика кількість асинхронних електродвигунів має ослаблений перетин стрижнів короткозамкненої обвитки. Так, за даними обстеження 6,8% електродвигунів мають ослаблені перетини одного стрижня, 10,5% – двох і 26,3% – трьох і більше стрижнів. Обриви і ослаблення перерізу стрижнів виникають тому, що з точки зору ливарного виробництва клітка ротора є нетехнологічною конструкцією. Внаслідок наявності різких переходів від порівняно тонких стрижнів до масивних кілець і невеликої маси алюмінієвого сплаву в порівнянні з масою пакету ротора, сплав дуже швидко охолоджується. Тому в стрижнях часто виникають ослаблення та несплавлення. Обриви стрижнів виникають також внаслідок усадки алюмінієвого сплаву при швидкому охолодженні. Тріщини в короткозамикаючих кільцях виникають при заливці перегрітого або окисленого металу.

Слід зазначити, що більшість обривів стрижнів не виявляються під час контрольних випробувань після виготовлення електродвигунів.

З наведених вище даних випливає, що стан обвиток роторів і якорів необхідно контролювати в процесі експлуатації електричних машин через певні періоди часу.

9.2.3 Зношування і пошкодження підшипників електричних машин

Статистичні дані і аналіз пошкоджень обертових електричних машин свідчать, що зношування і вихід з ладу підшипників, поряд з виходом з ладу ізоляції обвиток, є найбільш частими причинами відмов електричних машин. У переважній більшості випадків при зношуванні підшипників ротор (якір) починає зачіпати за активну сталь статора (індуктора), в місці зачеплення різко збільшується температура або відбувається зсув листів у зубцях, що призводить до пошкодження ізоляції обвиток.

Внаслідок ушкоджень підшипників виникає 20-25% відмов електродвигунів серії АІР та 10-40% серії АІУ.

Конструкція підшипникових вузлів електричних машин потужністю до 125 кВт порівняно проста. В електричних машинах використовують кулькові і роликові підшипники кочення та підшипники ковзання. У переважній більшості електричних машин застосовують підшипники кочення. В електродвигунах єдиної серії АІР з висотою осей обертання 56-132 мм встановлюють кулькові підшипники. В електродвигунах з більшою висотою обертання з боку приводу встановлюють роликові, а з протилежного боку - кулькові підшипники. Найбільш поширеною причиною виходу з ладу підшипників кочення є зношування поверхні бігових доріжок і тіл кочення, внаслідок чого збільшується радіальний зазор в підшипниках.

Під час роботи електричних машин змащення в підшипниках старіє і забруднюється пилом і абразивними частинками, які потрапляють у підшипник з навколишнього середовища або з електричної машини (металевий пил, продукти корозії і зносу щіток та ін.). При інтенсивному провертанні зовнішнього кільця підшипника внаслідок ослаблення посадки в підшипниковому щиті частинки матеріалу щита також потрапляють у підшипник. Дуже часто це явище спостерігається в електродвигунах з підшипниковими щитами, виготовленими з алюмінієвого сплаву.

Однією з причин виходу з ладу підшипників також є неправильна їх посадка на вал. При напружуванні підшипників на вал з великим натягом виникає защемлення тіл кочення, підвищене нагрівання і вигорання мастила. У цих випадках підшипники швидко зношуються. При слабкій посадці підшипників їх внутрішні кільця обертаються на валу, нагріваються і розширюються, внаслідок чого затискаються тіла кочення і підшипник також виходить з ладу.

В електродвигунах найчастіше виходять з ладу підшипники з боку кінця валу із шпоночною канавкою, що пояснюється більшим навантаженням підшипників, встановлених з боку механізмів, що приводяться в рух електродвигунами. В машинах постійного струму відмови підшипників з боку колектора становлять 60-90% всіх відмов підшипників. Таке явище пов'язане з інтенсивним попаданням у підшипники пилу, що виникає при терті щіток об поверхню колектора.

Великий вплив на термін служби підшипників, поряд з іншими факторами, чинить вібрація електричних машин в результаті невірноваженості обертових частин, передачі вібрації від механізму електричної машини та ін.

Довговічність підшипників розраховується виходячи з умов втомної міцності, на яку в основному впливають навантаження і швидкість обертання при нормальній експлуатації.

9.2.4 Зношування і пошкодження активної сталі електричних машин

У процесі роботи активна сталь електричних машин схильна до зношування, особливо інтенсивне зношування спостерігається на внутрішній поверхні розточки сердечника статора. Причинами зношування активної сталі є корозія поверхні і наявність у повітряному зазорі пилу, піску та інших абразивних частинок.

Для визначення значення зношування активної сталі короткозамкнених асинхронних електродвигунів в процесі експлуатації були виміряні внутрішні діаметри статорів і діаметри роторів асинхронних електродвигунів єдиних серій 1-5-го габаритів. Вимірювання показали, що 68% електродвигунів мають повітряний зазор, що перевищує своє номінальне значення.

Крім зношування, в умовах експлуатації зустрічаються вм'ятини, сліди оплавлення поверхні дугою і розпушення зубців крайніх листів активної сталі. Слід відзначити порівняно велику швидкість зношування активної сталі

заглибних електродвигунів порівняно з електродвигунами єдиних серій. Найчастіше в заглибних електродвигунах зустрічаються зношування внутрішньої поверхні розточки сердечника статора, зсув окремих листів активної сталі в зубчатій зоні і розпушення зубців. Зношування поверхні розточки статора, як правило, виникає у зв'язку з корозією і зачіпання ротора за статор. Посилена корозія активної сталі викликана тим, що внутрішня порожнина електродвигунів заповнюється водою. Особливо піддається корозії зубчата зона активної сталі статора. Велике зношування активної сталі статора і ротора спостерігається при зачіпанні ротора за статор при зношуванні радіальних підшипників (вище допустимого значення) або при вигині валу електродвигунів. Зношування поверхні по довжині розточення статора неоднакове. Зазвичай по краях статора зношування найбільше, а при наближенні до середини його значення зменшується. Овальність розточки статора, як правило, не спостерігається.

9.2.5 Зношування і пошкодження колекторів, контактних кілець і щіткового механізму електричних машин

Колектори відносяться до так званих «слабких» вузлів електричних машин. Проаналізовано, що у 85% обстежених пошкоджених якорів спостерігалось зношування колектора і лише у 10% – пошкодження обвитки. Під час роботи колектори електричних машин зношуються, на їх пластинах виникають риси і канавки, спостерігається биття робочої поверхні. Биття поверхні колектора, крім зношування, може бути спричинене рухливістю окремих пластин при значному зношуванні колектора та при ослабленні його пресування.

Великий вплив на зношування колекторів чинять умови роботи (ступінь іскріння, нагрів в контакті та ін.), швидкість ковзання і величина тиску щіток на поверхню, щільність струму в щітках. При надмірному натисканні щіток різко збільшується сила тертя між щітками і колектором, що призводить до підвищеного нагрівання і зношування його поверхні (механічне зношування). У випадку слабого натискання щіток між щітками і колекторними пластинами виникає інтенсивне іскріння, що призводить до швидкого зносу колекторних пластин (електричне зношування). При правильній установці на нейтраль іскріння щіток в процесі експлуатації виникає через їх вібрацію при взаємодії зі зношеною поверхнею колектора, при виступі пластин колектора та при появі овальності поверхні колектора.

У процесі експлуатації також спостерігається замикання пластин на корпус і між собою, підгоряння і виступання міканітової ізоляції між пластинами. Замикання пластин колектора на корпус найчастіше спостерігається в електричних машинах старих конструкцій при пробої ізоляційних конусів, а замикання між пластинами – при забрудненні колектора мідновугільним пилом, а також при пробої ізоляції між пластинами і при механічному пошкодженні поверхні пластин. Крім того, в процесі експлуатації спостерігається відпайка

проводів обвитки якоря від колектору. В основному це буває при неякісній пайці проводів під час виготовлення електричної машини.

В контактних кільцях електричних машин найчастіше зношується робоча поверхня, виникають подряпини, шорсткості або плями від підгоряння. Внаслідок зношування також виникає биття поверхні контактних кілець.

Порівняно часто в електричних машинах старих конструкцій спостерігається порушення контакту між вивідною шпилькою та контактними кільцями або пошкодження ізоляції шпильок контактних кілець. Досить часто спостерігаються випадки забруднення поверхні між контактними кільцями, що викликає перекриття ізоляції між ними електричною дугою.

Основними несправностями щіткового механізму є обгоряння або механічне пошкодження обойм, втрата пружинами своїх властивостей, ослаблення затягування в контактних з'єднаннях, наявність тріщин в траверсі і пошкодження ізоляції пальців щіткотримачів. З усіх деталей щіткового вузла найбільш схильні до зносу щітки. Особливо швидко зношуються щітки при великих струмових навантаженнях, що зустрічаються в обертових зварювальних перетворювачах і зварювальних генераторах. У результаті зношування щіток по висоті зменшується натискання на них пружин, тобто натискання в контакті між щіткою і колектором або контактним кільцем, в результаті чого між щіткою і колектором або кільцем виникає інтенсивне іскріння, яке призводить до прискорення процесу зношування як щіток, так і колектора.

9.2.6 Зношування і пошкодження апаратів управління і захисту електричних машин і установок

Від технічного стану низьковольтних апаратів (магнітних пускачів, автоматичних вимикачів, реле, перемикачів тощо) в значній мірі залежить довговічність і надійність роботи електроприводів і електричних установок. Відмови низьковольтних апаратів можна розділити на два види: раптові і поступові. Раптові відмови настають, як правило, при стрибкоподібній зміні одного або декількох параметрів функціональних вузлів апаратів. Поступові відмови настають внаслідок зношування і старіння функціональних вузлів і деталей. Найбільше число відмов низьковольтних апаратів спостерігається в контактах, обвитках котушок і механічної частини.

Відмови контактів електричних апаратів (магнітних пускачів, автоматичних вимикачів, реле, перемикачів, рубильників тощо) у більшості випадків пояснюються важкими умовами роботи. На зношування контактів впливають такі фактори: струм і напруга, тип струму, частота включення і виключення, характер навантаження, зовнішнє середовище (температура, вологість і запиленість повітря, наявність парів або газів), вібрація та ін. У зв'язку з цим спостерігається частий вихід контактів з ладу. Особливо це стосується контактів апаратів, що працюють у важких режимах.

В електромагнітних реле 60% відмов припадає на контакти, а інші 40% відмов приблизно порівну розподіляються між обвитками і механічною частиною. Найчастіше в умовах експлуатації відмови контактів відбуваються через безпосереднє зношування контактів. Одним з найважливіших факторів, що впливають на зношування контактів, є електрична дуга, яка виникає при їх розмиканні.

Дуговий розряд при розмиканні контактів викликає розплавлення і випаровування матеріалу, з якого виготовлені контакти. Ступінь зношування контактів залежить від струму дуги, часу її горіння, матеріалу контактів і їх форми. При великих струмах і нечастих включеннях й виключеннях зношування контактів можна вважати пропорційним до числа вимкнень. При відносно невеликих струмах і частих включеннях зношування контактів значною мірою залежить від частоти включення, яка багато в чому визначає температуру контактів і активність процесів окислення їх поверхонь.

Електричне зношування контактів зазвичай перевищує механічне зношування, воно відбувається при включенні і відключенні контактів під напругою. При виключенні між контактами виникає місток розплавленого металу, який випаровується і розбризкується тим інтенсивніше, чим більша сила струму в момент розмикання контактів. Електричне зношування контактів виникає також при вискакуванні рухомих контактів від нерухомих при ударі в момент їхнього зіткнення.

В апаратів постійного струму відбувається електрична ерозія контактів, при якій частина металу переноситься з одного контакту на іншій, внаслідок чого на одних контактах виникають поглиблення, а на інших – підвищення з перенесеного металу. Механічне зношування виникає при ударах, що відбуваються при замиканні контактів, а також при терті поверхонь контактів. В електричних колах з малим значенням струму досить часто виникають відмови незамикання, викликані утворенням окисних плівок на поверхні контактів.

