

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«Харківський політехнічний інститут»

До друку дозволяю
Проректор

Руслан МИГУЩЕНКО.

ТЕКСТ ЛЕКЦІЙ
з дисципліни

НАДІЙНІСТЬ І ДІАГНОСТИКА

для студентів всіх форм навчання спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Проф. Шевченко В.В.

Затверджено
редакційно-видавничою
радою НТУ «ХПІ»,
протокол № 1 від 16.02.2023 р.

Харків – 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«Харківський політехнічний інститут»



ТЕКСТ ЛЕКЦІЙ
з дисципліни

НАДІЙНІСТЬ І ДІАГНОСТИКА

для студентів всіх форм навчання спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Проф. Шевченко В.В.

Харків – 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«Харківський політехнічний інститут»

ТЕКСТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни

НАДІЙНІСТЬ І ДІАГНОСТИКА

для студентів всіх форм навчання спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Проф. Шевченко В.В.

Затверджено
редакційно-видавничою
радою НТУ «ХПІ»,
протокол № 1 від 16.02.2023 р.

Харків – 2023

Конспект лекцій з дисципліни «Надійність і діагностика» для студентів всіх форм навчання спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». / Укладач Шевченко В. В. – Харків: НТУ «ХПІ», 2023. – 178 с.

Укладач: В. В. Шевченко

Рецензент: О.П. Лазуренко

Кафедра електричних машин

СКОРОЧЕННЯ,
що використовуються в конспекті

АД – асинхронний двигун;
АЕС – атомна електростанція;
АМ – асинхронна машина;
АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
ВЕУ – вітроенергетична установка;
ГАЕС – гідро-акумуляююча електростанція;
ГЕС – гідроелектростанція;
ДПС – двигун постійного струму;
ЕМ – електрична машина;
ЕМС – електромеханічна система;
ЕО – електрообладнання;
КО – комплексне обстеження;
ЛАОР – лита алюмінієва обмотка ротора;
ЛМОР – лита мідна обмотка ротора;
МПС – машини постійного струму;
ОЗ – основні засоби (підприємства);
ПК – персональний комп'ютер;
ППР – планово-попереджувальний ремонт;
ПТЕ – Правила технічної експлуатації;
РПН – (пристрій) регулювання напруги під навантаженням;
СД – синхронний двигун;
СЕП – система електропостачання;
ТЕС – теплова електростанція;
ТЕЦ – теплоелектроцентраль;
ТО – технічне обслуговування;

ТО і Р – технічне обслуговування і ремонт;
ТУ – технічні умови;
ТУЕ – технічна умови експлуатації;
ЧР – частковий розряд;
MTTF – середнє напрацювання до відмови (англ. *Mean operating Time to first Failure*);
NEMA – Національна асоціація виробників електротехніки;
Service factor (*SF*) – міра здатності витримувати періодичні перевантаження (механічні і теплові), при якій двигун може працювати без пошкодження.

РОЗДІЛ 1

Лекція 1-3

ПОНЯТТЯ НАДІЙНОСТІ В ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Поняття надійності в теорії електричних машин (ЕМ). Показники надійності. Відмови ЕО в теорії надійності. Класифікація відмов. Структурна надійність. Інтенсивність відмов як міра надійності електрообладнання (ЕО). Service-factor в електромашинобудуванні. Вплив з'єднань елементів на надійність ЕО та методи їх розрахунку. Розрахунки показників безвідмовності обладнання

[Література: 1, 3, 4, 6, 11, 15, 20]

1.1 Поняття та показники надійності в теорії електричних машин

В світі спостерігається тенденція до скорочення обсягів регламентних та профілактичних робіт з експлуатації технологічного і енергетичного обладнання. Енергетики України ще довго будуть вимушені підтримувати в робочому стані обладнання, яке знаходиться в експлуатації вже більше 25 років. Таке обладнання вже вичерпало свій ресурс експлуатації і вимагає своєчасного виявлення початку розвитку можливого дефекту. Безумовно і нове обладнання може виходити з ладу по причині «заводських дефектів», або під впливом зовнішніх факторів (перевантаження, атмосферні і комутаційні перенапруги тощо).

Так звані «заводські» дефекти часто проявляються на перших роках експлуатації обладнання, а зовнішні фактори здатні вивести з ладу будь яке обладнання, незалежно від строку його експлуатації. Таким чином, основним завданням служб діагностики електротехнічного обладнання України натеper є своєчасне виявлення дефекту на ранній стадії. Якщо цей дефект вдається виявити до аварії, то обладнання можна відремонтувати за відносно невеликі кошти. Діагностика обладнання не відкидає і моніторингу стану ізоляції під час роботи обладнання.

Такий моніторинг дозволяє зменшити наслідки аварії, або її попередити, але не забезпечує безперебійності постачання електроенергії споживачам. Слід зазначити,

що в енергосистемах України слід запроваджувати і моніторинг і діагностику обладнання з його відключенням.

Цінність будь якого методу діагностики полягає в надійності, простоті його виконання, низької вартості виконання, здатності виявити дефект на дуже ранніх стадіях його розвитку. Над такими методами діагностики працюють всі енергетики світу.

Найбільш перспективним методом діагностики ізоляції електрообладнання (ЕО) вважають вимір рівня часткових розрядів при різних значеннях випробувальної напруги. Цьому методу присвячені наукові конференції, статті в журналах і наукові роботи. Судячи з публікацій, цей метод дозволяє проводити діагностичні роботи раз на 3-4 роки і гарантувати безвідмовну роботу ЕО в умовах нормальної експлуатації. На обладнання можуть вплинути і зовнішні фактори, дія яких може привести до виникнення нових зон дефектів. Ці дефекти можуть прогресувати швидше, ніж дефекти, пов'язані з старінням обладнання, ізоляції і врешті решт вивести обладнання із робочого стану.

Треба визнати, що жоден метод діагностики не гарантує безвідмовну роботу обладнання на значний проміжок часу. Зважаючи на відносно велику вартість приладів і обладнання для заміру часткових розрядів, складність обробки результатів, не варто чекати його широкого використання в Україні. Перспективною вважають дворівневу систему діагностики, а саме:

- діагностування ЕО раз в 3-5 років сучасними методиками з допомогою сучасного обладнання;
- не припиняти контроль параметрів обладнання електромереж за методиками згідно з СОУ-Н-ЕЕ «Норми випробування електрообладнання».

Таке поєднання методів дозволить підвищити достовірність і надійність діагностики та на практиці визначати ефективність різних методів діагностики.

Надійність електричних машин (ЕМ) – це здатність безвідмовно працювати з незмінними технічними характеристиками в період заданого проміжку часу при визначених умовах використання. Надійність ЕМ для практики має велике значення. Серед всіх характеристик надійності найбільш повною і загально зрозумілою характеристикою є якість, тобто сукупність властивостей виробу, які визначають його здатність задовольняти потреби людини, виробництва тощо. Досі немає певних кількісних показників якості, тому її визначають непрямими показниками:

- технічними (потужність, продуктивність, ККД тощо);
- технологічними – технологічністю конструкції, тобто ступенем довершеності конструкції з точки зору найбільш ефективного його виготовлення або ремонту;
- експлуатаційними: надійність, ергономічність, естетичні характеристики, – які показують ступінь довершеності характеристик об'єкта під час експлуатації;
- економічними – собівартість, капіталовкладення в виробництво, експлуатацію, модернізацію, ремонти виробу тощо.

Якість – відносна характеристика, вона ґрунтується на порівнянні показників різних однотипних нових виробів. Якість може характеризувати результат порівняння характеристик відремонтованого виробу з відповідними показниками нового або кращого аналогічного виробу, обраного за взірець. При ремонті машин необхідно підвищувати якість за рахунок удосконалення технології проведення робіт та організації виробництва, впровадження нових, високоефективних способів відновлення і зміцнення деталей, використання прогресивного обладнання, наукової організації праці тощо.

Можна виділити три основних періоди формування якості і надійності кожного виробу: період проектування, виготовлення та експлуатація. Кожен із цих періодів впливає на загальну якість і надійність, які є основними показниками якості. Але відомо, що реальна якість проявляється лише на останній стадії – на стадії експлуатації.

Для вивчення факторів, що впливають на надійність устаткування, розглянемо основні понятті і терміни, табл. 1.1.

Надійність ЕО повинна базуватися на використанні оптимального співвідношення властивостей матеріалу, його собівартості та ергономічності конструкції. Збільшення коефіцієнтів запасу міцності за рахунок збільшення габаритів: діаметрів валів, товщин стінок корпусів, тощо – не завжди приводить до підвищення надійності, особливо у випадках динамічного навантаження при експлуатації (пуск, гальмування), оскільки при зростанні розмірів зростають і маси рухомих деталей. Крім того збільшення розмірів деталей приводить до збільшення розмірів, ваги та собівартості.

Велике значення при проектуванні обладнання має вибір матеріалу окремих деталей: міцніші матеріали менш пластичні, в цих матеріалах виникає більше тріщин, особливо при циклічних та ударних навантаженнях. В той же час ці матеріали добре витримують контактні статичні навантаження, вони більш зносостійкі.

Коли в практиці виникає потреба забезпечувати достатню міцність і придатність сприймати змінні навантаження вживають додаткові прийоми, наприклад, використовують спеціальне термічне або інше оброблення.

Таблиця 1.1 – Надійність устаткування. Основні понятті і терміни

Термін	Оцінка	Примітка – значення
1	2	3
Відмова – подія, яка полягає у втраті повністю або частково працездатності, і яка характеризується:	<p>Статистичне значення ймовірності відмови дорівнює відношенню кількості елементів, що відмовили, за розглянутий проміжок часу до кількості елементів на початок випробувань N_0:</p> $Q(t) \approx \frac{\sum_{i=1}^{t/\Delta t} N_i(t)}{N_0}$ <p>$N(t)$ – кількість елементів на час t та $t+\Delta t$, відповідно, що не відмовили.</p>	<p>Ймовірність відмови $Q(t)$ – ймовірність того, що в заданому інтервалі часу й при заданих умовах експлуатації відбудеться хоча б одна відмова:</p> $Q(t)=1 - P(t)=1 - N_0 - n(t)/N_0= n(t)/N_0,$ <p>де $n(t)$ – кількість відмовивших об'єктів за час t.</p>
	<p>Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ – умовна густина імовірності виникнення відмови об'єкта, яка визначається за умови, що до цього моменту відмова не виникла:</p> $\lambda(t) = \frac{n(t)}{\Delta t \cdot [N - n(t)]}$	<p>Статистична оцінка $\lambda(t)$ визначається як відношення числа об'єктів, що відмовили в одиницю часу до безвідмовно пропрацювавших об'єктів із загальної кількості перевіряються на надійність за заданий час t.</p>
	<p>Частота відмов $\alpha(t)$:</p> $\alpha(t) = \frac{n}{N_0 \cdot \Delta t}$ <p>n – кількість відмов за період Δt;</p>	<p>Частоти відмов характеризує швидкість зростання ймовірності виникнення відмови від об'єкта (швидкість зниження надійності).</p>
	<p>Потік відмов $\omega(t)$</p> $\omega(t) = \frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(t)dt}$ <p>N – кількість відновлених після відмови n виробів</p>	<p>Потік відмов – це математичне очікування числа відмов, які пройшли за одиницю часу, починаючи з моменту t для визначення величини параметра відмов</p>

Продовження табл. 1.1

<p>Довговічність – властивість об'єкту зберігати працездатність</p>	<p>Середній ресурс</p> $t_{mid} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i$ <p>або</p> $t_{mid} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt$	<p>Довговічність – властивість машини зберігати працездатність до настання граничного стану при встановленій системі обслуговування та ремонтів</p>
<p>Напрацювання – термін функціонування об'єкта. Визначається в об'ємах виконаної роботи (за добу, місяць) до першої відмови або між відмовами</p>	$t_{mid} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i$ <p>t_i – напрацювання до відмови під час випробовування n об'єктів</p> $t_{mid} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt$ <p>$f(t)$ – щільність ймовірності відмов</p>	<p>Напрацювання (на відмову) – тривалість або обсяг роботи, виконаної машиною (між відмовами), Напрацювання на відмову виражається в одиницях часу і називається середньою тривалістю безвідмовної роботи.</p>
<p>Безвідмовність – ймовірність безвідмовної роботи, властивість об'єкту зберігати працездатність Ймовірність безвідмовної роботи – ймовірність того, що при заданому напрацюванні відмови не буде</p>	$P(t) = \frac{N(t)}{N}$ <p>N – загальна кількість деталей; $N(t)$ – кількість деталей, що залишились працездатними до кінця напрацювання Показник ймовірності безвідмовної роботи визначається статистичною оцінкою:</p> $P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = 1 - \frac{n(t)}{N_0}$ <p>де N_0 – початкова кількість працездатних об'єктів; $n(t)$ – кількість об'єктів, що відмовили за час</p>	<p>Поняття безвідмовності є одним з основних у теорії надійності. Безвідмовністю – властивість об'єкта безупинно зберігати працездатний стан протягом деякого часу або напрацювання. В основному безвідмовність розглядається стосовно використання об'єкта за призначенням, але може розглядатися і при транспортуванні і зберіганні. Ймовірність безвідмовної роботи визначається в припущенні, що в початковий момент часу об'єкт знаходиться в працездатному стані.</p>
<p>Ресурс – напрацювання механізму від початку його експлуатації (або після ремонту) до досягнення ним граничного стану, що визначається нормативно-технічною документацією.</p>	<p>або</p> $t_{mid} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i$ $t_{mid} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt$	<p>Ресурс – сумарний наробіток ЕО від початку його експлуатації або його відновлення після ремонту до переходу в граничний стан, за якого його експлуатація неприпустима або недоцільна.</p>

В останні часи широко вживають композитні матеріали, властивості яких можна забезпечити під час їх виготовлення. Такими матеріалами є матеріали на основі високоміцних волокон. Наприклад, так виконують лопати вітроенергетичних установок (ВЕУ).

На стадії виготовлення надійність суттєво залежить від якості виготовлення окремих елементів: для деталей, що отримані литвом – відсутність раковин, неметалевих домішок, які можуть сприяти зародженням тріщин втоми; при механічній обробці – забезпечення точних розмірів деталей, достатньої чистоти обробки поверхні, якості термічної обробки, рівня захисту деталей від шкідливого впливу агресивних середовищ.

Від того, як використовується механізм під час його експлуатації суттєво залежить і термін його роботи. Для того щоб надійно робила машина, треба виконувати правила технічної експлуатації, а самі навантаження та режими експлуатації повинні відповідати технічним можливостям конструкції.

Працювати з обладнанням повинні люди, що знають правила його експлуатації, своєчасно та якісно виконують його огляд, технічне обслуговування та ремонт.

Значний вплив на режими роботи і надійність ЕО оказують погодно-кліматичні фактори:

1) *температура повітря*. Низька температура приводе до збільшення вібрацій обертових частини та всієї установки з причини підвищення жорсткості матеріалів, що викликає підвищений знос механічних частин, а в комплексі із можливою крихкістю матеріалів – пошкодження деталей. Низька температура може викликати зволоження ізоляції і її пошкодження. Часті перепади температури повітря можуть викликати циклічні замерзання та розмерзання і в результаті пошкодження елементів систем охолодження. Висока температура повітря сприяє швидкому старінню електроізоляційних матеріалів, погіршенню стану гумових виробів, ускладнює режими роботи систем охолодження;

2) *паморозь* на поверхні обладнання його при зовнішній установці (У1, У2) викликає руйнування захисних покриттів, елементів кріплення, бандажів;

3) *висока вологість* повітря негативно впливає на стан лакофарбових покриттів та ізоляції. Волога, що проникає в пори ізоляції, знижує її електричну міцність, створює умови для її пробою, прискорює старіння. Підвищена вологість прискорює

процес утворення окислів на робочих поверхнях електричних контактів і незахищених металічних деталях, сприяє корозії металів;

4) *при значній запиленості* тверді частинки, що містяться в повітрі, викликають абразивний знос механічних деталей, негативно впливають на стан ізоляції, руйнують її.

При аналізі надійності об'єкта дотримуються наступного порядку:

1) проводиться аналіз пристрою й функціональний взаємозв'язок складових частин, виконуваних об'єктом і його елементами функції;

2) конкретизується зміст понять "безвідмовна робота" й "відмова" конкретно для цього обладнання;

3) визначаються всі можливі відмови об'єкта і його складових частин, їх причини й можливих наслідків;

4) оцінюється вплив відмов складових частин на працездатність об'єкта;

5) об'єкт розділяється на елементи, у яких показники надійності відомі;

6) складається структурна схема надійності системи;

7) за структурною схемою надійності складаються розрахункові залежності, по яких визначають величину показників надійності об'єкта.

1.2. Структурна надійність електрообладнання. *Service-factor* в електромашинобудуванні

1.2.1. Властивості, які характеризують якість обладнання

Сукупність властивостей машини, закладений на етапі проектування та виготовлення, характеризують її якість. Показники якості машини поділяють на дві групи – виробничо-технічні та експлуатаційні. Виробничо-технічні показники характеризують машину, як об'єкт виготовлення в реальних умовах машинобудівного підприємства. Експлуатаційні показники характеризують експлуатаційні властивості машини. До їх складу входять показники технічного рівня, надійності, естетична та ергономічна характеристики.

В теорії надійності розрізняють системи та елементи:

- система – сукупність спільно діючих елементів, що забезпечують рішення певних завдань;

- елемент не має самостійного експлуатаційного призначення при рішенні конкретного завдання та виконує визначені функції системи.

Ці поняття відносні, вони визначаються поставленими цілями дослідження.

Для характеристики стану об'єктів експлуатації застосовують такі терміни, як справність, несправність, працездатний або непрацездатний стан. Кожний з цих станів характеризується сукупністю значень параметрів та якісних ознак, що встановлюються конструкторською або нормативно-технічною документацією.

Працездатний об'єкт на відміну від справного задовольняє лише вимогам нормативно-технічної документації, виконання яких забезпечує його здатність виконувати потрібні функції. У зв'язку з цим "справний стан" ширше, ніж поняття "працездатний стан". Об'єкт може бути несправним, але працездатним.

Під граничним станом розуміють такий стан об'єкта, при якому подальша експлуатація, згідно з нормативно-технічною документацією, неприпустима або недоцільна, або характеризується виходом параметрів за встановлені межі.

Після настання граничного стану експлуатація об'єкта припиняється і він може бути відправлений в ремонт або списаний.

1.2.2. Відмови в теорії надійності. Інтенсивність відмов електрообладнання

Основним поняттям в теорії надійності є відмова – подія, при якій об'єкт втрачає здатність виконувати робочу функцію, тобто у нього порушений працездатний стан. Для кожної машини або механізму ознаки відмови встановлюються нормативно-технічною документацією.

Відповідно до фізичної природи виникнення, відмови можуть бути пов'язані з руйнуванням окремих деталей або їх поверхонь (спрацювання, поломка, корозія), втратою певних властивостей або параметрів (теплопровідності в теплових апаратах, електричного опору або електропровідності, магнітних властивостей та ін.). Відмови зумовлюються різними причинами та процесами, що відбуваються в обладнанні під час експлуатації або збереження.

Процеси, що призводять до відмов, за швидкістю виникнення поділяють на швидкі відмови, відмови середньої швидкості й повільні.

До швидких процесів можна віднести процеси з періодичністю, що вимірюється частками секунди. Вони діють у межах циклу роботи технічного об'єкта (або

його елемента) і повторюються при наступних циклах. До них можна віднести вібрацію, зміну навантаження і сил тертя. Такі цикли встановлюються залежно від взаємного розташування деталей та вузлів машини під час роботи.

Процеси середньої швидкості пов'язані з періодом безперервної роботи обладнання або його елемента. Їхня тривалість вимірюється хвилинами або навіть годинами. Вони викликають поступові зміни параметрів або властивостей. До цієї категорії належать оборотні та необоротні процеси (нагрівання в період пуску й охолодження при зупинці, спрацювання інструментів, валів, опорних поверхонь і т. ін.

Тривалість повільних процесів триває днями, місяцями, роками. І результати їх впливу достатньо часто можуть бути встановлені тільки під час періодичних оглядів або ремонтів.

Причинами, що призводять до відмов, є повне спрацювання основних механізмів, зростання внутрішніх напружень, корозія або повзучість металів, реагування на сезонні зміни температури, загальне старіння. Проявлення дії повільних процесів упереджують за рахунок ремонтів і профілактичних заходів, які виконують через певні проміжки часу.

За впливом на стан виробу відмови поділяють на функціональні і параметричні. Наприклад, для насоса відмови, що зумовлюють його зупинку, належать до функціональних, а зменшення його продуктивності або тиску нижче граничного рівня – до параметричних. За наявності параметричних відмов технічний об'єкт може продовжувати працювати, але з відхиленням від технічних вимог.

В цілому деталі машин і механізмів руйнуються під дією багатьох факторів: силових навантажень, тепла та світла, електричних і магнітних полів, хімічного середовища, тертя та ін. Під дією цих чинників відбувається зміна стану машини і механізмів, йде перетворення і деструкція матеріалів окремих елементів, їх руйнування, що спричиняє відмови.

Можливі такі перетворення:

1) деформація – зміна форми і розмірів об'єктів в результаті дії зовнішніх сил. Останній етап деформації – руйнування.

Деформація буває пружною та пластичною. Пластична деформація – це залишкова деформації, після якої навіть при відсутності навантаження і дії зовнішніх сил

об'єкт не відновляє початкову форму, але не відбувається зміна об'єму. З погляду мікроскопічної внутрішньої будови тіла при пластичній деформації принаймні частина атомів розриває хімічні зв'язки й покидає свої «потенціальні ями». Це призводить до збільшення внутрішньої напруги в матеріалі. На відміну від пластичної, пружна деформація не викликає незворотних змін у структурі тіла. За пружної деформації тіло повертає собі попередні розміри й форму при знятті напруження;

2) утомлюваність – виникає у випадку, коли деталі зазнають статичних і циклічних навантажень (рами, вали, пружини та ін.);

3) теплове руйнування деталей відбувається під час нагріву, через який змінюється структура матеріалу і він втрачає свої початкові властивості (циліндри, поршні, вкладиші підшипників тощо);

4) хімічне (корозійне) руйнування – це руйнування матеріалів внаслідок хімічної або електрохімічної взаємодії;

5) зношування внаслідок тертя поверхонь.

Відмови поділяють за причинами виникнення, за характером прояву, впливом на працездатність та ін. Класифікація відмов наведена на рис. 1.1.

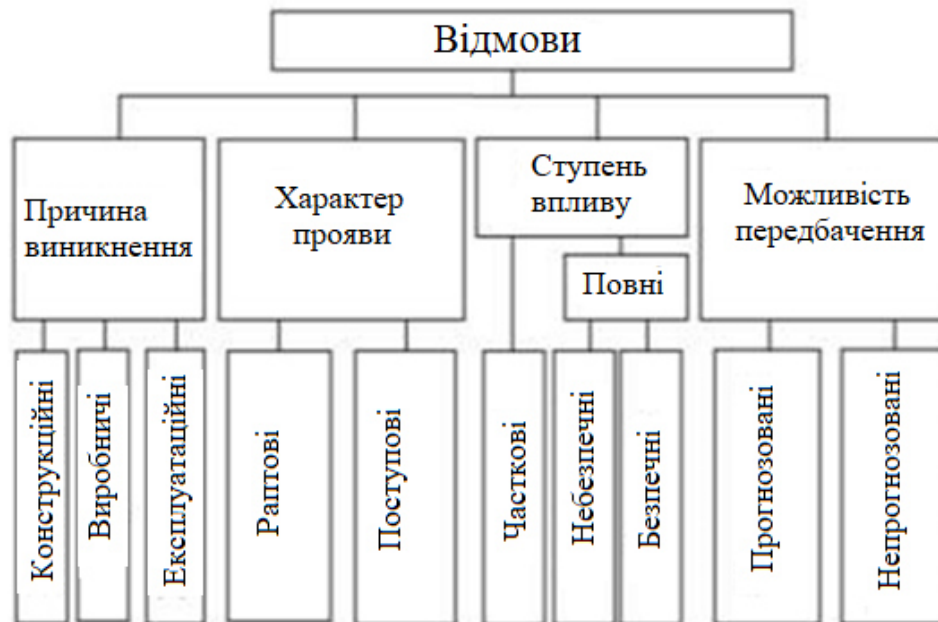


Рисунок 1.1 – Класифікація відмов

Відмови за причинами виникнення бувають:

1) конструкційні – зумовлені помилками при проектуванні, порушенням вимог державних стандартів, зниженням запасу міцності та ін.;

2) виробничі – спричинені порушенням технології виготовлення, невиконанням вимог технічної документації, застосуванням неякісних матеріалів і т. ін.;

3) експлуатаційні є наслідком порушень умов роботи машини, різних ушкоджень, невиконання правил експлуатації, низької кваліфікації обслуговуючого персоналу, старінням та ін. Так, наприклад, на групу експлуатаційних відмов обладнання в харчовій і переробній промисловості припадає близько 50 % усіх відмов за джерелом виникнення.

Процеси, що відбуваються в об'єктах під час експлуатації і збереження, та їхні відмови перебувають у причинно-наслідковому зв'язку. Причини відмов мають випадковий і систематичний характер.

Причини випадкового характеру викликаються непередбаченими перевантаженнями, дефектами матеріалів або похибками виготовлення елементів об'єкта, що не виявлені контролем, помилками в системі керування або експлуатуючого персоналу.

Систематичні причини обумовлені закономірними й немінучими явищами, що викликають поступове нагромадження ушкоджень – втома, зношування, старіння, корозія, спрацювання деталей, корозія і накипання на поверхнях теплопровідних елементів, затуплення лез різальних інструментів, забруднення фільтрів тощо. Систематичні причини відмов краще піддаються прогнозуванню.

Відповідно до характеру розвитку процесів та їх проявлення відмови можуть бути:

1) раптовими. Наприклад, поломки деталей і заїдання пар тертя від перевантаження або через відсутність змащування;

2) поступовими. Наприклад, руйнування деталей або конструкцій від втоми матеріалу, корозії, спрацювання, накипання, коротких замикань внаслідок старіння ізоляції, забруднення фільтрів, затуплення різальних інструментів та ін.

Відмови за ступенем впливу на працездатність машини:

1) часткова, яка призводить до нездатності об'єкта виконувати частину потрібних функцій;

2) ресурсна, внаслідок якої об'єкт досягає граничного стану;

3) критична, яка може спричинити травмування людей, значні матеріальні збитки чи інші неприйнятні наслідки;

4) повна, яка зумовлює повну нездатність технічного об'єкта виконувати будь-яку із потрібних функцій. Якщо погіршення якості функціонування ЕО не призводить до відмови, то такі несправності називають дефектами, і їх не розглядають в теорії надійності;

5) раптова відмова. Цьому може не передувати поступове накопичення пошкоджень, вона виникає раптово.

Для машин, які виконують відповідальні функції або функції, пов'язані з життям людей, відмови поділяють на небезпечні та безпечні. За можливістю передбачення відмови поділяються на прогнозовані і непередбачені. Основні позиції класифікації відмов встановлюються за характером та причинами виникнення; за характером усунення; за легкістю виявлення та за часом виникнення. Класифікація відмов за різними ознаками наведена в табл. 1.2.

Експлуатація майже всього ЕО передбачає три періоди, що характеризуються різною інтенсивністю відмов $\lambda(t)$ за час t (рис. 1.2). У кожному з цих періодів основні відмови мають свої особливості. В першому періоді експлуатації виникають відмови припрацювання, пов'язані з тим, що не всі елементи виробу припрацювалися, або з проявилися дефекти, що не були виявлені при виготовленні, випробуваннях, транспортуванні.

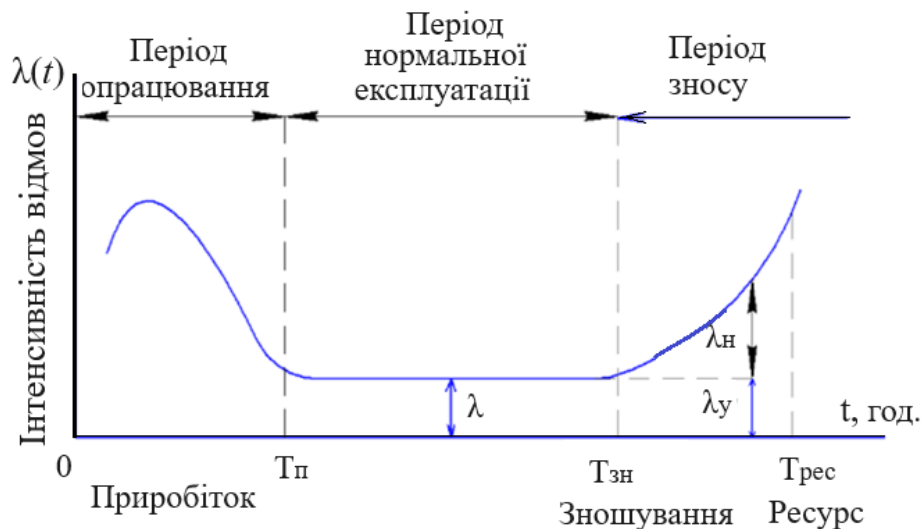


Рисунок 1.2 – Інтенсивність відмов для трьох періодів роботи технічного об'єкта
 1 – період припрацювання елементів; 2 – період нормальної експлуатації;
 3 – період інтенсивного спрацювання.

Таблиця 1.2 – Класифікація відмов за різними ознаками

Класифікація відмов	Ознака відмов
За характером виникнення:	<p><i>раптова відмова</i> – відмова, що виявляється в різкій (миттєвій) зміні характеристики об'єкта. Їй може не передувати поступове накопичення пошкоджень;</p> <p><i>поступова відмова</i> – відмова, що відбувається в результаті повільного, поступового погіршення якості об'єкта. Частіше настає через знос і старіння матеріалів</p>
<p>Раптові відмови зазвичай виявляються у виді механічних ушкоджень елементів (тріщини, пробої ізоляції, обриви тощо) і не супроводжуються попередніми видимими ознаками наближення. Раптові відмови характеризуються незалежністю моменту настання від часу попередньої роботи. Поступові відмови пов'язані зі зносом деталей і старінням матеріалів.</p>	
За причиною виникнення:	<p><i>конструкційна відмова</i> – викликана недоліками або невдалою конструкцією об'єкта, через порушення встановлених правил і (або) норм конструювання, недосконалість прийнятих методів конструювання;</p> <p><i>виробнича відмова</i> – пов'язана з помилками при виготовленні об'єкта через недосконалість або порушення технології;</p> <p><i>експлуатаційна відмова</i> – викликана порушенням правил експлуатації.</p>
За легкістю виявлення	<p><i>повна відмова</i>, що виключає неможливість роботи об'єкта до її усунення;</p> <p><i>часткова відмова</i>, при якій об'єкт може частково використовуватися</p>
За характером усунення:	<p><i>стійка відмова</i> – непрацездатність зберігається, постійно, стійко;</p> <p><i>нестійка (переміжна) відмова</i>, яка то виникає, то зникає;</p> <p><i>легка відмова</i> – відмова, яка може бути легко усунена;</p> <p><i>середня відмова</i> – відмова, яка не викликає відмови суміжних вузлів, вторинних відмов;</p> <p><i>важка відмова</i> – відмова, що викликає вторинні відмови, або яка призводить до загрози життю та здоров'ю людини).</p>
За подальшим використанням об'єкта	<p><i>повна відмова</i>, що виключає можливість роботи об'єкта до її усунення;</p> <p><i>часткова відмова</i>, при якій об'єкт може частково використовуватися.</p>
За часом виникнення	<p><i>відмова приробітки</i>, що виникає у початковий період експлуатації;</p> <p><i>відмова при нормальній експлуатації</i>;</p> <p><i>відмови зносу</i>, викликана необоротними процесами зношування деталей, старіння матеріалів та ін.</p>

Продовження табл. 1.2

Класифікація відмов	Ознака відмов
За впливом на інше обладнання	<i>Залежна відмова</i> – відмова, обумовлена або зв'язана з іншими відмовами, а також відмовами іншого обладнання. <i>Незалежна відмова</i> – відмова, яка необумовлена іншими відмовами.
За місцем усунення	<i>відмови, які усувають в експлуатаційних умовах;</i> <i>відмови, які усувають тільки в умовах спеціалізованих ремонтних підприємств або в експлуатаційних умовах</i>

Для ЕО приробітні відмови усуваються шляхом заміни дефектних деталей на справні або їх доробкою, якщо це допускається конструкцією (щітки, деякі обмотки, налагодження підшипникових вузлів, балансування роторів невеликих машин, створення палітури на колекторі або його продорожування, здвиг щіток з геометричної нейтралі). Виникнення відмов у технічному пристрої в період опрацювання підпорядковується приблизно розподілу Вейбулла.

Відмови 2-го періоду називають відмовами періоду нормальної експлуатації. Вони зумовлені несприятливим поєднанням різних причин, у тому числі частковим спрацюванням елементів. На цьому етапі немає переважаючих причин. У період нормальної експлуатації технічного пристрою зазвичай відбуваються раптові відмови, які мають випадковий характер, події відбуваються несподівано та нерегулярно. Фізична природа таких відмов різна, і може бути обумовлена, наприклад, раптовим зростанням навантаження, аваріями в мережі або на сусідньому обладнанні. Однак їх поява відбувається приблизно у рівні проміжки часу і вони повторюються приблизно з однаковою інтенсивністю.

У третьому періоді відбуваються відмови, зумовлені тим, що стан основних функціональних елементів досягає граничного рівня, починається «старіння», що створює умови для інтенсивної появи відмов. Строк появи відмови можна відкласти за рахунок поліпшення технічного обслуговування під час профілактичних оглядів, середніх або капітальних ремонтів.

Ймовірність безвідмовної роботи – ймовірність того, що в межах заданого часу напрацювання відмова об'єкта не виникає. Ймовірність безвідмовної роботи може застосовувати як кількісний критерій надійності, і змінюється від одиниці до нуля.

Для режимів зберігання та транспортування застосовують аналогічний термін – "ймовірність не виникнення відмови".

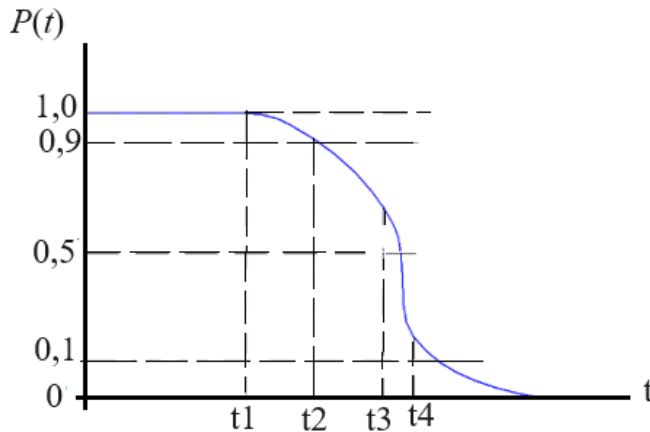


Рисунок 1.3 – Ймовірності безвідмовної роботи залежно від напрацювання виробу

Функція ймовірності безвідмовної роботи в залежності від напрацювання виробу $P(t) = f(t)$ представлена графіком монотонно спадної функції, тому що надійність в процесі експлуатації може тільки зменшуватися, рис. 1.3. На графіку $P(t) = f(t)$ до напрацювання t ймовірність безвідмовної роботи дорівнює 1, а при напрацюванні t_4 вона дорівнює 0,1. Ймовірність безвідмовної $P(t) = 1$ є безумовною ймовірністю того, що в інтервалі від 0 до t не настане

відмова, а при $P(t) < 1$ ймовірність, що відмова настане в інтервалі від t до нескінченності.

1.2.3. Структурна надійність ЕО

Структурна надійність являє собою результуючу надійність системи при заданій структурі і відомих значеннях надійності всіх комплектуючих елементів або збірних блоків. Тобто під структурною надійністю розуміють надійність, зумовлену структурою об'єкта, який аналізується або проектується. При визначенні структурної надійності об'єкта оцінюють вплив працездатності кожного елемента на працездатність об'єкта в цілому. Показником структурної надійності об'єкта є ймовірність його безвідмовної роботи, яка розраховується на основі даних, що визначають структуру об'єкта.

Всі технічні об'єкти складаються з елементів. Елементи фізично можуть бути з'єднані між собою самим різним чином. Із цього погляду всі елементи об'єкта ділять на чотири групи:

- 1) елементи, відмова яких практично не впливає на працездатність об'єкта (наприклад, погіршення фарбування поверхні корпусу або кожуха, дефект рим-болта тощо);
- 2) елементи, працездатність яких за розглянутий проміжок часу практично не змінюється й імовірність їхньої безвідмовної роботи близька до одиниці (станини, корпусні деталі, тощо);

3) елементи, відмова яких сама по собі (або в сполученні з відмовами інших елементів) приводить до відмови всієї системи.

4) елементи, ремонт або регулювання яких можливі в процесі роботи або під час планових зупинок (налагодження вимірювальних приладів, заміна щіток або ріжучого інструмента, продорожування колектору тощо);

При аналізі надійності об'єкта, розглядаються, як правило, елементи останньої групи.

Для наочного зображення з'єднань елементів використовуються різні схеми: структурні, функціональні, принципів тощо. Кожна з них має своє призначення і дозволяє аналізувати, як функціонує те чи інше обладнання. Для аналізу рівня надійності розрахунків показників застосовуються особливі схеми, які отримали назву структурних схем надійності.

Структурна схема надійності – це наочне графічне представлення умов, при яких працює або не працює досліджуваний елемент, об'єкт, система, пристрій і тому подібне. Для складання структурної схеми надійності аналізують процес функціонування об'єкта, вивчають функціональні зв'язки між елементами, види відмов і причини їх виникнення. Таке дослідження вимагає високої інженерної та математичної ерудиції. Ступінь дроблення об'єкта на елементи залежить від завдання. Одне і те ж з'єднання на принциповій схемі може мати абсолютно іншу сполуку на структурній схемі надійності. Основними відмовами електричних об'єктів є відмови типу «обрив» і КЗ.

Нехай об'єкт складається з двох діодів VD1 і VD2, фізично з'єднаних паралельно, рис. 1.4. При відмові типу «КЗ» схема вийде з ладу, коли відмовить будь-який з двох діодів. Тому структурна схема надійності для цього випадку зображується у вигляді послідовного з'єднання елементів. В іншому випадку, при відмові типу «обрив» паралельного кола діодів відмовить тільки в разі відмови двох діодів. Отже, структурна схема надійності буде являти собою паралельне з'єднання елементів, рис. 1.4.

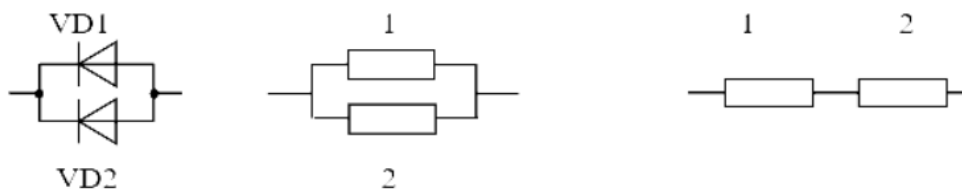


Рисунок 1.4 – Структурна схема надійності двох діодів VD1 і VD2: паралельне поєднання – «обрив», послідовне – «коротке замикання»

Припустимо, що система складається з n різних елементів. Розрахунок структурної надійності системи, що має різні типи сполучень елементів, виконують при наступних припущеннях:

- елементи незалежні, тобто ресурс окремих елементів не залежить один від одного, відмова одного елемента не змінює надійності інших елементів;
- стан елементів системи (справний – несправний) однозначно визначає стан всієї системи;
- після відмов елементи не відновлюються.

Підтримку структурної надійності в цілому можна забезпечити закладеними запасами по тепловим навантаженням, по механічній міцності. Зазвичай такі запаси для забезпечення надійності мають назву *service factor* (SF) – прийоми, які закладають у конструкцію машини для забезпечення можливості витримувати періодичні перевантаження (механічні і теплові), що дозволяє ЕО довше працювати без пошкоджень. Тож SF – це експлуатаційний коефіцієнт, міра періодичної перевантажувальної здатності, при якій обладнання може працювати без пошкоджень.

SF – стандартний коефіцієнт експлуатації *NEMA* (Національна асоціація виробників електротехніки) і, наприклад, для двигунів майже завжди $SF > 1$.

Обладнання, при виготовленні якого був закладений *service factor*, буде працювати значно довше, ніж було зазначено заводом-виробником. В табл. 1.3 наведені значення експлуатаційного коефіцієнту SF , який *NEMA* рекомендує закладати при проектуванні сучасних електричних двигунів. Дані представлені для двигунів зі ступенем захисту корпусу IP44.

Таблиця 1.3 – Експлуатаційний коефіцієнт SF (коефіцієнт *service factor*-у) при різних значення синхронній швидкості двигуна

Потужність, кВт	Коефіцієнт SF , в.о.			
	Синхронна частота обертання, об/хв			
	3000	1500	1000	750
1,0-5,0	1,35	1,35	1,35	1,35
5,0-50,0	1,25	1,25	1,25	1,25
50,0-100,0	1,25	1,25	1,15	1,15
100,0-200,0	1,25	1,15	1,15	1,15
>200	1,115	1,15	1,15	1,15

Експлуатаційну потужність двигуна P_D , з урахування закладеного *service factor*-у, можна розрахувати, Вт:

$$P_D = SF P_N,$$

SF – коефіцієнт закладеного *service factor*-у, в.о.;

P_N – номінальна потужність двигуна, Вт.

Розрахунок структурної надійності складається з таких етапів:

- 1) визначення складу показників надійності, що розраховуються;
- 2) складання структурної схеми надійності, що базується на аналізі функціонування системи (які блоки увімкнені, у чому полягає принцип їх роботи, перелік властивостей справної системи і т. п.), вибір методу розрахунку надійності;
- 3) складання математичної моделі, що пов'язує показники надійності системи, які розраховуються, з показниками надійності її елементів;
- 4) виконання розрахунку, аналіз отриманих результатів, коригування розрахункової моделі.

Моделі надійності системи зазвичай складається на основі функціональної, принципової або структурної схеми.

В якості моделі надійності застосовуватися логічні схеми або графи переходів. У графах переходів стани позначають прямокутниками і кружечками, переходи між станами – стрілочками. Біля кожної стрілочки вказують інтенсивності переходів (інтенсивність відмов). Після цього складаються диференціальні рівняння для графів станів. Такі рівняння складні для вирішення, а в деяких випадках і зовсім не мають аналітичного рішення.

Ймовірність безвідмовної роботи протягом напрацювання визначається сумою всіх імовірностей працездатних станів:

$$p(t_i) = \sum_{j=0}^{n-1} P_j(t_i)$$

де $P_j(t)$ – імовірність знаходження ЕО в j -тому стані;

n – кількість різних елементів.

Слід пам'ятати про недоліки використання графів переходів:

- 1) в результаті розв'язання систем диференціальних рівнянь визначаються імовірності знаходження системи в певному стані, а не імовірність її безвідмовної роботи;

2) схеми станів можуть використовуватися тільки при припущенні конкретного типу розподілу напрацювання до відмови: експоненціального або показникового.

Тому на практиці майже завжди використовують модель структурної надійності, яка базується на побудові логічних схем. Цей метод більш простий.

Перед складанням логічних схем вважають, що відмови елементів незалежні, а елемент може перебувати тільки в одному з двох станів: працездатному і не працездатному. Далі проводиться оцінка впливу відмови кожного елемента на стан системи. При складанні логічної схеми електричні зв'язки заміняю логічними. Елементи, відмова яких призводить до відмови схеми, включають послідовно, і тоді відмова системи відбувається при відмові будь-якого елемента. Елемент, відмова якого не призводить до відмови схеми, включають паралельно.

Порядок складання логічних схем:

- 1) складається логічна схема системи з блоків;
- 2) для кожного блоку з вузлів складають логічну схему системи;
- 3) для кожного вузла з елементів, що входять до його складу, складається логічна схема системи.

1.3. Розрахунок безвідмовності обладнання Вплив з'єднань елементів на надійність ЕО та методи їх розрахунку

1.3.1. Розрахунки показників безвідмовності обладнання

Розрахунки показників безвідмовності обладнання зазвичай проводяться в припущенні, що вся система, так і будь-який її елемент можуть перебувати лише в одному з двох можливих станів – працездатному і непрацездатному, а відмови елементів незалежні один від одного. Стан системи (працездатний або непрацездатний) визначається станом елементів та їх поєднань. Тому теоретично можливо розрахунок безвідмовності обладнання звести до перебору всіх можливих комбінацій станів елементів, визначення ймовірності кожного з них, і після цього визначається ймовірностей працездатності стану системи.

Це метод прямого перебору, він практично універсальний і може використовуватися при розрахунку будь-якого обладнання. Однак при великій кількості елеме-

нтів системи n такий шлях стає нереальним з-за великої кількості обчислень (наприклад, при $n=10$ число можливих станів системи становить $N=2^n=1024$, а при $n=20$ перевищує 10^6).

Тому на практиці використовують більш ефективні і економічні методи розрахунку, не пов'язані з великим обсягом обчислень.

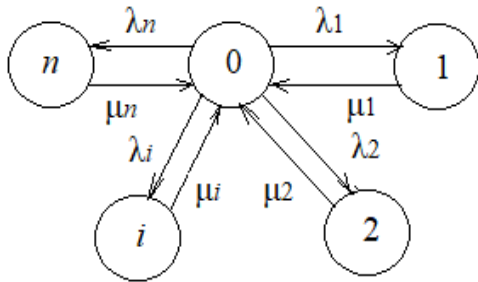


Рисунок 1.5 – Логічна схема розрахунку структурної надійності

Можливість застосування таких методів пов'язана з особливостями обладнання, яке досліджується. Так, наприклад, при розрахунку структурної надійності, система замінюється логічною схемою, рис. 1.5, де $\mu(t)$ – інтенсивність відновлення, $\lambda(t)$ – інтенсивність відмов.

Розрізняють системи з послідовним, паралельним та з паралельно-послідовним з'єднанням елементів.

1.3.2. Системи з послідовним з'єднанням елементів

Системою з послідовним з'єднанням елементів називається система, в якій відмова будь-якого елемента призводить до відмови всієї системи. Таке з'єднання

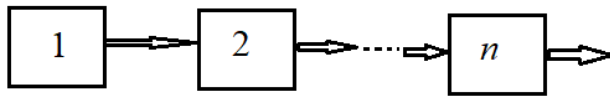


Рисунок 1.6 – Послідовне з'єднання елементів на логічній схемі надійності

елементів в техніці зустрічається найбільш часто, тому його називають основним з'єднанням, рис. 1.6.

Класичним прикладом послідовного з'єднання елементів в системі є електрична машина (ЕМ), де при відмові одного з елементів конструкції (статора, ротора, обмотки, щітки, колектор...) виходить з ладу вся машина. Тому ЕМ можна розглядати як систему, що складається з ланок, з'єднаних послідовно.

При послідовному з'єднанні можуть виникати незалежні і залежні відмови в залежності щодо стану інших систем. У тому випадку, якщо елементи піддаються значному впливу зовнішніх факторів, їх відмови повністю залежні.

При цьому при однаковій дії зовнішнього або внутрішнього фактору на всі елементами відмова відбувається в найбільш слабкій ланці (наприклад, порушення ізоляції), надійність такої конструкції p_c дорівнює надійності слабкого елемента $p_{l,\min}$:

$$p_c = p_{b \min}$$

При незалежних відмовах відмова одного елемента системи не пов'язана з відмовами інших елементів. Наприклад, руйнування щітки не пов'язане з руйнуванням ізоляції. Обидва випадка є взаємно незалежними.

Безвідмовна експлуатація системи з послідовно з'єднаних елементів є випадковою подією, а показник надійності (ймовірність безвідмовної роботи системи при незалежних відмовах з послідовним з'єднанням елементів) визначається перемноженням відповідних ймовірностей.

В системі з послідовним з'єднанням для безвідмовної роботи протягом деякого періоду t необхідно і достатньо, щоб кожен з n елементів працював безвідмовно протягом саме цього періоду. Вважаючи відмови елементів незалежними, ймовірність одночасної безвідмовної роботи n елементів визначається за теоремою множення ймовірності: ймовірність спільної появи незалежних подій дорівнює добутку ймовірностей $p_i(t)$ цих подій, в.о.:

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

Відповідно, ймовірність відмови такого обладнання, в.о.:

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

Середній час безвідмовної роботи, секунди (години, роки...):

$$T = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}$$

Якщо система складається з рівно-надійних елементів, то $p_i = p$.

Рівними за надійністю називають елементи, у яких однакові інтенсивності відмов або ймовірності відмов:

$$P = p^n, \quad Q = 1 - (1 - q)^n.$$

Аналізуючи математичні записи, можна зробити висновок:

- навіть при високій надійності елементів надійність системи при послідовному з'єднанні зменшується зі збільшенням кількості елементів;

- із малонадійних елементів не можна створити високонадійну систему, якщо між елементами та вузлами є послідовне з'єднання;

- ймовірність безвідмовної роботи любого обладнання, машини, апарата, трансформатора при послідовному з'єднанні не може бути вищою імовірності безвідмовної роботи самого ненадійного з її елементів (принцип "*гірше гіршого*").

Якщо всі елементи системи працюють в періоді нормальної експлуатації, див. рис. 1.2, має місце найпростіший потік відмов: напрацювання елементів і системи змінюється по експоненціальному розподілу; при цьому імовірність безвідмовної роботи та інтенсивність відмов можна записати:

$$P = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i \cdot t) = \exp[-(\sum_{i=1}^n \lambda_i) \cdot t] = \exp(-\Lambda \cdot t),$$

де Λ – сумарна інтенсивність відмов системи:

$$\Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \text{const}$$

Таким чином, інтенсивність відмов системи при послідовному з'єднанні елементів і найпростішому потоці відмов дорівнює сумі інтенсивностей відмов елементів.

Для системи з n рівно-надійних елементів:

$$\Lambda = n \cdot \lambda_i = n \cdot \lambda. \quad T_0 = \frac{T_{0i}}{n}.$$

Тобто інтенсивність відмов Λ в n разів більше, а середнє напрацювання T_0 в n разів менше, ніж середнє напрацювання T_{0i} окремого елемента.

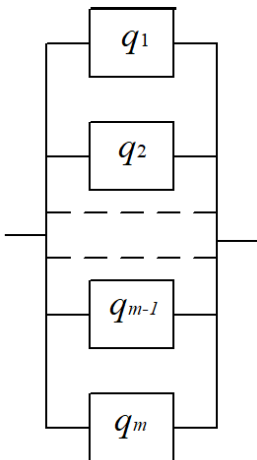


Рисунок 1.7 – Паралельне з'єднання елементів

1.3.3. Системи з паралельним з'єднанням елементів

Системою з паралельним з'єднанням елементів називається система, відмова якої відбувається тільки у випадку відмови всіх її елементів. Такі схеми надійності характерні для технічних систем, в яких елементи дублюються або резервуються, тобто паралельне з'єднання, використовують як метод підвищення надійності, рис. 1.7.

Для відмови системи з паралельним з'єднанням елементів протягом часу напрацювання t необхідно і достатньо, щоб всі її елементи відмовили протягом цього часу.

Так що відмова системи полягає в спільній, одночасній відмові всіх елементів.

Ймовірність її відмови може бути визначена як добуток ймовірностей відмови q_i окремих елементів:

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

Відповідно, ймовірність безвідмовної роботи

$$P = 1 - Q = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i). \quad (1.1)$$

Для систем з рівно-надійними елементами:

$$Q = q^n = (1 - p)^n \quad P = 1 - (1 - p)^n.$$

Тобто надійність системи з паралельним з'єднанням підвищується при збільшенні кількості елементів.

Оскільки завжди $q_i < 1$, то добуток у правій частині (1.1) завжди менше будь-якого із співмножників, тобто ймовірність відмови системи не може бути вище ймовірності самого надійного її елемента (принцип "краще кращого"). І навіть з порівняно ненадійних елементів можлива побудова достатньо надійної системи.

При експоненціальному розподілі напрацювання:

$$P = 1 - [1 - \exp(\lambda \cdot t)]^n$$

Звідки середнє напрацювання системи до відмови:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} = T_{0i} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}$$

де $T_{0i} = 1/\lambda_i$ – середнє напрацювання елемента.

При великих значеннях n справедлива наближена формула:

$$T_0 = T_{0i} \cdot \left(\ln n + \frac{1}{2n} + 0.577 \right).$$

Таким чином, середнє напрацювання системи з паралельним з'єднанням елементів більше середнього напрацювання її окремих елементів.

1.3.4. Системи з паралельно-послідовним з'єднанням елементів

Часто зустрічаються складні схеми, в яких поєднано паралельне та послідовне з'єднання. Більш поширені два типи таких систем (рис. 1.8):

У першому випадку (рис. 1.8, а) є m паралельних ланок з n однаковими по надійності частинами (елементами). Надійність та ймовірностей відмови ланки:

$$p_{\Sigma}' = p^n, \quad q' = 1 - p^n$$

Надійність всієї системи: $p_{\Sigma} = 1 - (1 - p^n)^m = 1 - (q')^m$.

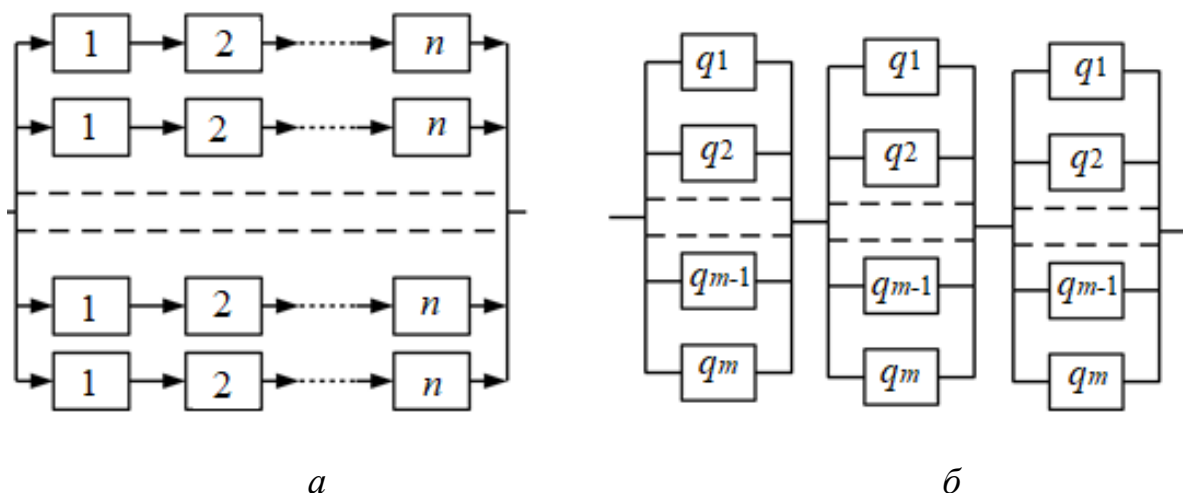


Рисунок 1.8 – Паралельно-послідовне та послідовно-паралельне з'єднання

Збільшуючи кількість паралельних ланок отримаємо, що при $m \rightarrow \infty$, $p \rightarrow 1$, тобто паралельне з'єднання ланок з однакових частин збільшує надійність схеми.

А при $n \rightarrow \infty$, $p \rightarrow 0$. І якщо $m \rightarrow \infty$, надійність також стремиться к нулю $p \rightarrow 0$.

У другому випадку (рис. 1.8, б) пов'язано n груп з m однакових частин. Тоді надійність кожної групи:

$$p_{\Sigma}' = 1 - (1 - p)^m$$

$$p_{\Sigma} = (p_{\Sigma}')^n = [1 - (1 - p)^m]^n$$

$$m \rightarrow \infty, \quad p \rightarrow 1, \quad n \rightarrow \infty, \quad p \rightarrow 0;$$

$$n \rightarrow \infty, \quad m \rightarrow \infty, \quad p \rightarrow 1.$$

У загальному випадку, коли кількість з'єднаних елементів в паралельних групах не однакова, то надійність буде різною:

$$q_i = \prod_{j=1}^m q_j = \prod_{j=1}^m (1 - p_j)$$

$$p_i = 1 - q_j = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_j)$$

$$p_{\Sigma} = \prod_{i=1}^n p_i = \prod_{i=1}^n \left[1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_j) \right]$$

1.3.5. Системи типу "m з n"

Систему типу "m з n" можна розглядати як варіант системи з паралельним з'єднанням елементів, відмова якої відбудеться, якщо з n елементів, з'єднаних паралельно, працездатними виявляться менш m елементів ($m < n$). Особливістю даної системи є те, що всі елементи, що входять до її складу, рівні за надійністю.

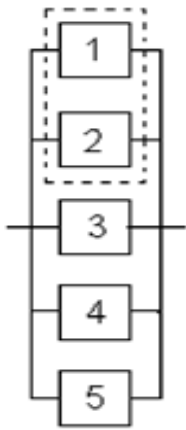


Рисунок 1.9 –
Система типу
«2 з 5»

На рис. 1.9 представлено систему "2 з 5", яка працездатна, якщо з загальної кількості її елементів ($n=5$) працюють будь-які 2, 3, 4 або 5 (на схемі пунктиром виділені функціонально необхідні два елементи). Виділення елементів 1 і 2 ($m=2$) зроблено умовно, оскільки всі 5 елементів рівнозначні.

Системи типу "m з n" найбільш часто зустрічаються в електричних і телекомунікаційних системах, в технологічних лініях, а також при структурному резервуванні. Для розрахунку надійності систем типу "m з n" при порівняно невеликій кількості елементів можна скористатися методом прямого перебору. Він полягає у визначенні працездатності кожного з можливих станів системи, які визначаються різними поєднаннями працездатних і непрацездатних

станів елементів.

Всі можливі стани системи «2 з 5» занесені в табл. 1.4., де працездатні стани елементів і систем відзначені знаком «+», непрацездатні – знаком «-». Працездатність визначається кількістю працездатних елементів. По теоремі множення ймовірність будь-якого стану визначається як добуток ймовірностей станів елементів.

Наприклад, в рядку 9 описано стан системи, в якій відмовили елементи 2 і 5, а інші працездатні. При цьому умова "2 з 5" виконується, так що система в цілому працездатна. Якщо прийняти, що всі елементи рівно-надійні, то ймовірність стану «працездатність» може бути розрахована:

$$P_9 = p_1 \cdot q_2 \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot q_5 = p^3 q^2.$$

З урахуванням всіх можливих станів, ймовірність безвідмовної роботи системи може бути знайдена за теоремою додавання ймовірностей всіх працездатних станів. Оскільки в табл. 1.3 (від пункту 27 до 32) кількість непрацездатних станів менше, ніж працездатних, простіше обчислити ймовірність відмови системи.

Таблиця 1.4 – Дані станів системи “2 з 5” (p – надійність; q – ймовірностей відмови)

№ стану	Стан елементів					Стан системи	Ймовірність стану системи
	1	2	3	4	5		
1	+	+	+	+	+	+	p^5
2	+	+	+	+	-	+	$p^4 \cdot q^1 = p^4 \cdot (1-p)$
3	+	+	+	-	+	+	
4	+	+	-	+	+	+	
5	+	-	+	+	+	+	
6	-	+	+	+	+	+	
7	+	+	+	-	-	+	$p^3 \cdot q^2 = p^3 \cdot (1-p)^2$
8	+	+	-	+	-	+	
9	+	-	+	+	-	+	
10	-	+	+	+	-	+	
11	+	+	-	-	+	+	
12	+	-	+	-	+	+	
13	-	+	+	-	+	+	
14	+	-	-	+	+	+	
15	-	+	-	+	+	+	
16	-	-	+	+	+	+	
17	+	+	-	-	-	+	$p^2 \cdot q^3 = p^2 \cdot (1-p)^3$
18	+	-	+	-	-	+	
19	-	+	+	-	-	+	
20	+	-	-	-	+	+	
21	-	+	-	-	+	+	
22	-	-	-	+	+	+	
23	+	-	-	+	-	+	
24	-	+	-	+	-	+	
25	-	-	+	-	+	+	
26	-	-	+	+	-	+	
27	+	-	-	-	-	-	$p^1 \cdot q^4 = p^1 \cdot (1-p)^4$
28	-	+	-	-	-	-	
29	-	-	+	-	-	-	
30	-	-	-	+	-	-	
31	-	-	-	-	+	-	
32	-	-	-	-	-	-	$q^5 = (1-p)^5$

Для цього додаємо ймовірності непрацездатних станів (де не виконується умова "2 з 5"):

$$Q = P_{32} + P_{27} + P_{28} + P_{29} + P_{30} + P_{31} = q^5 + 5p \cdot q^4 = \\ = (1-p)^5 + 5p \cdot (1-p)^4 = 1 - 10p^2 + 20p^3 - 15p^4 + 4p^5.$$

Тоді ймовірність безвідмовної роботи системи:

$$P = 1 - q = 10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5.$$

Розрахунок надійності системи "m з n" може проводитися комбінаторним методом, в основі якого лежить формула біноміального розподілу. Біноміальному розподілу підпорядковується дискретна випадкова величина m – кількість появ деякої події в серії з n дослідів, якщо в окремому досвіді ймовірність появи події дорівнює p.

При цьому ймовірність появи події визначається рівно m раз:

$$P_n(m) = P^m \cdot (1 - P)^{n-m}$$

де C_n^m – біноміальний коефіцієнт, який має назву "кількість сполучень m з n" (тобто скількома різними способами можна реалізувати ситуацію "m з n"):

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

Значення біноміальних коефіцієнтів наведено в довідковій літературі, [11].

Оскільки для відмови системи "m з n" досить, щоб кількість справних елементів було менше m, ймовірність відмови може бути знайдена по теоремі додавання ймовірностей для $m=0, 1, \dots, (m-1)$, а ймовірність безвідмовної роботи для $m=m, m+1, \dots, n$:

$$\sum_{m=0} P_m = \sum_{m=0} C_n^m P^m (1 - P)^{n-m}$$

Очевидно, що $Q+P=1$, тому в розрахунках слід вибирати ту з формул, яка в даному конкретному випадку містить меншу кількість доданків.

Для системи "2 з 5" ймовірність безвідмовної роботи:

$$P = C_5^2 p^2 (1-p)^3 + C_5^3 p^3 (1-p)^2 + C_5^4 p^4 (1-p) + C_5^5 p^5 = 10p^2(1-p)^3 + \\ + 10p^3(1-p)^2 + 5p^4(1-p) + p^5 = 10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5.$$

Ймовірність відмови тієї ж системи:

$$Q = C_5^0 \cdot (1-p)^5 + C_5^1 \cdot (1-p)^4 = (1-p)^5 + 5p \cdot (1-p)^4 = \\ = 1 - 10p^2 + 20p^3 - 15p^4 + 4p^5,$$

що, як видно, дає той же результат для ймовірності безвідмовної роботи.

У табл. 1.5 наведені формули для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи систем типу " m з n " при $m \leq n \leq 5$. Очевидно, при $m=1$ система перетворюється в звичайну систему з паралельним з'єднанням елементів, а при $m=n$ – з послідовним з'єднанням.

Таблиця 1.5 – Формули для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи систем типу " m з n " при $m \leq n \leq 5$

m	Загальна кількість елементів, n				
	1	2	3	4	5
1	p	$2p-p^2$	$3p-3p^2+p^3$	$4p-6p^2+4p^3-p^4$	$5p-10p^2+10p^3-5p^4+p^5$
2	-	p^2	$3p^2-2p^3$	$6p^2-8p^3+3p^4$	$10p^2-20p^3+15p^4-4p^5$
3	-	-	p^3	$4p^3-3p^4$	$10p^3-15p^4+6p^5$
4	-	-	-	p^4	$5p^4-4p^5$
5	-	-	-	-	p^5

Також інколи використовують мостові схеми з'єднання елементів, рис. 1.10.

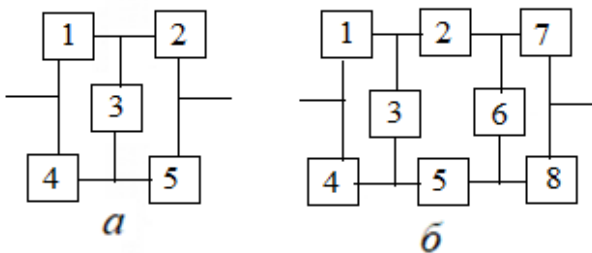


Рисунок 1.10 – Варіанти структури мостової схеми

Мостова структура – це не просто паралельне або послідовне з'єднання елементів, а це паралельне з'єднання послідовних кіл елементів з діагональними елементами, що включені між вузлами різних паралельних гілок (елемент 3 на рис. 1.10, а; елементи 3 і 6 – на рис. 1.10, б). Працездатність такої системи визначається не тільки кількістю

елементів, що відмовили, але і їх розміщенням в структурній схемі.

Для розрахунку надійності мостових систем найбільш часто використовують метод прямого перебору, але при аналізі працездатності кожного стану системи необхідно враховувати не тільки кількість елементів, що відмовили, але, як вже було вказане, і їх положення в схемі. Метод прямого перебору ефективний тільки при малій кількості елементів n . Для систем з великою кількістю елементів краще використовувати метод логічних схем з застосуванням алгебри логіки (метод мінімальних шляхів, метод мінімальних перерізів) [11, 17].

1.3.6. Перетворення схем складних комбінованих систем

В складних системах під впливом навантажень елементи взаємодіють між собою одночасно при послідовному і паралельному з'єднанні. Така взаємодія, наприклад, спостерігається для багатоелементного обладнання, що складається з великої кількості ($n=100$) радіально розташованих елементів. Наприклад, стрижні обмотки ротора асинхронного двигуна (АД) з короткозамкненим ротором. Якщо станеться відрив одного або декількох стрижнів, це не обов'язково відразу призведе до аварії. При відмові декількох сусідніх стрижнів струмове навантаження на стрижні, що залишилися цілими, може перевищити межу руйнування, і тільки тоді вся система обов'язково вийде з ладу.

Конструкції, при проектуванні та при виготовленні яких враховували взаємодію складових елементів і заздалегідь виконали дублювання їх зв'язків, мають додаткову надійність і стійкість до відмов.

Розглянемо оцінку надійності для основних структурних моделей систем, які можна представити у виді паралельно-послідовного з'єднання елементів, шляхом перетворення схем [4-6, 11].

Більшість технічних об'єктів має складну комбіновану структуру, частину елементів якої утворюють послідовні з'єднання, іншу частину – паралельні, окремі елементи або гілки структури утворюють мостові схеми або схеми типу " m з n ". Метод прямого перебору для таких систем практично не можна реалізувати. В цих випадках більш доцільно розбити систему на прості підсистеми – групи елементів, методика розрахунку надійності яких відома. Потім ці підсистеми структурної схеми надійності слід замінити умовними елементами («квазі-елементами») з вже розрахованою імовірністю безвідмовної роботи. При необхідності таке перетворення можна виконати декілька разів, до тих пір, поки залишаться квазі-елементи простої структури, методика розрахунку надійності яких також відома.

Розглянемо, як приклад, комбіновану систему, представлену на рис. 1.11.

Елементи 2 і 5, 4 і 7, 9 і 12, 11 і 14 попарно утворюють послідовні з'єднання один з одним. Замінімо їх відповідно квазі-елементами А, В, С, D.

Елементи 15, 16, 17 і 18 утворюють паралельне з'єднання (п. 1.4.3.), а елементи 3, 6, 8, 10 і 13 – систему "3 з 5". Відповідні квазі-елементи позначимо Е і F.

У результаті перетворена схема набуде вигляду як на рис. 1.11,б. На ній, в свою чергу, елементи А, В, С, D, F утворюють мостову схему, яку замінюємо квазі-елементом G. Схема, що була отримана після таких перетворень (рис. 1.11, в), має послідовне з'єднання елементів 1, G, E, 19, для яких справедливі співвідношення, що наведені в п. 1.4.2.

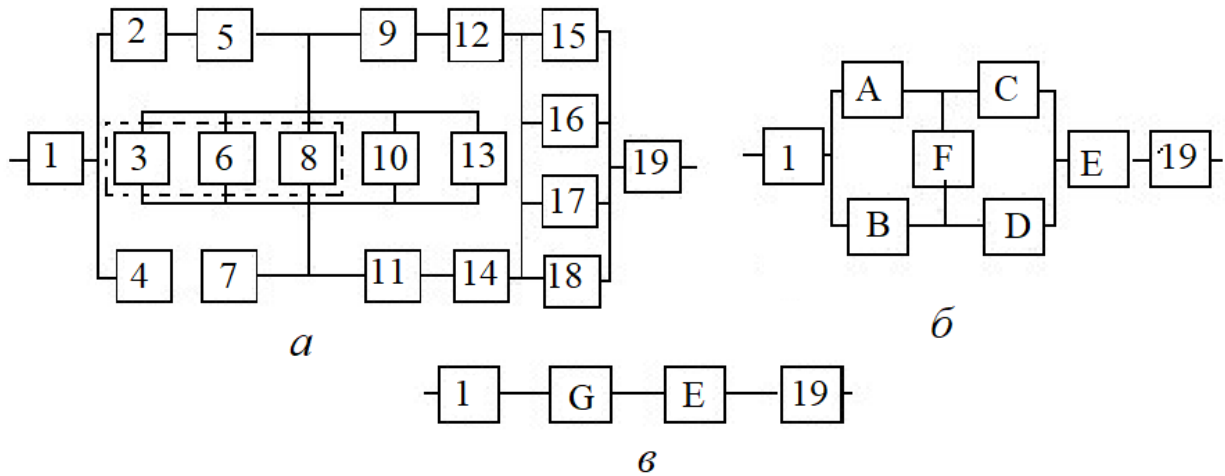


Рисунок 1.11 – Етапи перетворення складних систем

Таким чином, крок за кроком, ми замінили складну схему простою, з відомою надійністю блоків (одиниць обладнання), які або рахують на проміжних етапах, або вибирають по довідкових таблицях.

Розділ 2
Лекції № 4-5
(4 години)

РОЗРАХУНКИ ТА ЗАСОБИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ

Загальні відомості про методи оцінки надійності. Шляхи і засоби забезпечення надійності ЕО. Встановлення техніко-економічної ефективності прийнятого рішення з забезпеченням надійності об'єкта

[Література: 1, 3, 4, 6, 22, 23-25]

2.1. Загальні відомості про методи оцінки надійності

2.1.1. Ймовірність появи події, які впливають на надійність

Ймовірністю події A при проведенні деяких дій називають відношення числа тих результатів, у результаті яких настає подія A , до загального числа усіх фіналів цього випробування. Теорія надійності при розгляді властивостей випадкових процесів, з якими вона оперує, базується на математичному апараті теорії ймовірності та математичної статистики.

Теорія ймовірності оперує поняттям "подія".

Подія – факт, який може відбутися або ні. Ймовірність події A , яка позначається $p(A)$ є співвідношення кількості сприятливих випадків m до можливих n :

$$p(A)=m/n. \quad (2.1)$$

На практиці вірогідність появи події визначають за результатами статистичних іспитів. Відношення кількості фактичних появ подій M до кількості іспитів N встановлює частоту появи події $W(A)$:

$$W(A)=M/N \quad (2.2)$$

При достатньо великій кількості іспитів частота близька до теоретичної ймовірності події.

Випадкові події бувають несумісні, єдино можливі, рівно можливі, залежні. Несумісні події це події, при яких виникнення однієї події унеможливує виникнення іншої. Єдино можливі події – події, поява яких обов'язкова. Однаково можливі події – події, поява яких однаково ймовірна. Залежні події – події, які залежать

від появи інших подій. Незалежні події – події, що не залежать від появи або не появи інших подій.

Якщо події A та B несумісні, то вірогідність їх загальної подій дорівнює сумі окремої ймовірності кожної події:

$$p(A+B)=p(A)+p(B). \quad (2.3)$$

Це можна записати в частотах фактичних появ подій A і B :

$$W(A+B)=(M_1+M_2)/N=M_1/N+M_2/N=W(A)+W(B) \quad (2.4)$$

Випадкові величини бувають дискретними та неперервними.

Дискретна випадкова величина – це випадкова величина, яка може приймати окреме ізольоване значення з певною вірогідністю. Всі можливі значення випадкової величини та відповідні їм ймовірності p уявляють собою закон розподілу. Загальна кількість значень ймовірностей випадкової величини, як системи несумісних подій, дорівнює 1, тобто:

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1. \quad (2.5)$$

Закон розподілу дискретної випадкової величини подають у вигляді таблиць, графіків або гістограм.

Функція розподілу випадкової величини має вигляд:

$$F(x) = X = \sum_{x_i < x} P(X < x) \quad (2.6)$$

Функція розподілу випадкової величини для фіксованих значень напрацювання частіше описується біноміальним розподілом та розподілом Пуассона. Випадкова величина розподіляється за біноміальним законом і визначається формулою Бернуллі, якщо вона приймає цілі позитивні значення n з імовірністю $p(m)$.

Вірогідність того, що випадкова величина m не перевершить завданого значення m' , визначається:

$$P(m \leq m') = \sum_{m=0}^{m'} C_n^m \cdot p^m \cdot (1-p)^{n-m}$$

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

Для випадкової величини X , що розподілена за законом Пуассону, ймовірність того, що вона прийме значення x , визначається рівнянням:

$$P(x) = \frac{1}{x!} \cdot \alpha^x \cdot e^{-\alpha},$$

де α – параметр розподілу.

Випадкова величина називається неперервною, якщо вона може приймати всі значення з деякого кінцевого або безкінечного проміжку. Для кількісного оцінювання розподілу неперервної випадкової величини використовують ймовірність того, що $X=x$, а ймовірність події $X<x$.

Неперервна випадкова величина характеризується кривою розподілу або графіком щільності ймовірності (диференційним законом розподілу). Вона є похідною від функції розподілу $f(x)=F'(x)$. Тобто функція розподілу через щільність ймовірності:

$$F(x)=\int f(x)dx.$$

Інтегральна функція оцінювання розподілу неперервної випадкової величини (вона ще має назву «функція розподілу») може бути розрахована:

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

Ймовірність того, що X попаде на відрізок від a до b , дорівнює:

$$p(a<x<b)=\int_a^b f(x)dx$$

Успішне розв'язання питань надійності ЕО можливе лише за умови проведення досліджень із відбором та аналізом статистичної інформації щодо його відмов. Більш об'єктивні дані дає дослідження надійності обладнання безпосередньо в процесі експлуатації. В цьому випадку дослідження зводиться до збору даних про відмови обладнання, до правильного вибору закону розподілу відмов, визначенню параметрів обраного закону відмов та оцінки надійності об'єкту.

2.1.2. Засоби оцінки надійності об'єктів

Оцінку надійності можливо виконувати звітним, кореспондентським, анкетним способом та способом безпосереднього спостереження.

Звітний спосіб полягає у використанні звітів працівників виробництва щодо відмов за звітний період. Кореспондентський спосіб використовується для дослідження поодиноких об'єктів за результатами письмових звітів-відповідей підприємства, яке використовує обладнання, на запитання того, хто виконує дослідження надійності. Анкетний

спосіб схожий з попереднім, але запитання надсилаються на можливо більшу кількість підприємств. Спосіб безпосереднього спостереження полягає в дослідженні та спостереженні за попередньо розробленою програмою.

За характером обслуговування розрізняють невідновлювальні і відновлювальні об'єкти, ремонтні і неремонтні, не обслуговувані та обслуговувані (періодично, випадково та з комбінованим обслуговуванням) системи.

Невідновлюваний об'єкт – об'єкт, ремонт якого неможливий або ремонт не дозволяє відновити працездатність із заданими кількісними показниками надійності. Надійність невідновлювальних об'єктів характеризується ймовірністю безвідмовної роботи, середнім напрацюванням до відмови та інтенсивністю відмов. До невідновлюваних об'єктів можна віднести, наприклад, щітки ЕМ, розрядники, скляні чи фарфорові ізолятори, плавкі вставки запобіжників тощо.

Відновлюваний об'єкт – це завжди ремонтний об'єкт, який після відмови та усунення несправності знову стає здатним виконувати потрібні функції з заданими кількісними показниками надійності. Об'єкти, що складаються з багатьох елементів, наприклад, трансформатор або лінія електропередачі, є відновлюваними, оскільки їх відмови пов'язані з пошкодженнями одного або декількох елементів, які можуть бути замінені впродовж певного проміжку часу.

Відновлювальні системи як і не відновлювальні, можуть мати різну структуру: з основним, паралельним та змішаним з'єднанням елементів (див. п. 1.4).

Інколи один і той самий об'єкт залежно від особливостей, строку експлуатації або призначення може вважатися відновлюваним або невідновлюваним. При цьому невідновлюваний об'єкт може бути як ремонтним, так і неремонтним.

Ремонтний об'єкт – об'єкт, ремонт якого можливий та передбачений нормативною, ремонтною та/або конструкторською (проектною) документацією.

Неремонтний об'єкт – об'єкт, ремонт якого неможливий чи непередбачений нормативною, ремонтною та/або конструкторською (проектною) документацією.