Відмови обвитоккотушок найчастіше виникають через обриви і міжвиткові замикання. Провід катушок зазвичай обривається в місцях з низькою якістю пайки при механічних впливах на дроти і при їх вібрації. Міжвиткове замикання обвиток катушок низьковольтних апаратів виникає при пошкодженні ізоляції проводів, з яких намотані катушки і при довготривалому проходженні струму, значення якого перевищує номінальне.

Струм в катушці найчастіше збільшується при заклинюванні в проміжних положеннях або при нещільному приляганні робочих поверхонь магнітопроводів апаратів. Крім того, ізоляція пошкоджується від перенапруги під час включення і виключення живлення обвитки катушки, а також з інших причин.

Для визначення струму, що проходить через короткозамкнені витки обвитки, в катушках магнітних пускачів ПМЕ–200, намотаних проводом ПЕТВ діаметром 0,18 мм, закорочували 50 і 100 витків. Результати вимірювання показали, що при повному металевому замиканні 50 витків струм у них

перевищує номінальний струм котушки приблизно в 30 разів. За наявності 100 короткозамкнених витків струм у витках перевищує номінальний приблизно в 25 разів. Якщо між витками є неповне коротке замикання, тобто місце дефекту ізоляції має певний опір, то струм в короткозамкнених витках різко зменшується і при опорі 90 Ом дорівнює номінальному струму котушки. Отже, при опорі в місці дефекту міжвиткової ізоляції менше 90 Ом у витках проходить струм більше номінального в декілька разів, що призводить до перегрівання котушки, прискореного розвитку наявного і виникненню нових дефектів в ізоляції і до виходу обвитки котушки пускача з ладу.

Таким чином, в умовах експлуатації необхідно не тільки виявляти короткозамкнені витки з повним металевим замиканням, але й ослаблені ділянки ізоляції, які можуть привести до виходу котушки з ладу. У зв'язку з цим, для виявлення ослаблених місць в ізоляції рекомендується прикладати до виткової ізоляції напругу, яка в 10-15 разів перевищує номінальну. Це дає можливість виявляти дефекти на початковій стадії їх розвитку та вжити необхідних заходів.

Пробій ізоляції катушок на корпус спостерігається тільки в безкаркасних конструкціях катушок.

Відмови механічних систем низьковольтної апаратури найчастіше виникають у зв'язку зі зношуванням і поломками деталей, а також через перекоси, зачіпання і заклинювання рухомої системи. До відмов механічних систем належить близько 20% всіх відмов низьковольтних апаратів. Дослідження показали, що відмови механічних систем у більшості випадків є поступовими відмовами, що виникають внаслідок зношування деталей та вузлів.

Лекція 10

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

10.1 Діагностування обвиток електричних машин

Пошкодження чи вихід обвиток з ладу призводять до відмов, усунення яких у більшості випадків вимагає проведення капітального ремонту електричних машин. Основною причиною виходу обвиток з ладу є пробій ізоляції між витками або на корпус.

У процесі експлуатації в ізоляції відбуваються фізико-хімічні зміни, в результаті яких параметри ізоляції всієї електричної машини чи окремих її частин змінюються. Якщо пошкодження поширюється практично на всю ізоляцію або на її складову частину (розтріскування внаслідок перегріву обвитки тощо), то такий дефект називається розподіленням. Якщо зміна властивостей відбулася в певному місці ізоляції, то дефект називають місцевим (локальним). Найбільш загрозливими формами місцевих дефектів ізоляції є розриви, тріщини, отвори або канали.

Параметри, що визначають технічний стан ізоляції електричних машин, звичайно залежать від багатьох факторів (температури, напруги, вологості та ін.). Тому для отримання порівняльних результатів аналізовані параметри необхідно вимірювати в однакових умовах. Якщо цього досягти неможливо, то отримані значення параметрів перераховують для порівняння, наприклад, опір ізоляції приводять до певної температури.

Поряд з визначенням працездатності обвиток вимірюванням параметрів приладами, велике значення для розібраних електричних машин має ретельний зовнішній огляд обвиток. Зазвичай під час зовнішнього огляду визначають технічний стан всіх пазових клинів, бандажів кріплення лобових частин обвиток і якорів, ізоляції з'єднань між котушковими групами обвиток, між проводами обвиток і вивідними кінцями; ступінь забруднення обвиток. При зовнішньому огляді необхідно визначити, чи перегрівалися обвитки під час перевантажень, заклинювання привідних механізмів і машин та з інших причин. В обвитках проводів з емалевою ізоляцією ознакою перегріву є потемніння ізоляції витків або котушок, по яких проходив великий струм.

10.1.1 Вимірювання опору обвиток постійного струму

Вимірювання опору обвиток електричних машин постійного струму дозволяє виявляти обриви в обвитках, дефекти у з'єднаннях та інші ушкодження. Значення опорів, які вимірюють при експлуатації електричних машин, знаходяться в широкому діапазоні – від сотих часток до сотень і тисяч Ом.

На практиці застосовують кілька методів вимірювання опору обвиток постійному струму: омметром, за допомогою вольтметра і амперметра, одинарними або подвійними мостами. Найменш точним є вимірювання опору омметром, тому його застосовують у більшості випадків тільки для попередньої оцінки значення опору. Омметри зазвичай розраховані на вимір опорів від 1 Ом до 100 кОм.

Метод вольтметра-амперметра заснований на вимірюванні струму, що проходить через обвитку і втрат напруги в ній. При застосуванні цього методу використовують два варіанти схеми включення вольтметра. Амперметр завжди включають послідовно з вимірюваною обвиткою і повністю зарядженою батареєю. Якщо опір обвитки невеликий, вольтметр приєднують згідно з першим варіантом на затискачі обвитки. У цьому випадку збільшення струму, що вимірюється амперметром (викликане включенням вольтметра), незначне, тому що вольтметр має великий опір. Опір обвитки для цього випадку визначають за формулою:

$$R = \frac{U}{I - \frac{U}{R_g}},$$

де U – напруга, яка показує вольтметр, В;

I – струм, що вимірюється амперметром, А;

R_g – опір вольтметра, Ом.

При вимірюванні великих опорів застосовують другий варіант, при якому вольтметр приєднують до затисків джерела живлення. При цьому опір обвитки визначають з виразу:

$$R = \frac{U - IR_a}{I},$$

де R_a – опір амперметра, Ом.

Для виключення нагрівання обвитки під час вимірювань струм в обмотці встановлюють не більше 15-20% номінального. Метод вольтметра-амперметра забезпечує порівняно високу точність вимірювання опорів (0,3-0,5%), якщо при вимірах використовують вольтметри і амперметри класу 0,5 або 0,2.

Для одержання порівняльних результатів найзручніше вимірювати опір обвиток постійного струму в практично холодному стані електричних машин і апаратів, коли температура обвиток відрізняється від температури навколишнього повітря не більше ніж на 3°C. Якщо опір обвитки при даній температурі необхідно привести до іншої температури, то зручно користуватися формулою:

$$R_0 = \frac{R_1}{1 + \alpha(\theta_1 - \theta_2)},$$

де R_0 – опір при температурі, до якої потрібно привести опір обвитки, Ом;

R_1 – виміряний опір обвитки, Ом;

θ_1 – середня температура обвитки при вимірюванні, °C(K);

θ_0 – температура, до якої необхідно привести опір, °C(K);

α – температурний коефіцієнт опору матеріалу проводів обвитки, град⁻¹ (0,004 для міді і 0,00385 для алюмінію).

10.1.2. Вимірювання опору ізоляції

Опір ізоляції є відношенням поданої до ізоляції напруги доструму витоку. Зазвичай опір ізоляції складається з поверхневого R_n і внутрішнього (об'ємного) $R_{вн}$ опорів. Опір ізоляції записується виразом:

$$R_{із} = \frac{R_n R_{вн}}{R_n + R_{вн}}$$

Значення опору ізоляції залежить від стану ізоляції. Якщо ізоляція суха, вимірюванням опору виявити дефекти майже неможливо. Ймовірність виявлення дефектів ізоляції в таких випадках підвищується зі збільшенням напруги, при якій проводять виміри.

За результатами, отриманими при вимірюванні опору ізоляції, можна визначати стан сильно пошкодженої, зволоженої або забрудненої ізоляції.

Для електричних машин нижню межу допустимого значення опору ізоляції при контрольних випробуваннях після виготовлення машини розраховують за формулою:

$$R_{із} = \frac{U}{1000 + \frac{P}{100}},$$

де U – номінальна напруга обвитки машини, В;

P – номінальна потужність машини, кВА (для машин постійного струму кВт).

Слід мати на увазі, що розраховане за цією формулою значення опору ізоляції відповідає опору при робочій температурі обвиток.

У технічній літературі приводять допустимі значення опору ізоляції електричних машин, що ґрунтуються на досвіді експлуатації. В умовах експлуатації опір ізоляції зазвичай вимірюють при різних температурах. Температура ізоляції залежить від багатьох факторів (температури навколишнього повітря, температури обвиток машини, проміжку часу між відключенням машини з електричної мережі і вимірами та ін.) Для порівняння результатів, отриманих при вимірюванні, дані опору ізоляції необхідно перерахувати, при цьому привести їх до однієї температури.

10.1.3. Діагностування міжвиткової ізоляції обвиток електричних машин

Пошкодження міжвиткової ізоляції обвиток є однією з найбільш поширених причин виходу з ладу асинхронних електродвигунів. Для деяких типів електродвигунів в перший період роботи (до 1000 год.) міжвиткові замикання складають до 60% всіх відмов.

Статори електричних машин, які широко застосовуються в народному господарстві, як правило, мають всипну обвитку, намотану проводами круглого перерізу. Максимальний діаметр проводів для виготовлення всипних обвиток електричних машин потужністю до 100 кВт дорівнює 1,62 мм.

Для намотування обвиток асинхронних електродвигунів зазвичай застосовують проводи марки ПЕТВ.

Ізоляція між витками всипних обвиток електричних машин в більшості випадків складається з двох шарів емалі, якою покриті дварозташованих поряд провідника. Крім того, в місцях обвитки, девитки обмотувального дроту не щільно прилягають один до одного, між витками є просочувальний шар лаку, що заповнює порожнечі між проводами. Як приведено в довідкових таблицях, товщина ізоляційного шару проводів ПЕВ і ПЕТВ, якими найчастіше намотують обвитки електричних машин, становить від 0,04 до 0,12 мм.

Напруга між двома поруч розташованими витками обвиток електричних машин визначається з виразу:

$$U_{\text{ме}} = \frac{U_{\phi}}{\omega_{\phi}},$$

де U_{ϕ} – фазна напруга обвитки. В;

ω_{ϕ} – кількість послідовно включених витків обвитки у фазі.

Зазвичай міжвиткова напруга в асинхронних електродвигунах з короткозамкненим ротором не перевищує 10-15 В. Неушкоджена емалева ізоляція проводів, з яких намотуються обвитки електричних машин, має досить високу електричну міцність (4-6 кВ), однак навіть у нових проводах зустрічаються точкові пошкодження шару ізоляційної емалі. Ці ушкодження в умовах експлуатації розвиваються і на їх місці можуть виникнути місцеві осередки ушкоджень міжвиткової ізоляції, тобто місцеві дефекти. Крім того, в процесі роботи електричних машин під дією тривалої теплових та механічних навантажень в шарі ізоляції проводів виникають мікроскопічні тріщини і пори, які також збільшуються і призводять до виходу обвиток з ладу.

Розтріскуванню шару ізоляції проводів також сприяє різниця між коефіцієнтами теплового розширення міді і емалевою плівкою, внаслідок чого за різких змін температури в емалевій ізоляції виникають додаткові механічні напруги.

У зв'язку з малою товщиною ізоляційне покриття проводів досить часто пошкоджується при укладанні обвитки в пази електричних машин, особливо при використанні металевих інструментів. У процесі роботи ці ушкодження також розвиваються, і на їх місці виникає дефект ізоляції.