При розрахунках надійності невідновлювальних систем вважають, що відмови елементів незалежні. Тому ймовірність безвідмовної роботи системи дорівнює добутку відповідних ймовірностей усіх її елементів:

$$P_c(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t).$$

Приклад розрахунку. Електричний двигун (ЕД) працює в приводі механізму з 5 елементів, кінематична схема якого наведена на рис. 2.1. Елементи схеми з'єднані між собою послідовно і мають імовірність безвідмовної роботи на протязі часу t : електричний двигун $P_{mot}(t)=0,98$; муфта №1 $P_1(t)=0,99$; редуктор $P_{red}(t)=0,97$; муфта №2 $P_2(t)=0,985$; механізм навантаження $P_{road}(t)=0,975$.

Визначити ймовірність безвідмовної роботи системи.

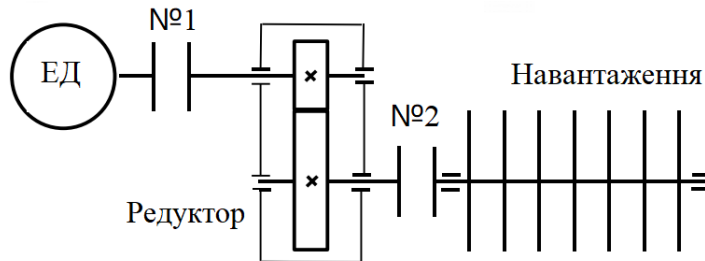


Рисунок 2.1 – Кінематична схема механізму

Розрахунок. Відповідно до кінематичної схеми механізму побудуємо структурну схему (рис. 2.2).

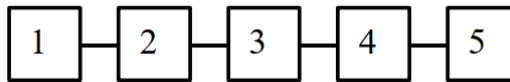


Рисунок 2.2 – Структурна схема механізму

1 – електричний двигун; 2 – муфта №1; 3 – редуктор;
4 – муфта №2; 5 – навантаження

Надійність системи можна розрахувати:

$$P_c(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_5(t) = \prod_{i=1}^5 P_i(t) = \\ = 0,98 \cdot 0,99 \cdot 0,97 \cdot 0,985 \cdot 0,975 = 0,90$$

2.2 Шляхи і засоби забезпечення надійності ЕО

Надійності обладнання поділяють на два типи – на базову та експлуатаційну. Необхідний рівень експлуатаційної надійності устаткування досягається як за рахунок забезпечення необхідної базової надійності в процесі проектування та виготовлення, так і під час експлуатації устаткування. Надійність роботи машини забезпечується, починаючи з її конструювання. До основних критеріїв працездатності деталі належать: міцність, жорсткість, витривалість, зносостійкість.

Міцність деталей машини забезпечують у процесі проектування шляхом розрахунку деталей на міцність. Жорсткість забезпечують добором матеріалу, вибором конструкції (розташуванням опор, раціональною формою перерізів), обмеженням застосування зварних конструкцій, у яких з'єднуються більше трьох деталей в одному вузлі, термічною обробкою. Темпи зношування деталей можна зменшити шляхом зменшення тиску на поверхні тертя, рівномірного розподілу тиску, надання деталям форми, яку вони набувають при зносі, добором мастил, запобіганням попадання в зону тертя забруднювачів. Для деталей, які підлягають абразивному зношенню можна зменшити поверхню тертя або застосовувати змінні елементи. Для збільшення терміну використання деталі доцільно використовувати компенсування зносу в парах тертя, наприклад в клинових, конічних ущільненнях, гідравлічне притиснення половинок підшипника, пружинні компенсатори зносу, тощо.

Значно впливає на міцність машини та її вузлів матеріал, із якого вони виготовлені. Для виготовлення деталей використовують сталь, чавун, кольорові метали, пластмаси, композитні матеріали. Деталі, що виготовляють зі сталі з низьким змістом вуглецю, не змінюють своїх властивостей під час загартовування. Цементация дозволяє збільшити твердість поверхневого шару. Середньо-вуглецеві сталі (0,25-0,30% вуглецю) застосовують для виготовлення деталей, які підлягають частковій термічній обробці. Сталі з високим вмістом вуглецю (0,5-0,7%), і добавками марганцю і кремнію використовують для ресор, пружин.

Поліпшити властивості металів можна шляхом термічної обробки. При цьому під час її нагрівання та охолодження йде зміна властивостей матеріалу, йде його загартовування. Загартовування та відпуск значно покращують властивості сталі.

В електромашинобудуванні використовують високоміцні сталі, які після відповідної термічної обробки мають міцність вищу за конструкційну (ротори турбогенераторів). Це хромонікелеві сталі, додатково леговані в різних сполученнях та співвідношеннях молібденом, вольфрамом, ванадієм. Їх використовують для виготовлення відповідальних деталей з великою площиною перерізу для яких треба забезпечити високу міцність, рис. 2.3.

В деяких випадках (литі колінчасті вали, сепаратори підшипників, зубчаті та черв'ячні колеса, втулки) використовують графітовані сталі. Загартовані графітовані сталі використовують для виготовлення корпусів та лопаток дробарок.

*а**б*

Рисунок 2.3 – Ротор турбогенератора

а – без обмотки; *б* – з обмоткою

Загартовування може бути наскрізним та поверхневим. Поверхнєве загартовування виконують із нагрівом у газовому полум'ї, струмами високої частоти, лазером. Нагрівання для загартовування по усьому об'єму виконують в печах.

Застосовують також хіміко-термічну обробку, цементацію, азотування, нітроцементацию та нітро-азотування. Широко вживають дифузійну металізацію: алітування, борування, хромування, сульфідкування – методи, що значно зменшують корозійний знос. Ефективним способом підвищення механічних властивостей сталі, чавуну, сплавів є поверхнєве пластичне деформування, що зменшує вплив концентраторів напруги, поліпшує шорсткість поверхні, збільшує контактну міцність та стійкість проти зносу. Цей метод не потребує великих витрат енергії та робочого часу. Реалізувати цей метод можливо роликком, кулькою, механічною чеканкою, надклепуванням, шляхом розкачування роликком. Це технологічні засоби. Також завжди використовують заходи по подовженню строку роботи обладнання за рахунок поліпшення виконання монтажу, наладки, експлуатації, виконання сервісного обслуговування та ремонтів.

Забезпечення базової надійності включає основні стадії:

1) перша стадія – попередні дослідження, порівняльний аналіз надійності різних варіантів конструкції. На цій стадії аналізують вимоги до обладнання, вивчають умови його використання, інформацію щодо надійності схожого обладнання. На основі аналізу вибирають остаточний варіант.

2) друга стадія – економічний аналіз остаточного варіанту. Аналіз полягає у виборі такого варіанта, при якому досягається мінімум загальних витрат на проектування, виготовлення та експлуатацію.

3) третя стадія – робоче проектування, виготовлення та випробовування устаткування. Етап робочого проектування найбільш відповідальний. На цьому етапові передбачають: рішення по забезпеченню терміну роботи обладнання, ремонтпридатність, засоби контролю стану вузлів та деталей при експлуатації, пристрої та обладнання для інспектування та обслуговування обладнання, засоби захисту від перевантаження; забезпечують максимальну стандартизацію та уніфікацію вузлів та деталей та інші заходи по збільшенню надійності. На третій стадії розробляють документацію на технічне обслуговування та ремонт.

Потрібний рівень надійності устаткування також забезпечують шляхом усунення недоліків на основі зібраної та обробленої інформації щодо стану обладнання, заміною менш надійного обладнання або його деталей більш надійними; виконанням модернізації конструкції.

Для визначення загальної кількісної надійності застосовуються кількісні показники окремих властивостей: безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності й збережаності, – а також комплексні показники, що характеризують готовність і ефективність використання технічних об'єктів (наприклад, електроустановок). Ці показники дозволяють проводити розрахунково-аналітичне оцінювання кількісних характеристик окремих властивостей при виборі різних схемних і конструктивних варіантів устаткування при їх розробці, випробуваннях і в умовах експлуатації.

Комплексні показники надійності використовуються головним чином на етапах випробувань і під час експлуатації при оцінюванні й аналізі відповідності експлуатаційно-технічних характеристик технічних об'єктів (пристроїв) існуючим умовам.

Залежно від ситуації використовуються такі показники надійності:

- одиничний показник надійності;
- комплексний показник надійності;
- експлуатаційний показник надійності;
- експериментальний показник надійності;
- розрахунковий показник надійності;
- екстрапольований показник надійності

- прогнозований показник надійності;
- середній показник надійності;
- стаціонарний та нестаціонарний показник надійності.

Надійність об'єкта є комплексною властивістю і може містити в собі безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та збережуваність, або поєднання цих властивостей (рис. 2.4).

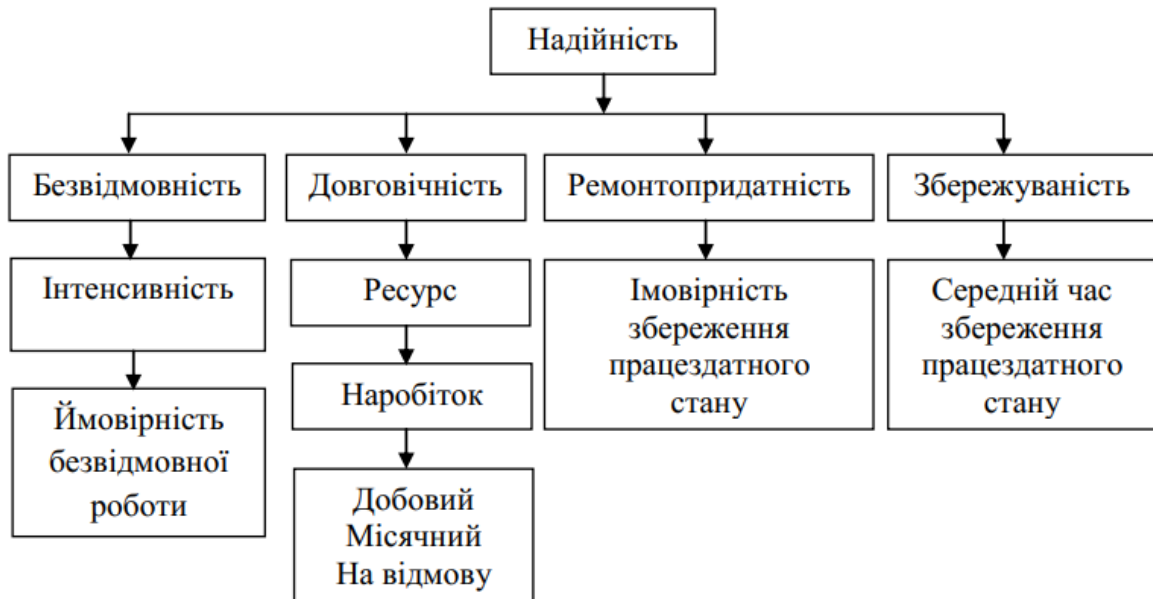


Рисунок 2.4 – Комплексні властивості надійності об'єкта

Безвідмовність – властивість об'єкта виконувати потрібні функції в певних умовах протягом заданого інтервалу часу.

Довговічність – властивість об'єкта виконувати потрібні функції до переходу у граничний стан при виконанні системи технічного обслуговування та ремонту.

Ремонтпридатність – властивість об'єкта бути пристосованим до підтримання та відновлення стану, в якому він здатний виконувати потрібні функції за допомогою технічного обслуговування та ремонту.

Збережуваність – властивість виробу зберігати в заданих межах значення параметрів, що характеризують здатність виробу виконувати необхідні функції, протягом і після зберігання або транспортування.

2.3. Забезпечення надійності системи в залежності від навантаження та заданої міцності

При звичайних розрахунках вважають, що об'єкт буде працювати надійно та безвідмовно якщо навантаження не перевищує закладену міцність елементів. Але навантаження Q і міцність R є випадковими величинами і залежать від багатьох факторів. Тому кожного разу слід знати їх розподіл, рис. 2.5.

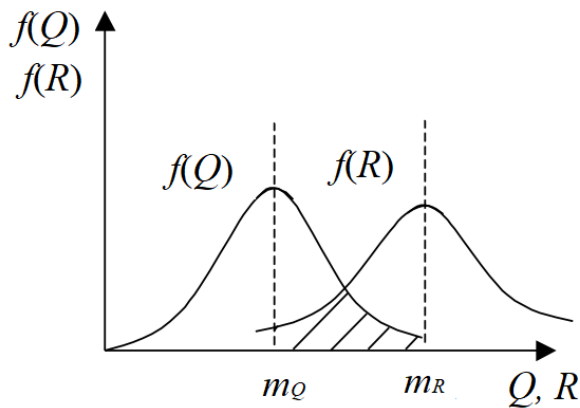


Рисунок 2.5 – Щільність розподілу навантажень Q та міцності R

Заштрихована частина перетину графіків розподілу навантажень Q та міцності R і буде областю, яка характеризує ймовірність появи відмови деталі.

Вважаємо, що ймовірність безвідмовної роботи $P(R > Q)$ визначається законом розподілу випадкової величини $L = R - Q$:

$$P(R > Q) = \int_{m_R - m_Q}^{\infty} f(t) dt.$$

де m_R та m_Q – математичні сподівання R та Q .

З ймовірнісної точки зору математичне сподівання характеризує біля якої величини коливається середнє значення випадкової величини, одержане в результаті спостережень. Властивості математичного сподівання:

- 1) математичне сподівання сталої дорівнює сталій;
- 2) сталий множник можна винести за знак математичного сподівання;
- 3) математичне сподівання суми випадкових величин дорівнює сумі їхніх математичних сподівань.

Потрібний рівень надійності устаткування забезпечують удосконаленням методів експлуатації та модернізацією обладнання; якісним технічним обслуговуванням та ремонтом; усуненням недоліків на основі зібраної та обробленої інформації щодо стану обладнання, заміною менш надійного обладнання або його вузлів на більш надійні.

2.4. Встановлення техніко-економічної ефективності прийнятого рішення з забезпеченням надійності об'єкта

Відповідно до вимог «Єдиної система технологічної підготовки виробництва. Технологічність конструкції виробу», матеріаломісткість виробів визначається кількістю матеріальних ресурсів, потрібних для їх виготовлення, експлуатації та ремонту. Оскільки цей термін не враховує закладений ресурс, то стандарт передбачає «питому матеріаломісткість продукції», яка характеризується співвідношенням матеріаломісткості до отриманого ефекту або до номінального значення основного параметра.

У структурі матеріаломісткості продукції загальну питому матеріаломісткість продукції M уявляють як суму виробничої M_R та експлуатаційної M_{exp} матеріаломісткості.

$$M = M_R + M_{exp};$$

де M_m – витрати на виріб;

W – корисний ефект;

$M_R = M_m / W$ – виробнича матеріаломісткість;

M_{exp} – експлуатаційна матеріаломісткість;

$$M_m = \sum_{i=1}^n M_i + M_{tb} + M_{met}$$

де $\sum_i^n M_i$ – сумарна розрахункова маса n деталей (за кресленнями);

Експлуатаційна матеріаломісткість

$$M_{exp} = M_{loss} / W,$$

де M_{loss} – збитки при експлуатації об'єкта.

Таким чином, показник M враховує раціональність та технологічність конструкції, рівень технології виготовлення. Економію матеріальних ресурсів, отриману внаслідок зниження матеріаломісткості, можна визначити:

$$E = (M_{bas} \cdot M_{new}) W_{new} B_{new},$$

де M_{bas} , M_{new} – питомі матеріаломісткості базового та нового виробів;

W_{new} – показник, який характеризує споживчі властивості нового виробу (продуктивність, вантажопідіймальність...);

B_{new} – обсяг виробництва нових виробів за запланований період.

Вибір метода відновлення деталей визначається характером дефекту, матеріалом деталі, особливостями її експлуатації та конструкції. Технологічний процес зміцнення деталей повинен забезпечувати можливість виконання вимог технічної документації на виготовлення (міцність, якість обробки,...) та при цьому забезпечувати економічну ефективність, яка характеризується наступними показниками:

1) співвідношення основного технологічного часу T_{rem} (часу витраченого безпосередньо на ремонт) до всього часу виконання ремонту T_{dob} :

$$T_{rem}/T_{dob} = T_{rem} / (T_{rem} + T_{tram}),$$

де $T_{dob} = T_{rem} + T_{tram}$;

T_{tram} – допоміжний час (час, що витрачається на демонтаж, транспортування, встановлення на місце, пуск, налагодження);

2) відношення підготовче-заключного часу T_{PZ} до загального часу відновлення та зміцнення N деталей партії:

$$T_N = N \cdot T_{st} + T_{PZ}$$

3) коефіцієнт завантаження обладнання відображає вплив запроектованого процесу відновлення (зміцнення, модернізація) деталей на завантаження обладнання та дорівнює часу виконання робіт із ремонту та відновлення до загального фонду часу цього обладнання;

4) показник економічності варіанта відновлення або додаткового зміцнення деталі – показник (коефіцієнт) доцільності

$$K_{econ} = (C_{new} - C_{mod}) / C_{new},$$

де C_{new} – вартість нової деталі, C_{mod} – вартість відновленої (зміцненої) деталі;

5) показник підвищення працездатності (коефіцієнт експлуатаційної надійності)

$$K_{EN} = L_{new} / L_{mod},$$

де L_{new} , L_{mod} – терміни роботи нової та відновленої (зміцненої) деталі.

Вибір оптимального варіанта відновлення (зміцнення) деталей виконують в три етапи: установлюють доцільність, обирають метод, розглядають можливі варіанти. Проводити відновлення (зміцнення, модернізацію) деталей має сенс коли її відносна собівартість не перевищуватиме відповідного показника виготовлення нової деталі:

$$C_{mod} / T_{mod} \leq C_{new} / T_{new},$$

де T_{mod} , T_{new} – термін служби відновленої деталі та нової.

Для швидкозношуваних деталей враховують й втрати з-за простоїв під час їх заміни:

$$C_{mod} \leq T_{mod} C_{new}/T_{new} + C_{mid}(T_{mod}/T_{new} + 1).$$

Чинники, які впливають на довговічність роботи обладнання можна поділити на дві групи – ті, що її підвищують або зменшують. Підвищенню сприяють технічний рівень виробництва, форми обслуговування та ремонту, стандартизовані конструкції деталей та вузлів, проведена модернізація тощо. Зниженню сприяє фізичний знос та, як наслідок, збільшення обсягів ремонтних робіт.

Питома вага збитків на ремонт та використання машини для будь якої i -тої кількості циклів експлуатації за весь термін її використання:

$$Z = \frac{S + \sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n T_i} + \frac{\sum_{i=2}^{n-1} R_{i=1}}{\sum_{i=1}^n T_i}$$

де S – вартість придбання та монтажу машини за вилученням її ліквідаційної вартості;

E_i – загальні видатки на технічне обслуговування та потоковий ремонт;

R_i - видатки на капітальні ремонти на протязі i -того циклу;

T_i – час i -того ремонтного циклу;

n – кількість циклів робочих процесів в період експлуатації;

Кількість циклів, що буде відповідати найменшій питомій вазі, є оптимальною.

РОЗДІЛ 3
Лекції № 6-7
(4 години)

**ВПЛИВ МЕХАНІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ
ОБЛАДНАННЯ. СИСТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ І ДІАГНОСТИКИ**

Поняття витривалості механічного обладнання під час експлуатації.

Основні показники безвідмовності роботи об'єктів.

Система планово-попереджувальних ремонтів (Система ППР). Технічне обслуговування та ремонт електрообладнання з урахуванням технічного стану

3.1. Поняття експлуатаційної витривалості обладнання

3.1.1 Утрата працездатності машини внаслідок втоми матеріалу

Деталі та вузли устаткування, які підпадають під дією різних навантажень, зношуються та руйнуються. Обладнання відмовляє в основному з трьох причин:

- внаслідок зносу,
- внаслідок поломок, які виникли зненацька,
- внаслідок виникненням та зростанням тріщин від втоми матеріалу, що приводе до повної відмови, до поломки обладнання.

Несподівані поломки зазвичай виникають від одноразових перевантажень, які в основному виникають при порушеннях технологічного процесу через недостатню кваліфікацію або недогляд персоналу, через невідповідність сировини технологічним вимогам. «Втома» матеріалу деталі також може привести до несподіваної поломки.

Руйнування деталі від втоми зазвичай спостерігається коли в деталі виникають змінні напруження, значення яких не перевищують напруження що можуть призводити до руйнування матеріалу. Наприклад при частих згинах дроту, він може зруйнуватися при невеликих навантаженнях, тоді, як при постійному навантаженні (розтягу), дріт залишається не ушкодженим.

Питаннями вивчення причин виходу з ладу деталей у яких напруження не перевищують межі міцності займається наука про довговічність (витривалість). Багато деталей ЕМ навантажені напруженнями, що циклічно змінюються з часом. Вал машини завжди під час роботи навантажений циклічно, навіть тоді, коли зовнішні сили зберігають свої значення. Основні поняття витривалості матеріалу подано у табл. 3.1.

Таблиці 3.1 – Поняття витривалості в теорії надійності

Терміни	Поняття
Втома	Процес поступового накопичення пошкоджень матеріалу під дією змінних напружень
Опір втоми	Властивість матеріалу протистояти втоми
Мало-циклова втома	Втома матеріалу при пружно-пластичному навантаженні (при кількості навантажень до 50000 циклів)
Багато-циклова втома	Втома матеріалу при пружному навантаженні (при кількості навантажень не менше ніж 50000 циклів)
Іспит на втому	Експериментальне визначення кількісних характеристик втоми матеріалу
База іспитів	Попередньо задана кількість навантажень
Пошкодження внаслідок втоми:	
тріщина втоми	Часткове розділення матеріалу деталі
злам від втоми	Повне розділення матеріалу деталі
Навантаження	Сукупність послідовних значень напружень за період навантаження
Частота циклу	Кількість циклів за одиницю часу
Період циклів	Час реалізації одного циклу
Напруження: номінальне максимальне мінімальне середнє	напруження без врахування концентрацій найбільше за алгебраїчним значенням середнє, зменшене на значення амплітуди (статична складова)
Відносне число циклів	Співвідношення поточної кількості циклів та довговічності
Цикл: симетричний	максимальні та мінімальні напруження дорівнюють одне одному за абсолютними значеннями
асиметричний знакозмінний	максимальні та мінімальні напруження не дорівнюють одне одному напруження змінюють свої знаки
Поточна кількість циклів	кількість навантажень, яку деталь спроможна витримати до руйнування
Характеристики опору втоми:	
довговічність	Кількість безруйнівних навантажень деталі
крива втоми	Графік залежності максимальних напружень від довговічності
межа втоми	Значення максимального напруження, яке відповідає заданій циклічній довговічності

3.1.2. Основні показники безвідмовності об'єктів

Надійність об'єкта є комплексною властивістю і об'єднує в собі безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та збережуваність (див. рис. 2.1).

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ – умовна густина імовірності виникнення відмови об'єкта, яка визначається за умови, що до цього моменту відмова не виникла (тільки для невідновлюваних об'єктів);

Середня інтенсивність відмов ($\lambda(t_1-t_2)$) – середнє значення інтенсивності відмов у заданому інтервалі часу.

Імовірність безвідмовної роботи $R(t_1, t_2)$ – імовірність того, що протягом заданого часу роботи відмова обладнання не виникне. Тож ймовірність безвідмовної роботи є функцією часу t , вона є спадною функцією і може набувати значень від 1 до 0. Графік імовірності безвідмовної роботи об'єкта зображено на рис. 3.1.

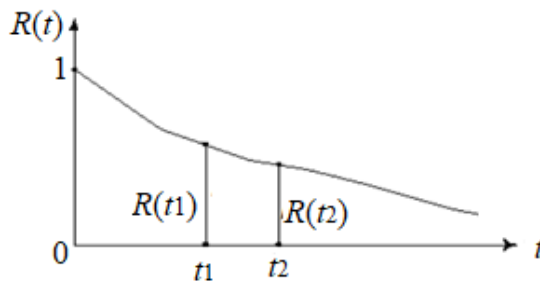


Рисунок 3.1 – Графік імовірності безвідмовної роботи об'єкта

Як видно з графіка (рис. 3.1), функція $R(t_1, t_2)$ характеризує зміну надійності в часі та дає наочну оцінку. Наприклад, на випробування поставлено 1000 зразків однотипних елементів, тобто $n_0 = 1000$. Під час випробування елементи, що відмовили, не заміняли справними. За проміжок часу (t_1, t_2) відмовило 10 елементів. Отже, $R(t_1, t_2) = 0,99$, тому будь-який елемент із цієї вибірки не відмовить за проміжок часу (t_1, t_2) з імовірністю $R(t_1, t_2) = 0,99$.

Іноді доцільно використовувати не ймовірність безвідмовної роботи, а ймовірність саме відмови $F(t_1, t_2)$. Оскільки працездатність і відмова – стани несумісні і протилежні, то їх імовірності пов'язані залежністю:

$$R(t_1, t_2) + F(t_1, t_2) = 1, \quad (3.1)$$

Тобто:
$$F(t_1, t_2) = 1 - R(t_1, t_2). \quad (3.2)$$

На практиці досить часто доводиться визначати умовну ймовірність безвідмовної роботи об'єкта в заданому інтервалі часу $R(t_1, t_2)$ як що в момент часу t_1 об'єкт працездатний і відомі $R(t_1)$ та $R(t_2)$.

На підставі формули ймовірності одночасної появи двох залежних подій, що визначаються добутком ймовірності виникнення однієї з них на умовну ймовірність другої, обчислену за умови, що перша подія вже настала, запишемо:

$$R(t_2) = R(t_1) \cdot R(t_1, t_2), \quad (3.3)$$

тобто

$$R(t_1, t_2) = \frac{R(t_2)}{R(t_1)}.$$

За відомими статистичними даними можна записати:

$$R(t_1, t_2) = \frac{N(t_2)}{N(t_1)},$$

де $N(t_1)$, $N(t_2)$ – кількість об'єктів, працездатних у моменти часу t_1 і t_2 :

$$N(t_1) = N_0 - n(t_1); \quad N(t_2) = N_0 - n(t_2), \quad (3.4)$$

де N_0 – загальна кількість об'єктів, стан яких контролюється;

$n(t)$ – кількість відмов об'єктів за час t .

Зазначимо, що не завжди напрацювання встановлюють, як роботу на протязі конкретного часу (в годинах, в роках). Наприклад, для оцінювання ймовірності безвідмовної роботи комутаційних апаратів зі значною кількістю перемикачів (вакуумних, оливних, елегазових вимикачів та ін.) як змінне значення напрацювання доцільно брати кількість циклів «увімкнути–вимкнути».

Для оцінки напрацювання ковзних контактів зручніше брати кількість проходжень струму через контакти, а оцінюючи надійність об'єктів, що рухаються, напрацювання доцільно брати в одиницях довжини проходжень під час технологічних процесів (м, км...). Математичні вирази для визначення $R(t_1, t_2)$, $F(t_1, t_2)$ та (t) при цьому залишається незмінними.

Середнє напрацювання до відмови МТТФ (англ. *mean operating time to first failure*) – математичне сподівання напрацювання об'єкта до першої відмови.

Середній параметр потоку відмов $Z(t_1, t_2)$ – середнє значення параметра потоку відмов у заданому інтервалі часу, де параметр потоку відмов $Z(t)$ – відношення математичного сподівання кількості відмов відновлюваного об'єкта за досить малий час його напрацювання до значення повного напрацювання.

Частота відмов – це щільність розподілу часу безвідмовної роботи, або похідна від ймовірності безвідмовної роботи. Тому:

$$\alpha(t) = Q'(t) = -P'(t)$$

Між частотою відмов, ймовірністю безвідмовної роботи і ймовірністю появи відмови існують наступні залежності[^]

$$Q(t) = \int_0^t \alpha(x)dx; \quad P(t) = 1 - \int_0^t \alpha(x)dx.$$

Інтенсивність відмов є умовною щільністю розподілу часу безвідмовної роботи для моменту часу t при умові, що до моменту часу t відмови обладнання не було. Таким чином,

$$\lambda(t) = \frac{\alpha(t)}{P(t)}.$$

Так як $P(t) < 1$, то завжди виконується співвідношення $\lambda(t) > \alpha(t)$.

Інтегруючи вираз, маємо:

$$-\int_0^t \lambda(x)dx = \ln P(t), \quad \text{або} \quad P(t) = \exp \left[-\int_0^t \lambda(x)dx \right]$$

Якщо $\lambda(x) = \lambda = \text{const}$, тоді $P(t) = e^{-\lambda t}$, $\alpha(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$.

Середнє напрацювання на відмову (середній час безвідмовної роботи) є математичним очікуванням напрацювання до першої відмови. Таким чином,

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

3.2. Система планово-попереджувальних ремонтів (Система ППР)

Для забезпечення безвідмовної роботи електротехнічного устаткування вже багато років служить система планово-попереджувальних ремонтів (ППР). Це пов'язано з тим, що знос, відмова окремих частин і деталей ЕО може привести до його аварії. Тому основним завданням технічного обслуговування ЕО є збереження його в робочому стані, подовження міжремонтного терміну служби, зниження витрат на його ремонт і підвищення якості ремонту.

Система ППР включає роботи з технічного обслуговування і ремонту обладнання: міжремонтне обслуговування, профілактичні огляди, поточний ремонт, середній ремонт, капітальний ремонт. Позапланові роботи, викликані аварією або незадовільною експлуатацією обладнання, системою не передбачаються.

Практично система ППР устаткування містить у собі два види робіт – міжремонтний сервіс та періодичне проведення планових ремонтних операцій. Плановий ремонт складається з поточного і повного (середнього, капітального) ремонтів ЕО.

Під час міжремонтного сервісу виконують періодичні огляди обладнання, контроль за режимами роботи, перевірку ступеня забрудненості і нагріву, коректності роботи комутаційної апаратури, рівень і наявність в достатньому об'ємі оливи, збереження заземлення. Робітники виконують підтяжку болтових з'єднань, замінюють оливу, мастило і щітки, усувають маленькі дефекти, для невеликих асинхронних машин виконують заміну підшипників тощо.

Міжремонтний сервіс здійснюється оперативним і черговим персоналом, а також персоналом сторонніх організацій, за яким закріплено обладнання. Щоденне міжремонтне обслуговування є повсякденною роботою профілактичного характеру і містить у собі спостереження за виконанням правил технічної експлуатації устаткування, а також своєчасне усунення дрібних несправностей та регулювання механізмів. Обслуговування виконується під час перерв у роботі без порушення режимів виробництва і здійснюється черговими слюсарями-регулювальниками, наладчиками та кваліфікованими робітниками.

Міжремонтний сервіс має профілактичне, тобто попереджувальне значення, його мета – виявлення обладнання або його окремих вузлів, які потребують негайного проведення поточного ремонту. Зазвичай такий висновок дає персонал ремонтних служб, що саме виконують ці роботи.

Поточний ремонт – це малий за обсягом ремонт з частковим розбиранням ЕО або без розбирання. При поточному ремонті очищають обладнання від пилу і бруду, замінюють або відновлюють окремі деталі і частини пристроїв, позбавляються маленьких несправностей і пошкоджень обладнання, відновлюють електричні з'єднання, замінюють або усувають недоліки ізоляції, замінюють обгорілі контакти силових трансформаторів та автоматичних вимикачів, замінюють або доливають оливу в вимикачі, лагодять щіткотримачі і замінюють щітки, пружини, бандажі тощо.

Середній ремонт полягає у відновленні експлуатаційних характеристик машин (агрегатів) шляхом ремонту або заміни тільки зношених або ушкоджених складових частин. При цьому обов'язково перевіряється технічний стан інших частин з усуненням виявлених несправностей. При середньому ремонті може проводитися капітальний ремонт (заміна) окремих вузлів. Середній ремонт устаткування проводиться на місці його установки без демонтажу машин силами ремонтного персоналу виробничого цеху із залученням ремонтно-механічного цеху під керівництвом цехового механіка, який відповідає за всі роботи.

В об'єми середнього ремонту входять наступні роботи:

- ремонт окремих вузлів із заміною деталей, що мають знос, який перевищує допустимий;
- перевірка всіх механізмів (агрегатів) із частковим розбиранням;
- перевірка і заміна зношених елементів: фрикційних стрічок, тросів, ланцюгів, пасів; очищення та/або планова заміна підшипників кочення і ковзання;
- перевірка й промивання редукторів;
- зачищення ушкоджених поверхонь, видалення забоїн і задирок; перевірка і заміна зношених прокладок, ущільнень і кріпильних деталей;
- фарбування, при необхідності, окремих складових частин машини;
- складання машини, перевірка кріплення вузлів і механізмів, регулювання, випробування на ходу.

Капітальний (повний) ремонт є обов'язковим для обладнання, що відпрацювало термін, визначений заводом-виробником. Під час цього ремонту ЕО розбирають повністю, замінюють зношені частини, модернізують окремі складальні одиниці та елементи. Відремонтоване ЕО перевіряють і досліджують відповідно до Правил технічної експлуатації (ПТЕ). При капітальному ремонті розміри допусків і посадок сполучених деталей і вузлів доводять до відповідності з технічними умовами, оновлюється зовнішній вигляд устаткування.

В об'єми капітального ремонту входять наступні роботи:

- заміна всіх вузлів і деталей, що зносилися, або реставрація їх з доведенням до номінальних розмірів, установлених умовами на нову машину;
- центрування, балансування вузлів і деталей устаткування;
- перевірка цілісності станин, корпусів, рам машини, фундаментів;

- перевірка, чищення і ремонт повітря-, оливо-проводів та всіх інших трубопроводів по подаче води, азоту, водню, засобів очищення трубопроводів;
- наладка, регулювання або заміна всіх приладів систем захисту, контролю та керування;
- фарбування окремих частин або, при необхідності, усієї машини;
- комплексна перевірка окремих вузлів та обладнання в цілому, регулювання й випробування.

При капітальному ремонті виконуються роботи з модернізації машини, обумовлені планом модернізації. Цим видом ремонту відновлюються первісні паспортні характеристики встаткування відповідно вимог спеціальної технічної документації, яка складається з ТУ на повний ремонт, з документів з розрахунками норм витрат матеріалів і запасних частин та з інших. Виконання робіт оформлюється спеціальним актом приймання-здачі ремонтних робіт, до якої додають протоколи і акти про результати вимірювання опору ізоляції ЕО і заземлюючих пристроїв, результати хімічного аналізу оливи, перевірки стану релейного захисту, пристроїв та кіл вторинної комутації тощо.

Капітальний ремонт виконується, як правило, силами ремонтно-механічних бригад підприємства. У випадку, коли підприємство не має власної ремонтної бази і ремонтного персоналу достатньої кваліфікації, капітальний ремонт виконується спеціалізованими організаціями.

Період роботи ЕО між двома ремонтами (черговими) має назву «міжремонтний період». Міжремонтний період між двома плановими ремонтами називають ремонтним циклом.

Для ефективності виконання ППР повинна бути повна картотека щодо експлуатації, ремонтів, оглядів, модернізації ЕО. В картотеках реєструють всі аварії обладнання, недоліки, виявлені при його оглядах, відомості про профілактичні випробування і про проведені ремонти.

Розрізняють три основні методи проведення ППР:

1) після оглядового ремонту планують не наступні ремонти, а наступні періодичні огляди. Якщо установлено, що обладнання не збереже працездатності до наступного огляду, призначається неплановий ремонт. Останнє дає можливість краще підготуватись до його проведення і виконати ремонт швидше та якісніше. Недолі-

ком даного методу є відсутність попереднього планування ремонтів, що може призвести до тимчасових перевантажень працівників ремонтної служби, а в інші періоди часу навпаки – до їх неповної зайнятості;

2) для кожної типу обладнання складають план-графік із зазначенням термінів проведення та об'ємів ремонтних робіт. В наступний час можливе корегування даного плану з врахуванням фактичних результатів виконаних оглядів, що дозволяє зробити систему ремонтів більш гнучкою та забезпечити більш раціональне використання технологічного обладнання протягом всього терміну його експлуатації. Цій метод на практиці використовується найбільш часто;

3) метод примусових ремонтів передбачає обов'язковий ремонт машин в установлені терміни. Ремонт проводять в строго встановлені терміни, згідно із заздалегідь розробленою технологією, з обов'язковим здійсненням всіх намічених заміन деталей та вузлів або їх відновлення. Використання даного методу доцільне тільки на ділянках з однотипним обладнанням при стабільному режимі його роботи, наприклад для конвеєрів та поточкових ліній .

На даний час у зв'язку з розвитку системи сервісного обслуговування система ППР зазнає відповідних змін, однак основні практичні заходи системи зберігаються. Зміни відбуваються у організації і керуванні процесом ППР.

Річний план-графік ремонту складається на кожну одиницю обладнання на підставі даних об'ємів робіт, структури і тривалості міжремонтного циклу та відпрацьованого часу за період від останнього планового ремонту. На підставі затвердженого річного плану-графіка складаються уточнені помісячні графіки. Місячним графіком установлюється рівномірне завантаження ремонтного персоналу, призначаються відповідальні особи за проведення ремонтних робіт у встановлений термін.

Для підприємств із сезонним виробництвом виконання ремонтних робіт планується в міжсезонний період під час найменшого завантаження, а також у період планових зупинок обладнання цехів і підприємства в цілому. Наприклад, планувати і виконувати ремонтні роботи на ТЕЦ краще в літні місяці.

Сучасне обладнання в загальному випадку складається з трьох основних частин: механічної (що включає кінематичну, гідравлічну та пневматичну системи), електричної та електронної (блоки керування та контролю).

Наближення до граничного стану деталей механічної частини можна, як правило, установити за візуальними ознаками, за результатами інструментальних вимірювань або за допомогою спеціальної апаратури: збільшення ступеня зносу поверхневих шарів елементів, виникнення окремих ушкоджень, тріщин, підвищення вібрації тощо.

Своєчасне прогнозування наближення машини до граничного стану дозволяє замінювати деталі обладнання заздалегідь, у плановому порядку.

Те ж саме можна сказати щодо електричної частини установок і агрегатів: до ізоляції електропроводки, до обмоток електричних машин (двигунів і генераторів) та електричних апаратів. Слід пам'ятати, що інколи наближення до граничного стану деталей та вузлів, що входять до складу обладнання, не супроводжується видимими ознаками і не може бути виявлене до настання відмови. Заміна таких деталей, вузлів та елементів можлива тільки у неплановому порядку, за потребою. У зв'язку із цим, за способом організації проведення всі ремонти розділені на планові і непланові.

Плановий ремонт – це ремонт, передбачений програмою. Він виконується через установлену нормами кількість годин оперативного часу роботи обладнання або при досягненні певного граничного технічного стану.

Неплановий ремонт – це ремонт, який здійснюється у неплановому порядку, за потребою. Трудові та матеріальні ресурси, а також час простою машини при її неплановому ремонті регламентуються нормами ПТЕ. Різновидом непланового ремонту, що також виконується з метою відновлення працездатності обладнання, є аварійний ремонт.

Аварійний ремонт – це неплановий ремонт, потреба в якому обумовлюється дефектами конструкції або виготовлення машини, дефектами її ремонту або порушенням правил технічної експлуатації. При наявності на підприємстві правильно організованої системи ППР аварійні ремонти, як правило, не відбуваються.

В наш час у зв'язку із підвищенням довговічності машин, поліпшенням діагностики та обслуговування намічається перехід до двох-видової системи ремонту, що включає тільки поточні та капітальні ремонти.

Натепер основним принципом нової технології управління технічним станом ЕО є ремонт по фактичному стану – метод «ТО і Р» (технічне обслуговування та ремонт), що базується на індивідуальному спостереженні за реальними змінами технічного стану ЕО в процесі експлуатації. У цьому випадку система ТО і Р являє

собою сукупність правил, що забезпечують задане та якісне управління виробничою експлуатацією ЕО на основі контролю його технічного стану.

Річний план-графік ремонту складається на кожну одиницю обладнання на підставі даних обліку роботи, структури і тривалості міжремонтного циклу та відпрацьованого часу за період від останнього планового ремонту. На підставі затвердженого річного плану-графіка складаються уточнені помісячні графіки. Місячним графіком установлюється рівномірне завантаження ремонтного персоналу, призначаються відповідальні особи за проведення ремонтних робіт у встановлений термін. Висновок про придатність обладнання до експлуатації робиться на підставі порівняння результатів випробувань із чинними нормами, результатами попередніх випробувань, а також вимірюваннями, отриманими на однотипному обладнанні. Нетранспортабельне обладнання випробовується у пересувних електротехнічних лабораторіях.

Строки проведення капітальних ремонтів основного обладнання електростанцій та підприємств різні, табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Строки проведення капітальних ремонтів ЕО

Назва обладнання	Строки
Турбогенератори до 100 МВт	1 раз на 15 років
Турбогенератори більш 100 МВт	1 раз на 5–6 років
Гідрогенератори	1 раз в 4–6 років
Синхронні компенсатори	1 раз в 4–5 років
Головні трансформатори, реактори і трансформатори власних потреб	Перший раз не пізніше, ніж через 8 років після включення в експлуатацію, надалі – при необхідності, залежно від результатів встановлення їх стану
Оливні вимикачі	1 раз на 6–8 років
Вимикачі навантаження, роз'єднувачі, заземлюючі ножі	1 раз на 4–8 років
Повітряні вимикачі та їх приводи	1 раз на 4–6 років
Компресори для повітряних вимикачів	1 раз на 2–3 роки
Відділювачі та короткозамикачі з приводами	1 раз на 2–3 роки
Конденсаторні установки	1 раз на 6 років
Акумуляторні батареї	Не пізніше 15 років з початку експлуатації

3.3. Технічне обслуговування та ремонт електрообладнання з урахуванням технічного стану

Основою побудови системи ТО і Р, що базується на встановленні фактичного технічного стану обладнання, є методи технічної діагностики. Сучасний рівень та перспективи розвитку засобів діагностики, дефектоскопії та автоматизованого контролю в електроенергетиці відкривають реальні можливості застосування в недалекому майбутньому методів ТО і Р обладнання з технічного стану для всього обладнання. Найбільший ефект від використання такої системи досягається при експлуатації складного обладнання, профілактичний ремонт якого пов'язаний з великими витратами, а аварійний стан викликає величезні збитки.

Деякі методи та засоби технічної діагностики вже давно знайшли застосування для контролю за технічним станом ЕО. Це, наприклад, хроматографічний контроль оливо-наповненого обладнання; тепловізійний контроль контактних систем; температурний контроль стану підшипників, магнітопроводів, обмоток генераторів, великих електродвигунів та трансформаторів; вібраційний контроль гідрогенераторів та іншого ЕО; контроль ізоляції кабельних ліній тощо.

При діагностуванні визначають, яким видам профілактичних робіт необхідно піддати ЕО для запобігання відмов та відновлення рівня його працездатності. Ці роботи мають бути спрямовані на підвищення або відновлення ресурсу окремих деталей, вузлів та ЕО в цілому.

Як кількісну оцінку технічного стану ЕО використовують показник напруження, залишковий ресурс, допустимі відхилення параметрів стану (температури, опору, струму, концентрації газів та ін.). Для визначення цих показників необхідний збір, вивчення та аналіз причин відмов та відповідних їм ознак технічного стану обладнання. Тому необхідно вирішувати питання про організацію служб діагностики та зберігання архівів, знати умови роботи та фінансування.

Що стосується електроустаткування важливо визначити, які параметри контролювати і які чинники враховувати в оцінці його технічного стану, тобто вирішити питання щодо глибини діагностування.

Можна говорити про механічні (вібраційні), теплові, електричні та інші фактори, що мають різну фізико-хімічну природу. Згадані чинники призводять до зміни окремих властивостей електроустаткування. У цьому випадку оцінка технічного стану за окремими властивостями виконується більш менш задовільно.

Однак загальна оцінка технічного стану надзвичайно утруднена через необхідність зіставлення показників різної фізичної природи та відсутності в даний час між ними кореляційних залежностей. Ця проблема змушує шукати інший підхід до загальної оцінки технічного стану ЕО. Доцільно як інтегральну оцінку технічного стану приймати значення спрацьованого ресурсу, що визначається за результатами експлуатаційного контролю параметрів обладнання в перехідних та стаціонарних режимах роботи.

У системі ремонту ЕО за технічним станом призначення термінів профілактичних ремонтів конкретних одиниць устаткування встановлюють не регламентним строком ППР, а за фактичним станом. У той же час періодичне діагностування слід виконувати в рамках технічного обслуговування за планом, що включений до календарного графіку. Безперервне діагностування в процесі експлуатації найбільш вразливих та відповідальних елементів обладнання здійснюватиметься в рамках реалізації автоматизованої системи ТО і Р електрообладнання за технічним станом.

Дані безперервного діагностування від відповідних спеціалізованих датчиків та пристроїв після обробки та аналізу видаються у вигляді рекомендацій або переліку відповідних сигналів та команд відносно стану іншого обладнання. Ці сигнали та команди можуть бути подані з метою відключення обладнання при невідповідності його технічного стану встановленим допустимим значенням контрольованих параметрів.

РОЗДІЛ 4
Лекції № 8-9
(4 години)

**ВПЛИВ КОНСТРУКЦІЙ І ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН
НА ЇХ НАДІЙНІСТЬ**

Основні положення та вимоги щодо забезпечення безвідмовності роботи ЕМ.

Технічні характеристики, що повинні враховуватись під час проектування ЕМ

Загальні умови забезпечення надійності ЕМ при проектуванні.

Підтримка надійності ЕМ під час експлуатації шляхом забезпечення достатнього охолодження. Особливості конструкції ЕМ, що визначаються умовами їх експлуатації. Електротехнічні матеріали, що застосовують в ЕМ

[Література: 1-6, 9, 11, 13, 16-19, 28, 35, 38]

4.1. Технічні характеристики, що повинні враховуватись під час проектування електричних машин

4.1.1. Загальні умови забезпечення надійності електричних машин при проектуванні

ЕМ повинні мати високу надійність, хороші енергетичні показники (ККД і коефіцієнт потужності), по можливості мінімальні габаритно-настановні розміри, масу і вартість: вони повинні бути простими за конструкцією, нескладні у виготовленні і зручними в обслуговуванні та експлуатації. Загальні технічні вимоги для машин загальнопромислового застосування сформульовані в Державних Стандартах, а для машин спеціального виконання — у відповідних стандартах, що враховують специфічні умови роботи цих машин.

Кожна ЕМ розрахована на роботу при певних умовах експлуатації: режими, навантаження і допустимі перевантаження, значення напруги, частота змінного струму, частота обертання, температура охолоджуючого середовища, допустима висота над рівнем моря, вологість тощо.

При цьому машина повинна розвивати номінальну потужність і працювати без аварій і ушкоджень протягом встановленого часу (зазвичай протягом часу між періодичними ремонтами). Така надійність роботи машини забезпечується шляхом закладки достатніх запасів при проектуванні, застосуванням високоякісної технології виготовлення і правильної експлуатації (робота машини в режимах, для яких вона спроектована і своєчасного виконання профілактичних ремонтів).

ЕМ можуть працювати і при неномінальних умовах (зменшена або збільшена потужність, відмінні від номінальних значень напруга та струм тощо). Однак при роботі в цих умовах енергетичні показники машини відрізняються від паспортних даних.

Зазвичай при навантаженнях, що менші номінальних, ККД і коефіцієнт потужності машини також менше номінальних. При навантаженнях, що перевищують номінальні значення, з'являється небезпека надмірного підвищення температури окремих частин ЕМ, в першу чергу її обмоток, що може привести до передчасного руйнування ізоляції обмоток і всієї машини.

Максимально допустима температура обмотки залежить від закладеного класу нагрівостійкості ізоляції і терміну служби машини, і становить від +105 до +160 °С. Гранично допустимі температури різних частин обмоток регламентуються стандартами. До стандартів на ЕМ і трансформатори включають також інші нормативні матеріали, які головним чином визначають допустимі короткочасні перевантаження та методи випробування машини і окремих її частин, а також основні умови експлуатації. Матеріали, що включаються в стандарти, перевірені багаторічною практикою виробництва та експлуатації, тобто мають статистичне обґрунтування.

Експлуатація і виробництво нових видів ЕМ нормуються технічними умовами, які узгоджуються та затверджуються організаціями, які проектують, виготовляють та експлуатують дані машини.

4.1.2. Особливості проектування ЕМ в залежності від режиму роботи

ЕМ є оборотними, тобто вони можуть працювати і в генераторному режимі і в режимі двигуна. Однак машини зазвичай краще працюють в якомусь одному режимі, що закладається під час проектування та виготовлення. Це дозволяє краще пристосувати машину до вимог експлуатації, не робити її надмірно важкою і дорогою.

ЕМ випускають на стандартні напруги, узгоджені зі стандартними напругами електричних мереж. Стандартні напруги генераторів приблизно на 5-10% вище, ніж у двигунів. Наприклад, якщо стандартна напруга двигуна 220 В, то стандартна напруга генератора — 230 В. Різниця в стандартних напругах двигунів і генераторів обумовлена втратами напруги в електричних мережах, до яких вони підключені.

У трансформаторах стандартні напруги на первинних обмотках приймаються як для двигунів, а на вторинних обмотках – як для генератора.

Машини змінного струму призначені, як правило, для роботи з синусоїдальною напругою, симетричною по фазах. Неминучі відхилення регламентуються стандартами. Так, наприклад, тривалі відхилення по значенню напруги в мережі, що живить силове обладнання, не повинні перевищувати $(-5)\%$ - $(+10)\%$; коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої повинен бути не більше $\pm 5\%$.

Машини, що працюють спільно з тиристорними перетворювачами, зазвичай працюють з несинусоїдною напругою і струмом, що викликає в них додаткові втрати, підвищує температуру обмоток і магнітопроводу. Режими роботи таких машин регламентуються спеціальними технічними умовами.

При проектуванні повинні бути забезпечені:

- механічна міцність всіх елементів машини (валу, станини, ротора, статора, деталей кріплення обмоток тощо). Зокрема, машини повинні без пошкоджень і деформацій витримувати короткочасні перевантаження по струму і перевищення номінальної частоти обертання;

- електрична міцність ізоляції обмоток, яка не повинна втрачати своїх якостей при тривалій експлуатації машини. Ізоляція обмоток щодо корпусу, ізоляція між обмотками і ізоляція між витками обмоток повинна витримувати підвищену напругу. Опір ізоляції всіх обмоток має відповідати значенням, зазначеним у стандарті;

- достатнє охолодження елементів ЕМ, в яких при роботі є значні втрати (магнітопровід, ковзні контакти, обмотки, підшипники). Найбільш чутливими до нагрівання є електроізоляційні матеріали обмоток, від якості яких залежить допустимий рівень нагріву ЕМ. Максимальні температури всіх частин машини не повинні перевищувати значень, зазначених у стандартах;

- вибір електромагнітних навантажень (щільності струму в обмотках і індукції в елементах магнітопроводу), при яких магнітні та електричні втрати, що виділяються в обмотках і магнітопроводі, встигають відводитися з машини системою охолодження, що не викликає недопустимий нагрів;

- застосування в машинах постійного струму заходів для поліпшення комутації, зменшення впливу реакції якоря.

При проектуванні ЕМ з умовою оптимального вибору її основних параметрів та електромагнітних навантажень прагнуть отримати найбільші значення ККД і коефіцієнта потужності при номінальному навантаженні.

До електричних мікро-машин автоматичних пристроїв встановлюють додаткові вимоги. Крім загальних технічних вимог вони повинні також забезпечувати:

- високу точність перетворення вхідного сигналу у вихідний, наприклад, частоту обертання і вихідну напругу в тахогенераторах або керуючу напругу в частоту обертання виконавчих двигунів;

- стабільність вихідних характеристик при зміні умов експлуатації, наприклад, зміні температури навколишнього середовища;

- лінійність характеристик при зміні управляючого сигналу і навантаження;

- висока швидкодія;

- широкий діапазон регулювання.

Для виконання цих вимог при створенні мікро-машини інколи відступають від принципів оптимального проектування, прийнятих для машин середньої та великої потужності. Так, наприклад, для зменшення похибок в мікро-машинах, що працюють в інформаційних системах, вибирають відносно невеликі електромагнітні навантаження і збільшують повітряний зазор між статором і ротором. В виконавчих двигунах для збільшення робочого моменту електромагнітні навантаження вибирають максимально можливими за умовою достатнього відводу теплоти (втрат) від машини. Все це призводить до погіршення енергетичних показників (ККД та коефіцієнта потужності), які дуже важливі для ЕМ середньої та великої потужності, однак у мікро-машинах показники, що характеризують точність та швидкодію, забезпечують достатній діапазон регулювання, завжди мають головне значення.

Для окремих видів мікро-машин пред'являють специфічні вимоги, обумовлені особливостями їх експлуатації. Так, мікро-машини, що застосовуються в звукозаписній і

звуко-відтворювальної апаратури, повинні мати низький рівень створюваних шумів. Мікро-машини, що використовуються в радіоапаратурі, не повинні створювати значних перешкод. При використанні мікро-машин, наприклад, у ядерних реакторах і космічних апаратах необхідно забезпечити радіаційну стійкість.

4.2. Особливості конструкції ЕМ, що визначаються умовами їх експлуатації

4.2.1. Захист ЕМ від зовнішніх впливів

Конструктивне виконання ЕМ багато в чому визначають вимоги, що пред'являються до захисту її від зовнішніх впливів. В залежності від цього стандарт встановлює буквено-цифрове позначення виконання ЕМ, що складається з двох букв ІР (*International Protection*) і двох цифр.

Перша цифра (від 0 до 6) характеризує ступінь захисту обслуговуючого персоналу від зіткнення з струмоведучими і обертовими частинами машини і від потрапляння всередину її твердих сторонніх предметів.

Друга цифра (0-8) характеризує ступінь захисту машини від проникнення в неї вологи, табл. 4.1. Приклади ЕМ, що призначені для роботи в особливих умовах, що випускаються вітчизняною промисловістю, та області їх застосування, наведено в табл. 4.2.

1) вибухозахищене (вибухобезпечне) – машини можуть працювати у вибухо- і пожеже небезпечному середовищі, так як ізоляція їх струмоведучих і обертових частин від зовнішнього середовища виключає виникнення вибуху і займання газів в навколишньому просторі при іскрінні та інших ненормальних явищах. При вибуху накопичених газів усередині машини виникає полум'я, але воно не може вийти в навколишнє середовище;

2) вологостійке — для роботи в умовах великої вологості;

3) морозостійке — для роботи при особливо низьких температурах і при можливому утворенні інію;

4) хімічно-стійке — для роботи в умовах наявності парів агресивних хімічних речовин і при впливі хімічних реагентів;

5) тропіко-стійке — для роботи в тропічних умовах при можливому утворенні цвілевих грибів та дії термітів.

Таблиця 4.1 – Характеристики ЕМ щодо захисту від зовнішніх впливів

Виконання ЕМ	Позначення	Характеристики
1	2	3
відкрите	IP00	Машина не має спеціальних пристосувань, що оберігають від попадання всередину сторонніх предметів і випадкового контакту обслуговуючого персоналу з струмопровідними і обертовими частинами. Машини відкритого виконання зустрічаються рідко і лише в старих конструкціях
захищене	IP21 – IP22 та ін.	Машини мають спеціальні пристосування: кришки, кожухи, сітки. При цьому між кришками, щитами або станиною машини залишають щілини, необхідні для циркуляції повітря, охолоджуючого машину. Такі машини можуть встановлюватися тільки в закритих приміщеннях, так як вони не мають захисту від дощу
Краплезахищене та бризкозахищене	IP23 – IP24 та ін.	Машини обладнані пристосуваннями, що захищають їх від проникнення до струмоведучих і обертових частин крапель води або бризок. У цих машинах всі отвори, розташовані у верхній частині корпусу і підшипникових щитів, закривають глухими кришками; отвори, розташовані збоку, зазвичай захищають кожухами, кришками і жалюзі, а розташовані знизу – сітками. Такі машини можуть встановлюватися на відкритому повітрі
Водозахищене	IP55 – IP56	Машини недоступні проникненню всередину струменів води будь-якого напрямку (також знизу). У них передбачені посилені ущільнення гумовими прокладками і сальниками. Вода, що випадково потрапила в машину, витікає з неї або віддаляється охолоджуючим повітрям. Подібні машини застосовують головним чином на суднових установках
Пилозахищене	IP65 – IP66	Машини захищені від попадання всередину пилу в небезпечних для нормальної роботи кількостях.
закрите	IP44 – IP54	Внутрішній об'єм машини ізолювано від зовнішнього середовища. Такі машини застосовують для роботи в запилених приміщеннях, на рухомих транспортних засобах (автомобілях, залізничних вагонах, локомотивах), в авіації та ін. До закритого виконання відносять також машини з охолодженням по замкнутому циклу (повітрям, воднем і ін.)

Продовження табл. 4.1

1	2	3
герметичне	IP67 – IP68	ЕМ виконують з особливо щільної ізоляцією від навколишнього середовища, що запобігає контакту її з внутрішнім простором при певній різниці тисків зовні і всередині машини. Такі ЕМ можуть працювати під водою (водонепроникні машини), в наповнених газом камерах (газонепроникні) і в інших подібних середовищах
Вибухо- захищене	різні	Призначені для роботи в особливих умовах

Таблиця 4.2 – Деякі приклади серій та області застосування вибухозахищених асинхронних двигунів (АД), що випускаються вітчизняною промисловістю, [24]

Двигун	Коротка характеристика двигуна
	<p>Вибухозахищені АД серії ВАО2-280, 315, 355</p> <p>Трифазні вибухозахищені АД з КЗ ротором типів ВАО2-280, ВАО2-315, ВАО2-355 призначені для приводу стаціонарних машин і механізмів в шахтах, небезпечних за газом та пилом, а також у вибухонебезпечних приміщеннях всіх класів; в зовнішніх установках, де можуть утворитися вибухонебезпечні суміші газів, пари або пилу з повітрям. Віднесені за вибухо-небезпекою до категорії ПА, ПВ і груп займистості Т1, Т2, Т3, Т4</p>
	<p>Вибухозахищені трифазні АД з КЗ ротором серії ВАО5П-280, 315, 355</p> <p>Трифазні вибухозахищені АД з КЗ ротором типу ВАО5П призначені для приводу різних машин і механізмів в шахтах, небезпечних за газом та пилом (маркірування по вибухозахисту РВ4В), у вибухонебезпечних приміщеннях і зовнішніх установках нафтопереробної, газової і інших галузей промисловості (маркірування за вибухозахистом IExdIIBT4)</p>

Продовження табл. 4.2

Двигун	Коротка характеристика двигуна
	<p>Вибухозахищені АД серії ВД-450 Призначені для роботи в шахтах, небезпечних за газом та пилом, а також у вибухонебезпечних приміщеннях і зовнішніх установках нафтопереробної, газової і інших галузей промисловості. Діапазон потужності від 200 до 400 кВт; режим роботи тривалий S1; кліматичне виконання У2,У5; ступінь захисту двигуна – IP54, зовнішнього вентилятора – IP20; виконання за способом монтажу IM1001; спосіб охолодження ICA 0151.</p>
	<p>Вибухозахищені АД серії АИМ Трифазні вибухозахищені АД з КЗ ротором серії АИМ призначені для експлуатації у вибухонебезпечних зонах приміщень і зовнішніх установок</p>
	<p>Вибухозахищені АД серії АИУ Електродвигуни серії АИУ призначені для роботи в якості приводу стаціонарних машин і механізмів у вибухонебезпечних виробництвах хімічної, газової, нафтопереробної і інших галузей промисловості.</p>
	<p>Вибухозахищені АД серії 2В-250, 280, 2ВР-250, 2ВР-280 Призначені для приводу стаціонарних машин і механізмів вугільної, хімічної, нафтової і інших галузей промисловості: двигуни 2В250, 280 – на підприємствах нафто-газохімічних виробництв, виконання по вибухозахисту – IExdIIВТ4; двигуни 2ВР250, 280 – на підприємствах вугільної промисловості, виконання за вибухозахистом – РВ-3В (ExdI для експортних поставок).</p>

Продовження табл. 4.2

Двигун	Коротка характеристика двигуна
	<p>АД типів 3В112 – 3В225 та 3ВР112 – 3ВР225</p> <p>Трифазні АД вибухозахищені з КЗ ротором призначені для приводу різних машин і механізмів у вибухонебезпечних виробництвах вугільній, сланцевій (виконання по вибухозахисту РВ (ExdI для експортних поставок)), нафтопереробній, газовій (виконання по вибухозахисту IExdПВТ4) і інших галузях промисловості.</p>
	<p>Вибухозахищені АД типу ЕДКОФВ315</p> <p>Трифазні АД вибухозахищені з КЗ ротором серії ЕДКОФВ315 призначені для приводу прохідницьких комбайнів, вугільних агрегатів, скребкових і стрічкових конвеєрів вугільних і сланцевих шахт, небезпечних за газом та пилом.</p>
	<p>Вибухозахищені АД серії 3ЕДКОФ250</p> <p>Трифазні вибухозахищені АД з КЗ ротором серії 3ЕДКОФ250 призначені для приводу скребкових і стрічкових конвеєрів, перевантажувачів і прохідницьких комбайнів у вугільних шахтах, небезпечних за газом та вугільному пилу.</p>
	<p>Вибухозахищені АД типу ЕКВ4-140, ЕКВ4-185</p> <p>Призначені для приводу комбайнів 1ГШ 68, МК67и МК67И (ЕКВ4-140) і 1ГШ68Е (ЕКВ4-185) і інших механізмів, вживаних у вугільних і сланцевих шахтах, небезпечних за газом (метан) і вугільному пилу.</p>
	<p>Вибухозахищені АД типу 2ЕКВ3,5-90, 2ЕКВ3,5-100</p> <p>Трифазні вибухозахищені АД з КЗ ротором 2ЕКВ3.5-90, 2ЕКВ3,5-100 призначені для приводу комбайна К103М і інших механізмів, вживаних у вугільних і сланцевих шахтах, небезпечних за газом (метан) і вугільному пилу.</p>

Продовження табл. 4.2

Двигун	Коротка характеристика двигуна
	<p>Вибухозахищені електродвигуни типу ЕКВ4-30</p> <p>Трифазні АД вибухозахищені з КЗ ротором типу ЕКВ4-30 призначені для частотно-регульованого приводу подачі очисного комбайна УКН400, що працює в шахтах небезпечних за газом (метан) і вугільному пилу (маркірування по вибухозахисту РВЗВІа).</p>
	<p>Вибухозахищені АД серії АІУВ250S2</p> <p>Трифазні АД вибухозахищені з КЗ ротором серії АІУВ250S2 призначений для приводу стаціонарних вентиляторів місцевого провітрювання ВМЦ8 у вугільних і сланцевих шахтах, небезпечних за газом (метан) або вугільному пилу. Виконання по вибухозахисту – РВ (ExdI для експортних поставок). Виконання за способом монтажу – ІМ4001. Клас нагрівостійкості ізоляції – F.</p>

4.2.2. Вплив кліматичних умов і умови розміщення ЕМ на їх надійність.

При експлуатації ЕМ в нормальних кліматичних умовах температура навколишнього середовища становить $(25 \pm 10) ^\circ\text{C}$, відносна вологість повітря 35-80 % і атмосферний тиск 84-106 кПа. Вплив кліматичних умов на надійність ЕО складається із впливу температури, вологості, тиску, чистоти повітря.

Залежно від макрокліматичних умов, стандарт на ЕМ передбачає різні кліматичні виконання, яким присвоюються певні позначення:

– електричні двигуни, призначені для експлуатації на суші, ріках і озерах у макрокліматичних районах з помірним кліматом, мають позначення У;

ХЛ – з холодним кліматом;

ТВ – з вологим тропічним кліматом;

ТЗ – з сухим тропічним кліматом;

Т – з сухим і з вологим тропічним кліматом;

О – для всіх макро-кліматичних районів на суші (загально-кліматичне виконання);

М – двигуни, призначені для установки на морських суднах в макро-кліматичних районах з помірно-холодним морським кліматом, з тропічним морським – ТМ; ОМ – для необмеженого району плавання;

В – двигуни, призначені для всіх макро-кліматичних районів на суші і на морі.

Залежно від умов розміщення ДержСТ передбачає різні виконання електричних двигунів, яким також присвоюються певні позначення:

- двигуни, які можна експлуатувати на відкритому повітрі, позначення «1»;
- в закритому приміщенні, де температура і вологість повітря несуттєво відрізняються від зовнішнього повітря, – «2»;
- в закритих приміщеннях, в яких коливання температури і вологості, а також вплив піску та пилу на машину істотно менше, ніж на відкритому повітрі, – «3»;
- в приміщеннях з штучно регульованими кліматичними умовами (наприклад, у закритих опалювальних приміщеннях) – «4»;
- в приміщеннях з підвищеною вологістю (наприклад, в неопалюваних і не вентильованих підземних приміщеннях) – «5».

Наприклад, двигуни, які можуть працювати в районах з холодним кліматом при установці на відкритому повітрі, мають позначення ХЛ1; в районах з помірним кліматом в закритих приміщеннях – У3 або У4.

В умовах експлуатації виникають впливи механічного характеру: удари, лінійні прискорення, вібрація, помилкові дії обслуговуючого персоналу при завантаженні, транспортуванні, упакуванні тощо, – що значно впливає на надійність.

Надійність зменшується зі збільшенням температури. Причина, чому надійність значно залежить від температури, пов'язана з активацією хімічних процесів. Зазвичай в якості нормальної температури береться температура в приміщенні $+(20-25)^\circ\text{C}$.

Зміну параметрів можна враховувати шляхом введення факторів прискорення впливу зовнішнього середовища на надійність ЕО (поправочний коефіцієнт щодо значень, встановлених для стандартних параметрів зовнішнього середовища), зокрема, температури, табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Коефіцієнти прискорення впливу температури на надійність ЕО

Температура навколишнього середовища, °С	+25	+30	+40	+50	+60	+70	+80
Коефіцієнт прискорення процесів, що впливають на надійність ЕО	1	1,5	3	6	12	22	40

З табл. 4.3 можна бачити, що подвоєння температури навколишнього середовища від + 25 °С до + 50 °С збільшує ефект старіння в шість разів. А якщо температура збільшена ще на +25 °С, тобто до +75 °С, то ефект старіння збільшиться вже приблизно в 30 разів. Таке ж співвідношення працює й у зворотному напрямку. Зниження температури підвищує надійність електронних компонентів.

Проте при дуже низьких температурах (нижче –20 °С) вже інші чинники, такі як механічні напруги через різницю в коефіцієнтах розширення різних матеріалів або те, що при низьких температурах паяні з'єднання стають крихкими, можуть викликати більш високу швидкість інтенсивності відмов.

Залежно від кліматичного виконання машини та умов її розміщення відповідно змінюють конструкцію її корпусу, застосовують різні ущільнення, підсилюють ізоляцію обмоток і здійснюють інші конструктивні заходи, що забезпечують нормальну експлуатацію машини протягом встановленого терміну.

4.2.3. Підтримка надійності ЕМ під час експлуатації шляхом забезпечення достатнього охолодження

Для запобігання надмірного нагріву ЕМ застосовують різні способи охолодження. Спосіб охолодження залежить від конструкції машини і її потужності. При підвищенні потужності ЕМ потрібно збільшувати інтенсивність її охолодження.

Електричні мікро-машини, машини середньої та малої потужності зазвичай не мають штучного охолодження. Відведення теплоти від їх нагрітих частин (обмоток, ротора, статора, колектора) здійснюється за рахунок природної тепловіддачі до вкілью (машини з природним охолодженням).

ЕМ великої потужності виконують зі штучним охолодженням. У цих машинах за допомогою спеціальних пристосувань досягається збільшення швидкості руху

охлаждающего среды. Для ЭМ охлаждающим средой может быть воздух, вода, вода, масло. Обозначение способа охлаждения складывается из букв IC (*International Cooling*) и двух цифр: первая (0-6) условно обозначает пристройку для циркуляции хладагента, вторая (0-7) – способ его перемещения.



Рисунок 4.1 – АД з короткозамкненим ротором та з зовнішніми охолоджуючими ребрами

ЕМ малої та середньої потужності зазвичай виконують з самовентиляцією. У цьому випадку охолодження нагрітих частин здійснюється вентилятором, який насаджують на вал ротора. У деяких машинах вентиляторами є не тільки вентиляційні лопаті, а також інші пристосування, що прибудовують до торцевій частині осердя ротора. Машины закрытого виконання зазвичай виконують обдуваемими. У таких машинах вентилятор обдуває зовнішню поверхню корпусу, сприяючи більш інтенсивному

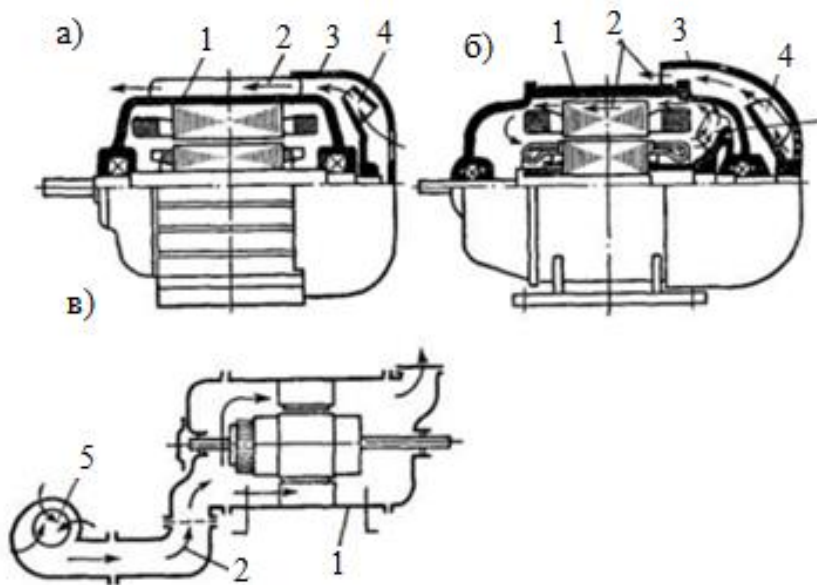


Рисунок 4.2 – Схеми вентиляції закритих ЕМ:
1 – корпус машини; 2 – потоки охолоджуючого повітря; 3 – кожух; 4 – зовнішній вентилятор; 5 – внутрішній вентилятор; 6 – допоміжний вентилятор

відведенню від нього теплоти (IC01), рис. 4.1. Для збільшення поверхні охолодження на станинах закритих машин зазвичай роблять зовнішніми охолоджуючі ребра. Іноді на валу ротора встановлюють також внутрішній вентилятор, що забезпечує додаткову циркуляцію повітря усередині машини і посилення інтенсивності теплообміну між її частинами та станиною.

У закритих машинах великої потужності часто застосовують незалежну вентиляцію, при якій охолоджуюче повітря продувається через

машину допоміжним вентилятором, що приводився в обертання окремим електродвигуном (IC17), рис. 4.2.

В авіаційних ЕМ, замість вентилятора для продувки охолоджуючого повітря через машину використовується аеродинамічний напір, що виникає при русі літака.

У машинах відкритого, захищеного, бризко-, крапле- і водо-захищеного виконання охолоджуюче повітря зазвичай проганяється вентилятором навколо обмоток і по вентиляційних каналах статора, ротора, колектора.

Система вентиляції може бути осьовою (інша назва – тангенційна) і радіальною. У разі осьової системи (охолоджуючий повітря проходить через машину в напрямку, паралельно осі валу, (рис. 4.3, *a*), у разі радіальної (рис. 4.3, *б*) – в радіальному напрямку, від центра валу к зовнішній поверхні корпусу. У деяких випадках застосовують комбіновану радіально-осьову (радіально-тангенційну) систему вентиляції, рис. 4.3, *в,г*.

Залежно від місця установки вентилятора осьова система вентиляції може бути витяжної або нагнітальної. При витяжної системи (рис. 4.3, *a*) вентилятор встановлюють в місці виходу повітряного потоку з машини; при нагнітальної (рис. 4.3, *б*) – в місці входу його в машину.

В якості охолоджуючого агенту в машинах великої потужності застосовують воду і водень. Використання водню дозволяє зменшити втрати, поліпшити відведення теплоти, так як водень має меншу щільність і більшу теплопровідність, ніж повітря. Вода має ще кращі показники, але є складність забезпечення герметичності струмопровідних елементів – обмотки статора. Тому дистильовану воду, часто разом з воднем, використовують, коли потрібно забезпечити високу інтенсивність охолодження. Також в якості агенту охолодження в деяких серія турбогенераторів (наприклад, ТВЗ-2-УЗ) використовують трансформаторну оливу.

Для потужних ТГ можливе використання наступних систем охолодження:

- повітряне охолодження;
- водневе охолодження;
- форсоване охолодження з розділенням повітряних потоків в статорі і роторі;
- повне водяне охолодження;
- оливне охолодження обмотки статора, водяне (або водневе) охолодження обмотки ротора;

- водяне (обмотка статора) та водневе охолодження внутрішнього об'єму машини і ротора. Цей варіант охолодження використовується найбільш часто.

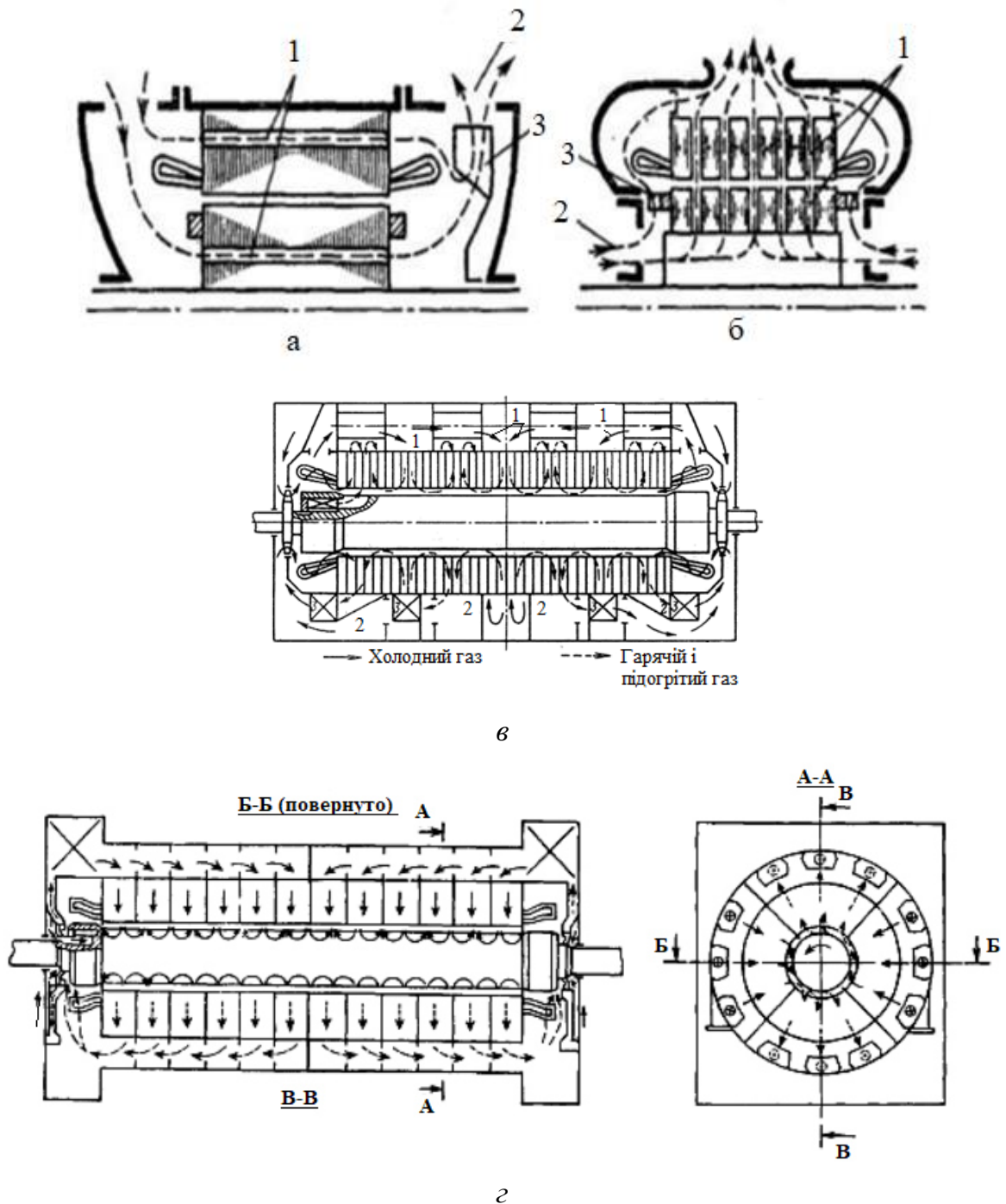


Рисунок 4.3 – Осьова і радіальна системи вентиляції відкритих і захищених ЕМ:
1 – вентиляційні канали; 2 – потоки охолоджуючого повітря; 3 – вентилятор

Особливості вибору охолоджуючого агенту зв'язані з їх фізичними якостями. В табл. 4.4 для порівняння наведені деякі данні різних середовищ, що використовуються для охолодження потужних ТГ. Параметри повітря умовно прийняті за одиницю.