Основним параметром, що визначає технічний стан ізоляції, є її електрична міцність, що оцінюється значенням пробивної напруги. Як було зазначено раніше, пробивна напруга непошкоджених проводів з емалевою ізоляцією складає 4-6 кВ. Створити таку напругу на міжвитковій ізоляції електричних машин з всипними об витками практично неможливо, тому що в цьому випадку

до ізоляції обвиток відносно корпусу прикладалася б напруга, що перевищує десятки кіловольт, що призвело б до пробоя корпусної ізоляції обвитки.

Для виключення імовірності пробоя корпусних ізоляцій при діагностуванні міжвиткової ізоляції до обвиток електричних машин напругою 380 В можна прикладати напругу не вище 2,5-3 кВ, у зв'язку з чим при діагностуванні реально можна виявити дефекти в міжвитковій ізоляції на певній стадії її розвитку.

Для вивчення процесів розвитку дефектів у міжвитковій ізоляції були отримані залежності пробивної напруги місця дефекту (електричного пробоя) ізоляції між двома витками від часу горіння дуги. Для цього високою напругою пробивалася ізоляція між витками проводів ПЕТВ, потім визначалася напруга, яка виникла, в місці пробоя дуги, і під цією напругою витки витримувалися протягом 10 с. Після відключення напруга знову піднімалась до моменту виникнення дуги і витримувалася протягом 20 с. Збільшуючи тривалість горіння дуги при кожному наступному підйомі напруги на 10 с, досліди проводилися до тих пір, поки не відбувалося повне коротке замикання між витками. Так, після першого пробоя для досліджених ушкоджень міжвиткової ізоляції зниження напруги з 400-1500 В до нульового значення відбулося за 36-270 с горіння дуги. При цьому швидкість зниження напруги пробоя в основному залежить від відстані між провідниками з пошкодженою ізоляцією, площі пошкодження і сили стиснення провідників у місці пошкодження. Чим менша відстань між провідниками в місці пошкодження, більша площа дефекту і більша сила стиснення, тим швидше знижується пробивна напруга місця дефекту.

У зв'язку з тим, що пробивна напруга місця дефекту досить висока (400 В і більше), а перенапруги в витках обвиток електричних машин короточасні і не завжди досягають пробоя, з моменту виникнення дефекту в ізоляції і до повного виткового замикання проходить тривалий час. Це свідчить про те, що за умови застосування надійних методів діагностування виткової ізоляції можливе прогнозування залишкового ресурсу роботи виткової ізоляції.

10.1.4 Визначення температурного режиму обвиток електричних машин

Одним з критеріїв оцінки технічного стану обвиток і деталей електричних машин є температурний режим їх роботи. Порушення температурного режиму зазвичай призводить до різкого зниження терміну служби або до виходу з ладу електрообладнання.

Перегрів окремих місць станини електричних машин змінного струму свідчить про наявність міжвиткового замикання обвиток, а в електричних машинах постійного струму - про замикання обвиток на корпус в двох місцях.

Перегрів обвиток електричних машин може свідчити про перевантаження, неправильне їх з'єднання, про виткові замикання, несправності вентиляційних систем (пошкодження вентиляторів, забруднення вентиляційних каналів) та ін.

Середню температуру обвиток електричних машин визначають за опором постійному струму. Опір вимірюють в холодному стані обвиток і після його нагрівання. При цьому приймається, що температура холодної обвитки дорівнює температурі повітря навколо електричної машини.

Середню температуру нагрітих мідних обвиток електричних машин і апаратів підраховують за формулою:

$$\theta = \frac{R_n - R_x}{R_x} (235 + \theta_x) + \theta_x$$

де R_n , R_x – опір обвитки відповідно в нагрітому і холодному стані, Ом;

θ_x – температура обвитки в холодному стані, °С.

Якщо обвитка електричної машини або апарата виготовлена залюмінію, у формулі число 235 замінюється на 245. Опір обвиток в нагрітому стані вимірюють як можна швидше після відключення електричної машини з мережі, оскільки постійна нагріву обвитки низька.

Перегрів окремих місць станини електричних машин часто свідчить про наявність дефектів в ізоляції обвиток, найпростіше визначається вимірюванням температури поверхні станини термометром. При вимірах кульку термометра обертають фольгою і щільно притискають до поверхні станини електричної машини, температура якої вимірюється. Для ізоляції кульки термометра від навколишнього повітря кульку з фольгою накривають теплоізоляційним матеріалом, наприклад, шаром вати, азбесту, вовни. При вимірах бажано користуватися спиртовими термометрами, оскільки у ртутних термометрах під дією електромагнітних полів крупних електричних машин може виникати додатковий нагрів ртуті вихровими струмами.

10.1.5 Моніторинг стану ізоляції обвитки

Для контролю стану ізоляції електрообладнання в процесі експлуатації застосовуються системи MDR-3/UHF і MDR-M.

MDR-3/UHF (Motor and Generator Diagnostics Relay) – система моніторингу стану ізоляції високовольтних генераторів і електродвигунів по частковим розрядам.

Оцінка технічного стану ізоляції обвитки статора електричної машини і оперативна діагностика дефектів у системі «MDR-3/UHF» проводиться на підставі реєстрації та аналізу розподілу часткових розрядів в НВЧ (UHF – Ultra High Frequency) діапазоні частот. В даний час це найбільш чутливий метод діагностики, що дозволяє виявляти практично будь-які дефекти в високовольтної ізоляції на ранніх стадіях їх виникнення та розвитку.

Прилад «MDR-3/UHF» призначений для постійного моніторингу технічного стану ізоляції електричної машини під робочою напругою. Визначення технічного стану ізоляції здійснюється на основі реєстрації та аналізу інтенсивності й розподілу імпульсів часткових розрядів. Вимірювання проводиться за допомогою спеціальних давачів. Як давачі можуть використовуватися давачі-антени, встановлені для цих цілей виробником

електричних машин або при ремонті машин. Також в якості здавачів можуть використовуватися високочастотні трансформатори струму (давачі марок RFCT) або конденсатори зв'язку (ємнісні опорні ізолятори). У приладі «MDR-3/UHF» реалізований набір сучасних засобів і методів відбудови від зовнішніх перешкод. Завдяки вбудованій у прилад експертній системі «PD-Expert», автоматично проводиться оцінка не тільки рівня часткових розрядів, але і визначається тип дефекту. По всіх каналах реєстрації розрядів вимірювання проводиться одночасно, за рахунок аналізу схеми установки датчиків і різночасності реєстрації імпульсів у різних каналах приладу можна встановити місце дефекту.

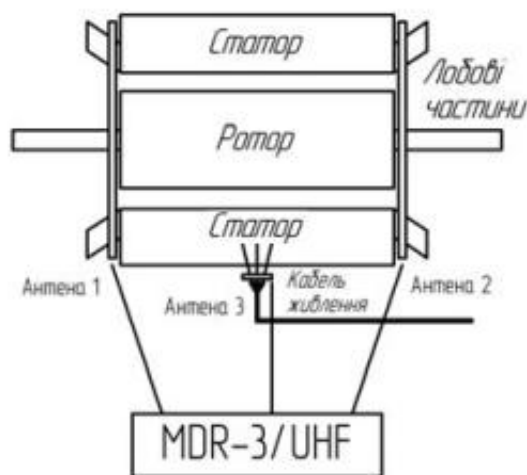


Рисунок 10.1– Схема підключення системи MDR-3/UHF до електродвигуна

Два давачі-антени встановлюються при виготовленні або ремонті електричної машини в лобових частинах (рис.10.1). Третя антена встановлюється на ввіді в машину. При використанні такої схеми вимірювання канали приладу повинні працювати в НВЧ (UHF) діапазоні частот. Частковий розряд – це іскровий розряд дуже малої потужності, який утворюється всередині ізоляції, або на її поверхні, в обладнанні середнього і високого класів напруги. З плином часу, періодично повторювані часткові розряди, руйнують ізоляцію, приводячи в кінцевому підсумку до її пробою. Зазвичай руйнування ізоляції під дією часткових розрядів відбуваються протягом багатьох років. Таким чином, реєстрація часткових розрядів, оцінка їх потужності і повторюваності, а також локалізація місця їх виникнення, дає змогу своєчасно виявити розвиваються пошкодження ізоляції і прийняти необхідні заходи для їх усунення.

Система моніторингу марки «MDR-M» (Motor and Generator Diagnostics Relay) призначена для контролю технічного стану ізоляції обмоток статорів високовольтних турбо- та гідрогенераторів, а також потужних високовольтних електродвигунів так само по частковим розрядам.

Визначення технічного стану ізоляції обмотки статора в системі «MDR-M» проводиться на підставі реєстрації та аналізу розподілу часткових розрядів в ізоляції. Це найбільш чутливий метод діагностики, що дозволяє виявляти

дефекти в ізоляції на ранніх стадіях їх виникнення та розвитку. Крім того, система «MDR-M» має набір вбудованих експертних алгоритмів (система «PD-Expert»), що дозволяють проводити максимально повну обробку первинної інформації, в результаті чого персоналу видаються вже готові висновки про стан контрольованої електричної машини з переліком дефектів.

Таким чином, описані вище сучасні методи моніторингу стану дозволяють проводити оперативну діагностику і відповідно прогнозування основних вузлів електричних машин, знижуючи ймовірність раптових відмов.

10.1.6 Діагностування короткозамкнених обвиток роторів електродвигунів

У зв'язку з виникненням у стрижнях короткозамкнених обвиток роторів асинхронних електродвигунів дефектів, в умовах експлуатації необхідно періодично перевіряти їх технічний стан.

При обривах стрижнів обвиток роторів збільшуються час розгону і додаткові втрати електродвигунів, зменшуються ККД і коефіцієнт потужності, збільшуються споживаний струм та ковзання.

Найбільш шкідливий вплив на роботу електродвигунів чинить вібрація, яка виникає внаслідок обриву стрижнів короткозамкненої обвитки. У результаті вібрація приводить до виходу електродвигунів з ладу.

Проведені дослідження впливу обривів стрижнів на характеристики і вібрацію асинхронних електродвигунів показали, що для електродвигунів єдиних серій допускається обрив не більше одного стрижня.

Діагностування короткозамкнених обвиток роторів без розбирання електродвигунів. Зовнішніми ознаками наявності обривів стрижнів електродвигунів є підвищена вібрація і шум при роботі, що збільшуються із зростанням навантаження.

Характерним є те, що вібрація і шум періодично змінюються з частотою, що дорівнює подвоєній частоті ковзання.

Стрілки амперметрів, включених в ланцюг живлення електродвигунів з обривами стрижнів короткозамкнених обвиток роторів, також періодично коливаються через періодичні зміни ефективних значень струмів у фазах.

На практиці застосовують кілька способів визначення технічного стану короткозамкнених обвиток роторів.

Спосіб вимірювання струмів в обвитках статора при провертанні ротора вручну дозволяє встановити наявність обривів стрижнів в короткозамкнених обвитках асинхронних електродвигунів. Відповідно до цього способу одну або дві фази обвитки статора електродвигуна включають на напругу змінного струму, що дорівнює 10-15% номінального, і при повільному провертанні ротора вручну вимірюють струм в ланцюзі живлення (рис.10.2).