Таблиця 4.4 – Порівняльні характеристики властивостей охолоджуючих середовищ

Охолоджувальне середовище	Тиск, МПа	Щільність, в.о.	Здатність відводити тепло, в.о.	Витрати, в.о.
Повітря	0,1	1	1	1
Водень (при різних значеннях тиску):	0,1	0,07	1,44	1
	0,2	0,21	2,70	
	0,4	0,28	4,0	
Трансформаторна олива	0,1	848	21	0,01
Вода	0,1	1000	60	0,01

Водень, що заповнює генератор у суміші з повітрям (від 4,1 до 74%, в присутності парів оливи – від 3,3 до 81,5%), утворює вибухонебезпечну суміш. Тому у машин з водневим охолодженням має бути забезпечена висока газощільність корпусу статора шляхом використання оливних ущільнень валу; струмопроводів, що під'єднані до обмоток статора та ротора; використання ущільнень кришок газо-охолоджувачів, люків, торцевих щитів, що знімаються. Найбільш складно виконати надійні оливні ущільнення валу генератора.

Чим вище надлишковий тиск водню, тим ефективніше охолодження генератора, отже при тих самих розмірах генератора можна збільшити його номінальну потужність. Однак при надмірному тиску (більше 0,4-0,6 МПа) приріст потужності генератора не виправдовує витрат на подолання технічних труднощів, що виникають при цьому – ускладнення ущільнень і підвищення класу нагрівостійкості ізоляції обмоток. Тому тиск водню в сучасних генераторах більше 0,6 МПа не застосовується.

Генератори з непрямим водневим охолодженням можуть за необхідності працювати з повітряним охолодженням, але їх потужність відповідно зменшується.

4.2.4. Конструктивні групи ЕМ

Залежно від способу установки і кріплення, напрямів осей валів і конструкцій підшипникових вузлів, ЕМ поділяють на дев'ять конструктивних груп. Кожна з них

поділяється на види, що складаються з декількох форм виконання. Всім їм присвоєні відповідні позначення, які містять літери ІМ (*International Mounting*) і чотири цифри: перша визначає конструктивну групу, друга і третя – спосіб монтажу, четверта (0-8) – форму робочого кінця валу.

Є наступні конструктивні групи:

ІМ1 – машина на лапах з підшипниковими щитами;

ІМ2 – на лапах з підшипниковими щитами і фланцем на одному щиті;

ІМ3 – без лап з підшипниковими щитами і фланцем на одному щиті;

ІМ4 – без лап з підшипниковими щитами і фланцем на станині;

ІМ5 – без підшипників в щитах;

ІМ6 – з підшипниковими щитами і стояковими підшипниками;

ІМ7 – зі стояковим підшипниками (без щитів);

ІМ8 – з вертикальним валом (що не охоплюються групами ІМ1–ІМ4);

ІМ9 – спеціальне виконання.

Кінці валів ЕМ мають стандартні розміри. Стандарти встановлюють строго фіксовані висоти осей обертання ЕМ, а також конструкції і розміри місць кріплення.

При роботі насосів, димососів, вентиляторів, генераторів, при проходженні пари і води в трубопроводах виникає шум. Виробничі шуми негативно впливають на здоров'я людини. Шум приводить до ослаблення уваги, уповільнює психічні реакції, додає роздратованості в відносинах, збільшує кількість помилок при роботі, сприяє виникненню травм і професійних захворювань. Тому при проектуванні і виготовленні ЕМ застосовують спеціальні конструктивні заходи для зменшення шуму. Боротьба із шумом здійснюється методами звукопоглинання і звукоізоляції.

Допустимі рівні шуму ЕМ нормовані. Нормування шуму здійснюється двома методами: по граничному спектрі шуму і за рівнем звуку в залежності від типу приміщення. Граничні значення рівнів шуму ЕМ визначено за ГОСТ 16372-84 та ДСН 3.3.6.037-99) [22, 29]. Для оцінки шуму прийнятий середній (для декількох точок) рівень звуку A , виміряний на відстані $d=1$ м від контуру машини (позначається $Ld1A$), а для деяких машин спеціального виконання – також нормується і середній рівень звуку A , виміряний на радіусі 3 м (позначається $LA3$).

Рівень звуку (дБ) визначається відношенням:

$$A = 20 \cdot \lg(p/p_0),$$

де p — звуковий тиск в даній точці, змінний надлишковий тиск, що виникає в пружному середовищі при проходженні через неї звукової хвилі, Па;

$p_0 = 2 \cdot 10$ мкПа — амплітуда звукового тиску, звуковий тиск, відповідний порогу чутності.

Для прикладу в табл. 4.5 приведені фактичні значення рівнів шуму, створювані устаткуванням машинного залу ТЕС.

Таблиця 4.5 – Значення рівня шуму, що створюється устаткуванням машинного залу ТЕС

Устаткування	Рівень шуму, дБ
Котельне відділення:	85
- димососи	86-92
- дуттьові вентилятори	86-91
Машинний зал:	
- генератор, турбіна	79-117
- насоси	85-99
- ПНТ	94-109
- паропроводи	87-98

Припустимі рівні шуму у виробничих приміщеннях ТЕС не повинні перевищувати 80 дБ. З табл. 4.5 видно, що рівні шуму, створювані енергетичним устаткуванням на блоці ТЕС, перевищують припустимі значення рівнів шуму для робочих зон виробничих приміщень. Тому для даного случаю (блок ТЕС) можна запропонувати такі дії для зниження шуму:

- винести за межі корпусу тяго-дуттьові машини і повітря-підігрівачі;
- насоси і їх приводи встановити на окремі фундаменти, під які підкласти вібропоглинаючі матеріали;
- по можливості всі насоси закрити звуковбирними кожухами;
- зони стаціонарної праці та відпочинку чергового експлуатаційного персоналу захистити звуко-ізолюючими перегородками.

Шуми виникають по механічним, вентиляційним і магнітним причинам.

Механічні шуми виникають через вібрації окремих частин машини внаслідок неточної балансування ротора, тертя щіток о колектор, тертя в підшипниках тощо. Для зниження механічного шуму здійснюють точну динамічне балансування ро-

тора, збільшують жорсткість валу, застосовують високоякісні підшипники, ретельно притирають щітки, підвищують жорсткість щіткотримачів і виконують колектори зі строго циліндричної і гладкою поверхнею.

Вентиляційні шуми обумовлені коливаннями тиску повітряного потоку, охолоджуючого машину, і вихорами на окремих ділянках системи охолодження. Зниження вентиляційного шуму досягається раціональною конструкцією вентилятора і всієї системи охолодження, підвищенням жорсткості вентилятора, його ретельним балансуванням, вибором досить великого зазору між вентилятором і підшипниковим щитом.

Магнітні шуми з'являються через вібрацію окремих частин магнітної системи ЕМ під дією змінних електромагнітних сил, що виникають в результаті зміни магнітної провідності повітряного зазору при обертанні зубчастого якоря, явища магнітострикції, а в машинах змінного струму і трансформаторах – внаслідок періодичного перемагнічування магнітопроводу. Зменшення шуму досягається раціональним вибором числа зубців ротора і статора, створенням ексцентричного повітряного зазору під головними полюсами (в машинах постійного струму), скосом зубців ротора, застосуванням напівзакритих пазів тощо.

За допустимим рівнем шуму в режимах неробочого ходу ЕМ поділяють на класи 1, 2, 3 та 4. Як шумову характеристику приймають середній рівень звуку з відривом 1 метр від контуру машини або коригований рівень звукової потужності. Рівень звукової потужності вказується для машин, які постачаються на експорт.

Класи рівнів шуму:

- до класу 0 відносять ЕМ, що працюють у короткочасних і повторно-короткочасних режимах, з примусовою вентиляцією від стороннього вентилятора, полегшеної маси, багатополюсні (з кількістю пар полюсів більше 6), деякі типи однофазних та індукторних генераторів, зварювальні генератори і перетворювачі, багато-швидкісні АД, двигуни з підвищеним пусковим моментом ковзанням та ін.;

- до класу 1 – машини постійного струму, асинхронні, синхронні і колекторні машини нормального виконання;

- до класу 2 відносять машини з малошумними підшипниками, зі спеціальними малошумними вентиляторами;

- до класу 3 відносять машини зі зниженим використанням активних матеріалів, закриті, з глушниками вентиляційного шуму;

- до класу 4 відносять машини зі звукоізолюючим кожухом або іншими спеціальними конструктивними вузлами, що забезпечують зниження шуму.

Машини класу 1 повинні мати рівень звуку на відстані 1 м від контуру машини не вище значень, зазначених у табл. 4.6 (для машин зі при ступенем захисту IP44).

Таблиця 4.6 – Граничні значення коригованих рівнів звукової потужності машин класу 1 зі ступеню захисту IP44

Номинальна потужність, кВт	Рівень звуку, дБ (по шкале "A") при частоті обертання, об/хв.					
	>600 до 960	>960 до 1320	>1320 до 1900	>1900 до 2360	>2360 до 3150	>3150 до 3750
> 0,25-1,1	67	70	71	74	75	79
> 1,1-2.2	69	70	73	78	80	82
> 2,2-5,5	72	74	77	82	83	85
> 5,5-11	75	78	81	86	88	90
> 1-37	78	82	85	87	91	93
>3 -55	81	86	88	92	93	96
>55-110	84	89	92	93	96	98
>110-220	87	91	94	96	98	100
>220-400	83	92	96	98	99	102

Допустимі рівні шуму машин класів 2, 3 і 4 повинні бути нижчими за допустимі рівні класу 1 на 5, 10 і 15 дБ відповідно за шкалою «А».

Так, наприклад, для машин класу 1 рівень звуку L_{d1A} в режимі неробочого ходу не повинен перевищувати 64-109 дБ, а рівень звуку $LA3$ — не повинен перевищувати 55-104 дБ.

Зниження радіоперешкод. Колекторні машини постійного і змінного струму є інтенсивними джерелами радіоперешкод. Іскріння під щітками, що виникає в цих машинах, створює імпульсні коливання струму і напруги, які мають безперервний частотний спектр. В результаті цього утворюються перешкоди радіоприйому у вигляді різкого тріска або безперервного шуму у всьому діапазоні частот радіозв'язку.

Рівень перешкод, поширюваних по дротах і кабелях, приєднаним до ЕМ, заміряють на затискачах машини (в мкВ).

Рівень перешкод, випромінюваних ЕМ в навколишній простір, визначають при максимальній напрузі (в мкВ), яке вимірюють на 1 м штировий антени, встановленої на певній відстані від машини. Зменшення радіоперешкод досягають екрануванням машини, зниженням ступеня іскріння.

Часто використовують перешкодо-подавляючі фільтри, що перешкоджають поширенню високочастотних коливань по проводах мережі, до якої приєднана машина. Найбільш простими перешкодо-подавляючими фільтрами є ємнісні (конденсатори C), які включають між струмопровідними затискачами, а також між цими затискачами і корпусом машини (рис. 4.4, а). Найбільш ефективними є прохідні конденсатори, у яких один вивідний кінець приєднують до корпусу, а інший проходить всередині конденсатора і є струмоведучим провідником, приєднуваних до вихідних затискачів машини. У ряді випадків застосовують більш складні фільтри – Г-подібний (рис. 4.4, б) і П-подібний (рис. 4.4, в), що складаються з індуктивності L і ємності C .

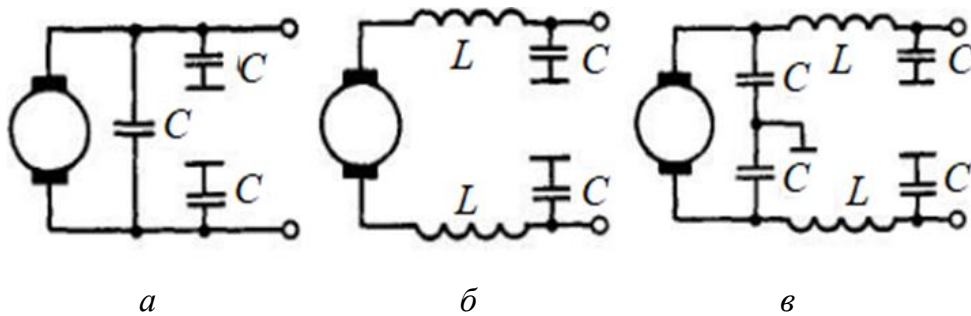


Рисунок 4.4 – Схеми перешкодо-подавляючих фільтрів

Такі фільтри пропускають в зовнішнє коло тільки постійну складову струму і сильно послаблюють гармонійні складові, що створюють радіоперешкоди.

Ємність перешкодо-подавляючого конденсатору зазвичай підбирають дослідним шляхом; вона становить 0,1-1 мкФ, а індуктивність дроселя фільтра – 50-500 мкГн.

4.3. Електротехнічні матеріали, що застосовують в ЕМ

Експлуатаційні властивості і надійність ЕМ багато в чому визначаються технологією виготовлення і якістю застосовуваних матеріалів. У електромашинобудуванні застосовують різні магнітні, провідникові та ізоляційні матеріали.

1) *Магнітні матеріали*. Магнітопроводи ЕМ виготовляють з листової електротехнічної сталі, сталевого лиття і листової вуглецевої сталі. Залежно від структурного стану і способу прокатки електротехнічні сталі ділять на гарячекатані та холоднокатані. Гарячекатана сталь має полікристалічну структуру, в якій кристали, що мають форму куба, розташовані хаотично, що призводить до практичної ізотропності властивостей сталі.

Холоднокатана сталь в результаті холодної прокатки і відпалу отримує спеціальну структуру, при якій кристали орієнтовані в певному напрямку. Це анізотропні сталі – сталі, в яких магнітний опір проходженню силових ліній магнітного поля буде мінімальним по текстурі прокату.

Крім того розрізняють сталь з ребровою структурою, коли кристали орієнтовані ребром куба кристала уздовж напрямку прокату, і сталь з кубічної структурою – при орієнтації кристалів стороною куба. Сталь з ребровою структурою має яскраво виражену магнітну анізотропію. При цьому уздовж напрямку прокату забезпечується найменше магнітне опір, а в поперечному напрямку або під кутом до напрямку прокатки – найбільше.

Тому при виготовленні магнітопроводів з такої сталі необхідно, щоб напрямок магнітного потоку на всьому його шляху збігался з напрямком прокату. Сталь з кубічної структурою ізотропна, тому що має однаково високі магнітні властивості як уздовж, так і поперек прокату.

Електротехнічну сталь виготовляють різної товщини і випускають в листах і рулонах. При частоті 50 Гц застосовують сталь товщиною 0,28; 0,30; 0,35 і 0,5 мм; при частоті 400 Гц – 0,1 і 0,2 мм. Для трансформаторів, що працюють на частотах понад 2,5 кГц, використовують сталь товщиною 0,05, 0,08, 0,2; 0,15; 0,1 мм. При частотах понад 10-20 кГц магнітопроводи пресують із порошкових матеріалів (магнітодіелектриків та феритів).

Головною легуючою присадкою електротехнічної сталі є кремній, наявність якого зменшує магнітні втрати в сталі. Зміст кремнію в сталі складає 0,4-4,8% і чим він вище, тим нижче питомі втрати сталі. Однак добавка кремнію підвищує твердість і крихкість сталі, що ускладнює її обробку. Тому високолеговану сталь (з вмістом кремнію 2,8-3,8% і вище) застосовують при виготовленні трансформаторів і великих обертових машин. Для виготовлення магнітопроводів малих машин, у яких

в роторі і на статорі повинні бути виштампувані пази порівняно складної конфігурації, застосовують сталь з вмістом кремнію 0,4-1,9%.

Електротехнічну сталь поставляють на електромашинобудівні заводи у вигляді листів, рулонів або різаною стрічки, в основному в термічно обробленому стані з електроізоляційним нагрівостійким або не нагрівостійким покриттям, а також без покриття. В якості ізоляції використовується шар оксидної плівки товщиною 3-5 мікрон (мкм) або лакової плівки товщиною 15-20 мкм.

Різні марки електротехнічної сталі позначають чотиризначними числами (наприклад, 1211; 2013; 2212; 3413; 3416):

- перша цифра означає приналежність сталі до того чи іншого класу (1 – гарячекатана ізотропна; 2 – холоднокатана ізотропна; 3 – холоднокатана анізотропна сталь з ребровою структурою).

- друга цифра означає вміст кремнію (від 0,4 до 4,8%);

- третя цифра – група по основній нормованій характеристиці (по значенню питомих магнітних втрат при певній індукції і частоті перемагнічування);

- четверта цифра – порядковий номер сталі. Фактично це ширина прокату: 250 мм, 500 мм, 750 мм, 1000 мм.

Для виготовлення магнітопроводів сучасних АД з висотою осі обертання до 180 мм використовують сталь марки 2013, при більших висотах обертання – марок 2212, 2312 і 2421. Осердя статорів синхронних машин (СМ) виготовляють з сталей тих же марок. Сталь 2013 володіє високою магнітною проникністю і порівняно низькими втратами на перемагнічування.

Після штампування листи піддають рекристалізаційному отпалюванню (для усунення погіршення магнітних властивостей сталі в результаті утворення наклепу при технологічних операціях) і оксидації для створення ізоляційного шару.

Сталі марок 2212, 2321 і 2411 мають електроізоляційне покриття (шар оксидної плівки) і не вимагають відпалу. Застосування сталей, що мають низькі втрати, підвищує ККД і, крім того, спрощує технологію виготовлення, так як не потрібно отпалювати листи великого розміру.

У машинах постійного струму (МПС) з висотою осі обертання до 200 мм для осердь якорів застосовують сталь марок 2013. Для зняття наклепу після штампування

сталь отпалюють, а потім ізолюють. При великих висотах обертання використовують сталі марок 2112, 2212, 2312, 2411.

При виготовленні магнітопроводів трансформаторів використовують холоднокатані анізотропні сталі марок 3412 та 3413 з ізоляційним покриттям; після штампування сталь отпалюють. Застосування холоднокатаної анізотропної сталі ускладнює конструкцію і технологію виготовлення магнітопроводів, так як при цьому потрібно виключити проходження магнітного потоку поперек прокатки або, принаймні, зменшити довжину ділянок, де це необхідно. З тих же причин в ЕМ через більш складну конфігурацію їх магнітопроводів така сталь знаходить обмежене застосування – тільки в дуже великих СМ для виготовлення сегментів, з яких збирають осердя статорів та роторів (сталі марок 3411-3413).

Полюси МПС і СМ збирають з листів низьковуглецевої конструкційної сталі товщиною 1-2 мм або з електротехнічної сталі 3411.

Корпуси МПС виготовляють шляхом зварювання з листової низьколегованої магнітно-м'якої сталі або сталевого литва, тому що станина є частиною магнітопроводу. Для виготовлення станин і роторів синхронних машин також застосовують сталеве лиття.

Вали машин виконують з високоміцних конструкційних сталей з добавкою хрому, нікелю тощо. Для машин загальнопромислового виконання майже завжди використовують сталь Ст 45. Особливо складно виготовити ротори турбогенераторів, в яких сталь одночасно повинна володіти і високою міцністю, і гарною магнітною проникністю.

2) *Провідникові матеріали.* У електромашинобудуванні застосовують мідь і алюміній. Мідь значно дорожче алюмінію, проте її використовують для виготовлення обмоток частіше, ніж алюміній, тому що вона має більш високу електропровідність (приблизно в 1,6 рази), що дозволяє зменшити габарити машин і знизити електричні втрати. Для виготовлення круглих і прямокутних проводів обмоток ЕМ і трансформаторів застосовують провідникову мідь високої чистоти (вміст міді 99,95%). Її отримують в електролітичних ваннах і вона відрізняється низьким вмістом сторонніх домішок

Алюміній також застосовують для виготовлення обмоток ЕМ і трансформатори, але тільки тоді, коли ці обмотки мають порівняно мале теплове навантаження. Алюміній використовують для виготовлення обмоток трансформаторів, де збільшення розміру обмоток менше впливає на збільшення габаритів і маси, ніж в ЕМ.

Для контактних кілець АД з фазним ротором крім міді застосовують бронзу і навіть сталь, так як для цих деталей важлива не тільки електропровідність, але і висока механічна міцність.

3) *Ізоляційні матеріали.* Основні вимоги до ізоляції – нагрівостійкість, висока електрична міцність, вологостійкість, хороша теплопровідність, висока механічна міцність та еластичність.

Нагрівостійкість – це здатність електроізоляційних матеріалів витримати без шкоди вплив підвищеної температури, і навіть різкі зміни температури. Висока нагрівостійкість ізоляції є основною вимогою, що визначає надійність роботи ЕМ в цілому і забезпечує термін служби, який повинен становити не менш 15-20 років. Термін служби ізоляції різко скорочується з підвищенням температури. При нагріванні ізоляції виникають електрохімічні та термічні процеси, що призводять до її старіння, руйнування, до втрати ізолюючих властивостей і механічної міцності.

Електроізоляційні матеріали в залежності від рівня нагрівостійкості підрозділяють на сім класів: *Y, A, E, B, F, H, C*, характеристики яких наведені в табл. 4.7.

Ізоляція класу *Y* та *A* для ЕМ натеper не використовується, класу *E* знаходить обмежене застосування в машинах малої потужності. В основному застосовують ізоляцію класів *B* і *F*, а в спеціальних машинах, що працюють у важких умовах (металургія, електроенергетика, гірське обладнання, транспорт) та для окремих елементів МПС, – класу *H*.

Ізоляцією класу *A* натеper використовують в трансформаторах з оливним охолодженням. Застосування в них ізоляційних матеріалів з більшою нагрівостійкістю недоцільно, оскільки допустима температура обмоток визначається допустимою температурою трансформаторної оливи (+105 °C), що відноситься до класу *A*.

Але в трансформаторах з повітряним охолодженням («сухих») широко використовують обмотувальні дроти класів нагрівостійкості *B* і *F*.

Таблиця 4.7 – Теплові характеристики ізоляції

Клас нагрівостійкості	Абсолютна допустима температура нагрівання °С	Перевищення температури нагрівання °С	Склад ізоляційного матеріалу
<i>У</i>	65-70	35-40	Текстильні і паперові матеріали, виготовлені з бавовни, натурального шовку, целюлози і поліамідів (стрічки, папір, картон, фібра), деревина та пластмаси з органічними наповнювачами
<i>А</i>	80	40	В клас <i>А</i> входять матеріали класу <i>У</i> , які просочені ізоляційним складом або занурені в рідкі діелектрики (натуральні смоли, асфальтові смоли, трансформаторна олива, термопластичні компаунди)
<i>Е</i>	120	80	Синтетичні плівки і волокна, деякі лакотканини на основі синтетичних лаків, термореактивні синтетичні смоли і компаунди (епоксидні, поліефірні, поліуретанові), ізоляція проводів типу ПЛД, ПЕПЛО – з лавсану, емалева ізоляція проводів типу ПЕВТЛ, ПЕВТЛК та інші на основі поліуретанових і поліамідних смол.
<i>В</i>	130	90	Матеріали зі слюди, азбесту і скловолкна, що утримують органічні зв'язувальні речовини.
<i>F</i>	155	115	Те саме, у сполученні з синтетичними зв'язуючими і просочуючими складовими.
<i>Н</i>	180	140	Те саме, але у сполученні з кремнійорганічними зв'язуючими і просочувальними речовинами.
<i>С</i> >180	200	160	Слюда, керамічні матеріали, скло, кварц, азбест, що застосовуються без зв'язуючих складових або в сполученні з неорганічними зв'язуючими складовими.
	220	180	
	300	260	

Температурою навколишнього повітря, за якої ЕО загальнопромислового використання може працювати з номінальною потужністю, вважається +40 °С.

Якщо температура навколишнього середовища більша або менша за +40 °С для загальнопромислового виконання то стандарт дозволяє певні зміни допустимих перевищень температур. Разом з допустимою температурою нагрівання елементів ЕО

Θ_{dop} (абсолютне значення температури), прийнято вказувати допустиме перевищення температури τ_{dop} ($^{\circ}\text{C}$) над температурою зовнішнього середовища $\Theta_{air}=+40$ $^{\circ}\text{C}$, див. табл. 4.7:

$$\tau_{dop} = \Theta_{dop} - \Theta_{air}.$$

Нормують не самі температури, а максимально допустимі перевищення температур τ_{dop} , тому що тільки від навантаження машини залежить перевищення температури.

Наведені значення допустимої температури нагріву для окремих класів ізоляції не можуть бути повністю використані, так як в умовах експлуатації ЕМ і апаратів неможливо встановити точний контроль за температурою ізоляції найбільш нагрітих деталей. Тому існуючі стандарти на ЕМ встановлюють нижчі межі допустимих температур окремих елементів машин в залежності від конструкції цих елементів і розташування їх в машині.

Найбільшу нагрівостійкість, високу електричну, механічну міцність і вологостійкість мають скловолонисті і слюдяні матеріали, які містять кремнійорганічні зв'язуючі і просочуючі складові; а також емалева ізоляція проводів на основі кремнійорганічних лаків і синтетичні плівки типу "Ізофлекс" та "Імідофлекс". Тому для ЕМ широко використовують обмотувальні дроти з емалевою, волонистою та комбінованою ізоляцією. Клас нагрівостійкості такої ізоляції залежить від хімічного складу емалевого лаку, складу волонистого матеріалу і наповнювача. У машинах постійного струму середньої та великої потужності використовують літу ізоляцію типу "Моноліт", "Моноліт-2" та "Моноліт-2М"

Ізоляція "Моноліт-2М" відрізняється від "Моноліт-2" додатковим опресуванням пазової частини обмотки якоря. "Моноліт-2М" був створений на заводі «ХЕМЗ» (Україна, м. Харків). Ізоляція являє собою поєднання склотканини і слюденіту з терморективним компаундом, який вводять в обмотку і в ізоляцію під вакуумом з подальшою обпресуванням. Ізоляцію з терморективним компаундом застосовують в машинах змінного струму.

В даний час вартість ізоляції становить 30-70% від вартості всіх матеріалів, що йдуть на виготовлення ЕМ.

В ЕМ розрізняють між-обмоткову та корпусну ізоляції. Між-обмоткова ізоляція (між витками обмотки) забезпечується ізоляцією самого провідника, наноситься

на нього в процесі виготовлення на кабельних заводах. Корпусна ізоляція відокремлює провідники обмотки від корпусу ЕМ. Для неї використовують різні прокладки, гільзи або ряди шарів ізоляції, що наносяться на котушку обмотки до установки її в машину.

Всі ізоляційні матеріали мають допустиму межу використання. Тому незалежно від зниження температури навколишнього повітря, збільшувати навантаження (струм!) більш ніж на 10% від номінального значення не допускається.

У АД на тепловий стан впливає і зміна напруги в мережі живлення, тому що вони найбільш чутливі до зміни напруги: разом зі зменшенням напруги, в квадратичній залежності зменшується потужність (момент) на валу двигуна, Н·м:

$$M = \frac{m_s \cdot U_{sN}^2 \cdot R_r' \cdot p}{2\pi \cdot f \cdot s \cdot \left[\left(R_s + R_r'/s \right)^2 + \left(X_s + X_r' \right)^2 \right]}$$

де M – електромагнітний момент асинхронного двигуна, Н·м;

$m_s = 3$ – кількість фаз мережі;

$f = 50$ Гц – частота напруги в мережі (Україна);

p – кількість пар полюсів статора; s – ковзання, в.о.;

R_s та R_r' – активний опір обмотки статора та зведений активний опір розсіяння обмотки ротора, Ом; X_s та X_r' – реактивний опір обмотки статора та зведений індуктивний опір розсіяння обмотки ротора, Ом;

Крім того, зменшення напруги нижче 95 % від номінального значення призводить до значного зростання струму двигуна і к значному нагріванню обмоток, А:

$$I_{sN} = \frac{P_{inN}}{m_s \cdot U_{sN} \cdot \cos \varphi_N};$$

де U_{sN} – фазна напруга обмотки статора, В;

$\cos \varphi_N$ – номінальний коефіцієнт потужності, в.о.

P_{inN} – потужність, яку АД споживає з мережі в номінальному режимі, Вт:

$$P_{inN} = \frac{P_N}{\eta_N}.$$

η_N – номінальний ККД, в.о.;

P_N – номінальна потужність, кВт.

Зростання напруги вище 110% від номінальної також веде до зростання струму в обмотках двигуна, збільшується нагрів всієї машини.

Всі ізоляційні матеріали від тривалої дії підвищених температур набувають крихкості, легко руйнуються і втрачають свої властивості. Цей процес називається тепловим старінням. Досвід показує, що підвищення температури ізоляції на 10 °С над допустимим для класу нагрівостійкості скорочує термін її служби приблизно вдвічі. Так, для ізоляції класу А підвищення температури з +95 до +105 °С скорочує термін її служби з 15 до 8 років, а до +120 °С – до двох років.

В основі цього явища лежить загальний закон залежності швидкості хімічних реакцій від температури, що описується рівнянням Вант-Гоффа – Ареніуса. Правило Вант-Гоффа – емпіричне правило, яке дає змогу в першому наближенні оцінити вплив температури на швидкість протікання хімічної реакції в температурному інтервалі (зазвичай від 0 до +100 °С).

Якоб Гендрік Вант-Гофф на основі багатьох експериментів сформулював таке правило: в інтервалі температур від 0°С до 100°С при збільшенні температури на кожні 10 °С швидкість хімічної реакції збільшується у 2-4 рази. Правило описується рівнянням:

$$v_2 = v_1 \cdot \gamma^{(T_2 - T_1)/10}$$

де v_2 — швидкість реакції при температурі T_2

v_1 — швидкість реакції при температурі T_1

γ — температурний коефіцієнт швидкості реакції, який дорівнює 2-4: якщо він, наприклад, дорівнює 2, то швидкість реакції буде збільшуватися вдвічі при збільшенні температури на 10 °С).

Пізніше було показано, що правило Вант-Гоффа носить дуже приблизний характер і може застосовуватися тільки для грубих оцінок швидкостей. Точніше залежність швидкостей хімічних реакцій від температури визначається рівнянням Арреніуса, який спочатку визначив його дослідним шляхом, а потім обґрунтував теоретично.

З рівняння Вант-Гоффа температурний коефіцієнт можна розрахувати:

$$\gamma = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{10/(T_2 - T_1)}$$

В електроенергетиці часто використовують правило швидкості старіння ізоляції – «правило 8 градусів», запропоноване Монтзінгейзером: швидкості старіння β залежить від температури:

$$\beta = k \cdot e^{-\rho\theta}$$

де k і ρ – постійні. Кількісне значення постійних залежить від багатьох причин, таких як хімічний склад, наявність вологи, кисню та ін. Однак, незалежно від впливу цих факторів, величина параметра ρ може бути прийнята постійною для інтервалу температури від +80 до +140 °С;

θ – температура, °С.

При температурі нижче +80 °С старіння ізоляції незначне. Це приймають за основу при встановленні впливу навантаження на ізоляцію.

Технологічні перевантаження ЕО (електричних двигунів, трансформаторів, апаратів...) або коливання напруги в мережі ведуть до збільшення струму в обмотках, до перевищення температури обмоток вище допустимих для даного класу, в результаті чого термін служби ЕО швидко зменшується.

В результаті використання матеріалів з більш високим класом нагрівостійкості, при використанні електротехнічних сталей з поліпшеними властивостями, в результаті поліпшення конструкцій та систем охолодження за останні 70-80 років вдалося зменшити масу ЕМ у 2,5-3 рази.

РОЗДІЛ 5

Лекції № 10-11

ВПЛИВ СТРОКУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ НА ЙОГО НАДІЙНІСТЬ

Експлуатаційна надійність ЕО. Причини та види пошкоджень ЕО, що впливають на його надійність. Основні шляхи підвищення надійності ЕО з урахуванням процесів старіння. Врахування амортизації ЕО для оцінки рентабельності проведення ремонтів [Література: 1-3, 8, 12, 15, 20, 26, 30]

5.1. Експлуатаційна надійність ЕО

Крім надійності ЕО, яка закладена на стадії його проектування й виготовлення, необхідно досліджувати експлуатаційну надійність ЕО. Процес експлуатації включає саме експлуатацію та організацію обслуговування і ремонту. Але завжди слід пам'ятати і враховувати економічну рентабельність обслуговування, ремонтів, модернізації ЕО, оцінювати знос обладнання та вміти розраховувати його амортизацію.

Розрізняють розрахункову й експлуатаційну надійність ЕО та його елементів. Між розрахунковою та експлуатаційною надійністю є принципова різниця.

Розрахункова надійність характеризує очікувану надійність роботи обладнання в виробничій або енергетичній системі, яка може бути розрахована з використанням статистичних даних попередньої експлуатації обладнання в конкретному виробництві. Вона може бути поділена на апаратну й схемну. Експлуатаційна надійність характеризує надійність роботи конкретного обладнання або його окремих елементів.

При проектуванні та розвитку системи, наприклад, системи електропостачання (СЕП), використовується розрахункова надійність ЕО, а при оцінці господарської діяльності електричної системи, з метою розробки заходів щодо поліпшення її роботи, проводиться розрахунок експлуатаційної надійності кожної окремої електроустановки.

Експлуатація має вирішальний вплив на надійність роботи об'єктів, яка забезпечується шляхом:

- дотриманням умов і режимів експлуатації (стан мастила та оливи, навантажувальні та температурні режими тощо);
- проведення періодичних технічних обслуговувань з метою виявлення й усунення виникаючих дефектів та підтримки об'єкта в працездатному стані;
- систематичною діагностикою стану об'єкта, своєчасним виявленням відмов та дефектів, запобігання їх розвитку, зниження шкідливих наслідків відмов, тощо;
- проведення профілактичних ремонтів.

Основною причиною зниження надійності в процесі експлуатації є знос і старіння компонентів об'єкта. Знос призводить до зміни параметрів об'єкта, порушення працездатності, поломки, зниження міцності. Старіння впливає через зміну фізико-механічних властивостей матеріалів. Надійність об'єкта на стадії експлуатації можна проілюструвати графіком типової залежності інтенсивності відмов об'єкта від часу експлуатації, рис. 5.1.

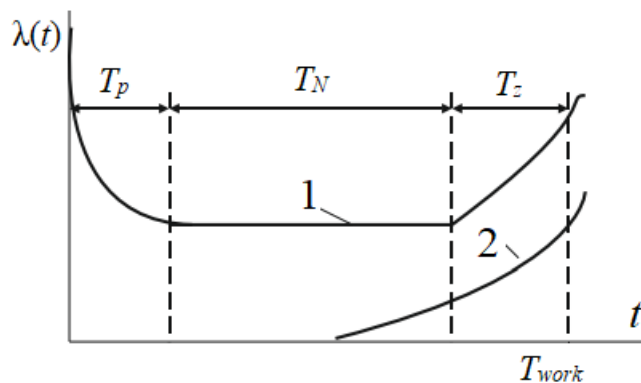


Рисунок 5.1 – Залежність інтенсивності відмов $\lambda(t)$ об'єкта від часу експлуатації
 1 – інтенсивність відмов $\lambda(t)$; 2 – графік впливу старіння на інтенсивність відмов;
 T_p – період приробітку; T_N – період нормальної роботи; T_z – період зносу;
 T_{work} – призначений термін служби (календарна тривалість експлуатації)

У період приробітку надійність, в першу чергу, визначається помилками в конструктивно-технологічних рішеннях, що веде до підвищеної інтенсивності відмов. У міру виявлення та усунення цих факторів надійність об'єкта досягає номінального рівня, який зберігається в періоді нормальної експлуатації обладнання T_N . Протягом цього етапу експлуатації в об'єкті накопичуються прояви «старіння»: знос і втома, – інтенсивність яких зростає зі збільшенням терміну експлуатації (зростаюча крива 2 на рис. 5.1).

Настає період T_z інтенсивного зносу об'єкта, який закінчується його переходом у граничний стан та зняттям з експлуатації.

Досвід експлуатації показує, що надійність роботи ЕО залежить від численних і різноманітних факторів, які умовно можуть бути розділені на чотири групи: конструктивні, виробничі, монтажні, експлуатаційні.

Конструктивні фактори зумовлені застосуванням у пристроях елементів з низькою надійністю; недоліками схемних і конструктивних рішень, прийнятих під час проектування; застосуванням комплектуючих елементів, що не відповідають умовам навколишнього середовища, тощо.

Виробничі фактори зумовлені порушеннями технологічних процесів та слабким контролем якості виготовлення, забрудненням навколишнього середовища, робочих місць і пристроїв, слабким контролем якості виготовлення.

Монтажні фактори проявляються в процесі монтажу електротехнічних пристроїв. Їх надійність може бути знижена в разі недотримання вимог технології і порядку виконання робіт та безпосередньо монтажу.

Експлуатаційні фактори. Умови експлуатації мають найбільший вплив на надійність електротехнічних пристроїв. Різні умови експлуатації неоднаково можуть позначатися на терміні служби й надійності роботи ЕО.

Перевантаження елементів ЕО, струми КЗ, різні види перенапружень (дугові, комутаційні, резонансні), температура, вологість, корозійні рідини й гази, електричні й магнітні поля, удари, вібрація, сонячна радіація, пісок, пил, цвіль – усе це впливає на роботу пристроїв.

Перевантаження призводять до підвищення температури нагрівання ізоляції електротехнічних пристроїв вище допустимої і різкого зниження терміну її служби. Електричні й механічні перевантаження відбуваються в результаті несправності механізмів електроустановок, значних змін частоти або напруги мережі живлення, загустіння масла механізмів у холодну погоду, перевищення номінальної розрахункової температури навколишнього середовища в окремі періоди року і дня тощо. Високі температури також викликають механічні та електричні пошкодження елементів електротехнічних пристроїв, прискорюючи їх старіння.

Під дією вологи відбувається дуже швидка корозія металевих деталей електротехнічних пристроїв, зменшується поверхневий і об'ємний опір ізоляційних матеріалів,

з'являються різні витоки, різко збільшується небезпека поверхневих пробоїв, утворюється грибкова цвіль, під впливом якої поверхня матеріалів роз'їдається й електричні властивості пристроїв погіршуються.

Значно знижують надійність електротехнічних пристроїв ударно-вібраційні навантаження, які в деяких випадках може бути значнішим впливу інших механічних, електричних і теплових навантажень. В результаті тривалого знакозмінного впливу навіть невеликих ударно-вібраційних навантажень відбувається накопичення втоми в елементах, що призводить до раптових відмов. Під впливом вібрацій і ударів виникають численні механічні пошкодження елементів конструкції, послаблюються їх кріплення й порушуються контакти електричних з'єднань.

Навантаження при циклічних режимах роботи, пов'язаних з частими увімкненням й вимиканням електротехнічного пристрою, так само як і ударно-вібраційні навантаження, сприяють виникненню й розвитку ознак втоми елементів. Фізична природа підвищення небезпеки відмов пристроїв при їх увімкненні й вимкненні полягає в тому, що під час перехідних процесів у їхніх елементах виникають надструми і перенапруги, значення яких часто набагато перевищують (хоча й короткочасно) значення, регламентовані технічними умовами.

Пил, що потрапляє в мастило або в оливу, осідає на частинах і механізмах електротехнічних пристроїв і викликає швидкий знос частин, що труться, викликає забруднення ізоляції. Тому при великій запиленості особливого значення набуває якість ущільнень елементів електричних пристроїв і догляд за ними.