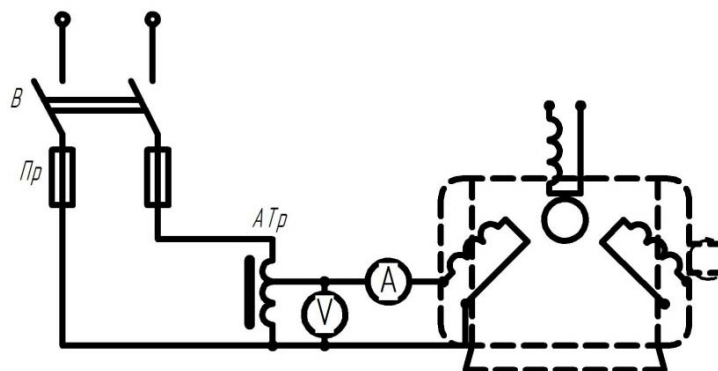


Рисунок 10.2 – Схема для визначення обривів стрижнів короткозамкнених обмоток роторів електродвигунів

Для визначення зміни струму зручно використовувати самописний амперметр. Слід зазначити, що вказаний спосіб більш чутливий до обривів стрижнів при подачі напруги на одну фазу обмотки, ніж при подачі напруги на дві фази. Якщо при обертанні ротора струм в обмотці статора не змінюється, обриви в стрижнях обмотки ротора відсутні. Зміна струму при провертанні ротора вказує на наявність обриву стрижнів. У зв'язку з тим, що зміна струму залежить від кількості пошкоджених стрижнів і їх взаємного розташування, визначити число обірваних стрижнів за відхиленням стрілки амперметра важко. Після виявлення факту наявності обриву стрижнів електродвигун підлягає розбиранню та точному встановленню числа обірваних стрижнів.

Спосіб контролю стрижнів короткозамкнених обмоток роторів заснований на використанні залежності ковзання електродвигунів від числа обірваних стрижнів. При визначенні їх числа у відповідності з цим способом вимірюють ковзання електродвигуна при заданому навантаженні і температурі й отриману величину порівнюють з контрольною, яка вимірюється на електродвигуні з ротором, що не має обривів. Для використання цього способу необхідно мати еталонні криві залежностей ковзання від навантаження для конкретних типів електродвигунів, що обмежує застосування способу при експлуатації електрообладнання.

Для спеціальних електродвигунів, наприклад, заглибних, визначення технічного стану короткозамкнених обмоток традиційними способами є досить трудомісткою операцією. У зв'язку з цим було розроблено два способи визначення технічного стану короткозамкнених обмоток роторів електродвигунів, доступ до яких неможливий або утруднений.

Спосіб визначення ступеня пошкодження короткозамкнених обмоток роторів заглибних асинхронних електродвигунів заснований на положенні, що при нерухомому роторі, що має пошкодження короткозамкненої обмотки, струм у фазах залежить від положення ротора відносно статора. В електродвигунів заглибних насосів полюсний поділ становить 180° , у зв'язку з чим при обертанні ротора, що має дефекти обмоток, період зміни ефективного значення струму фази відповідає половині обороту ротора. Зміна

ефективного значення струму пов'язана зі зміною магнітного опору фази електродвигуна при зміні розташування дефектів обвитки ротора щодо обвитки статора, в якій вимірюють струм. У заглиблених електродвигунах ця зміна порівняно велика. Так, при обриві чотирьох розташованих поруч стрижнів при повороті ротора на один оберт ефективне значення струму змінюється на 42% середньої величини.

Розроблений спосіб дозволяє визначити ступінь пошкодження короткозамкнених обвиток роторів без підйому заглиблених електродвигунів зі свердловини. Спосіб придатний і для контролю інших типів асинхронних електродвигунів, доступ до валів яких важкий або взагалі неможливий. Для визначення технічного стану стрижнів з допомогою порушення фаз обвитки статора ротор електродвигуна повертають на певні кути (кроків обертання). Після кожного повороту обвитку статора підключають до стабілізованої напруги змінного струму і самопишучим амперметром записують струм. Крокові обертання продовжують до тих пір, поки ротор не зробить один оберт.

При відсутності ушкоджень у короткозамкненій обмотці ротора струм буде однаковим при всіх положеннях ротора. Якщо короткозамкнена обвитка ротора має обриви стрижнів, струм буде залежати від положення ротора щодо обвиток статора, при цьому зміна струму буде тим більше, чим більше число стрижнів мають пошкодження. За зміною струмів при різних положеннях ротора в межах одного обороту оцінюють технічний стан короткозамкненої обвитки.

Ступінь пошкодження обвитки ротора при локальному (місцевому) розміщенні дефектів визначають за формулою:

$$\gamma = k_k = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \cdot 100,$$

де γ – ступінь пошкодження обвитки, %;

k_k – коефіцієнт конструктивних особливостей електродвигуна;

$I_{\max}, I_{\min}$ – найбільше і найменше значення вимірюваних струмів, А.

Діагностування короткозамкнених обвиток роторів розібраних електродвигунів. Для визначення технічного стану короткозамкнених обвиток роторів розібраних електродвигунів розроблені різні способи і прилади. Найбільше їх число призначене для виявлення обривів стрижнів обвитки після виготовлення роторів або в процесі виготовлення. У залежності від принципу роботи та схеми ці прилади можна розділити на наступні групи:

1. Прилади трансформаторного типу, що мають кілька обвиток. Звичайно одна з обвиток наводить електрорушійну силу в стрижнях ротора, а інші є вимірювальними. У цих приладах обвитки, як правило, розміщені на магнітопроводі П або Ш – подібного типу.
2. Прилади, що використовують поля розсіювання. Давачі, що входять в комплект приладів, перетворюють поля розсіювання в електричні сигнали і по них визначають технічний стан обвитки ротора.

3. Прилади, в основу яких покладено схеми мостів (індуктивних, індуктивно-активних і індуктивно-ємнісних). Прилади цього типу мають, як правило, збудник у вигляді статора або частини статора з обвитками.
4. Прилади, що використовують принцип зміни магнітного опору в зазорі датчик – ротор. Датчики таких приладів виготовляють у вигляді котушок з великим числом витків.
5. Прилади, що використовують принцип порошково – магнітної дефектоскопії. По стрижнях ротора пропускають струм 300-500 А, який створює сильне магнітне поле. По конфігурації поля орієнтується металевий магнітний порошок, розташований тонким шаром на аркуші паперу або іншого немагнітного матеріалу. Уздовж цілих стрижнів порошок розміщується суцільною смугою, а в місцях обривів стрижнів у смузі порошку є розриви.
6. Прилади, засновані на використанні теплових явищ. Перед випробуванням ротор обертають папером, на який нанесений легкоплавкий склад. Через обвитку ротора пропускають струм, що нагріває стрижні, і легкоплавкий склад над стрижнями без обривів розплавляється. Через стрижні з обривами струм не проходить, і склад не розплавляється.

В останні роки при визначенні технічного стану короткозамкнених обмоток роторів після розбирання електродвигунів широкозастосовують способи і прилади, робота яких заснована на принципі трансформації струмів. Такі прилади дозволяють виявляти не тільки обриви і тріщини в стрижнях, але й ослаблення їх перетину більш ніж на 25%.

10.2 Діагностування підшипників електричних машин

Поряд з ізоляцією обмоток, від технічного стану підшипників залежить працездатність електричних машин. Пошкодження або надмірне зношування підшипників найбільш часто призводить до зачіпання ротора за активну сталь статора і до виходу електричної машини з ладу. Так, дані обстеження технічного стану, що надходять у капітальний ремонт заглиблених електродвигунів свідчать про те, що до 16% електродвигунів доводиться вибраковувати через пошкодження зубців активної стали внаслідок зносу радіальних підшипників.

Зношування підшипників також негативно впливає на робочі та енергетичні характеристики електричних машин. У міру зношення підшипників збільшується нерівномірність повітряного зазору, що призводить до збільшення вібрації, часу розгону електродвигунів; збільшення ковзання електродвигунів; втрат у сталі і додаткових втрат; збільшення нагрівання в зоні найменшого зазору, а головне – до збільшення одностороннього магнітного притягання, яке, в свою чергу, призводить до додаткового навантаження і прискорення процесу зношування підшипників.

Досвід експлуатації свідчить, що продіагностувавши і своєчасно замінивши підшипники, можна значно зменшити кількість відмов і продовжити доремонтний і міжремонтний терміни службиелектричних машин.

Таким чином, ненормальна робота підшипників, супроводжується у першу чергу надмірним збільшенням температури, шумом, витокami мастила, підвищеним опором при обертанні і збільшенні моменту рушіння механізму. Причини тому можуть бути різноманітними, але понад 80% підшипників кочення виходить з ладу внаслідок руйнувань втомного характеру.

Основним завданням проведення своєчасного діагностичногообстеження устаткування є виключно запобігання аварій та їх наслідків, навіть якщо діагностична інформація про наявність дефектубуде отримана на досить пізньому етапі.

Зупинки обладнання для заміни підшипника можуть бути виконані в будь-який час, без якого-небудь збитку для роботи контрольованої установки та технологічного циклу всього підприємства, без порушення загального процесу.

Якщо циклічність проведення ремонтних робіт на контрольованому обладнанні така, що залишився термін служби підшипника здіагностованим дефектом, нехай навіть мінімальний, завжди перевищує час роботи до його виводу в ремонт з інших причин.

Діагностування підшипників без розбирання електричних машин. Для оцінки технічного стану та діагностики дефектів підшипників кочення різними підприємствами і компаніями розроблено досить багато сучасних методів та приладів. Всі ці методи різні засвоїм теоретичним передумовам, мають різну трудомісткість, вимагають різного приладового забезпечення і можуть застосовуватися для різних цілей.

Акустичний контроль технічного стану підшипників широкозастосовується для масової їх перевірки. Так, розроблено ряд стендів, заснованих на вимірюванні акустичних характеристик підшипників. Аналогічні стенди створені і за кордоном. Ці стенди використовують для контролю підшипників на заводах-виробниках. Слід також відзначити, що спектр шуму підшипників у значній мірі залежить від конструкції підшипникового вузла, чистоти і кількості мастила в підшипнику.

За величиною середньоквадратичного значення (СКЗ) віброшвидкості. Даний метод дозволяє виявляти дефекти підшипників на останніх стадіях розвитку дефекту, коли загальний рівень вібрації значно зростає. Даний метод діагностики простий, має нормативну базу, потребує мінімальних технічних витрат і не вимагає спеціального навчання персоналу, застосовується при діагностиці «масового» і порівняно недорогого обертового обладнання.

Діагностика дефектів підшипників кочення за спектрами вібраційних сигналів. Даний метод застосовується на практиці досить часто, хоча і не володіє високою чутливістю, але він дозволяє виявляти, поряд з діагностикою підшипників, велику кількість інших дефектів обертового обладнання. Цей метод дозволяє починати діагностику дефектів підшипників на більш ранніх

етапах, коли енергія резонансних коливань зростає настільки, що буде помітна взагалі картині частотного розподілу всієї потужності вібросигналу.

Діагностика дефектів по співвідношенню пік /фон вібросигналу. Цей метод розроблявся декількома компаніями і має багато різних, приблизно однакових по ефективності, практичних модифікацій. Це метод HFD (High Frequency Detection – метод виявлення високочастотного сигналу), метод SPM (Shock Pulse Measurement – метод вимірювання ударних імпульсів), метод SE (Spike Energy – метод вимірювання енергії імпульсу), а також ще кілька інших, але менш відомих методів. Кращі різновиди цього методу дозволяють виявляти дефекти підшипників кочення на досить ранніх стадіях.

Діагностика дефектів підшипників кочення по спектру обвідної вібраційного сигналу. Даний метод дозволяє виявляти дефекти підшипників на самих ранніх стадіях. Теоретично даний метод діагностики дефектів підшипників кочення може базуватися і на аналізі акустичних сигналів і аналізу вібраційних сигналів. У першому випадку метод називається SEE (Spectral Energy Emitted – аналіз випромінюваної спектральної енергії) і для своєї роботи використовує спеціальний датчик акустичного випромінювання. Найчастіше для такої діагностики використовують акустичні детектори витоків різних модифікацій, що працюють в діапазоні частот до 100 кГц. У цьому випадку вимірювання акустичних параметрів проводиться дистанційно, з деякого віддалення від контролюваного підшипника.

Пристрій для контролю стану підшипників, якій контролюється наявність мастила в підшипниках. Принцип контролю заснований на вимірюванні електричного опору шару мастила в підшипниках. Пристрій складається з електричного кола, в якій послідовно включені омметр, джерело живлення і перевіряється підшипник. При недостатній кількості мастила в підшипниках зменшується опір між тілами кочення та кільцями і омметр вказує на порушення режиму змащення підшипників. Недоліком цього методу є необхідність від'єднувати електродвигун від робочої машини, щоб виключити з вимірювального ланцюга підшипники й інші частини робочої машини або механізму. У зв'язку з тим, що на валу електричної машини встановлено два підшипника, цей метод не дозволяє проводити індивідуальний контроль кожного підшипника окремо.

Спосіб визначення радіальних зазорів в підшипниках без розбирання електродвигунів забезпечує точне вимірювання зазорів в кожному підшипнику без знімання електродвигуна з робочої машини або механізму. Слід зазначити, що радіальний зазор в підшипниках є основним параметром, що характеризує їх технічний стан. Спосіб, заснований на використанні ділянок статора з обвиткою як електромагніту, що притягує ротор в певних радіальних напрямках і вимірює переміщення валу ротора в безпосередній близькості від підшипників. Вимірювати величину переміщення валу ротора можна за допомогою давачів лінійного переміщення або індикаторів годинникового типу. Давачі або індикатори вимірювальними стрижнями встановлюють на валу електродвигуна і кріплять на корпусі за допомогою електромагнітного або механічного

швидкоз'ємного пристосування. При цьому вимірювальні стрижні датчиків повинні бути перпендикулярні до поверхні валу. Експериментальні дані свідчать, що при пропущенні через котушки обмоток асинхронних електродвигунів постійного струму, рівного номінальному, зусилля притягання ротора до статора перевищує масу ротора від 8 до 35 разів в залежності від його положення щодо статора й розташування котушок обмоток. У зв'язку з вищевикладеним при діагностуванні підшипників застосовують постійний струм, який становить 25-30% номінального струму електродвигуна.

Радіальні зазори підшипників електродвигунів не повинні перевищувати допустимих значень, наведених в довідкових таблицях для кожного типу та розміру підшипників. В таблицях приведені номінальні і граничні значення радіальних зазорів в підшипниках, що необхідні для визначення залишкового ресурсу роботи підшипників.

Для діагностування стану підшипників по вібрації існує достатня кількість сучасних приладів, заснованих на вимірі та обробці параметрів вібраційних сигналів. Головною перевагою такого найпростішого та досить інформативного методу діагностики дефектів підшипників кочення електрообладнання по загальному рівню вібрації є те, що для його застосування не потрібно, практично, ніякого додаткового навчання обслуговуючого, а часто і експлуатаційного, персоналу. Крім того, вартість технічного обладнання, необхідного для даного методу діагностики, мінімальна.

Визначення технічного стану підшипників без знімання з валів електричних машин. При поточних ремонтах електричних машин для визначення доцільності подальшої експлуатації або заміни підшипників в обов'язковому порядку вимірюють значення їх радіальних зазорів. При вимірюванні зазорів підшипники не знімають з валів електричних машин, так як зняття і напругування порушують посадку підшипників на вали. Крім того, при зніманні досить часто пошкоджуються тіла кочення підшипників.

Перед визначенням технічного стану підшипники ретельно промивають бензином з додаванням 6-8% за обсягом веретенного або трансформаторного масла і оглядають. Придатні до подальшої експлуатації підшипники не повинні мати на кільцях та тілах кочення викривлення металу і тріщин, лунок, вибоїн, кольорів мінливості, що свідчать про перегрів, глибоку корозію, відшарування металу, рисок та забоїн на бігових доріжках. Сепаратори підшипників не повинні мати наскрізних тріщин, відламів, ослаблених заклепок, забоїн і вм'ятин, що перешкоджають вільному і плавному обертанню кілець підшипників.

Справні підшипники повинні легко обертатися, при цьому не повинно спостерігатися пригальмовування і заїдання. Обертання підшипників повинне супроводжуватися глухим шиплячим звуком, різке металеве деренчання не допускається. Простір між обоймами зкульками набивають мастилом по всьому колу.

Основним діагностичним параметром, за яким вибирають підшипники, є радіальний зазор. Для вимірювання радіального зазору в підшипниках

електродвигунів без знімання з валів розроблено пристосування КІ-6178 (рис.10.3). Його також можна застосовувати для вимірювання зазорів в підшипниках синхронних генераторів, зварювальних генераторів, що обертаються, перетворювачів та інших електричних машин.

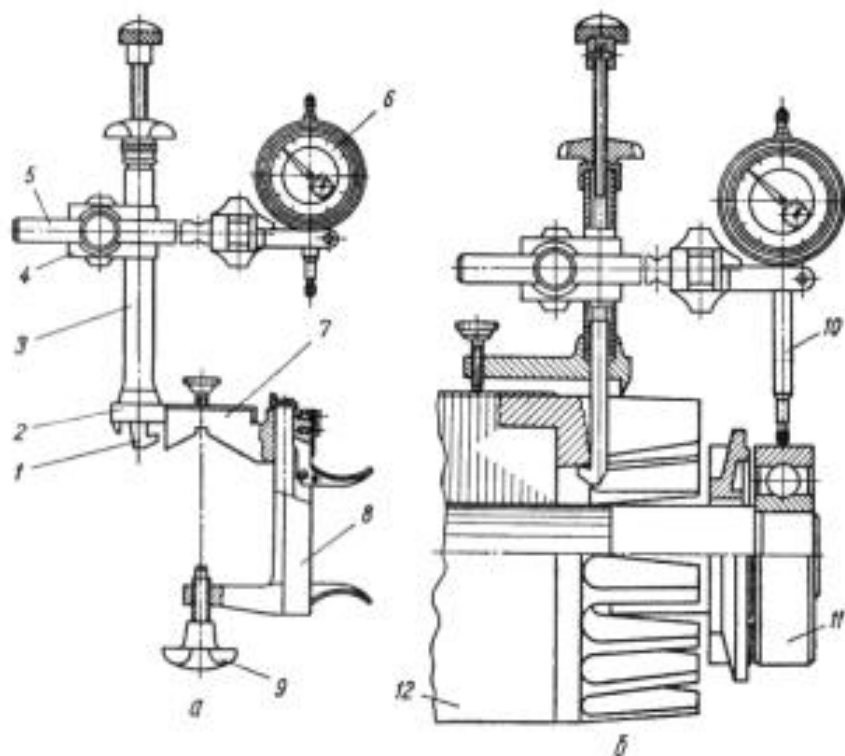


Рисунок 10.3 – Пристосування КІ-6178 для вимірювання радіального зазору підшипників електродвигунів без знімання з валу (а) і його кріплення на роторі електродвигуна (б): 1 – захоплювач; 2 – основа; 3 – вертикальна стійка; 4 – повзун; 5 – горизонтальна стійка; 6 – індикатор; 7 – призма; 8 – затиск; 9 – гвинт; 10 – ніжка індикатора; 11 – підшипник; 12 – ротор

До вимірювання зазорів в підшипниках короткозамкнених роторів пристосування кріплять на краю бочки ротора попередньо знявши призму 7 з затиском 8, а перед виміром зазорів в підшипниках фазних роторів електродвигунів, якорів синхронних і зварювальних генераторів, перетворювачів та інших електричних машин – на їх валах. При вимірі рукою переміщують зовнішнє кільце підшипника вгору і вниз і по різниці показань індикатора визначають радіальний зазор в підшипнику. На встановлення пристосування і вимірювання зазорів в підшипниках йде не більше 3-4 хв.

10.3 Визначення технічного стану магнітопроводів електричних машин

Технічний стан активної сталі зазвичай визначають при поточних або капітальних ремонтах електричних машин у випадках, коли зовнішнім оглядом виявлені місця перегріву або пошкодження ділянок сталі. Основними

критеріями для оцінки технічного стану активної сталі є температура при нагріванні сталі індукційним методом і питомі втрати в сталі.

Для оцінки стану сталі з електричної машини виймають ротор або якор, заземляють обмотку статора, а на станину намотують робочу і контрольну обмотки, як це показано на рис.10.4.

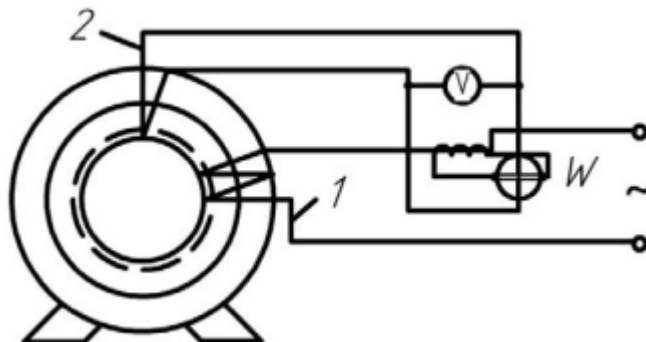


Рисунок 10.4– Схема для визначення технічного стану магнітопроводів електричних машин: 1 – робоча обмотка для намагнічування; 2 – контрольна обмотка

За допомогою робочої обмотки в активній сталі статора наводиться індукція, що дорівнює 1 Тл. Наведену індукцію вимірюють за допомогою контрольної обмотки. За показаннями вольтметра, включеного на затискачі контрольної обмотки, визначають індукцію з виразу:

$$B_c = \frac{10^4 U}{4,44 w f q},$$

де U – напруга на контрольній обмотці, В;

q – перетин активної сталі статора, см²;

f – частота напруги живлення робочої обмотки, Гц;

w – число витків контрольної обмотки.

За ватметром визначають втрати P_c в сталі статора електричної машини, приведені до індукції 1 Тл за формулою:

$$P_c = P_1 \left(\frac{1}{B_c} \right)^2,$$

де P_1 – втрати, виміряні ватметром, Вт.

Знаючи втрати і масу сталі, обчислюють питомі втрати у сталі за виразом:

$$\rho = \frac{P_c}{G_c},$$

де G_c – маса активної сталі статора, кг.

Технічний стан магнітопроводу вважається задовільним, якщо питомі втрати в сталі не перевищують 2,5 Вт/кг.

Для визначення місць пошкоджень ізоляції між листами сталі (замикання аркушів) магнітопровід нагрівають індукційними втратами при індукції 1 Тл протягом 1 год. Якщо після закінчення години нагрівання температура поверхні

магнітопроводу в розточенні рівномірною, а питомі втрати не перевищують 2,5 Вт/кг, технічний стан сталі вважається задовільним. Нерівномірне нагрівання поверхні розточення статора свідчить про наявність місцевих порушень ізоляції між листами активної сталі. У потужних електричних машинах технічний стан сталі вважається задовільним, якщо при індукції 1 Тл максимальний перегрів зубців не перевищує 45°C, а найбільша різниця температур в найбільш холодних і гарячих місцях не перевищує 30°C.

Для зібраних електродвигунів втрати в активній сталі можна визначити в режимі холостого ходу. При х.х. потужність P_0 , споживана електричним двигуном з мережі живлення, витрачається на покриття втрат у сталі P_c і механічних втрат P_m . Оскільки при х.х. електродвигунів потужність, споживана ними з мережі живлення, лінійно залежить від квадрата напруги, вимірявши і побудувавши графік цієї залежності, можна легко визначити механічні втрати, а потім і втрати в сталі. Для цього ватметром вимірюють потужність, яку споживає електродвигун в режимі х.х. при різних значеннях напруги, що підводиться (наприклад, при $0,75U_n, 0,5U_n, 0,25U_n$). Потім за отриманими даними будують графік (рис.10.5) залежності споживаної потужності від квадрата напруги $P_0 = P_c + P_m = f(U_0)^2$.

Подовживши лінію залежно $P_c + P_m = f(U_0)^2$ до перетину з віссю ординат (точка n) визначають механічні втрати (відрізок 0- n), тому що при напрузі, що дорівнює нулю, втрати в сталі також дорівнюють нулю. Якщо через точку n провести пряму, паралельну осі абсцис, то на графіку ця пряма являє собою механічні втрати, які при х.х. асинхронних електродвигунів можна прийняти незмінними, так як частота обертання електродвигунів практично не залежить від напруги.