Якість експлуатації електротехнічних пристроїв також залежить від ступеня наукової обґрунтованості застосовуваних методів експлуатації та кваліфікації обслуговуючого персоналу (знання матеріальної частини, теорії та практики надійності, вміння швидко знаходити й усувати несправності тощо).

Застосування профілактичних заходів (регламентні роботи, огляди, випробування), ремонту, використання досвіду експлуатації електротехнічних пристроїв забезпечують їх більш високу експлуатаційну надійність, зменшують величину зносу та пошкоджень деталей.

5.2. Причини та види пошкоджень ЕО від зносу, що впливають на його надійність

В першу чергу розглянемо причини появи признак зносу та встановимо його вплив на надійність ЕО. Робота деталей і вузлів супроводжується механічними процесами, що викликають зниження міцності поверхневого шару. Цій фактор значно підсилюється дією фізичних і хімічних факторів. Знос – це процес руйнування і відокремлення матеріалу від поверхні твердого тіла та (або) накопичення остаточної деформації при терті, що проявляється у вигляді поступової зміни розмірів і (або) форми тіла (ГОСТ 30479-97) [22].

Знос при роботі деталей і вузлів є природним і безперервним процесом. Однак його швидкість на різних етапах експлуатації та за різних умов може змінюватись і залежати від ряду причин: конструкції деталей, властивостей їх матеріалів, якості обробки поверхонь, збирання та регулювання, значення та тривалості навантажень, тиску, температури, організації технічного обслуговування, стану мастила. Зміна швидкості зносу на різних етапах експлуатації відповідає певній закономірності, що наведена на рис. 5.2.



Рисунок 5.2 – Залежність зносу механічних деталей від строку напрацювання

У першому періоді (зона I), який починається від початкового зазору δ_{st} , знос збільшується швидко, оскільки протікає процес припрацювання поверхонь, згладжування мікронерівностей.

У другому періоді (зона II) знос наростає майже повільно та рівномірно – це зона нормальної експлуатації. У цей період швидкість зносу залежить від умов роботи обладнання і якості догляду за ним. Наприкінці другого періоду наступає гранично допустимий знос, при якому ще не порушується процес нормальної експлуатації, а зміна форми деталей не викликає пошкоджень і аварійних зупинок. Це перехід в зону критичного зносу.

У третьому періоді (зона III – зона критичного зносу) темп наростання зносу різко підвищується, виникають ударні навантаження, що часто супроводжуються підвищеним шумом, нагріванням, навіть стуком. Якщо негайно не припинити роботу, то це може призвести до поломки машини або механізму. Норми гранично допустимих зносів завжди наводять в нормативних документах і правилах, в ТУ. Вони встановлюються за результатами тривалих дослідів, випробувань та спостереженнями за роботою вузлів.

Виділяють механічний, корозійно-механічний знос і знос від дії електричного струму, табл. 5.1.

Викришування у вигляді віспоподібних заглиблень і западин найчастіше спостерігається на робочих поверхнях зубів шестерень і деталей підшипників котіння. Глибина і розміри западин залежать від механічних властивостей металу і величин питомих тисків при контакті. Деформація деталей, наприклад, овалізація «ліжок» підшипників в підшипникових щитах, вигин валів, виникає в результаті ударних навантажень, надмірного нагріву, порушення порядку закріплення або регулювання взаємного розташування деталей.

До пошкодження хіміко-теплого характеру можна віднести короблення, появу прогарів, оплавлень, раковин. Короблення, прогари й оплавлення деталей відбуваються найчастіше від температурних перевантажень або через незадовільне охолодження. Раковини майже завжди виникають внаслідок місцевих перегрівів або через газову корозію. Наприклад, при поганому приляганні ізоляційних прокладок газу прориваються в зазор, в результаті чого на притиральних поверхнях вигорає метал і з'являються раковини.

Таблиця 5.1 – Види, причини виникнення і найбільш характерні міста появи слідів зносу

Вид зносу	Тип зносу	Причини і місце появи
Корозійне-механічний	Окисний	Виникає під впливом хімічних реакцій, що виникають при дії на матеріал кисню або іншого окисного середовища (деталі в середині машини, корпуси).
	Від фретинг-корозії	Виникає в деталях, що встановлені з щільною посадкою, при їх коливанні з малою амплітудою. Фретинг-корозія може супроводжуватись корозією і, як правило, появою продуктів зносу.
Механічний	Абразивний	Має найбільш руйнівну дію. Виникає при попаданні в зону контакту деталей твердих частинок, що ріжуть та дряпають поверхні (щітки та колектори електричних машин, паливна апаратура). Абразивні частинки впливають на поверхню деталей при переміщенні відносно неї потоків рідини або газу (охолоджувачі, компресори, паливна апаратура)
	Від ерозії	Це механічний вплив потоку рідини або газу (лопатки вентиляторів).
	Кавітаційний	Гідро-абразивний знос при русі твердого тіла відносно рідини, при якому виникають поблизу поверхні пухирці газу, що створює місцеве підвищення тиску або температури (поверхні охолодження циліндрових втулок, корпус водяного насоса, вкладиші валів з бабітовим шаром).
	Втомний	Виникає при повторному деформуванні мікрооб'ємів матеріалів поверхневого шару (деталі підшипників кочення та зубчастих передач).
Електричний (від дії електричного струму)	Від торкання (заїдання)	Виникає в результаті схоплення, глибинного виривання матеріалу, перенесення його з однієї поверхні на іншу та подальшій взаємодії нерівних поверхонь, що утворилися (підшипники ковзання).
	Від електроерозії	Ерозійний знос поверхні в результаті впливу розрядів при проходженні електричного струму. Вражає робочі поверхні контактних з'єднань ЕМ і апаратів.

Пошкодження також поділяють за причиною виникнення:

- експлуатаційні пошкодження – в результат неякісної експлуатації та технічного обслуговування (ТО);
- виробничі – виникають в результаті неякісного виготовлення або ремонтів;
- конструкційні пошкодження – через помилки при проектуванні;
- аварійні пошкодження – виникають при аварійних ситуаціях.

Підвищення експлуатаційної надійності ЕО пов'язане з матеріальними витратами, тому ця проблема повинна вирішуватися на базі техніко-економічних розрахунків. Для кожного типу ЕО слід враховувати економічно-обґрунтовані оптимальні показники надійності з урахуванням умов застосування, фізичного та морального зносу, витрат на технічне обслуговування і ремонт, мінімізувати можливі причини пошкоджень.

5.3. Основні шляхи підвищення надійності ЕО з урахуванням процесів старіння

Відзначимо основні шляхи підвищення надійності ЕО, яке майже або повністю відпрацювало паспортних строк експлуатації, що встановлений в ТУ заводу-виробника:

- подальше вивчення й удосконалення умов експлуатації та підвищення експлуатаційної надійності ЕО, визначення характеру, причин і законів розподілу відмов;
- вдосконалення та розробка нових методів розрахункової оцінки надійності електроустаткування, а також оцінки надійності шляхом випробування на надійність;
- розробка і вдосконалення методів розрахункової і експериментальної оцінки надійності ЕО при зберіганні й транспортуванні;
- налагодження й правильна експлуатація систем захисту ЕО, передбачених під час проектування;
- покращення теплового стану ЕО шляхом переходу на більш високий клас нагрівостійкості ізоляції, вирівнювання температури окремих частин обладнання, втілення сучасних систем охолодження, вдосконалення системи вентиляції, максимальне обмеження перевантажень та обов'язкова наявність системи захисту від перевантажень тощо;

- розробка і впровадження заходів щодо зниження вібрацій як електроустаткування, так і електромеханічної системи у цілому;
- підвищення якості комплектуючих виробів і матеріалів, застосування матеріали найвищої якості;
- використання новітніх технологій та сучасних матеріалів, наприклад, вакуумне просочування лаками осердь статорів та ізоляції; використання спеціальних обмотувальних проводів з міцною та еластичною ізоляцією, зі зменшеною жорсткістю; застосовувати високоякісну міканітову ізоляцію (міканітова ізоляція струмовідводів настільки надійна, що їх огляди можуть здійснюватися через дуже великі проміжки часу);
- застосування нових систем керування, діагностики та обслуговування систем (концепція *Smart Grid*).

Всі обрані рішення повинні пройти не тільки технічну, но і економічну оцінку. Але ця оцінка враховувати показники надійності.

Утримання технічного обладнання на високому експлуатаційному рівні неможливе без об'єктивної інформації про його фактичний стан. Для реалізації ефективного діагностування необхідна інтелектуалізація електричних мереж. При розробці проектів з інтелектуалізації електричних мереж доцільно вивчати світовий досвід розвитку концепцій *Smart Grid*.

Таке керування повинно здійснюватися на всій системі електропостачання (СЕР), яка зрештою повинна стати повністю автоматичною, а всі наявні автоматизовані системи (АСДУ, АСУТП, системи моніторингу, системи керування даними, системи діагностування тощо) є лише інструментом для досягнення кінцевої цілі. Об'єднані автоматизовані інформаційні СЕР дозволять по-новому підходити до побудови електричних мереж та контролю їх роботи.

Інтелектуальна електрична мережа залежно від умов, що склалися, у автоматичному режимі повинна здійснювати зміну конфігурації СЕР з метою мінімізації витрат енергоресурсів без зниження надійності роботи, у тому числі: керування СЕР, діагностування стану ЕО станцій і підприємств, а також планування та проведення технічного обслуговування і ремонтів обладнання.

Регламентоване обслуговування, що виконується згідно з інструкціями, в цілому призначене забезпечувати працездатність обладнання. Проте інколи таке об-

слуговування призводить до невиправданих витрат, оскільки за реальним технічним станом пристрій в момент виконання робіт може й не потребувати технічного обслуговування, а замінювані деталі ще не досягли критичної межі зносу. Поступове старіння парку устаткування й зниження запасів міцності гостро ставлять питання оцінки його стану й рівня ризику експлуатації ЕО за межами нормованого терміну служби.

Розвиток вільного ринку електроенергії і збільшення фінансового тиску стали додатковими чинниками, які, з одного боку, максимально підсилюють необхідність продовження термінів служби устаткування, а з іншого – спрямовані на зниження експлуатаційних витрат на його технічне обслуговування і ремонт. Необхідність розв'язання цієї суперечності приводить до формування нового підходу в оцінці стану устаткування – обслуговування устаткування за фактичним технічним станом.

В основі нових запропонованих методів управління й прийняття рішень, що формуються сьогодні, лежить аналіз ризиків експлуатації старого устаткування або устаткування з певними незначними дефектами. Обслуговування та виведення в ремонт ЕО за фактичним технічним станом забезпечує необхідний рівень надійності при зниженні експлуатаційних витрат. При цьому призначають необхідні роботи з технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) залежно від реального технічного стану конкретного об'єкта й передбачуваної зміни його стану в процесі експлуатації.

Цей метод полягає в контролі за технічним станом устаткування з використанням сучасних засобів технічної діагностики та проведенням ремонтних робіт лише тоді, коли вони дійсно необхідні (рис. 5.3). У результаті проведення безперервної діагностики експлуатованого устаткування можна досягти зниження обсягів робіт за рахунок систематичного зменшення причин виникнення дефектів.

Накопичений світовий досвід застосування ТО і Р за фактичним технічним станом дозволяє дати таку узагальнену оцінку ефективності цього методу:

- зниження витрат на обслуговування на 75 %;
- зниження кількості обслуговувань на 50 %;
- зниження кількості відмов на 70 % за перший рік роботи.

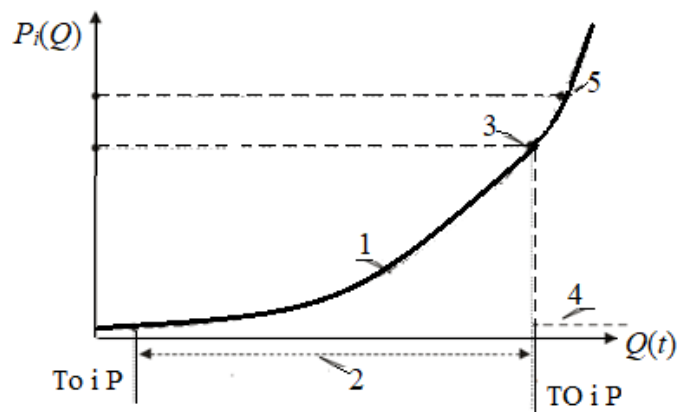


Рисунок 5.3 – Обслуговування пристроїв за фактичним технічним станом $P_i(Q)$ – узагальнений показник ресурсу пристрою;
 1– зміна технічного стану обладнання $Q(t)$; 2– моніторинг та діагностування технічного стану обладнання; 3 – передвідмовний стан обладнання;
 4 – відновлення ресурсу; 5 – відмова пристрою

За даними «Асоціації відкритих систем управління інформацією» про стан машин, показав, що питомі витрати на ТО і Р в енергетичному секторі США склали в 2010 р.:

- 24 \$ на 1 кВт – при функціонуванні устаткування до виходу з ладу;
- 18 \$ на 1 кВт – при ТО і Р на базі планово-запобіжних ремонтів;
- 12 \$ на 1 кВт – при ТО і Р на базі оцінки фактичного стану устаткування.

Інший приклад економічного ефекту від переходу з обслуговування і ремонту за регламентом на ремонт і обслуговування за фактичним станом за даними фірми «*Bruel and Kjaer*» (Данія) наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Річний економічний ефект від переходу з ТО і Р за регламентом на ТО і Р за фактичним станом

Підприємство (ремонтуюме обладнання)	Економічний ефект
Хімічний комбінат (електричні машини)	Зниження кількості ТО і Р від 274 до 14
Нафтопереробний комбінат (все ЕО)	Зниження затрат на ТО і Р на 75 %
Паперова фабрика (ЕО)	Економія \$250 тис, що в 10 разів перекрило затрати на закупівлю засобів для моніторингу
Атомна електростанція (ЕО)	Економія \$3 млн. за рахунок зниження затрат на ТО і Р
Залізничний транспорт	Зниження кількості ТО і Р на 15 %
Коефіцієнт окупності вкладених коштів	Більше 10 разів

Ці дані показують, що для вирішення проблеми своєчасного відновлення ресурсу та підвищення надійності ЕО промислових підприємств та електростанцій, скорочення витрат, пов'язаних з ремонтом і простоями, необхідно переходити від регламентованих ТО і Р до обслуговування за фактичним технічним станом.

Вже існуючий досвід обслуговування за фактичним технічним станом дозволяє, з одного боку, забезпечити працездатність техніки, з іншого – заздалегідь підготуватися до проведення ТО і Р та мінімізувати витрати на нього.

Однак планування ТО і Р пристроїв ТП досить складне у зв'язку з тим, що стан кожного з об'єктів контролюється множиною показників, за кожним з яких повинна розраховуватися дата наступного ТО і Р. Тому в кожній системі ТО і Р необхідно шукати резерви для скорочення витрат. У цьому напрямку, в першу чергу, необхідно забезпечити обґрунтованість ремонтної програми:

1) обґрунтованість витрат на ТО і Р – це розуміння того, на що, на які об'єкти і які роботи плануються засоби ремонтного фонду, скільки коштує кожна робота;

2) при кожному варіанті рішення необхідно виконувати усвідомлений вибір між витратами на підтримку працездатності устаткування й розміром ризику в разі невиконання ремонту.

Для цього слід впровадити пооб'єктне планування ремонтного фонду; прив'язати витрати на ремонт до технічного стану й фактичного завантаження обладнання; впровадити оцінку ризику невиконання ремонтів і систему прийняття рішень на основі теорії ризиків. Технічне обслуговування і ремонт по фактичному технічному стану обладнання повинне базуватися на сучасній технічній діагностиці.

На початковому етапі впровадження системи ТО і Р електроустаткування за фактичним технічним станом доцільно зберегти планування основних ремонтних показників (ремонтного циклу, міжремонтного періоду, трудомісткості, об'єму складських запасів матеріалів і запасних частин). У результаті прогнозування технічного стану на підставі діагностування міжремонтний період кожного виду ЕО необхідно коригувати залежно від його фактичного технічного стану.

У процесі накопичення діагностичної інформації про відпрацьований або залишковий ресурс різного ЕО можуть бути внесені корективи в нормативи також періодичних циклів ТО і Р.

При подальшому глибокому розвитку й впровадженні методів і засобів технічної діагностики можна буде повністю відмовитися від регламентного календарного планування термінів ремонту, замінивши його на календарне планування діагностичних перевірок.

5.4. Врахування амортизації електрообладнання для оцінки рентабельності проведення його ремонтів

Врахування зносу ЕО для оцінки рентабельності проведення ремонтів або необхідності заміни виконується шляхом розрахунку амортизації основного обладнання. Амортизація – це систематичний розподіл вартості необоротних активів протягом строку їх корисного використання (експлуатації).

Об'єктом амортизації є вартість, яка амортизується (окрім вартості земельних ділянок, природних ресурсів і капітальних інвестицій). Під вартістю, яка амортизується, мають на увазі первісну або переоцінену вартість об'єкта за вирахуванням його ліквідаційної вартості.

Ліквідаційна вартість – сума коштів або вартість інших активів, яку підприємство/установа очікує отримати від реалізації (ліквідації) необоротних активів після закінчення строку їх корисного використання, за вирахуванням витрат, пов'язаних із продажем або ліквідацією.

Строк експлуатації – очікуваний період часу, протягом якого необоротні активи будуть використовуватися підприємством або з їх використанням буде виконано встановлений об'єм робіт або продукції.

При визначенні строку експлуатації враховується:

- очікуване використання обладнання підприємством або електростанцією з урахуванням його потужності або продуктивності;
- фізичний та моральний знос, що передбачається;
- правові або інші обмеження щодо строків використання обладнання та інші фактори.

На практиці при надходженні основних засобів підприємства дуже важко або майже неможливо визначити їх ліквідаційну вартість. В такому випадку або коли ліквідаційна вартість становить незначну суму, вважають, що вона дорівнює нулю. Метод

розрахунку амортизації обладнання обирається підприємством самостійно з урахуванням очікуваного способу отримання економічної вигоди від його використання та переглядається у разі зміни очікуваного способу отримання економічної вигоди від його використання.

В стандартах визначають такі методи амортизації ЕО:

- 1) прямолінійний;
- 2) зменшення залишкової вартості;
- 3) прискорення зменшення залишкової вартості або подвійного залишку, що зменшується;
- 4) кумулятивний;
- 5) виробничий.

Для малоцінних необоротних матеріальних активів і бібліотечних фондів використовують спрощений метод: амортизація об'єктів цих груп може нараховуватися у першому місяці використання об'єкта в розмірі 50 % його вартості, яка амортизується, та решта 50 % вартості, яка амортизується, нараховується в місяці їх вилучення з активів (списання з балансу).

В міжнародних стандартах використовують розподіл на три методи:

- 1) прямолінійний метод;
- 2) метод зменшення залишку;
- 3) метод суми одиниць продукції (аналог нашого виробничого методу).

Прямолінійний метод нарахування амортизації передбачає рівномірний розподіл вартості, яка амортизується, на строк корисного використання об'єкта основних засобів, якщо ліквідаційна вартість активу не змінюється. Прямолінійний метод нарахування амортизації найпоширеніший у світі за свою простоту у розрахунках. Цей метод застосовується для тих об'єктів основних засобів, які протягом всього строку експлуатації виконують приблизно постійний обсяг робіт. Однак, даний метод не враховує вплив наступних факторів:

- моральний знос одиниці обладнання;
- виробничу потужність у різні роки експлуатації;
- збільшення витрат на ремонт в останні роки експлуатації об'єкта.

Методу зменшення залишку (або метод зменшення залишкової вартості). Результатом застосування цього методу є зменшення суми відрахувань протягом терміну експлуатації.

платуації. Ці метод, як і метод прискореного зменшення залишкової вартості та кумулятивний метод відносяться до прискорених методів амортизації. За цим методом річна сума амортизації визначається як добуток залишкової вартості об'єкта на початок звітного року або первісної вартості на дату початку нарахування амортизації.

Річна норма амортизації (у відсотках) обчислюється як різниця між одиницею та результатом кореня ступеня кількості років корисного використання об'єкта з результатом поділу ліквідаційної вартості об'єкта на його первісну вартість:

$$A = C_z \cdot \left(1 - \sqrt[T]{\frac{C_L}{C_P}}\right)$$

де C_z – залишкова або первісна вартість об'єкта на дату початку нарахування амортизації;

C_L – ліквідаційна вартість основних засобів;

C_P – первісна вартість основних засобів;

T – термін корисного використання основних засобів, рік.

За методом прискореного зменшення залишкової вартості річна сума амортизації визначається як добуток залишкової вартості об'єкта на початок звітного року або первісної вартості на дату початку нарахування амортизації та річної норми амортизації, яка обчислюється, виходячи із строку корисного використання об'єкта, і подвоюється. При цьому ліквідаційна вартість об'єкта не має значення. Річна норма амортизації визначається діленням 100% на кількість років корисного використання об'єкта.

За кумулятивним методом річна сума амортизації визначається як добуток вартості, яка амортизується, на кумулятивний коефіцієнт. Кумулятивний коефіцієнт розраховується діленням кількості років, що залишаються до кінця строку корисного використання основних засобів, на кількість років його корисного використання:

$$A_m = K_k \cdot (F_f - L_v)$$

де $K_k = P_v / C_\Sigma$ – кумулятивний коефіцієнт;

A_m – амортизаційні відрахування;

F_f – первісна вартість; L_v – ліквідаційна вартість;

P_v – кількість років, що залишається до кінця строку корисного використання основних засобів;

C_Σ – сума років корисного використання основних засобів.

Виробничий метод не відноситься до прискорених методів амортизації і вважається найбільш наближеним до реальних бізнесових процесів. За цим методом місячна сума амортизації визначається як добуток фактичного місячного обсягу продукції (робіт, послуг) та виробничої ставки амортизації.

Виробнича ставка амортизації обчислюється діленням вартості, яка амортизується, на загальний обсяг продукції (робіт, послуг), який підприємство очікує виробити (виконати) з використанням об'єкта основних засобів.

$$A_m = V_{fact} \cdot R_s$$

де R_s – виробнича ставка:

$$R_s = (F_f - L_v) / Z_\Sigma;$$

V_{fact} – фактичний обсяг продукції (робіт, послуг);

Z_Σ – загальний розрахунковий обсяг виробництва.

Виробничий метод доцільно використовувати для обладнання, знос якого залежить від інтенсивності використання, або для обладнання, яке самостійно може виконувати визначений об'єм робіт (верстати, вантажні авто).

Важливо пам'ятати, що в цілому немає обмежень для застосування тих або інших методів амортизації, якщо вони є більш доречними (тобто вищенаведений перелік не є вичерпним).

РОДІЛ 6

Лекції № 12-13

ЗАПЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ. ВПЛИВ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

(на прикладі асинхронного двигуна)

[Література: 1, 4-7, 10, 15, 21, 25, 31, 37, 41]

Визначення експлуатаційних ушкоджень і відмов ЕО. Методи підвищення експлуатаційної надійності ЕО. Покращення пускових характеристик асинхронних короткозамкнених двигунів як засіб енергозбереження та підвищення їх надійності.

Особливості роботи і проблеми пуску АД з мідною обмоткою ротора.

6.1. Визначення експлуатаційних ушкоджень і відмов силового ЕО

Під час виконання оглядів або ремонтів важливо знати які параметри слід контролювати і враховувати при оцінці технічного стану ЕО. Завжди розглядаються механічні (вібрація), теплові, електричні та інші чинники, що мають різну фізико-хімічну природу та призводять до зміни окремих властивостей електроустаткування.

Загальна оцінка технічного стану устаткування надзвичайно ускладнена через необхідність зіставлення показників різної фізичної природи й відсутність між ними кореляційних залежностей. Тому постійно йдуть пошуки найбільш результативних та простих в виконанні підходів до загальної оцінки технічного стану ЕО. Натепер частіш за все для інтегральної оцінки технічного стану ЕО обирають значення спрацьованого (залишкового) ресурсу, який визначають за результатами експлуатаційного контролю параметрів пристрою в перехідних і стаціонарних режимах роботи.

Умови практичної експлуатації ЕО відрізняються значною різноманітністю й нестабільністю. Безперервне діагностування технічного стану найбільш ушкоджуваних і відповідальних елементів ЕО в процесі експлуатації можливо впровадити з допомогою концепції інтелектуальної системи виконання ТО і Р, моніторингу та діагностування обладнання в режимі онлайн.

При цьому враховують:

- кількісні характеристики напрацювання ЕО з початку експлуатації або після чергового ремонту: в годинах напрацювання, враховують кількості включень, безаварійних зупинок тощо);
- вплив зовнішнього середовища, у якому працює ЕО (температура, вологість, запилення, дія агресивних або хімічних речовин тощо);
- фактичні режими роботи обладнання ТП і його систем залежно від змін графіків навантаження, наявності перехідних процесів, стабільності параметрів живлячої мережі тощо;
- організація та технічне забезпечення процесів ТО і Р, застосування методів технічного контролю обладнання;
- рівень підготовки й майстерність інженерно-технічного складу, який полягає в умінні вибирати та використовувати оптимальні режими роботи ЕО та дотримуватися встановлених правил експлуатації;
- якість виконання робіт з ТО і Р залежно від строку виявлення й усунення ушкоджень, виконання профілактичних робіт і заміни дефектних елементів, технічної оснащеності виробничої бази, стану СЕП, достатньої кваліфікації і чисельності технічного персоналу, якість організації їх праці.

Перераховані чинники визначають рівень експлуатаційної надійності ЕО і його систем, оскільки в загальному випадку відмови та дефекти мають випадковий характер і трапляються через те, що в процесі експлуатації відбуваються зміни стану елементів: виникають відхилення від нормованих параметрів або відхилення від штатних режимів, з'являються несправності, зумовлені різними дефектами працюючого поруч ЕО.

Більшість вказаних дефектів є керованими, тобто можуть бути фактично змінені шляхом забезпечення оптимальних режимів роботи ЕО і розробки заходів, спрямованих на своєчасну ліквідацію виникаючих чинників або запобігання їм.

Дефекти ЕО станцій, підстанцій і промислових підприємств можуть бути класифіковані за характером і походженням:

- І група – тріщини, деформації і руйнування втомного характеру, викликані дією експлуатаційних навантажень, що багаторазово повторюються;

- II група – спрацювання рухомих зчленувань (поява люфту), послаблення різних з'єднань і заклепувальних швів, потертості й інші види механічного зносу елементів конструкції тощо;

- III група – руйнування і деформації, викликані разовими діями навантажень, що перевищували розрахункові значення, або пов'язані з порушеннями правил експлуатації ЕО;

- IV група – втрата властивостей оливи, мастила і спеціальних рідин, що використовуються в вузлах, агрегатах і системах, а також старіння деталей;

- V група – руйнування лакофарбових та інших видів захисних покриттів;

- VI група – корозія механічних елементів конструкції;

- VII група – механічні ушкодження, викликані недбалістю при ТО і Р або при виконанні навантажувально-розвантажувальних робіт.

До причин виникнення названих груп дефектів слід віднести такі фактори:

- експлуатація ЕО зверх встановленого терміну експлуатації (I і II групи);
- організація і практичне виконання завдань виробництва в умовах, які не відповідають нормативним вимогам (III група);

- порушення календарних термінів експлуатації та дія зовнішніх факторів (IV, V, VI групи);

- недоліки організації праці, низька кваліфікація робочого персоналу (VII група).

Запропонована класифікація експлуатаційних ушкоджень і відмов є базою для прогнозування технічного стану ЕО та розробки профілактичних заходів, які безпосередньо повинні враховуватися при ТО і Р для підвищенні експлуатаційної надійності.

6.2. Методи підвищення експлуатаційної надійності електрообладнання

Для зниження економічних втрат і підвищення терміну експлуатації ЕО необхідно отримати інформацію щодо його експлуатаційної надійності, на підставі якої слід розробити заходи щодо більш коректної та відповідальної експлуатації, а також скласти план щодо вдосконалення системи ТО і Р з метою продовження терміну служби. Показники надійності конкретного ЕО або технологічної системи мають ймовірнісний характер. Це означає, що той чи інший показник надійності досить

точний лише стосовно великої кількості зразків або одного зразка, але за умови, що спостереження за ним ведеться так довго, що була можливість спостерігати велику кількість відмов.

Ймовірнісний характер показників надійності зумовлений тим, що більшу частину свого терміну служби технічний об'єкт перебуває на етапі нормальної роботи, коли відмови відбуваються раптово, тобто мають випадковий характер.

Однак і на етапі зносу і старіння, коли закономірне наближення відмови того чи іншого об'єкта можна передбачити, саме момент відмови точно передбачити неможливо. Звідси, час безвідмовної роботи так само, як і на етапі нормальної роботи, є випадковою величиною.

Експлуатаційна надійність, тобто його здатність зберігати працездатність протягом певного часу, складна характеристика, яка включає безвідмовність, працездатність, довговічність, ремонтпридатність та значною мірою залежить від умов експлуатації (див. п. 5.1).

В умовах експлуатації ЕО кількісну оцінку безвідмовної роботи отримують досить просто: за результатами обробки експлуатаційних даних шляхом розрахунку відношення кількості об'єктів системи, які безвідмовно пропрацювали до моменту часу t , до кількості об'єктів, працездатних у початковий момент часу:

$$P(t) = \frac{N}{N_0} = \frac{N_0 - r(t)}{N_0} = 1 - \frac{r(t)}{N_0}$$

де N – кількість об'єктів системи;

N_0 – кількість працездатних об'єктів у початковий момент часу;

$r(t)$ – кількість відмов за час t .

Враховуючи велику кількість параметрів, які впливають на працездатність об'єктів ТП, можна прийняти нормальний закон розподілу оцінки безвідмовної роботи:

$$P(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^{\infty} e^{-(x-x_{mid})^2/2\sigma^2} dx$$

де x – вимірне значення параметра; σ – середньоквадратичне відхилення параметра; x_{mid} – середнє значення параметра (математичне сподівання):

$$x_{mid} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n};$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - x_{mid})^2}{n - 1}},$$

де x_i – вимірне значення параметра на i -му кроці;

n – кількість вимірювань параметра.

Фізичні параметри ЕО залежать від великої кількості різних факторів, здатних вносити з однаковою похибкою додатні та від’ємні відхилення, незалежно від природи цих випадкових факторів.

При експоненціальному законі розподілу напрацювання на відмову, характерну для усталеного режиму експлуатації, ймовірність безвідмовної роботи визначається:

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

де e – основа натуральних логарифмів ($e = 2,7183$);

λ – інтенсивність відмов; t – час.

Слід мати на увазі, що застосування ймовірності безвідмовної роботи та ймовірності відмови без зазначення періоду часу спостереження не має сенсу, бо для різної тривалості роботи об’єкта ймовірність безвідмовної роботи і ймовірність відмови будуть так само різними. Якщо пристрій складається з n послідовно з’єднаних елементів, ймовірність безвідмовної роботи яких для різних інтервалів часу дорівнює $P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)$, то на підставі теореми множення незалежних подій ймовірність безвідмовної роботи пристрою:

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t).$$

Небезпека відмов пристрою може бути встановлена:

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t),$$

де $\lambda(t)$ – небезпека відмови i -го елемента пристрою.

В окремому випадку при експоненціальному законі розподілу, коли $\lambda_i(t) = \lambda_i = \text{const}$, ймовірність безвідмовної роботи обладнання:

$$P(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_i + \dots + \lambda_n) \cdot t}.$$

Якщо пристрій складається з n паралельно з'єднаних елементів, ймовірність відмови яких для різних інтервалів часу дорівнює $Q_1(t), Q_2(t), \dots, Q_n(t)$, то ймовірність відмови пристрою:

$$Q(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t).$$

Вивчення теоретичного та практичного досвіду експлуатації й ремонту з метою підвищення надійності ЕО енергосистем та систем у цілому, а також дослідження роботи господарства електрифікації та електропостачання Укренерго за 10-15 років дозволяє визначити основні складові, напрямки формування рівня експлуатаційної надійності ЕО, концепцію якої було наведено на рис. 2.4.

Розрізняють плановані й фактичні значення показників експлуатаційної надійності. Часто їх прив'язують до року експлуатації ЕО (1-й, 2-й тощо), до виду та умов роботи, до природно-кліматичних умов. Рівень надійності окремого обладнання зменшується за роки експлуатації. Зазвичай це особливо інтенсивне відбувається після 3-4 років використання.

Щодо кращих світових зразків обладнання стосовно конкретної моделі техніки, можна розрізнити «високий», «середній» і «низький» рівні експлуатаційної надійності за певними значеннями показників надійності. Цілком очевидно, що рівень експлуатаційної надійності забезпечують підприємства (підрозділи), що здійснюють його проектування, виготовлення та експлуатацію.

Схема формування рівня експлуатаційної надійності ЕО (див. рис. 2.4) у своєму складі має заходи, що впливають на здатність ЕО працювати без зупинок та на тривалість зупинок ЕО з технічних причин.

Для забезпечення безвідмовності й довговічності ЕО можна запропонувати:

- розробити вимоги, пропозиції та стратегії виконання ТО і Р для підвищення довговічності й безвідмовності обладнання в цілому, її систем і елементів;
- розробляти якісну конструкторську та технологічну документацію, виконувати положення, якої забезпечують довговічність та безвідмовність обладнання;
- оцінювати ступень виконання встановлених вимог до надійності на експериментальних зразках елементів ЕО за допомогою стендових випробувань та випробувань дослідних зразків ЕО в експлуатаційних умовах електропостачання;

- поступово підвищувати рівень безвідмовності й довговічності елементів ЕО на основі результатів його експлуатації, а також за інформацією про відмови, що надходять від всіх енергоприймачів; коригувати нормативно-технічні документи ТО і Р за результатами випробувань;

- впроваджувати автоматизовані системи збору, обліку та зберігання інформації про відмови й результати діагностування ЕО в умовах експлуатації, розробляти пропозиції щодо підвищення рівня безвідмовності й довговічності.

Для забезпечення пристосованості ЕО до технічного обслуговування та діагностики необхідно забезпечити:

- вільний доступ для обслуговування та очищення елементів ЕО;
- виведення на пульт управління показників та звукових сигналів, які оперативне проінформують оператора про стан елементів ЕО, забезпечити можливість установки на основне силове ЕО пристроїв для збору інформації про його технічний стан;
- по можливості групувати в єдині вузли елементи, деталі та саме ЕО для обслуговування й отримання візуальних показників;
- можливість установки автоматизованих систем змащення та інших;
- для технічного персоналу забезпечити нормальні умови для виконання роботи під час обслуговування, забезпечити повний набір інструментів і пристроїв для підключення переносних діагностичних засобів.

Забезпечення якості виготовлення ЕО передбачає сукупність дій, які гарантують з необхідною ймовірністю, що ЕО буде відповідати встановленим вимогам. На якість виготовлення ЕО впливають:

- 1) якість організація виробництва (використовуване обладнання, кваліфікація персоналу, технологія і методологія виконання робіт, рівень менеджменту та ін.);
- 2) контроль якості організація виробництва, що включає:
 - вхідний контроль якості, комплектуючих і матеріалів, вихідний контроль;
 - коригувальні дії за результатами контролю та ін.;
 - статистичний контроль якості процесів;
- 3) забезпечення поліпшення якості виготовлення за рахунок використання інформації, що була отримана під час експлуатації.

Усі роботи або частина з них може виконуватися тільки своїми фахівцями, а інша частина – фахівцями сторонніх організацій. При цьому значна увага приділяється заходам профілактичного характеру, спрямованим на максимально можливе зменшення відмов ЕО, а також на необхідність своєчасного здійснення ремонту агрегатів, поки ремонт не трудомісткий, не ускладнений і не потребує великих витрат і тривалого простою ЕО.

За цієї стратегії найбільшої важливості набувають такі ефективні заходи з підтримки працездатності ЕО: технічне обслуговування й ремонт за фактичним технічним станом (також при введенні в експлуатацію) та діагностування з визначенням максимально реальних параметрів обладнання.

Розходження в затратах на ремонт при прогресивній стратегії та при поширеній на сьогодні роботі до відмови може досягати трикратного значення. Роботи з підтримки працездатності ЕО повинні виконуватися висококваліфікованими сертифікованими фахівцями, які використовують сучасні технології і мають високоякісне обладнання. Провідні виробники здійснюють підготовку (підвищення кваліфікації) сервісного персоналу й беруть участь в оснащенні приладами, пристроями та інструментом.

До складу профілактичних заходів з технічного сервісу також входить забезпечення мастильними матеріалами та охолодними рідинами, що включає:

- придбання мастильних матеріалів, мастильних та охолоджувальних рідин (провідні зарубіжні виробники поставляють фірмові високоякісні експлуатаційні рідини спеціального виготовлення);

- організацію зберігання та підтримання запасів експлуатаційних рідин;
- періодичну очистку оливи оливо-наповненого силового ЕО, у тому числі з використанням мобільних засобів.

Висока якість профілактичних заходів характеризується показниками відхилення від графіка технічного обслуговування $\pm 10\%$, ступеню плановості ремонтів 80-90 %.

Ефективні конструктивні рішення з ремонтпридатності ЕО включають:

- пристосованість конструкції до знаходження місця несправності (відмови);
- рішення, що забезпечують зручність ремонту;
- можливість легкого доступу до пошкоджених елементів ЕО;

- модульність конструкції – можливість швидкого зняття непрацездатних елементів, що не мають складних зв'язків із сусідніми;
- можливість використання високоефективних інструментів і пристроїв, у тому числі тих, що поставляються провідними виробниками.

Для відновлення працездатності ЕО при виконання ремонту ЕО в польових умовах використовуються спеціально виготовлені мобільні майстерні, оснащені малогабаритними кранами високої вантажопідйомності, кузовами для перевезення агрегатів, автономними генераторами, зварювальними установками, компресорами, комплексом інструментів і запасних частин тощо. Стаціонарні майстерні повинні мати мостові крани достатньо високої вантажопідйомності; необхідний набір стендів, обладнання та інструментів; можливості з навантаження та доставки; обладнання для фарбування, мийки та ін.

Ремонтні служби підприємств та електростанцій працюють 7 днів на тиждень, 24 години на добу. У передовій практиці відсоток виконання замовлень на ремонт у місці роботи обладнання становить: протягом дня – 85 %, протягом доби – 95 %. Забезпечення запасними частинами ремонтних бригад і служб повинно здійснюватися з власних складів. При цьому під запасною частиною розуміється складова частина ЕО (деталь або складальна одиниця), призначена для заміни такої самої частини, що перебуває в експлуатації.

У складі постачальників можуть бути зовнішні (також виробники ЕО) і внутрішні (підрозділи, що здійснюють відновлення працездатності агрегатів і деталей ЕО). На складах зберігаються запасні частини, які користуються великим попитом. При цьому на початковому етапі формування запасів запасних частин визначаються оптимальні запаси за номенклатурою і кількістю запасних частин.

За контрактом з виробником на основі замовлень здійснюється регулярна поставка запасних частин, що користуються середнім і малим попитом; вони поставляються за замовленням дилера через інтернет екстреним порядком (у передовій практиці за 24 години). Таким чином забезпечується мінімальний термін доставки запасних частин для ремонту ЕО при мінімальних їх запасах.

Експлуатаційна і сервісна документація, яка розробляється виробником конкретної продукції, повинна містити методичні матеріали:

- зі знаходження несправностей (відмов) та їх причин;
- швидкого і якісного відновлення працездатності ЕО, у тому числі схему розбирання та складання; склад дій і інструменти, пристрої, що використовуються; нормативи трудових затрат та ін.

При цьому повинні бути встановлені раціональні відносини між керівниками служб електропостачання і виробниками обладнання.

Підвищення експлуатаційної надійності ЕО пов'язане з матеріальними витратами, тому ця проблема повинна вирішуватися на базі техніко-економічних розрахунків для кожного типу силового ЕО ТП.

6.3. Покращення пускових характеристик асинхронних короткозамкнених двигунів як засіб енергозбереження та підвищення їх надійності

Відомо, що АД в момент пуску мають дві проблеми: менший, ніж номінальний, пусковий момент і великий пусковий струм, який може перевищувати номінальне значення струму в 5-8 разів, рис. 6.1.

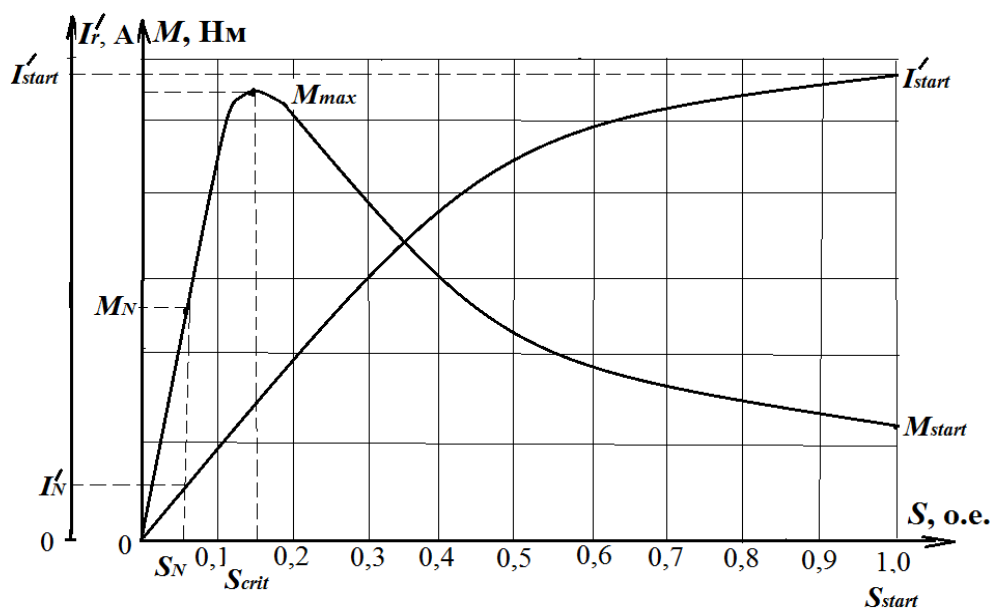


Рисунок 6.1 – Пускові характеристики асинхронного двигуна

Відомо, що збільшення активного опору обмотки ротора в момент пуску дозволяє поліпшити пускові характеристики. Можна в обмотку ротора на момент пуску ввести пускові реостати, але це можливо тільки для АД з фазним ротором.

При прямому пуску зведене значення струму ротора АД дорівнює, А:

$$I_r' = \frac{U_{sN}}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R_r'}{s}\right)^2 + (X_s + X_r')^2}}$$

де U_{sN} – номінальна напруга обмотки статора, В;

R_r' ; R_s ; X_r' ; X_s – активні та зведені індуктивних опори розсіювання обмоток ротора і статора. Ом;

Ковзання s в момент пуску дорівнює одиниці ($s=1$), тож можна записати:

$$I_{rstart}' = \frac{U_{sN}}{\sqrt{(R_s + R_r')^2 + (X_s + X_r')^2}}$$

Після введення в обмотку ротора пускових реостатів, дійсно можна побачити, що струм зменшується, А:

$$I_{rstart+R}' = \frac{U_{sN}}{\sqrt{(R_s + R_r' + R_{reos}')^2 + (X_s + X_r')^2}},$$

Одночасно при введенні пускових реостатів збільшується і пусковий момент:

- при прямому пуску, Н·м:

$$M_{emstart} = \frac{m_s \cdot U_{sN}^2 \cdot R_r' \cdot p}{2\pi \cdot f \cdot \left[(R_s + R_r')^2 + (X_s + X_r')^2 \right]}$$

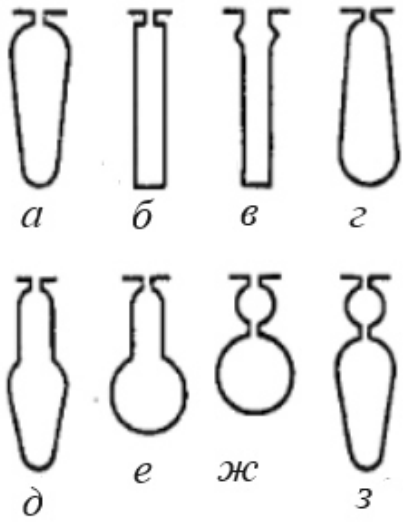
де f – частота напруги в мережі, від якої живиться АД, Гц;

p – кількість пар полюсів обмотки статора; m_s – кількість фаз;

- при введенні пускових реостатів, Н·м:

$$M_{emstart+R} = \frac{m_s \cdot U_{sN}^2 (R_r' + R_{reos}') \cdot p}{2\pi \cdot f \cdot \left\{ [R_s + (R_r' + R_{reos}')]^2 + (X_s + X_r')^2 \right\}}$$

де R_{reos}' – сумарне значення опору ступенів пускових реостатів, Ом.



ротора АД

а-г – глибокі пази; д-е – фігурні пази; ж-з – «подвійна біліччя клітина»

В АД з КЗ ротором доступу в обмотку ротора немає. Щоб надати простим, дешевим та надійним в роботі АД з короткозамкненим ротором кращі пускові характеристики, пази ротора виконують глибокими та вузькими, також розроблені двох-клітинні АД з глибоким пазом, рис. 6.2. При цьому на роторі двох-клітинного двигуна знаходяться дві обмотки.

Ближче до поверхні ротора розмішена пускова обмотка що має великий активний і малий індуктивний опори. Вона виготовляється із матеріалу з великим питомим опором (манганова латунь, бронза). Далі від поверхні ротора розмішена робоча обмотка, яка виготовляється із алюмінію (натепер можливо і краще з міді) і має малий активний та порівняно більший індуктивний опір.

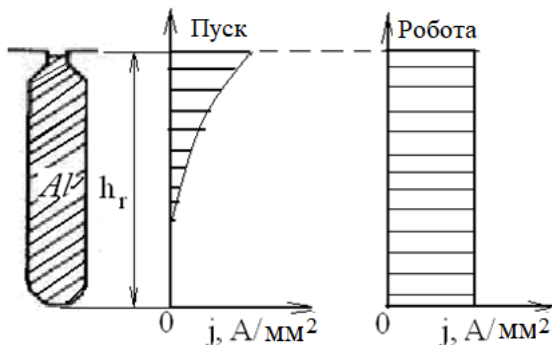


Рисунок 6.3 – Вплив «скін-ефекту» на розподіл струму по висоті провідника

Таке рішення (глибокий паз, подвійна «біліччя клітина») для покращення пускових характеристик дозволяє використовувати явище витіснення струму («скін-ефект»), рис. 6.3.

Нижні частини провідника зв'язані з більшою кількістю ліній магнітної індукції потоку розсіяння, ніж верхні. Тому в нижніх частинах провідника наводиться більша ЕРС розсіяння, а у верхніх – менша Крім того, по всій висоті провідника основним потоком наводиться однакова ЕРС. Тоді струм у будь-якій частині провідника визначається за законом Ома. Цей струм та, відповідно, густина струму будуть тим більші, чим менша ЕРС від потоку розсіяння, тобто будуть зростати по висоті провідника.

У початковий момент пуску, коли ротор ще нерухомий і частота струму в роторі дорівнює частоті мережі, струм в робочій обмотці відстає за фазою від наведеної ЕРС в цій обмотці майже на 90 ел. град. і тому створює незначний обертовий момент, а струм

в пусковій обмотці майже співпадає з наведеною в ній ЕРС, тому створює при пуску великий обертовий момент, зі збільшенням частоти обертання ротора частота струму в ньому зменшується, відповідно, зменшуються індуктивні опори обох обмоток. При нормальній частоті обертання індуктивні опори обмоток дуже малі, тому струм розподіляється обернено пропорційно до їх активних опорів і майже весь струм йде по робочій обмотці. Співвідношення між активним і індуктивним опором пускової обмотки вибирається таким, щоб забезпечити необхідну кратність пускового моменту при заданій кратності пускового струму. Таким чином, відбувається витіснення струму у верхню частину провідника, що призводить до збільшення активного та зменшення індуктивних опорів провідника.

Якщо не враховувати ці особливості і не вносити особливі рішення в конструкцію ротора (глибокий паз для «допомоги» під час пуску від скін-ефекту), то погані пускові характеристики можуть значно ускладнити можливість використання АД в електроприводах.

У сучасних АД ця проблема фактично вирішена, але вирішена для АД з литою алюмінієвою обмоткою ротора (ЛАОР). Перехід на мідні обмотки ротора поставив нові питання, тому що питомий опір алюмінію в 1,6 разів більше, ніж міді. Такий перехід необхідний і рентабельний, бо дозволяє зменшити електричні втрати в обмотці ротора в $1,6^2=2,56$ рази.

Це підвищує ККД машини і та відповідає загальним потребам енергозбереження. Саме висока електропровідність міді є важливим причиною її використання. Вона дозволяє підвищити енергетичну ефективність двигунів. Це важливо, оскільки електродвигуни є одними з основних споживачів електроенергії: до 43–46 % всього світового споживання електроенергії та до 69 % всієї електроенергії, що використовується в промисловості. Враховуючи величезну кількість АД з КЗ роторам, що використовуються в промисловості та в енергетиці, це дуже важливо.

Для АД низької напруги (0,4 кВ) вже з 1999 року діють європейські правила, що регламентують показники енергетичної ефективності. Згідно з цими вимогами АД класифікуються за трьома категоріями: низька, середня і висока. Ці угоди, засновані на принципах енергозбереження та екологічних вимогах, пов'язаних з жорсткістю сучасних вимог до охорони навколишнього середовища (*ISO 14001 Standard*), вимагають створення нових серій високоефективних АД. Засобом досягнення цієї мети може бути

застосування нових сучасних матеріалів та інноваційних технологій. Відповідно до прийнятої в країнах ЄС і США (федеральний закон «Ераст») класифікацією, значна частина випускаються в Україні АД відноситься до низького класу енергетичної ефективності *EFF3* і поступається за габаритними показниками зарубіжним аналогам. Таке положення знижує експортні можливості України і конкурентоспроможність на зовнішньому ринку.

Натепер можна виділити чотири основні напрями розвитку технологій підвищення енергоефективності за рахунок мінімізації втрат в АД, встановлених у виробництві:

1) зниження втрат електричної енергії при її перетворенні в механічну, використання нових матеріалів (електротехнічних сталей, провідникових та ізоляційних матеріалів) і технологій;

2) раціональний розподіл реактивної складової споживаної електричної енергії;

3) на етапі підготовки виробництва проводити підбір обладнання з мінімальним запасом по потужності, тобто з номінальною потужністю відповідної розрахункової потужності технологічних процесів;

4) підвищення ефективності використання електроенергії за допомогою створення ефективних систем управління.

Тому у всьому світі для підвищення ККД АД зараз використовують заміну алюмінієвої «білячої клітки» на мідну. Дослідження, проведені в США, Франції, Італії, Німеччині, Польщі, Бразилії, Індії та Кореї показали, що застосування в АД литої мідної обмотки ротора (ЛМОР) замість ЛАОР в значній мірі вирішує проблеми енергоресурсозбереження. У США реалізований проект вартістю в \$2 млн з метою дослідження можливості використання ЛМОР для АД.

Було визначено, що використання міді призводить до значного зменшення втрат в АД, дозволяє виконати його більш компактним: зменшити довжину осердя статора і ротора в АД відкритого виконання на 7,2 %, закритого – на 20 %, при збільшенні ККД на 2,0-4,0 %. Скорочення довжини машини дозволяє зменшити витрати міді, електротехнічної сталі та ізоляційних матеріалів, скоротити трудомісткість виготовлення.

Довгий час залишалася невирішеною проблема забезпечення стійкості ливарних форм до ерозії від розплаву міді. Промислове виробництво рентабельних ливарних

форм в США для виготовлення ЛМОР для АД дозволило вже з 2002 року виготовляти АД потужністю від 3 до 200 кВт з підвищеним ККД на 1,2-3,2%.

Німецька фірма *SEW-Eurodrive* з 2003 року поставляє на світовий ринок АД потужністю від 1,1 до 37 кВт, в яких обмотка ротора виконана з міді літій під тиском. Такі двигуни мають ККД 94-96%, що значно вище норм США («Ераст») та країн ЄС (*Premium Efficiency*). Починаючи з 2004 р. розпочато серійний випуск АД з ЛМОР в Італії та Франції, в Бразилії (фірма *WEG*), в Індії (фірма *Combater Tamil Nadu*) та в інших країнах.

Аналіз наступних досліджень і наших розрахунків підтвердив, що у разі використання АД з ЛМОР, що мають такі ж конструктивні геометричні розміри, як АД з алюмінієвою обмоткою, можливе підвищення потужності в 1,3-1,7 рази, ККД – на 1,5-3,0 %, перевантажувальної здатності – в 1,4-1,7 разів. Мідь сприяє підвищенню ефективного споживання електроенергії. На даному етапі розроблена нова технологія, що дозволяє виконувати литу обмотку ротора з міді. Ця технологія, була розроблена спеціально для двигунів класу високої ефективності. У світі всі галузі промисловості спрямовані на економію енергії та скорочення викидів вуглецю в атмосферу. Тож заміна матеріалу ротора АД може вважатися кроком у поліпшенні екології.

6.4. Вплив конструктивних рішень на надійність електрообладнання. Вирішення проблеми пуску асинхронних двигунів з мідною обмоткою ротора, як показник підвищення експлуатаційної надійності

Позитивні аспекти використання міді для КЗ роторів АД очевидні, але необхідно оцінити вплив зміни матеріалу обмотки на характеристики АД, і, в першу чергу, на пускові. Для АД з ЛАОР питання поліпшення пускових характеристик практично вирішені вибором форми паза ротора, тобто за рахунок використання явища витиснення струму – скін-ефекту. Але заміна Al в «білячій клітині» на Cu, що має менший питомий опір, вимагає пошуку нових рішень для забезпечення допустимих пускових характеристик, тому що питомий опір Cu при температурі $\theta_a=20$ °C значно менший, ніж питомий опір алюмінію ($\rho_{Cu}=0,0175$ Ом·мм²/м, $\rho_{Al}=0,028$ Ом·мм²/м).

Для пошуку рішень необхідно визначити кінцеву мету дослідження. Наприклад, стоїть завдання так спроектувати АД з ЛМОР, щоб його пускові характеристики були такими ж, як і у серійних АД з ЛАОР. Розуміючи, що при проектуванні серійних машин з ЛАОР потрібні пускові характеристики досягалися геометрією (в основному, глибиною) паза ротора, варіювання пускових характеристик АД з ЛМОР можна провести, змінюючи глибину паза ротора.

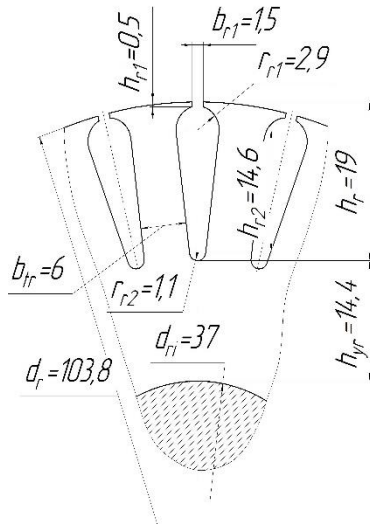


Рисунок 6.4 – Ескіз зубцевої зони ротора АД потужністю 1,5 кВт з ЛАОР

При цьому необхідно зберегти вимоги технологічного процесу: проведення надійної штампування листів шихтованого осердя ротора можливо при значенні меншого радіуса паза $r_{r2} \geq 1$ мм.

Проведемо аналіз на прикладі серійного шості-полюсного АД з КЗ ротором потужністю 1,5 кВт, з глибиною паза ротора $h_r = 19$ мм. На рис. 6.4 наведене ескіз зубцевої зони ротора, на рис. 6.5 – пускові характеристики (залежність струму ротора від ковзання $I_r' = f(S)$) для АД з ЛАОР і з ЛМОР. Аналіз характеристик дозволяє відзначити, що перевищення пускового струму зросло від 14,7 А для АД з ЛАОР до 16,6 в АД з ЛМОР.

Можна зробити висновок, що в результаті застосування міді в якості матеріалу для КЗ обмоток АД, пускові характеристики погіршуються.

В перший момент пуску, коли $n_r = 0$ та $s=1$, в обмотці ротора внаслідок великої частоти ($f_r = f_s$) індуктується ЕРС такої величини, що пусковий струм в 5-7 разів більше номінального значення.

Великі пускові струми можуть створювати небезпечні електродинамічні зусилля в лобових частинах обмотки статора і стрижнях білячої клітини; електромагнітні перехідні моменти, що виникають при перехідних процесах, досягають при пуску 10-15-ти кратного значення статичного початкового пускового моменту, що поряд з великими температурними напругами обмежує термін служби АД і може призвести до перегорання обмоток статора або виплавлення клітини ротора. Тому пускові струми потрібно знижувати.

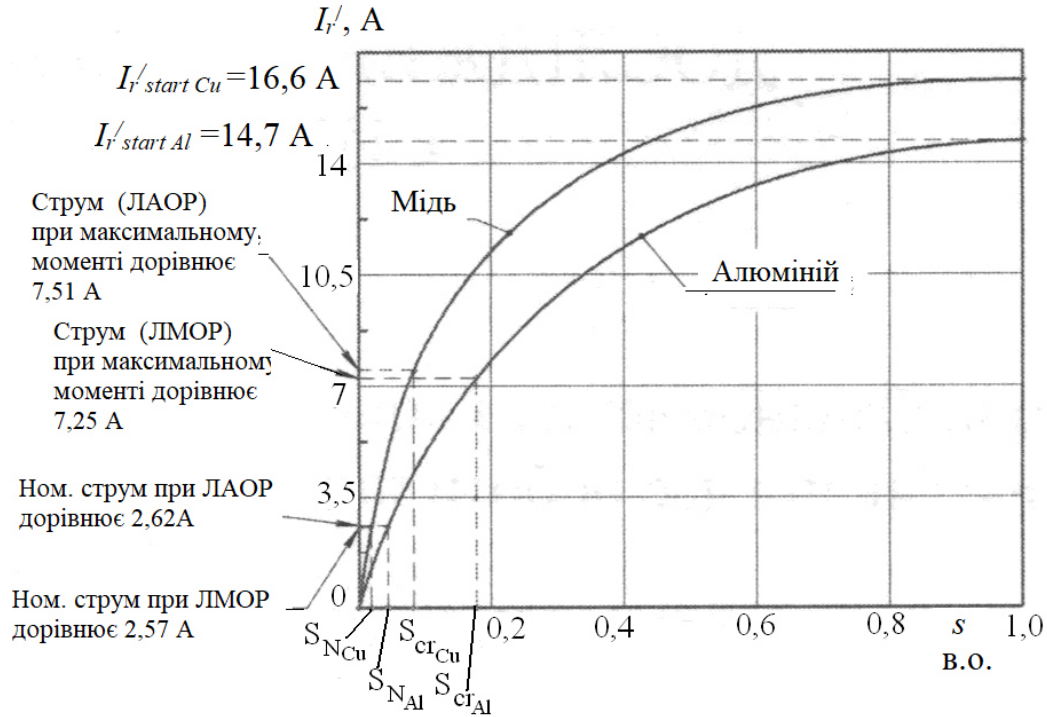


Рисунок 6.5 – Залежність струму ротора від ковзання для АД потужністю 1,5 кВт з ЛАОР і з ЛМОР

Пускові властивості АД описуються залежностями обертового моменту і пускового струму від частоти обертання, від ковзання. А також величиною пускового струму або його кратністю $k_{startI} = I_{start}/I_{sN}$ і величиною пускового моменту M_{start} або його кратністю $k_{startM} = M_{start}/M_N$. Кратність пускового моменту показує можливість прямого пуску АД. Для двигунів з КЗ ротором потужністю 0,6-100 кВт обирають $k_{startM} = 1,0-2,0$; потужністю 100-1000 кВт – $k_{startM} = 0,7-1,0$.

На рис. 6.6 наведені пускові механічні характеристики: залежність моменту ротора від ковзання $M^* = f(s)$ для АД з ЛАОР і з ЛМОР.

Аналіз цих характеристик показує, що при використанні мідної «клітки» практично в 2 рази зменшується пусковий момент, кратність пускового моменту стає менше одиниці, що для даної потужності АД (1,5 кВт), не рекомендоване, і унеможливорює прямий пуск АД з ЛМОР з номінальним навантаженням.

Розрахунок параметрів АД потужністю 1,5 кВт з ЛАОР і з ЛМОР представлений в табл. 6.1.

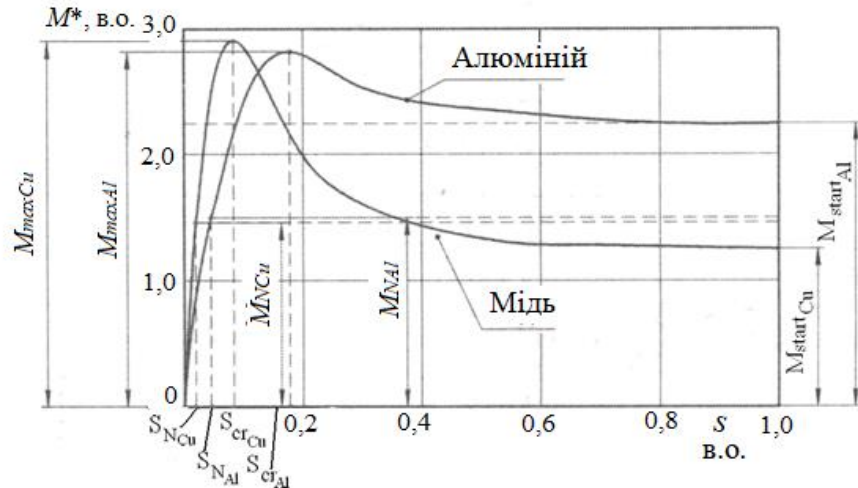


Рисунок 6.6 – Залежність моменту ротора від ковзання для АД потужністю 1,5 кВт з ЛАОР і з ЛМОР

Таблиця 6.1 – Деякі данні для АД потужністю 1,5 кВт з ЛАОР і з ЛМОР

№	h_r , мм	S_r , мм ²	$R_{r0} \cdot 10^{-5}$, Ом		I_{s1} , А		M_{rN} , Н·м		M_{crit} , Н·м		η_N , в.о.		M_{rstart} , Н·м	
			Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu
1	24	72	5,92	2,8	16,9	18,9	15	14,6	28,2	29	0,76	0,79	22,5	12,5
2	23	54,4	7,83	3,71	15,9	18,4	15,2	14,7	28,4	29,2	0,76	0,79	26,3	15,8
3	22	47,3	9,01	4,27	15,4	18,3	15,4	14,8	28,9	29,8	0,75	0,78	29,3	18,6
4	19	34,4	12,4	5,87	14,1	17,7	16	15	29,6	30,5	0,72	0,77	34	24,3

У табл. 6.2 наведені дані по перевантажувальній здатності АД (k_M), вказані «кидки» пускового струму (k_{Is}), відносно значення пускового моменту в порівнянні з номінальним моментом (k_{MS}):

$$k_M = \frac{M_{rmax}}{M_{rN}}; \quad k_{sI} = \frac{I'_{rstart}}{I'_{rN}}; \quad k_{sM} = \frac{M_{crit}}{M_{rN}}.$$

Розрахунки проводилися для двигуна з мідної та алюмінієвої «кліткою» і зі зміненою глибиною паза (h_r).

Результати показали, що при збереженні потужності АД і габаритів:

- номінальний момент (M_{rN}) дещо зменшується;
- максимальний момент (M_{crit}), отже і перевантажувальна здатність машини, збільшуються;

Таблиця 6.2 – Значення відносних коефіцієнтів, розрахованих для АД потужністю 1,5 кВт з ЛАОР і з ЛМОР

№	Глибина паза, h_r , мм	k_M		k_{si}		k_{sm}	
		A1	Cu	A1	Cu	A1	Cu
1	24	1,88	2	5,6	6,3	1,25	1,36
2	23	1,86	2	4,9	5,7	1,73	1,3
3	22	1,88	2,02	3,8	4,7	1,9	1,1
4	19	1,85	2,04	3,4	4,5	2,1	0,83

- на 3-5 % збільшується ККД двигуна (η_N);
- в 1,5-1,8 раз зменшується пусковий момент АД (M_{rstart}).

Можна зробити висновок, що для отримання майже таких же пускових характеристик при заміні ЛАОР на ЛМОР, достатньо поглибити паз ротора на 3-4 мм. При такому збільшенні глибини паза (на 3 мм) пусковий момент збільшується і стає в 1,1 більше номінального моменту. Можливий прямий пуск. В цьому варіанті зберігається значення ККД ($\eta_N=0,79$), дещо знижується «кидок» пускового струму.

Подальше поглиблення паза приводить до поліпшення пускових характеристик, але потребують збільшення габаритів машини, значного зменшення радіусів паза ротора і ускладнення штампувального обладнання, знижує надійність конструкції. При постановці завдання забезпечення можливості прямого пуску двигуна ($M_{rstart} > M_{rN}$) достатнім є поглиблення паза при заміні алюмінію на мідь на 15 %.

Можна вважати, що така зміна є достатньою для забезпечення працездатності двигуна.

Визначення ефективності трифазних АД виконується згідно зі стандартом МЕК 60034-30:2008, що замінив EN 60034-2:1996 та МЕК 60034-2-1:2007.

Були введені міжнародні виробничі класи (LV) трифазних двигунів, потужністю від 0,75 до 375кВт– IE = Міжнародна Ефективність:

$IE1$ = Стандартна Ефективність (зіставимо с $EFF2$);

$IE2$ = Високоєфективний (зіставимо с $EFF1$);

$IE3$ = преміальна ефективність.

Починаючи з 2009 р. двигуни почали випускатися з цими новими класами (*IE1*, *IE2* і *IE3*). Старі Європейські позначення (*EFF3*, *EFF2* і *EFF1*) не втратили сенсу, але поступово зникають з ринку.

Для забезпечення сумісності зі старими класами *EFF1* і *EFF2*, значення меж *IE2* і *IE1* були злегка занижені. Наприклад, для працюючого чотириполюсного АД потужністю 2,2 кВт, який, згідно старої класифікації, відноситься до *EFF1* і мав ККД = 86,4%, прирівняний такий же новий двигун *IE2* з ККД = 84,3%. Двигун фізично не змінився, але класифікований за двома різними методами.

Виробничі рівні, згідно МЕК 60034-30, встановлюються при проведенні випробувань, визначених стандартом МЕК60034-2-1.

Більш високий рівень ефективності за класифікатором визначається більш високою складністю виготовлення двигунів і використанням більш енергоефективного матеріалу, (наприклад, міді). Відповідно збільшиться вартість двигунів. При цьому одночасно зі збільшенням ціни визначаються в процентному співвідношенні кілька інших параметрів – зниження втрат і скорочення, за рахунок цього, періоду окупності.

МЕК 60034-30 тільки визначає вимоги нових класів і пропонує діапазон запасів для міжнародних виробників. Це не є законом, не має законодавчої влади і не визначає, якими двигунами повинно забезпечуватися виробництво. Це залишено за відповідним регіональним законодавством. Але у Європі, Директивний *ErP* для енергоспоживачів (Вимоги «Есо-проекту»), встановили обов'язкові правила для нових двигунів (2009 р., Технічний Регламент 640/2009 (ІЕС-електродвигуни), 327/2011 (вентилятори) і нової директиви 1253/1254 (повітряні агрегати)). Ця директива є обов'язковою для країн-учасників ЄС.

Вимоги директиви поширюються не тільки на виробників вентиляційного та кліматичного обладнання, але також і на виробників систем і експлуатуючі організації. Директива *ErP* охоплює вироби, що вироблені в Європейській економічній зоні, а також вироби, що імпортуються з інших країн. Вимоги директиви не поширюються на вироби, що виробляються для експорту за межі ЄС. Проте цілком імовірно, що інші країни також почнуть вимагати відповідності ввезених виробів вимогам даної директиви.

З прийняттям Кіотського протоколу Європейський Союз висунув вимогу щодо скорочення викидів CO₂ як мінімум на 20 % до 2020 р. Для досягнення поставленої

мети у 2005 р. ЄС була затверджена Директива *ErP* (директива по енерго-споживаючому обладнанню).

У 2009 р. дана директива була перейменована в Директиву *ErP* (директива щодо обладнання, пов'язаного зі споживанням електроенергії). Часто її називають просто директивою з еко-дизайну. Іншими словами, дана назва відноситься до Директиви 2009/125/ЄС. Прояви даної директиви ми бачимо у повсякденному житті, наприклад, поступова відмова від традиційних ламп розжарювання або маркування класу енергоефективності на холодильниках, пральних машинах, тощо.

Після закінчення перехідного періоду, передбачалось чітке встановлення мінімального виробничого рівня для обертових ЕМ: починаючи з 2011 р. стандартні двигуни потужністю від 0,75-375 кВт повинні відповідати класу *IE2*. Всесвітня економічна криза затримала виконання цього закону.

З 01.01.2015 р. на ринок можуть виводитися тільки АД з класом енергоефективності мінімум *IE2* (потужністю до 5,5 кВт включно) і класом енергоефективності *IE3* (потужністю від 7,5 кВт). Клас енергоефективності *IE2* допускається для електродвигунів потужністю понад 7,5 кВт, якщо вони оснащені регулятором швидкості (наприклад, перетворювачем частоти).

РОЗДІЛ 7

Лекції № 14-15

ДІАГНОСТИКА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ І ЗАСОБИ ПРОВЕДЕННЯ ДІАГНОСТИКИ

Класифікація засобів діагностування електротехнічного обладнання. Методи діагностики електричного обладнання. Діагностика АД по спектру струму статора.

Прогнозування залишкового ресурсу асинхронних двигунів

[Література: 6, 14, 27, 33, 34, 36, 42]

7.1. Класифікація засобів діагностування електротехнічного обладнання

Метою діагностування є забезпечення раціональної експлуатації електроустановки при заданих показниках надійності та скорочення витрат на технічне обслуговування та ремонт. Ця мета досягається шляхом управління технічним станом ЕО в процесі експлуатації, що дозволяє проводити ТО і Р відповідно до даних діагностування.

Основне завдання технічного діагностування полягає у отриманні достовірної інформації про технічний стан ЕО в процесі експлуатації. Вона вирішується на основі вимірювання, контролю, аналізу та обробки кількісних та якісних значень параметрів ЕО, а також шляхом управління обладнанням відповідно до алгоритму діагностування.

Аналіз причин виникнення дефектів ЕО показує, що технічний стан характеризується індивідуальними і тільки йому властивими характеристиками, а також загальними ознаками. Для кожного виду обладнання характерні свої типові дефекти, що багаторазово зустрічаються в експлуатації.

Об'єднавши всі дефекти та ознаки їх появи в окремі групи, отримуємо структуру діагностування ЕО, що складається з трьох рівнів і підсистем: перевірки функціонування; виявлення дефектів; оцінки та прогнозування працездатності.

При цьому на кожному наступному рівні використовуються результати попередніх.

Технічна діагностика ЕО включає у собі два основних напрями – оперативну і ремонтну діагностику.

В основні завдання оперативної діагностики входять:

- раннє виявлення дефектів на працюючому чи виведеному з роботи для обстеження (але не розібраному) устаткуванні;
- прогнозування розвитку дефектів, оцінка їх небезпеки та загального стану обладнання;
- підготовка рекомендацій щодо подальшої експлуатації та технічного обслуговування обладнання (наприклад, негайний вивод в ремонт, зміна термінів планового ремонту, дозвіл роботи без обмежень тощо).

Ремонтна діагностика здійснюється на виведеному з роботи на ремонт обладнанні. До її основних завдань входять локалізація дефектів обладнання, визначення об'ємів ремонтно-відновлювальних робіт, рекомендації щодо доцільності заміни обладнання.

Апаратурні засоби, що складають з об'єктом діагностування конструктивно єдине ціле, є вбудованими апаратурними засобами діагностування. Прикладами подібних засобів можуть бути електровимірювальні прилади для вимірювання струму, напруги, потужності, частоти тощо; пристрої індикації технічного стану елементів (реле, світловипромінюючі діоди, неонові лампи); пристрої контролю ізоляції тощо. До апаратурних засобів діагностування відносяться прилади, пульти, стенди, промислові комп'ютери.

Якщо в схемах експлуатації ЕО вбудовані не передбачені засоби діагностування або їх недостатньо для діагностування з необхідною глибиною, то застосовують зовнішні апаратурні засоби діагностування, виконані окремо від конструкції обладнання та підключаються до нього лише в процесі діагностування.

Зовнішні спеціалізовані засоби діагностування – це пристрої, які використовуються, наприклад, для перевірки працездатності окремих елементів або вузлів ЕО на стадіях технічного контролю після виконання ремонтних робіт. Найпростішими прикладами зовнішніх апаратурних засобів можуть бути комбіновані прилади для вимірювання в колах постійного та змінного струму, тестери логічного стану, електронно-променеві та цифрові осцилографи, переносні вимірювальні комплекти тощо.

Якщо апаратурні засоби діагностування призначені тільки для однотипного ЕО, то вони є спеціалізованими, а якщо для обладнання різного конструктивного виконання та функціонального призначення – універсальними.

Універсальні засоби діагностування технічно досить складні та, як правило, побудовані на базі серійних промислових комп'ютерів.

Програмні засоби діагностування є комп'ютерними програмами, які управляють роботою обладнання відповідно до алгоритму діагностування. Вони застосовні, наприклад, для програмованих контролерів, мікропроцесорних систем управління релейним захистом та інших. Програми забезпечують технічне діагностування обладнання як у процесі його використання за прямим призначенням (робочі програми), так і при короткочасному перериванні функціонування об'єкта (спеціальні випробувальні програми). Програмні засоби у поєднанні з апаратурними утворюють програмно-апаратурні засоби діагностування, що дозволяють вирішувати завдання самодіагностування обладнання, наприклад на основі сучасних SCADA-систем.

За ступенем автоматизації засоби діагностування можуть бути ручними, автоматизованими та автоматичними. Застосування ручних засобів вимагає участі людини-оператора як у підключенні до об'єкта діагностування, так й у прийнятті рішень про його технічний стан. Такий підхід знижує продуктивність та об'єктивність діагностування. Як правило, ручні засоби виконуються спеціалізованими.

Автоматизовані засоби вимагають часткової участі оператора для їх підключення до обладнання та вибору режимів діагностування. Основна ж процедура діагностування, включаючи видачу інформації про технічний стан обладнання, здійснюється автоматично.

Автоматичні засоби (мікропроцесорні комплекти, мікро- та міні-ЕОМ) вирішують завдання діагностування без втручання людини.

Автоматизовані та автоматичні засоби можуть бути як спеціалізованими, так і універсальними. Вони мають високу швидкодію і достовірність діагностування.

Залежно від форм обробки та подання інформації технічні засоби діагностування можуть бути поділені на аналогові, цифрові та цифрові аналогові.

За ступенем впливу на об'єкт діагностування технічні засоби можуть бути активними і пасивними. Активні впливають на об'єкт, посилаючи в нього сигнал, що

викликає реакцію об'єкта, який потім аналізується. Пасивні засоби виконують лише вимірювання, обробку та оцінку сигналів, що характеризують стан об'єкта.

З усього різноманіття засобів діагностування в електроенергетиці найбільше застосування знаходять апаратні засоби визначення працездатності та справності окремих складальних одиниць електроустаткування. Програмні та програмно-апаратні засоби діагностування широко впроваджуються в міру поширення мікропроцесорних систем та обчислювальної техніки.

Важливість забезпечення надійності ЕО на основі застосування методів і засобів діагностики пред'являє до останніх високі вимоги. При проектуванні та експлуатації засобів діагностування ці вимоги характеризуються:

- номінальними та допустимими значеннями вхідних та вихідних сигналів;
- статичною та динамічною точністю їх вимірювання;
- глибиною діагностування (числом сигналів, що діагностуються);
- достовірністю діагностування;
- технічною та метрологічною надійністю;
- способом зв'язку з об'єктом діагностування;
- формою представлення результатів.

Перелічені показники взаємопов'язані та мають бути узгоджені між собою.

Технічні засоби діагностування можуть мати похибку вимірювання в інтервалі $\pm(1-5) \%$. На величину похибки впливають вид сигналу (аналоговий або дискретний), спосіб і форма передачі інформації, а також статичні та динамічні характеристики контрольованих параметрів ЕО.

Високий рівень електромагнітних і технологічних перешкод на об'єктах електроенергетики, пов'язаний зі специфікою роботи обладнання та природними коливаннями електричних і технологічних параметрів, пред'являє високі вимоги до перешкодозахищеності та перешкодостійкості засобів діагностування.

Коли використовують апаратні засоби діагностування, то дотримуються ієрархічного принципу виділення дефекту. Завжди починають з діагностування окремих функціональних елементів і закінчуючи діагностуванням обладнання в цілому. Для своєчасного виявлення дефектів достатнім контролювати не більше 25-26 діагностичних параметрів. Подальше зростання числа вхідних сигналів невиправдано

ускладнює технічну реалізацію засобів діагностування та може призвести до збільшення його тривалості. Для програмних засобів діагностування кількість контрольованих сигналів визначається ємністю носія інформації і може бути необмеженим, хоча надмірно велика кількість діагностичних параметрів ускладнює їх аналіз і подання.

Достовірність засобів діагностування – властивість забезпечувати відповідність результату діагностування істинному стану об'єкта. Достовірність залежить від глибини діагностування: від достатнього набору параметрів, що діагностуються, від періоду перевірки та його тривалості, завадостійкості.