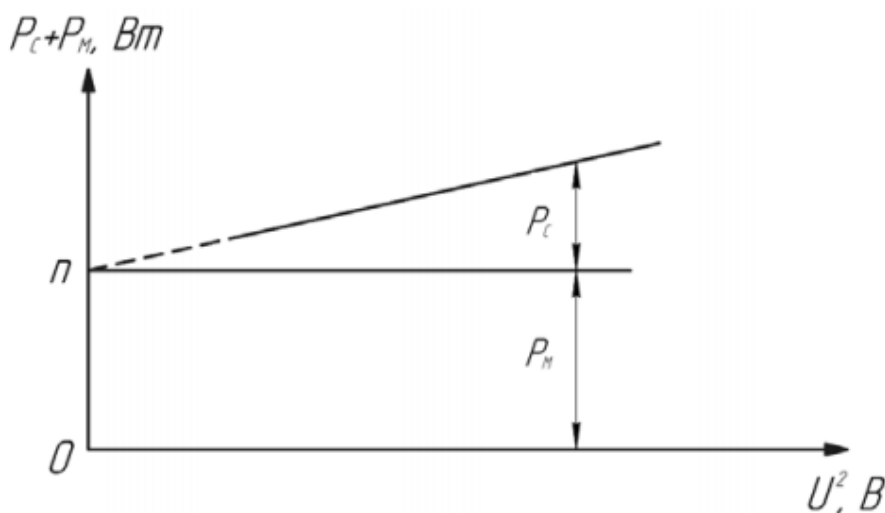


Рисунок 10.5— Поділ втрат при х.х. електродвигунів:
 P_c — втрати в сталі; P_m — механічні втрати

Втрати в активній сталі обчислюють як різницю втрат х.х. при номінальній напрузі і механічних втрат:

$$P_c = P_0 - P_m$$

Визначивши втрати у сталі і знаючи з технічної документації масу сталі, обчислимо питомі втрати, які не повинні перевищувати 2,5 Вт/кг.

Приблизно технічний стан активної сталі електродвигунів можна визначити за значенням струму $x.x$. при номінальній напрузі, який для різних серій не повинен перевищувати значень, наведених в довідкових таблицях.

10.4 Визначення технічного стану колекторів, контактних кілець і щіткового механізму

10.4.1 Контроль стану колектора і контактних кілець

Колектор є одним з найбільш складних вузлів електричних машин як за кількістю деталей, так і за технологією його виготовлення. Під час роботи на колектор діють відцентрові сили, вібрація, нагрів. У процесі роботи геометрія і стан колектору повинні відповідати вимогам забезпечення надійного контакту з щітками.

Контактні кільця електричних машин (асинхронних електродвигунів з фазним ротором, синхронних генераторів та ін.) працюють в порівнянні з колектором в менш напружених умовах, але і доних пред'являються високі вимоги. Слід зазначити, що знос колектору та контактних кілець в значній мірі залежить від роботи щіткового механізму. При технічному обслуговуванні стан колекторів та контактних кілець звичайно визначається оглядом, і тільки в необхідних випадках проводять вимірювання (наприклад, при потемнінні поверхні колекторних пластин в місцях припаювання виводів обвитки вимірюють падіння напруги в місці пайки).

Велику інформативність містить в собі політура, що покриває поверхню колекторних пластин. Політура нормально працюючого колектору має однаковий колір по всьому колектору. Пробій шару політури у вигляді світлих плям з точками-поглибленнями свідчить про перевантаження струмом колектору. Якщо на поверхні колектору спостерігаються світлі й темні смуги, що чергуються, то можна твердити про нерівномірність розподілу струмового навантаження між паралельно включеними щітками, тобто про несправність щіткового вузла. Потемніння півників колекторних пластин свідчить про порушення пайки між колекторними пластинами і виводами обвитки якоря.

Зазвичай при діагностуванні колекторів та контактних кілець контролюють діаметр і биття поверхні колектору та контактних кілець, профіль колектору та стан контактів в поєднанні колекторних пластин з обвиткою.

Вимірювання діаметра колектору та контактних кілець проводять, щоб визначити, чи не перевищив знос колекторних пластин допустимої величини. Мінімальне значення діаметра колектору визначають, виходячи з допустимої висоти колекторних пластин. Їх висота не повинна бути меншою, ніж це зазначено в табл.9.1. Діаметр контактних кілець асинхронних електродвигунів з

фазним ротором не повинен бути менше допустимого значення, наведеного також у відповідній довідковій таблиці.

Таблиця 10.1 - Висота колекторних пластин електричних машин

Висота колекторних пластин, мм	
номінальна	допустима
16-19	11-12
20-29	13-19
30-39	20-27
40-49	28-35
50-80	36-60

Контроль биття поверхні колекторів та контактних кілець можна проводити як при зібраній електричній машині, так і після її розбирання. Биття зазвичай вимірюють індикатором годинникового типу, закріпленим на штативі.

При визначенні биття колектору або контактних кілець у зібраній електричній машині якір або ротор повільно повертають вручну і стежать за показаннями індикатора. Якщо електрична машина розібрана, то для виміру биття колектору або кілець якір або ротор встановлюють у центрах і також повертають навколо осі. При вимірах ніжка індикатора повинна бути перпендикулярною до поверхні колектору або кільця. Значення биття визначають по різниці між найбільшим і найменшим показниками індикатора. Як правило, биття колектору не повинно перевищувати 0,05-0,06 мм, а биття контактних кілець – 0,3 мм. Для визначення допустимого значення биття колектора в залежності від його діаметру і номінальної частоти обертання можна скористатися формулою:

$$\delta = 0,047 \frac{D^{0,16}}{n_n},$$

де D – діаметр колектору, мм;
 n_n – номінальна частота обертання, хв^{-1} .

Биття колекторів та контактних кілець усувають проточуванням їх поверхні на токарних верстатах.

Контроль профілю є важливим елементом у процесі діагностування колектору. Необхідність такого контролю обумовлена тим, що при експлуатації зустрічаються випадки ослаблення кріплення колекторних пластин, внаслідок чого деякі з них виступають над поверхнею і порушують нормальне контактування між щітками і колектором. Це призводить до вібрації щіток під час роботи і, як наслідок, до їх прискореного зношування.

Перед контролем профілю колектор ретельно оглядають, звертаючи увагу на глибину залягання міканітових прокладок між колекторними пластинами. Внаслідок швидшого зносу мідних пластинок колектору в порівнянні з міканітовими прокладками, між пластинами часто спостерігається виступання прокладок над поверхнею колектору. При цьому виникає вібрація щіток, збільшується тертя і порушується контакт між щітками і пластинами колектору.

У разівиступання прокладок їх продорожують, добиваючись глибини залягання щодо поверхні колекторних пластин 0,5-0,7 мм.

Найбільш простим способом контролю профілю колектору, який широко застосовується практиками, є нагрівання його поверхні. При контролі колодку, виготовлену з твердих порід дерева (бук, дуб тощо), за допомогою важеля притискають на кілька секунд до поверхні колектору, який швидко обертається. Після появи слабого диму колодку відводять від колектору, зупиняють електричну машину і оглядають поверхню колекторних пластин. Виступаючі над поверхнею колектору пластини мають більш темний колір в порівнянні з іншими у зв'язку з більш сильним нагріванням, оскільки натискання на них дерев'яної колодки було великим.

Важливе значення при діагностуванні електричних машин має контроль контактів в місцях з'єднання колекторних пластин з обмоткою якоря. При порушеннях пайки на гребінцях колекторних пластин спостерігаються сліди потемніння. Порушення пайки або обривизазвичай визначають виміром падінь напруги в місцях з'єднання колекторних пластин з обмоткою якоря. При погіршенні контакту свідчення мілівольтметра будуть максимальними.

З'єднання проводів обмотки з колекторними пластинами вважається задовільним, якщо відхилення показань мілівольтметра становлять не більше $\pm 10\%$ середнього значення.

10.4.2 Визначення технічного стану щіткового механізму

Від роботи щіткового механізму значною мірою залежить надійність роботи електричної машини. Щітки є одним з найбільш схильних до інтенсивного зносу деталей щітково-колекторного вузла. У результаті зносу щіток зменшується натискання на них пружин щіткового механізму, а між щітками і колектором виникає інтенсивне іскріння, яке, у свою чергу, призводить до прискорення зносу щіток і колектору (електричне зношування).

Стан щіток електричних машин визначається оглядом (повинні мати чисту блискучу робочу поверхню без рисок та тріщин) і виміром висоти штангенциркулем. Висота щіток, наприклад, асинхронних електродвигунів з фазним ротором не повинна бути меншою допустимих значень, наведених у довідковій таблиці, де всередньому вони становлять 50% від номінальних.

Якщо щітка в поперечних напрямках має порівняно велике переміщення щодо обойми щіткотримача, то вимірюють зазор між щіткою і обоймою. Виміряні за допомогою щупів зазори між щітками і обоймами повинні знаходитися також у межах, зазначених у відповідній довідковій технічній літературі.

У зв'язку з тим, що на знос колектору і щіток великий вплив чинить натискання пружин, при діагностуванні щітковоколекторного вузла обов'язковою операцією є вимір натискання. Як недостатнє, так і надмірне натискання пружин призводить до прискореного зносу колектору і щіток. При

надмірному натисканні спостерігається в основному механічне зношення колектору і щіток.

Натискання пружин щіткового механізму електричних машин вимірюють динамометром. Перед вимірами між щіткою і колектором або контактним кільцем закладають стрічку тонкого паперу. Гачок динамометра чіпляють за пружину щікотримача таким чином, щоб поздовжня вісь динамометра збігалася або була паралельною поздовжній осі щітки і, одночасно докладаючи відповідних зусиль до динамометру і до смужки паперу, зчитують свідчення на шкалі динамометра в момент початку звільнення паперу.

Натискання пружин щікотримачів асинхронних електродвигунів з фазним ротором приведено в довідковій таблиці. Зазвичай величезних машин пружини повинні забезпечувати рівномірний тиск на щітки в межах 0,12-0,2 кгс/см².

10.4.3 Перевірка і регулювання комутації машин постійного струму

На зношування колектору і щіток, а також на надійність роботи машин постійного струму (збудників синхронних генераторів, зварювальних генераторів, перетворювачів та ін.) значний вплив чинить комутація, яка оцінюється згідно ДСТУ за ступенем іскріння щіток при номінальній напрузі і силі струму електричних машин.

Ступінь іскріння щіток класифікується за класами комутації. Клас комутації встановлюється згідно з даними табл. 10.2 по іскрінню під збігаючим краєм щіток.

Ступінь іскріння щіток перевіряється після того, як встановиться температура обв'язки машини (зазвичай через 1-2 години після початку роботи). Якщо ступінь іскріння щіток при доброму стані поверхні колектору перевищує 1½, то щітки повинні бути встановлені на нейтраль одним із таких способів.

Таблиця 10.2 - Дані іскріння щіток

Ступінь іскріння (клас комутації)	Характеристика ступеня іскріння	Стан колектору і щіток
1	Відсутність іскріння (темна комутація)	Відсутність почорніння на колекторі і нагару на щітках
1¼	Слабке точкове іскріння під невеликою частиною щітки	Відсутність почорніння на колекторі і нагару на щітках
1½	Слабке іскріння під більшою частиною щітки	Поява слідів почорніння на колекторі, які легко видаляються протиранням поверхні колектору бензином, а також поява нагару на щітках
2	Іскріння під усім краєм щітки (допускається тільки при	Поява слідів почорніння на колекторі, які не можна

	короткочасних поштовхах навантаження і при перевантаженнях)	усунути протиранням поверхні бензином, а також слідів нагару на щітках
3	Значне іскріння під усім краєм щітки з наявністю великих івилітаючих іскор. Допускається тільки для моментів прямого (без реостатних ступенів) включення або реверсування машин, якщо при цьому колектор та щітки залишаються в стані, придатному для подальших робіт	Значне почорніння на колекторі, не усуває протирання поверхні колектору бензином, а також підгар і руйнування щіток

Спосіб імпульсів. До обвитки збудження машини постійного струму через переривник або перемикач під'єднують батарею з напругою 2-4 В, а до щіток – мілівольтметр. Переривником або перемикачем періодично вмикають і вимикають батарею. При цьому стрілка мілівольтметра відхиляється на певний кут. Повертаючи траверсу з щітками, знаходять такий стан щіток щодо колектору, при якому замикання і розмикання ланцюга збудження не буде викликати відхилення стрілки мілівольтметра. Якщо внаслідок невеликої несиметрії розташування щіток і колекторних пластин при різних положеннях якоря нейтраль зміщуватиметься, вибирається таке розташування щіток, при якому максимальні відхилення стрілки мілівольтметра в одну або в іншу сторону при різних положеннях якоря рівні між собою. Потім траверсу закріплюється і перевірка повторюється.

Спосіб максимальної напруги. До щіток машини постійного струму приєднують вольтметр, встановлюють номінальні обороти машини і збуджують збудник. Переміщуючи траверсу разом із щітками, знаходять положення траверси, при якому напруга буде найбільшою.

10.5 Діагностування електричних апаратів

10.5.1 Діагностування ізоляції котушок низьковольтних апаратів

Більшість низьковольтних апаратів (магнітні пускачі, реле та ін.) мають котушки, що намотані на пластмасових каркасах. Така конструкція котушок забезпечує надійну їх ізоляцію щодо магнітопроводів і значно скорочує механічні пошкодження котушок. Узв'язку з цим при визначенні технічного стану ізоляції котушок щодо магнітопроводів та інших заземлених частин низьковольтних апаратів звичайно обмежуються вимірюванням опору ізоляції

катушок щодо магнітопроводу або заземлених частин апаратів. Значно складніше при діагностуванні катушок низьковольтних апаратів визначити, чи є в міжвитковій ізоляції ушкодження, які можуть призвести до міжвиткового замикання.

Наявні замикання між витками катушок на практиці виявляються порівняно простими пристосуваннями. Один з таких пристроїв показано на рис.10.6.

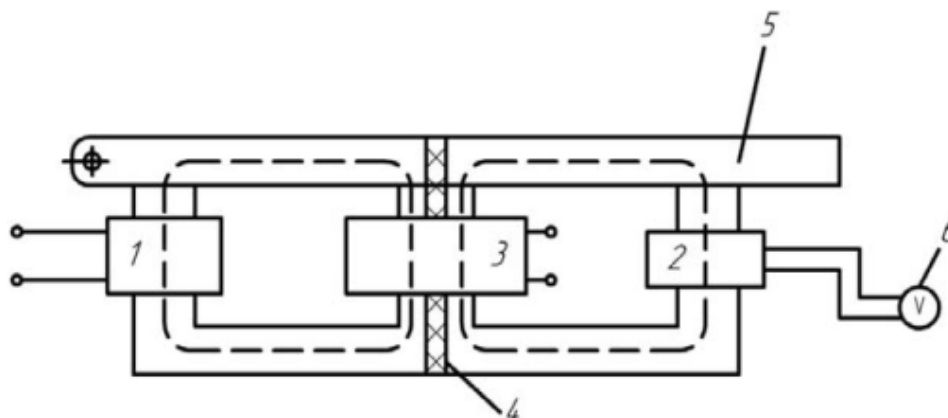


Рисунок 10.6 - Пристрій для визначення короткозамкнених витків в обмотках катушок

Пристосування є магнітою системою у вигляді трансформатора з двома роз'ємними магнітопроводами, які не мають між собою магнітної зв'язки і розділені немагнітною прокладкою. На одному магнітопроводі пристосування розміщена намагнічуюча обмотка – 1, а на другому вимірювальна обмотка – 2, до затисків якої приєднані електровимірювальні прилади – 6. Катушка – 3, перевіряється на відсутність короткозамкнених витків, надягається на суміжні стрижні магнітопроводів, розділених прокладкою – 4.

Після замикання відкидного якоря – 5 на намагнічувальну обмотку – 1 подається змінний струм. Якщо в обмотці катушки – 3 є коротко-замкнені витки, то в них під дією електромагнітного потоку, створеного намагнічувальною обмоткою – 1, індукуються струми. У свою чергу, цей струм створює в магнітопроводі з вимірювальною катушкою – 2 електромагнітний потік, в катушці – 2 наводиться електрорушійна сила і стрілка приладу відхиляється на певний кут. Якщо в контрольованій катушці короткозамкнені витки відсутні, у вимірювальній катушці напруга не індукують і стрілка приладу не відхиляється.

10.5.2 Діагностування контактних систем низьковольтних апаратів

До контактних систем відноситься до 60% всіх відмов низьковольтних апаратів. В основному відмови виникають унаслідок механічного та електричного зносу робочих поверхонь контактів, виникнення на них плівок, забруднення, а також через втрату пружних властивостей контактних пружин, пошкодження або старіння ізоляційних матеріалів між контактами.

Важливим параметром контактних з'єднань є перехідний опір. Перехідний опір контактів апаратів залежить від струму, характеру навантаження, сили стискування контактів, матеріалу контактів, середовища, що оточує апарат, і ін. Залежність опору контактів відповідно до теорії Хольма та його послідовників можна записати таким виразом:

$$R_k = \frac{\varepsilon}{P_k^m},$$

а у відповідності з теорією Чельчіна:

$$R_k = \frac{\varepsilon}{P_k^m} + k_0$$

де ε – коефіцієнт, що враховує фізичні властивості матеріалу контактів і стан контактної поверхні;

P_k – статичне натискання контактів;

m – коефіцієнт форми контактів (0,3–1);

k_0 – коефіцієнт, що враховує опір тіла контактів або додатковий опір, що створюється плівками на поверхні контактів.

Від струму і опору залежить робоча температура контактів. На практиці для контролю контактних з'єднань вимірюють падіння напруги при проходженні через контакти постійного струму від джерела живлення з напругою 2-5 В. При вимірі опору випробувальний струм повинен бути рівним номінальному.

Втрати напруги на контактах не повинні перевищувати наступних значень: у магнітних пускачів і автоматичних вимикачів при номінальному струмі вище 50 А – 70 мВ, у автоматичних вимикачів з номінальним струмом менше 50 А – 110 мВ, у апаратів з ковзаючими контактами (рубильники, пакетні вимикачі) – 10 – 20 мВ. Падіння напруги на контактах магнітних пускачів 5 і 6 габаритів і автоматичних вимикачів з номінальними струмами, що не перевищують 200 А, зазвичай вимірюють при пропущенні через контакти струму, що становить не менше 20% номінального.

Для порівняння з допустимими значеннями виміряні втрати напруги необхідно перерахувати для приведення їх до номінального значення струму апарата за формулою:

$$U_n = \frac{\Delta U_\varepsilon I_n}{I_\varepsilon},$$

де ΔU_n – втрати напруги, наведені до номінального струму апарата, мВ;

ΔU_ε – виміряні втрати напруги, мВ;

I_n – номінальний струм апарата, А;

I_ε – струм, при якому вимірювалися втрати напруги, А.

Результати спостережень за станом низьковольтних апаратів показують, що однією з основних причин відмов є знос контактів, який призводить до зменшення товщини контакту або контактної напайки і до втрати форми поверхні контактування. Зменшення товщини контактів викликає ослаблення

сили стискання контактів, узв'язку з чим погіршуються умови контактування і підвищується температура контактів.

Найбільш важливим параметром, що характеризує зношування контактів низьковольтних апаратів, є провал контактів. Він дорівнює ходу рухомої системи апарата з моменту замикання контактів до моменту замикання магнітної системи. У процесі експлуатації апаратів при зносі контактів провали зменшуються. Дослідження та досвід експлуатації показують, що між значенням провалу контактів і напрацюванням є кореляційний зв'язок. Так, наприклад, при напрацюванні 700 тис. циклів провал контактів зменшується в середньому на 35%.

Провал контактів з певним ступенем точності в заданий момент часу можна обчислити за виразом

$$P_k = P_0 - vt,$$

де P_0 – початкове значення провалу, мм;

v – швидкість зміни провалу, мм/тис. год. або мм/тис. циклів;

t – напрацювання, тис. год. або тис. циклів.

У магнітних пускачів провали контактів визначають в замкнутому положенні з переміщення повідця, на якому закріплений контактний місток, від початку до повного замикання контактів. Раніше провали перевірялися щупами, товщина яких дорівнювала припустимим значенням провалів.

Момент початку замикання контактів зазвичай визначають зазагорянням лампочки, включеної послідовно з батареєю і контактами.

Провали магнітних пускачів повинні відповідати даним, наведеним в довідковій таблиці для відповідного типу. Провали контактів автоматичних вимикачів перевіряють штангенциркулем і набором щупів. Контакти автоматичних вимикачів вибраковують, якщо провали контактів складають менше 0,5 мм. При необхідності провали автоматичних вимикачів регулюють згідно табличних даних.

Важливим параметром для оцінки технічного стану контактної системи низьковольтних апаратів є натискання контактів. Зменшення величини натискання контактів у процесі експлуатації свідчить як про знос контактів, так і про стан контактних пружин.

Вимірювання показують, що зменшення провалу контактів, що характеризує величину їх зносу, обов'язково супроводжує зменшення кінцевого натиснення, що також сприяє збільшенню швидкості зносу контактів. Зменшення провалу контактів на невелику величину при значному зменшенні кінцевого натиснення вказує на втрату пружних властивостей контактних пружин.

Працездатність контактів магнітних пускачів, автоматичних вимикачів і реле залежить і від зусилля натискання контактів. Тому в процесі експлуатації періодично визначають і при необхідності регулюють зусилля початкового та кінцевого натиснення контактів. Зусилля натискання контактів вимірюють таким чином. Послідовно з контактами включають лампочку з батареєю для точного визначення моменту розмикання контактів. Рухомий контакт за

допомогою спеціальної підвіски, закріпленої на гаку динамометра, повільновідтягують до моменту, коли згасне лампочка, яка вказує на розмикання контактів. В момент розмикання за шкалою динамометра визначають зусилля натискання, яке повинно відповідати даним довідкових таблиць.

При вимірі лінія дії зусилля повинна бути перпендикулярною до площин контактів. Початкове натискання регулюють підкладанням шайб під контактну пружину. Якщо таким чином натискання відрегулювати не можна, пружину замінюють новою. При визначенні кінцевого натиснення контактів на котушку магнітного пускача подають номінальну напругу і відтягують рухливий контакт за допомогою підвіски і динамометра. В момент розмикання контактів за шкалою динамометра визначають зусилля кінцевого натиснення контактів, яке також повинно відповідати даним, наведеним у відповідних довідкових таблицях. Зусилля кінцевого натиснення регулюється так само, як і початкового.

10.5.3 Контроль напруги втягування і відпуску якорів магнітних пускачів

Перед контролем напруги втягування і відпускання якоря перевіряють роботу рухомої частини пускача включенням від руки, а потім при подачі на котушку номінальної напруги. При включенні від руки рухома система пускача повинна вільно переміщатися, а при подачі напруги на котушку негайно включатися без затримок в проміжних положеннях. Для визначення напруги втягування і відпускання якорів магнітних пускачів спочатку на їх котушки подають напругу, рівну 80% номінальної. Магнітний пускач повинен чітко включатися без зупинок або помітних затримок рухомої системи. При напрузі, що дорівнює 80% номінальної, допускається помірний шум магнітної системи, який не повинен переходити в деренчання. Збільшення напруги втягування вище 85% зазвичай свідчить про збільшення повітряного зазору між якорем і серцевиною (при кількості витків в котушці згідно з паспортними даними).

Для перевірки напруги відпускання якоря на затискачі котушки подають номінальну напругу, а потім плавно його знижують і вимірюють в момент відпускання якоря. Напруга відпускання має складати не більше 70% номінальної. Крім того, перевіряють включення пускача при зниженій напрузі, що дорівнює 60% номінальної. Котушка не повинна включати пускач при цій і меншій напрузі.

Вимірювання напруги втягування, відпускання і перевірку включення пускача при зниженій напрузі можна проводити за допомогою автотрансформатора типу ЛАТР чи РНО, підвищувального трансформатора і вольтметра типу Е-59/1 з межами виміру 75-150-300-600 В. Для регулювання напруги при вимірах можна також використовувати високоомний реостат, включений за схемою дільника напруги.

10.5.4 Перевірка роботи елементів електромагнітних розчіплювачів автоматичних вимикачів

Перевірка роботи елементів електромагнітних розчіплювачів зазвичай зводиться до визначення струму, при якому спрацьовує розчіплювач, однак порядок перевірки розчіплювачем різних серій автоматичних вимикачів має свої особливості. Елементи електромагнітних розчіплювачів автоматичних вимикачів серії АЗ100 перевіряють наступним чином. За допомогою схеми або приладу встановлюють струм, що проходить через полюси автоматичних вимикачів на 30% менше від номінального значення струму уставки електромагнітного розчіплювача, наведеного в довідковій таблиці. При цьому вимикач не повинен відключатися. Потім плавно збільшують струм до значення, при якому спрацьовує розчіплювач. Струм спрацьовування вимикача АЗ110 (АЗ113/5, АЗ114/5) не повинен перевищувати струм уставки електромагнітного розчіплювача більш ніж на 30%, а вимикачів типу АЗ120 (АЗ123, АЗ124), АЗ130 (АЗ133, АЗ134), АЗ140 АЗ143, АЗ144) - на 15%. Вимикач повинен відключатися при спрацьовуванні кожного електромагнітного елемента.

Для перевірки елементів електромагнітних розчіплювачів автоматичних вимикачів серії АП50 спочатку встановлюють значення випробувального струму на 15% менше струму уставки електромагнітного розчіплювача. При цьому вимикач не повинен відключатися. Повільно збільшуючи, відраховують струм, при якому автоматичний вимикач відключиться. Струм спрацьовування електромагнітного розчіплювача автоматичних вимикачів серії АП50 не повинен перевищувати значень, більш ніж на 15%.

При перевірці електромагнітних розчіплювачів автоматичних вимикачів з тепловими та електромагнітними елементами може трапитися, що тепловий елемент відключить вимикач раніше, ніж спрацює електромагнітний розчіплювач. Щоб переконатися, що вимикач виключився від електромагнітного елемента, необхідно відразу ж включити його. Нормальне включення свідчить, що вимикач був відключений електромагнітним елементом. При спрацюванні теплового елемента вимикач не можна включити до тих пір, поки не остигне елемент.

При перевірці розчіплювача мінімальної напруги автоматичних вимикачів серії АП50 на затискачі котушки розчіплювача подають напругу, рівну 80% номінальної, і включають вимикач. Вимикач повинен чітко включитися. Після цього плавно зменшують напругу на котушці і вимірюють напругу, при якій вимикач відключиться. Ця напруга повинна бути не менше 50% номінальної напруги.

10.5.5 Визначення технічного стану і налаштування елементів теплового захисту

Від надійності роботи теплових реле і розчіплювачів автоматичних вимикачів, які є основним захистом електрообладнання від перевантаження, в значній мірі залежить термін служби електропроводів і електроустановок.

Для захисту електрообладнання широко застосовують теплові реле ТРН, ТРП, ТРА і ТРВ. Діапазон номінальних струмів реле ТРН становить від 0,5 до 40 А, ТРП – від 25 до 150 А, ТРА – від 7 до 200 А, ТРВ – від 7 до 200 А. Для визначення технічного стану теплові реле уважно оглядають і вимірюють товщину контактів. Контакти підлягають заміні, якщо їх товщина складає менше 0,5 мм. Слід зазначити, що при товщині контактів менше 0,5 мм реле ТРА та ТРВ підлягають вибракуванню.

Нагрівачі теплових реле вибраковуються при замиканні витків, розкритті скріпок (реле ТРН), вигині нагрівача та його зближенні з біметалевою пластиною, а також при вигоранні металу. Біметалеві пластини вибраковуються при деформації і обгоранні. При наявності такого дефекту реле ТРН вибраковується в зібраному вигляді. Контактний тиск перевіряють натисканням голівкою графометра на рухому систему реле, як це показано на рис. 10.7. Розчин контактів вимірюють щупами. Виміряні значення контактної тиску і розчинів контактів теплових реле порівнюють зі значеннями для відповідного типу реле в довідкових таблицях і роблять висновок про вибракування у разі перевищення встановленого діапазону зазначених параметрів.

Після визначення тиску і розчину контактів визначають запрограмований час і повернення реле. Для цього реле підключають до затискачів приладу, що дозволяє плавно регулювати струм в широких межах.

Для визначення часу спрацювання через реле пропускають випробувальний струм, що дорівнює $1,05I_n$. При температурі 20°C (293 К) реле не має спрацювати протягом години.

Потім струм збільшують до $1,2I_n$ і переконуються в тому, що реле спрацює протягом 20 хв. Якщо запрограмований час не відповідає зазначеним значенням, реле регулюють за допомогою важеля плавного регулювання або регулювальними гайками. Якщо відрегулювати реле не вдається, його замінюють.

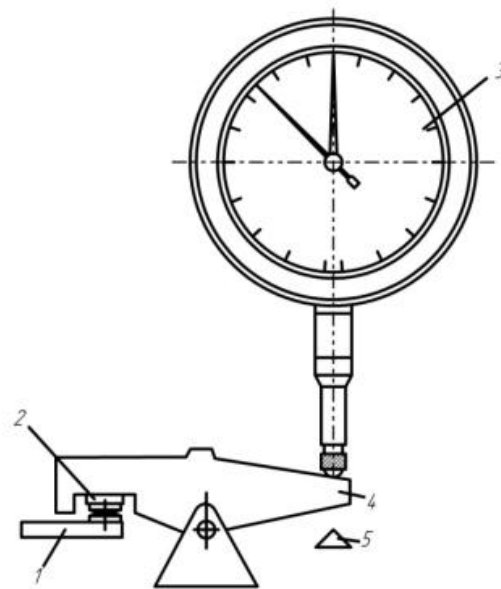


Рисунок 10.7 – Положення стрижня гравометра при перевірці контактного реле ТРП-25: 1 – нерухомий контакт; 2 – рухомий контакт; 3 – гравометр; 4 – контактна колодка; 5 – упор

Налаштування реле вважається задовільним, якщо час спрацювання реле, що перевіряється або наструюється, відрізняється від часу спрацювання еталонного реле не більше ніж на $\pm 10\%$.

Під час перевірки чи налаштування параметрів теплових реле переконуються, що час повернення контактів реле в початкове положення не перевищує 3 хв.

Важливою вимогою щодо забезпечення надійності захисту електроприводів і електроустановок є періодична перевірка роботи елементів теплових розчіплювачів автоматичних вимикачів. При перевірці елементів теплових розчіплювачів затискачі автоматичного вимикача приєднують до приладу або до відповідної випробувальної схеми. Через включений автоматичний вимикач пропускають струм навантаження, що дорівнює номінальному струму розчіплювача. При цьому автоматичний вимикач не повинен відключатися. Потім автоматичних вимикачів перевіряють час спрацювання теплових розчіплювачів при одночасному навантаженні всіх полюсів випробувальним струмом. Значення випробувального струму для автоматичних вимикачів різних серій і час спрацювання розчіплювача повинен також відповідати даним, наведеним у технічній довідковій літературі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ 2863-94. Програма забезпечення надійності. Загальні вимоги. – Чинний від 1994-12-08. – Київ: Держстандарт України, 1994. – IV, 37 с. (Надійність техніки).
2. ДСТУ 2864-94. Експериментальне оцінювання та контроль надійності. Основні положення. – Чинний від 1996-01-01. – К.: Держстандарт України, 1995. – IV, 30 с. – (Надійність техніки).
3. ДСТУ 3004-95. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. – Чинний від 1995-01-25. – Київ: Держстандарт України, 1995. IV, 130 с. – (Надійність техніки).
4. Кутін В.М. Діагностика електрообладнання: навчальний посібник /В. М. Кутін, М.О. Ілюхін, М.В. Кутіна. – Вінниця: ВНТУ, 2013. –161 с.
5. Губаревич О. В., Невзлін Б.І. Надійність і діагностика електрообладнання: Навчальний посібник. – Луганськ: Вид-во СЛУ ім. В. Даля, 2004. – 156 с.
6. ДСТУ 2389-94. Технічна діагностика. Терміни і визначення. – Чинний від 1995-01-01. – Київ: Держстандарт України, 1994 , 26с.

ЗМІСТ

Лекція 1. ПОНЯТТЯ, СКЛАДОВІ, ВЛАСТИВОСТІ, КІЛЬКІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДІЙНОСТІ	3
Лекція 2. ТЕОРІЯ ВІДМОВ. ЗАКОНИ РОЗПОДІЛУ ЧАСУ БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ ВИРОБУ	13
2.1 Випадкові події та їх потоки	13
2.2 Випадкові величини	14
2.3 Види відмов	17
2.4 Закони розподілу часу безвідмовної роботи виробу	21
Лекція 3. КРИТЕРІЇ НАДІЙНОСТІ ТА РОЗРАХУНОК ВІДНОВЛЮВАНИХ ВИРОБІВ	28
3.1 Випадкові процеси в теорії надійності	28
3.2 Показники надійності відновлюваних об'єктів	30
3.3 Розрахунок станів відновлюваних систем	31
Лекція 4. РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК НАДІЙНОСТІ НЕВІДНОВЛЮВАНИХ ВИРОБІВ З РІЗНИМ ВИДОМ З'ЄДНАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ У СИСТЕМУ. СТРУКТУРНЕ РЕЗЕРВУВАННЯ	33
4.1 Структурно-логічний аналіз технічних систем	33
4.2 Розрахунки структурної надійності систем	37
Лекція 5. ОЦІНКА І КОНТРОЛЬ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИПРОБУВАНЬ	52
5.1 Випробування на надійність	52
5.2 Контроль надійності	55
5.3 Встановлення закону розподілу	58
5.4 Оцінка середнього напрацювання на відмову	60
5.5 Оцінка довговічності при зношувальних відмовах	61
Лекція 6. ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ НА ЕТАПАХ ПРОЕКТУВАННЯ І КОНСТРУКТОРСЬКОЇ РОЗРОБКИ. ЗАЛЕЖНІСТЬ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ВІД ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ	63
6.1 Вихідні умови забезпечення надійності	63
6.2 Розрахунки надійності при проектуванні нових виробів	66
6.3 Залежність показників надійності від впливу зовнішніх факторів	68
6.4 Типи відмов електрообладнання	71

Лекція 7. ЗАВДАННЯ, МЕТОДИ, ЗАСОБИ, СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ. ПЛАНУВАННЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ	72
7.1 Завдання і методи технічної діагностики	72
7.2 Структурні схеми діагностування	73
7.3 Засоби технічного діагностування	76
7.4 Етапи розробок з діагностування електрообладнання	77
7.5 Діагностування при експлуатації електрообладнання	88
Лекція 8. 5. УПРАВЛІННЯ ТЕХНІЧНИМ СТАНОМ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ	90
8.1 Управління технічним станом електрообладнання	90
8.2 Принципи та напрями прогнозування відмов основних елементів електричних машин	93
Лекція 9. ВИДИ ВІДМОВ ДЕТАЛЕЙ І ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ	102
9.1 Статистика відмов електричних машин	102
9.2 Зношування і пошкодження деталей і вузлів електрообладнання в процесі експлуатації	107
Лекція 10. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ	121
10.1 Діагностування обвиток електричних машин	121
10.2 Діагностування підшипників електричних машин	131
10.3 Визначення технічного стану магнітопроводів електричних машин	135
10.4 Визначення технічного стану колекторів, контактних кілець і щіткового механізму	138
10.5 Діагностування електричних апаратів	142
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	149