Достовірність діагностування знижується зі збільшенням тривалості періоду перевірки через можливе виникнення дефектів устаткування саме в цей час. Залежно від необхідної точності оцінки діагностичних параметрів обладнання (оцінки справності, працездатності, правильності функціонування) період перевірки окремих елементів ЕО може коливатися в широких межах: від 10^{-4} до 10^5 с. Чинники, що впливають на час перевірки, визначають його доцільну тривалість. Швидкодія діагностування зростає в міру зниження числа контрольованих параметрів, вибору з їх складу найбільш інформаційних, від застосування вбудованих засобів діагностування, а також використання програмованих обчислювальних пристроїв.

Надійність засобів діагностування не повинна бути нижче рівня надійності елементів і деталей ЕО, а також не повинна знижувати їх надійність у процесі діагностування. Високої надійності засобів діагностування може бути забезпечена:

- за рахунок використання високонадійних комплектуючих елементів і деталей,
- шляхом вибору якісних системних і технічних рішень побудови схем, стійких до різних дестабілізуючих факторів,
- застосуванням резервних пристроїв, методом самоконтролю тощо.

До технічних засобів діагностування пред'являють високі вимоги щодо метрологічної надійності, особливо в оцінці працездатності та прогнозуванні технічного стану устаткування. По відношенню до засобів виділення несправностей об'єкта, коли вони виражені в логічній формі, метрологічні вимоги можуть бути суттєво знижені, оскільки граничні значення сигналів 1 і 0, як правило, помітно відрізняються.

Результати діагностування повинні бути представлені у зручній для їхнього аналізу формі. Зазвичай це індикація у вигляді звукової та світлової сигналізації або документованого запису на паперових та магнітних носіях.

7.2. Методи діагностики електричного обладнання

Основна мета контролю та діагностики обладнання є упередження відмов, зниження втрат електроенергії та витрат на ремонти, що вкрай важливо для надійного і ефективного функціонування електростанцій.

При цьому певні переваги має безконтактне дослідження обладнання на відстані. Рішення такої задачі можна здійснити, наприклад, шляхом реєстрації та аналізу інфрачервоного електромагнітного випромінювання, інтенсивність і спектральний склад якого визначається температурою та фізичними особливостями об'єктів. Здійснити це дозволяють сучасні тепловізійні комплекси, що забезпечують вимірювання та реєстрацію по точках температури поверхонь об'єкта, перетворення отриманих значень у відео-сигнали і виведення на монітор теплового зображення [36].

Деякі застосовувані і найбільш перспективні напрямки діагностування електрообладнання, що розробляються, наведені в табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Напрямки діагностування електрообладнання

Електро-обладнання	Напрямки діагностування
Турбогенератори (ТГ)	Діагностика теплового стану обмоток статора і ротора
	Діагностика несправностей обмоток статора і ротора
	Діагностика системи охолодження стрижнів обмотки статора
	Контроль вібрації і діагностика механічного стану ТГ
	Діагностика щітково-контактного апарата
	Контроль електромагнітного випромінювання, що впливає на обладнання, яке працює поруч
	Діагностика ущільнень і підшипників
	Діагностика системи збудження

Продовження табл. 7.1

Електро-обладнання	Напрямки діагностування
Силкові трансформатори	Хроматографічний аналіз газів, що розчинені в оливі
	Температурний і тепловізійний контроль осердь і обмоток
	Контроль зносу контактів РПН
	Регистрація часткових розрядів в ізоляції
Вимикачі високої напруги	Контроль комутаційного і механічного ресурсу
	Оцінка стану контактної системи
	Контроль характеристик привода
	Контроль стану фарфорових ізоляторів
	Контроль утечи дугогасильного середовища (повітря, елегаз)
КРУ і струмопроводи	Контроль захисту від появи дуги
	Тепловізійний контроль стану електричних контактів і ізоляторів
Повітряні і кабельні лінії електропостачання	Дистанційна тепловізійна діагностика контактів і ізоляції підвісних елементів
	Контроль часткових розрядів
	Діагностика опор ЛЕП
	Контроль стану ізоляції кабелів
Високовольтні електричні двигуни	Діагностика обривів стрижнів короткозамкненого ротора
	Контроль виткових замикань
	Вібраційний контроль обмоток статора
	Контроль підшипникового вузла
	Контроль і захист від неуспішних пусків
	Контроль ексцентриситету повітряного проміжку між ротором и статором
	Контроль неповнофазних режимів
	Контроль напрямку обертання
	Безперервний селективний контроль активного опору ізоляції
	Температурний контроль
	Оцінка розходу ресурсу на основі контролю пускових і тривалих режимів роботи
	Дистанційна тепловізійна діагностика контактів і підвісної ізоляції
	Контроль часткових розрядів
	Діагностика опор ЛЕП
Контроль стану ізоляції кабелів	

Метод інфрачервоної термографії (метод реєстрації та аналізу інфрачервоного електромагнітного випромінювання). Зміна температури вузлів і елементів ЕО в процесі експлуатації є важливою інформативною ознакою їх технічного стану. Дистанційний контроль температури нагріву струмопровідних частин, контактних з'єднань, корпусів ЕО, ізоляції реалізується засобами тепловізійного контролю. Роздільна здатність тепловізійного контролю складає 0,2 °С. В електроенергетиці найбільш широко поширені тепловізори ТВ-03 і тепловізори шведської фірми АGЕМА, наприклад АGЕМА-782.

Оцінка технічного стану контактних з'єднань проводиться порівнянням температури однотипних контактів, що знаходяться в однакових умовах по навантаженню та охолодженню, а також температури контактного з'єднання та суцільних ділянок струмопроводів. Оцінка технічного стану ізоляторів ґрунтується на аналізі різниці температур дефектного та непробитого ізолятора. Ця різниця визначається напругою на ізоляторі та величиною діелектричних втрат порцеляни ізолятора.

Температура пробитого ізолятора дорівнює температурі довкілля, оскільки напруга у ньому нуль. Температура непробитого ізолятора визначається за середніми параметрами ємності, розмірів та напруги та перевищує температуру навколишнього середовища на 0,4-0,5 °С.

Тепловізійний метод контролю.

У світовій практиці тепловізійні технології широко застосовуються для проведення технічної діагностики складного, відповідального устаткування, керування технологічними процесами, екологічного моніторингу тощо. У даний час реалізовані значення абсолютної (0,1 К) і відносної (2 %) температурної чутливості забезпечує вирішення зазначених задач. При цьому основне навантаження та відповідальні вимоги лягають на програмне забезпечення вимірювань, аналізу та прогнозування стану об'єкта, що досліджується.

Тепловізійна діагностика в Європі використовується з середини 70-х років. Роботи, що проводяться на основі цього методу, дають змогу суттєво підняти надійність експлуатації обладнання і його монтажу, а також якість будівельних робіт, і знизити на 10-20 % енерговитрати на опалення житлових будинків [4, 12]. У даний час там діє міжнародний стандарт ISO 6781-83 «Теплоізоляція. Якісне знаходження теплотехнічних порушень обмежуючих конструкцій. Інфрачервоний метод».

Тепловізійні технології широко та ефективно використовуються також для діагностики електротехнічного та енергетичного обладнання АЕС, ТЕС, ГЕС.

Положення про тепловізійний контроль електроустаткування та повітряних ліній електропередачі входить у норми випробувань ЕО. Існують рекомендації Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) з граничних значень температур і припустимого підвищення температури обладнання порівняно з навколишнім середовищем [7, 12, 28, 35]. При тепловізійному контролі електротехнічного обладнання та повітряних ліній передачі повинні застосовуватися тепловізори з розв'язувальною здатністю не гірше $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, переважно зі спектральним діапазоном 8-12 μm .

Шляхом температурного тепловізійного контролю може бути виконано дослідження такого крупного енергетичного обладнання, як парогенератори, паропроводи, парові турбіни, а також внутрішніх поверхонь осердь статорів гідро- та турбогенераторів. При цьому можуть бути виявлені дефекти, що пов'язані з контактами між пакетами сталі та окремими пластинами у середині пакетів ТГ (порушення ізоляції листів та інші дефекти). Для цього в магнітопроводі за допомогою спеціальної обмотки створюється змінне магнітне поле, що викликає виникнення вихрових струмів в осерді й підвищене тепловиділення в області контактів між пластинами, рис. 7.1.

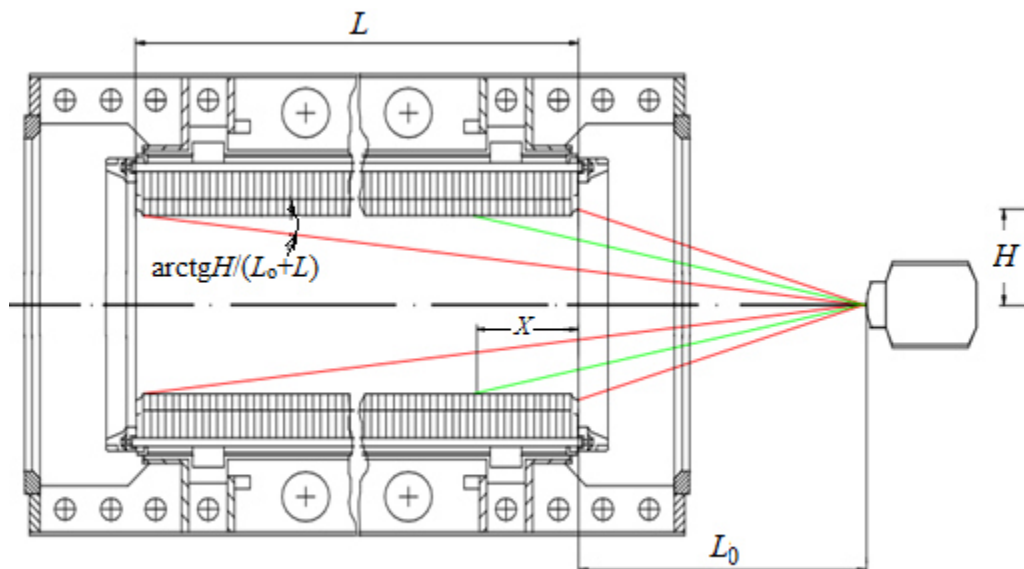


Рисунок 7.1 – Схема досліджень осердя статора турбогенератора за допомогою тепловізійного вимірювального комплексу

Вхідна лінза тепловізійної системи розташовується на відстані L_0 від крайнього пакета на осі симетрії магнітопроводу, тобто на відстані H від внутрішньої поверхні. Відстань L_0 вибирається так, щоб кут огляду системи забезпечував зображення всієї внутрішньої поверхні статора. У цьому випадку лінійна координата пакета X зв'язана з кутом спостереження α як:

$$X = H / \operatorname{tg} \alpha - L_0.$$

Якщо повна довжина пакета L , то:

$$\operatorname{arctg}(H/L_0) > \alpha > \operatorname{arctg}[H/(L_0+L)].$$

На рис. 7.2 представлено термограми осердя статора ТГ, та температурний розподіл уздовж паза статора з виявленою температурною аномалією. Отримані перевищення температури, що спостерігаються, не перевищують припустимого рівня. Ступінь розігріву вказує на втрати енергії і, відповідно, якість технічного стану осердя статора.

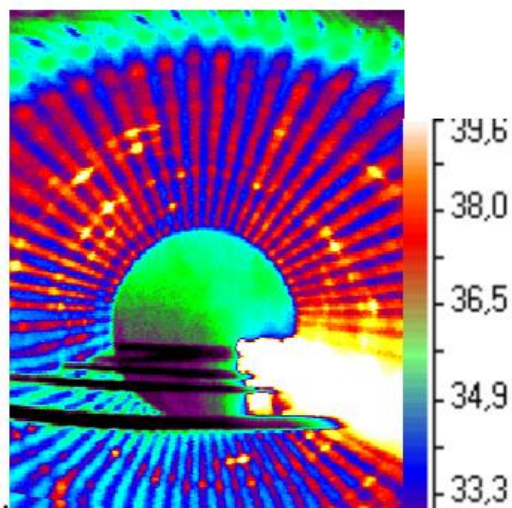


Рисунок 7.2 – Дані тепловізійного обстеження осердя статора ТГ.

Термограма осердя після впливу магнітного поля

1,4 Тл протягом 20 хв.

Застосування теплового контролю для діагностики осердя статора гідро- та турбогенераторів відомо понад 25 років [40, 41], однак устаткування, що використовується, не завжди дозволяє повною мірою подолати наявні труднощі, з яких відзначимо такі:

- необхідність врахування значення випромінювальної здатності досліджуваної поверхні, її неоднорідності й кута візування (як і при будь-яких дистанційних вимірюваннях температури);

- складна динаміка зміни теплового поля;
- проблемне визначення координат дефектних пакетів осердя статора генераторів.

Існує спосіб контролю якості збірки активної сталі статорів ЕМ, при якому шляхом індукційного нагріву та індикації зон підвищеного тепловиділення за допомогою термочутливого датчика виконують безперервну індикацію теплового випромінювання з поверхні осердя статора.

Для цього термочутливий датчик, наприклад інфрачервоний, пересувають в осьовому напрямку по гвинтовій лінії, фіксують значення теплового поля у вигляді масштабної теплової карти, визначають форми та координати зон підвищеного нагріву. Такий спосіб потребує розміщення термодатчика на спеціальному возику, що пересувається по поверхні статора, [40].

Тепловізійний метод контролю отримав застосування у відкритих та закритих розподільних пристроях напругою 35 кВ і вище, а також на ЛЕП. Крім того, до різних видів устаткування, яке можна контролювати інфрачервоними методами, слід віднести також рухомі елементи обладнання: зубчаті передачі, вали, муфти, клинові ремені, шківи, ланцюгові приводи, повітряні компресори, вакуумні насоси тощо.

Основні переваги тепловізійних технологій при контролі рухомого та нерухомого обладнання складаються в безпосереднім спостереженні та швидкому визначенні топографії дефектних ділянок.

Метод хроматографічного контролю оливо-наповненого обладнання. Це найбільш опрацьований та поширений в електроенергетиці метод діагностики. Він застосовний для раннього виявлення дефектів, що розвиваються всередині оливо-наповнених силових трансформаторів, автотрансформаторів, шунтуючих реакторів, великих електричних машин з водо-оливою системою охолодження, вимірювальних трансформаторів, високовольтних вводів і високовольтних кабелів.

Хроматографія є поділ сумішей. Ідея методу полягає в припущенні, що ушкодження в оливо-наповненому устаткуванні супроводжується виділенням різних газів, відсутніх у оливі за нормальної роботи. Ці гази розчинені в оливі. Виділивши їх з оливи та провівши хроматографічний аналіз, можна виявити дефекти на ранній стадії виникнення. В даний час вивчений склад газів, що містяться в оливі недефектного обладнання, що працює нормально; виявлені гази, які характерні для різних пошкоджень; встановлені їх граничні концентрації. При цьому визначають концентрації водню, метану, етилену, етану, ацетилену, оксиду і діоксиду вуглецю, інших газів. Для аналізу складу, динаміки зміни та концентрації газів у пробах оливи застосовують хроматографи.

Відбір оливи з працюючого трансформатора проводиться спеціальними оливо-відбірниками поршневого типу через клапан, що розміщений внизу баку. При цьому виключається контакт оливи з повітрям, запобігає втратам розчинених в

оливі газів під час відбору для аналізу. Олива міститься в замкнутий об'єм, і газ над її поверхнею йде на аналіз.

Крім того, в промисловості використовують вбудовані засоби аналізу газів, які розчинених в оливі, і газів, що виділилися. Характер і місце ушкодження визначають за кількісним складом газів. Необхідність виявлення дефекту на ранніх стадіях його розвитку потребує обробки даних хроматографічного аналізу. Оцінка стану оливо-наповненого обладнання здійснюється, як правило, на базі чотирьох критеріїв: граничних концентрацій, швидкості наростання концентрації газів, відносин концентрацій газів, критерію рівноваги.

Перший критерій дозволяє судити за значенням перевищення граничних концентрацій характер внутрішніх дефектів. Так, сильні пошкодження ізоляції характеризуються високою концентрацією водню і ацетилену, і зазвичай супроводжуються наявністю CO_2 . Якщо присутня помітна кількість CO_2 , то це означає, що відбувається розкладання целюлози.

Відносно велика концентрація насичених і ненасичених вуглеводів вказує на теплове розкладання оливи внаслідок перегріву металевих частин. Різке збільшення свідчить про сильний локальний перегрів, що супроводжується обвуглюванням оливи. Наявність водню та невеликого вмісту етилену свідчить про появу часткових розрядів, що говорить про дефекти, які розвиваються всередині трансформатора. Тож його необхідно вивести з експлуатації і оглянути.

При другому критерії контролюється швидкість наростання концентрацій газів. Якщо приріст вмісту газів становить понад 10 % на місяць, трансформатор ставиться на прискорений контроль. Достовірність оцінки стану за допомогою цього критерію значно вище за вуглеводневими газами і CO_2 , ніж по водню і оксиду вуглецю, втрати яких у пробі оливи іноді можна порівняти з чисельними значеннями цього критерію.

Третій критерій дає можливість використовувати три відносини пар газів: $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$, CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$. Наприклад, умови $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4 \ll 0,1$ і $\text{CH}_4/\text{H}_2 > 1$ вказують на дефект термічного характеру, а відношення $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ характеризує температуру перегріву. Найбільш частими причинами згаданих причин є виникнення дефектів в ізоляції трансформаторного осердя, нагрівання і вигорання контактів

пристроїв регулювання напруги під навантаженням (РПН), порушення ізоляції стяжних шпильок і ярмових балок з утворенням короткозамкненого контуру, нагрівання контактів відводів низької напруги.

Четвертий критерій заснований на зіставленні результатів аналізу оливи з газового реле та з проби. Використовується у разі спрацьовування газового захисту. На основі цього критерію робиться висновок про можливість включення трансформатора в роботу і визначається дефект електричного характеру, коли повторне включення трансформатора могло б призвести до збільшення зони ушкодження.

Перспективним напрямом застосування зазначених критеріїв є розробка алгоритмів для реалізації автоматизованих систем оцінки стану оливо-наповненого обладнання. Слід зазначити універсальність методу та зростаючу зі збільшенням напруги ефективність його використання.

Метод контролю діелектричних характеристик ізоляції заснований на вимірі діелектричних характеристик, до яких відносяться струми витоку, величини ємності, тангенсу куту діелектричних втрат ($\text{tg}\delta$) тощо.

Одним із дуже важливих параметрів діагностики є значення тангенса кута діелектричних втрат ($\text{tg}\delta$) і електронної ємності (С) ізоляції. Ці параметри ізоляції контролюються енергетиками вже багато десятиріч і по їх змінах вдалося уникнути багато аварій. Традиційно вони вимірюються на частоті 50 Гц при напрузі 10 кВ. Такі вимоги були встановлені майже 60 років тому і обумовлені рівнем розвитку вимірювальної техніки на той час. Діагностичний параметр $\text{tg}\delta$ залежить і від частоти і від величини прикладеної напруги. Але ці залежності проявляються при значних змінах частоти і напруги. Збільшення $\text{tg}\delta$ з ростом напруги зумовлено іонізаційними процесами, які починають проявлятися при напругах вищих за робочі, а графік залежності від частоти в діапазоні від 10 до 1000 Гц дозволяє контролювати вологість ізоляції.

Такі способи діагностики розроблялись, але широкого застосування не знайшли. Обумовлено це складністю проведення таких робіт і неоднозначністю отриманих результатів. Річ у тім, що вимірювання $\text{tg}\delta$ в польових умовах вимагає від оператора досвіду і високої кваліфікації. Оператори вимушені проводити декілька вимірів із зміною фази випробувальної напруги і запроваджувати спеціальну обробку результатів вимірювання.

Сучасна техніка дозволяє виготовляти генератори напруги різних частот, порівняно невеликої вартості, а також спростити прилади для виміру параметра $\text{tg}\delta$, в порівнянні з класичним мостом Шеринга.

Крім контролю величини тангенсу кута діелектричних втрат, важливо вести контроль і величини електричної ємності об'єктів випробування (C). Сучасні електро-лабораторії здатні контролювати цей параметр при випробуванні обладнання змінною напругою до 100 кВ. Такий контроль дозволяє виявити пробої ізоляції в процесі випробування.

Перспективні резонансні установки для випробування ЕО, які дозволяють випробувати обладнання великої ємності зміною напругою і вимірювати параметри ізоляції устаткування. Такі установки можна використовувати для випробування великих генераторів, трансформаторів, кабелів із зшитого поліетилену (ЗПЕ).

До останніх досліджень слід віднести випробування кабелів енергопостачання зі ЗПЕ. Заводи, які виготовляють кабелі із ЗПЕ рекомендують випробувати його напругою 0,1 Гц або 50 Гц. Для контролю за змінами цих параметрів під час експлуатації значно інформативніші результати на частоті 50 Гц. Зараз спостерігається тенденція до контролю величини часткових розрядів та $\text{tg}\delta$ на частотах 0,1 Гц, але ці параметри можна порівняти тільки з такими ж минулими результатами вимірювань.

Використовування випробувальних резонансних установок для кабелів із СПЕ дозволить:

- суттєво зменшити час випробування;
- контролювати реальну величину параметру тангенса кута діелектричних втрат при робочій і при підвищеній напрузі;
- при необхідності і наявності спеціальних приладів вимірювати і рівень часткових розрядів в кабелі.

В основі контролю струму витoku лежить вимірювання струму, що проходить через тверду ізоляцію за наявності напруги. Відомі два методи контролю. У першому прямому методі вимірюється модуль комплексної провідності ізоляції або її ємність. Метод вимагає реєстрації часток відсотка у зміні контрольованого параметра, застосування різних схем підвищення чутливості та завадостійкості, що є його недоліком. У другому методі порівнюються ємність і однотипного електроустаткування $\text{tg}\delta$ за допомогою схеми Шеринга і вимагає спеціальних вимірювальних виводів.

Міст Шеринга – це мостова схема змінного струму, що використовується для вимірювання ізоляційних властивостей електричних кабелів та ЕО. Його перевага у тому, що рівняння балансу залежить від частоти. З'єднання мосту Шеринга в умовах рівноваги показані на рис. 7.3.

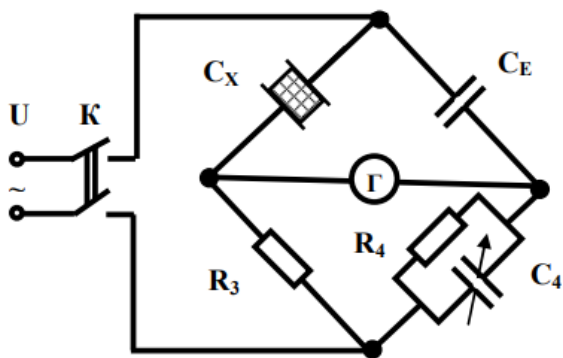


Рисунок 7.3 – Схема моста Шеринга

Особливість схеми моста Шеринга полягає в тому, що випробувальна напруга U майже повністю прикладається до об'єкта контролю C_x та еталонного конденсатора C_E . На вимірювальній частині моста (плечі R_3 , R_4 та C_4) падає не більш 1 В. Це дозволяє, по-перше, підвищити безпеку роботи з мостом, а по-друге, знизити у відомих межах вплив параметрів вимірювальної частини моста на результати вимірювання.

На точність визначення $\text{tg} \delta$ великий вплив має температура, при якій проводяться вимірювання. Практика показала, що помилка у визначенні середньої температури ізоляції на 5°C може викликати похибку вимірювання до 10-20%.

Цій засіб може використовуватися для контролю стану високовольтних вимірювальних трансформаторів і конденсаторів зв'язку.

Метод контролю розрядів (метод часткових розрядів) отримує все більше поширення як показник стану ізоляції ЕО. Метод вимірювання характеристик розрядів можна розділити на декілька варіантів: на вимірювання часткових, пазових та поверхневих розрядів, а також на електричні та неелектричні методи. Методи застосовуються для трансформаторів з напругою 110 кВ і вище та для ЕМ. Досліджують залежності інтенсивності часткових розрядів в ізоляції ЕМ від теплових і механічних впливів, а також зв'язки між характеристиками часткових розрядів і термінами служби ізоляції.

Частковий розряд являє собою електричний розряд, який відбувається на невеликій ділянці ізоляції, де напруженість електричного поля перевищує міцність до пробою матеріалу. Він може статися в пустотах в межах твердої ізоляції, по поверхні ізолюючого матеріалу, всередині газових бульбашок в рідкій ізоляції.

Виникнення і розвиток залежить від типу діелектрика і конструктивних особливостей ізоляції об'єкта. Часткові розряди в ізоляції є наслідком наявності неоднорідностей в структурі діелектрика і характеристик напруги, що впливає на нього.

Такими неоднорідностями можуть бути різні сторонні домішки і забруднення, газові порожнини, зони зволоження. Подібні дефекти утворюються в структурі ізоляції, як правило, внаслідок порушення процесу її виготовлення і при експлуатації обладнання (під впливом механічних впливів, деформації, вібрації). Оскільки для виникнення часткового розряду в газовому середовищі потрібна напруга більш низька, ніж для якого ж ефекту в рідині чи в твердій субстанції, то наявність таких дефектів в ізоляції може стати найбільш імовірною причиною початку її руйнування.

До основних причин деградації ізоляції відносяться теплове та електричне старіння матеріалу через часткові розряди, що створюються як при перенапруженні, так і в номінальному робочому режимі. Під впливом часткових розрядів запускається процес руйнування ізоляції, розмір ураженої області збільшується. Часткові розряди зазвичай не приводять до наскрізного пробиття ізоляції, проте є причиною змін структури діелектрика, а при достатньо тривалій експлуатації можуть стати причиною наскрізного пробою ізоляційного шару, рис. 7.4. Їх виникнення завжди свідчить про місцевої неоднорідності діелектрика.



Рисунок 7.4 – Наскрізний пробій ізоляційного шару внаслідок дії часткових розрядів

Вимірювання часткових розрядів дозволяє контролювати стан ізоляції під час випробувань і виявляти її передаварійний стан.

Наявність часткових розрядів визначається за імпульсами напруги, що з'являються, і по змінах електромагнітного поля в зовнішньому колі за допомогою електромагнітних датчиків. Відомі пристрої, що контролюють амплітуду та частоту проходження імпульсів у певних діапазонах частот.

Основні труднощі застосування методу часткових розрядів пов'язані з наявністю перешкод, обумовлених комутаціями і перехідними процесами в первинних колах ЕО, наявністю коронних розрядів, радіоперешкод тощо. Проблему вимірювання сигналу та його відокремлення від перешкод не завжди можна вирішити. Ефективність використання контролю часткових розрядів

збільшується зі зростанням робочої напруги, оскільки, з одного боку, зростають напруженість електричного поля та ймовірність виникнення дефектів, з іншого – з'являється можливість відмовитися від випробувань підвищеною напругою.

Виявляти пазові розряди, іскріння та утворення дуг доцільно в обмотках великих ЕМ, що постійно працюють під навантаженням. Причиною виникнення розрядів можуть стати ослаблення пазових клинів, стирання та усадка підклинових прокладок між стрижнями обмоток статора, обрив елементарних провідників, вібрація пластин гнучких виводів тощо.

Для ЕМ пошкодження ізоляції є найбільш частою причиною відмови, а для трансформаторів вихід з ладу в результаті пошкодження ізоляції обмоток стоїть на другому місці після пошкодження вводів. Ізоляція обмоток трансформаторів і ЕМ безперервно піддається таким руйнівним факторам, як теплові впливи від тривалого протікання струмів; від вібраційних навантажень на магнітопроводи трансформаторів і ЕМ; від протікання пускових струмів і струмів КЗ. Всі ці фактори призводять до пошкодження ізоляції і виникнення часткових розрядів.

Методи діагностики часткових розрядів дозволяють виявити дефект на ранніх стадіях його розвитку і, тим самим, запобігти дорогому ремонту або навіть аварії.

Діагностика часткових розрядів при експлуатації утруднюється тим, що зазвичай навколо об'єкта, що перевіряється, знаходиться інше обладнання, яке також є джерелом перешкод. Ці сигнали можуть не відрізнятися за параметрами сигналів від потрібного об'єкта, так як можуть бути частковими розрядами. Тому, для розділення сигналів перешкод і вимірюваного часткового розряду, потрібно спочатку виміряти сигнали перешкод при відключеній напрузі на досліджуваному об'єкті, а потім провести замер на ньому в робочому режимі. У цьому випадку буде реєструватися сума сигналів часткового розряду і фону. Різниця результатів цих вимірювань покаже значення сигналу часткового розряду. Отримані характеристики дозволяють оцінити характер дефектів і самого розряду.

Метод часткових розрядів не завдає шкоди ізоляції і широко використовується, оскільки в процесі перевірки не використовується підвищеною напругою, негативно впливає на ізоляцію.

Вібро-діагностика. Для контролю за технічним станом механічних вузлів велике значення має зв'язок параметрів об'єкта з такою інтегральною ознакою, як

спектр частот вібрації. Будь-яке параметричне збудження зміщує діапазон. Це і використовується як ознака. Оцінка стану зі зміщення низькочастотних складових спектру менш ефективна.

Електрофізичні методи контролю є дуже показними і перспективними напрямками діагностики ЕО. Переваги цих методів:

- швидке отримання первинної інформації, зручність її передачі та подання у вигляді сигналу відгуку. Легко піддаються автоматизації та реалізації на ЕОМ;
- датчики легко вбудовуються в об'єкт, потребують порівняно простої апаратури;
- легко налаштовуються для різних електрофізичних процесів;
- мають висока ефективність виявлення дефектів.

Методичну основу використання електрофізичних методів становить принцип спостереження, а носіями інформації є електрофізичні ефекти, що виникають при активізації фізичних процесів. За способами прояви, виведення та обробки інформації ефекти такого типу можна розділити на інтегральні ефекти та пов'язані з ними перехідні процеси, ефекти нелінійності, флуктуаційні ефекти та шуми. Використання електрофізичних ефектів обирається з урахуванням очікуваного дефекту від конкретного фізичного процесу, з забезпеченням можливості спостереження за цим процесом зовнішніми засобами. Ця можливість обумовлюється силою прояву ефекту і класом точності застосованих вимірювальних засобів.

7.3. Діагностика АД по спектру струму статора

Останнім часом отримали розвиток методи діагностування стану ЕО, засновані на моніторингу споживаного струму з виконанням спеціального спектрального аналізу отриманого сигналу, що дозволяє з високою достовірністю визначати технічний стан елементів електромеханічних систем (ЕМС). Принцип методу полягає в тому, що будь-які збурення в роботі механічної та електричної частин АД і пов'язаного з ним механізму призводять до змін магнітного потоку в зазорі ЕМ, а отже – до слабкої модуляції споживаного струму. Поява у спектрі струму АД характерних частот свідчить про наявність пошкоджень електричної або механічної частин ЕМС (АД).

Фізичний принцип, покладений в основу діагностики, полягає в тому, що будь-які збурення в роботі електричної та/або механічної частини електродвигуна та пов'язаного з ним пристрою призводять до змін магнітного потоку в зазорі ЕМ і, отже, до слабкої модуляції споживаного електродвигуном струму.

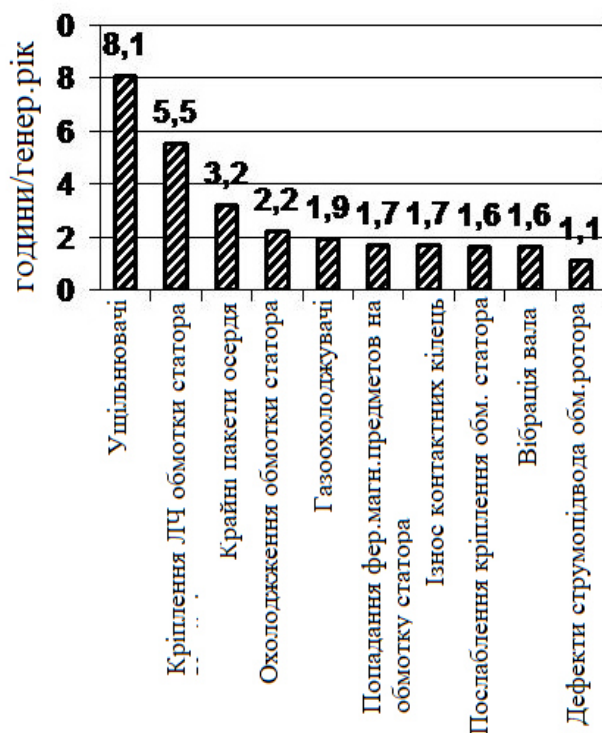


Рисунок 7.5 – Експлуатаційні дефекти в електричних машинах

Численні дослідження характеру пошкоджень двигунів змінного струму. а саме АД, дозволили отримати статистичні дані, що наведені на рис. 7.6.

Роботи з усунення причин відмов, пов'язаних з недоліками конструкції та технології, дефектами монтажу, із зовнішніми впливами (від експлуатаційних та аварійних режимів), а також з якістю ремонту вимагають наступних дій:

- заміна вузлів та деталей новими, в т. ч. удосконаленої конструкції, яка виключає деякі види дефектів;
- вдосконалення технології виготовлення та контролю якості ремонту,
- вдосконалення систем контролю та захисту;

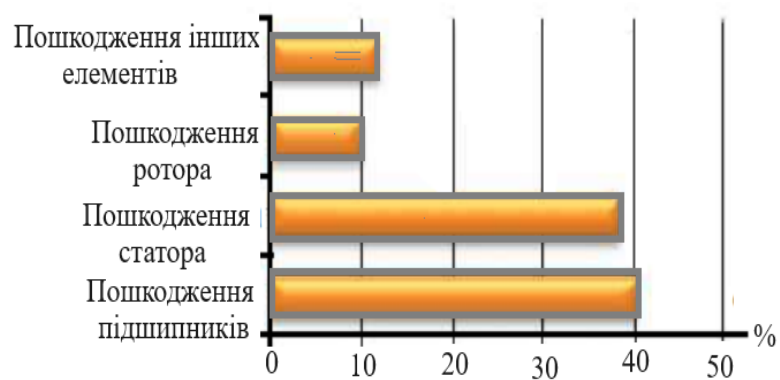


Рисунок 7.6 – Ймовірність пошкоджень в асинхронних двигунах

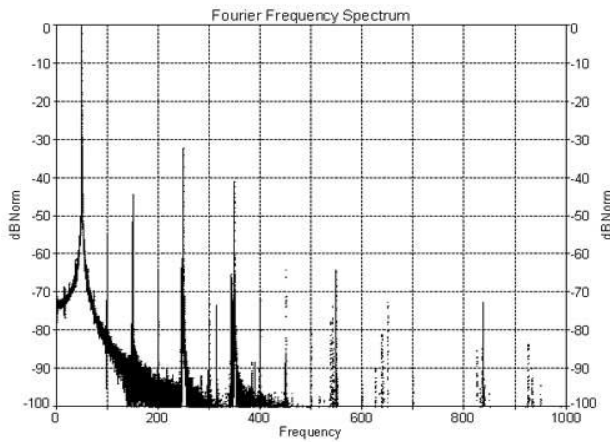
- коригування правил технічної експлуатації.

Можливості розробленого методу діагностики з погляду виявлення різних видів ушкоджень розповсюджуються на різні несправності:

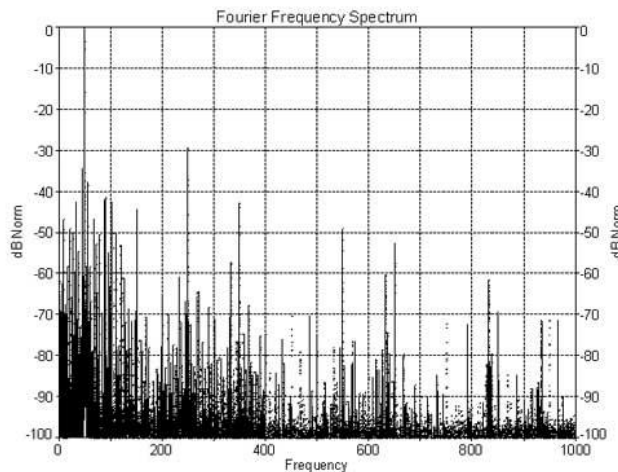
- пошкодження ротора АД (обрив стрижнів, ослаблення кріплення стрижнів до контактних кілець, приховані дефекти

лиття). Цей вид несправності виявляється за наявністю 2-х симетричних піків у спектрі струму відносно частоти мережі живлення;

- неспіввісність валів двигуна та механічного навантаження. Цей вид несправності визначається за частотами, кратними частотою обертання ротора (рис. 7.5).
- міжвиткові замикання обмоток статора;
- пошкодження підшипників (необхідні дані про підшипники електродвигуна та механічного пристрою);
- підвищений ексцентриситет ротора (статичний та/або динамічний);
- ослаблення елементів кріплення електродвигуна між собою та до фундаменту;
- дефекти механічної частини пов'язаних з електродвигуном пристроїв.



а)



б)

Рисунок 7.7 – Спектральний склад струму в обмотці статора: а) нового АД; б) АД, що перебуває в експлуатації 5 років

Як приклад наведено результати спектрального аналізу струмів двох однотипних АД для вентиляторних установок: а) для АД, що знаходиться в експлуатації один тиждень (рис. 7.7, а) і що пропрацювала 5 років (рис. 7.7, б).

На рис. 7.8 наведені результати спектрального аналізу струмів статора при пошкодженні ротора

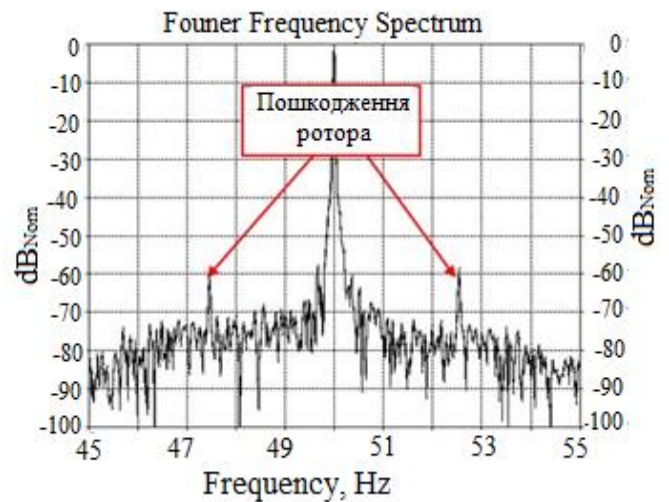


Рисунок 7.8 – Спектральний склад струму при пошкодженні ротора АД

На рис. 7.9 наведені результати спектрального аналізу струмів статора при несоосності валів ротора та валу приводного механізму, а на рис. 7.10 – при дефектах ремінної передачі, що з'єднує

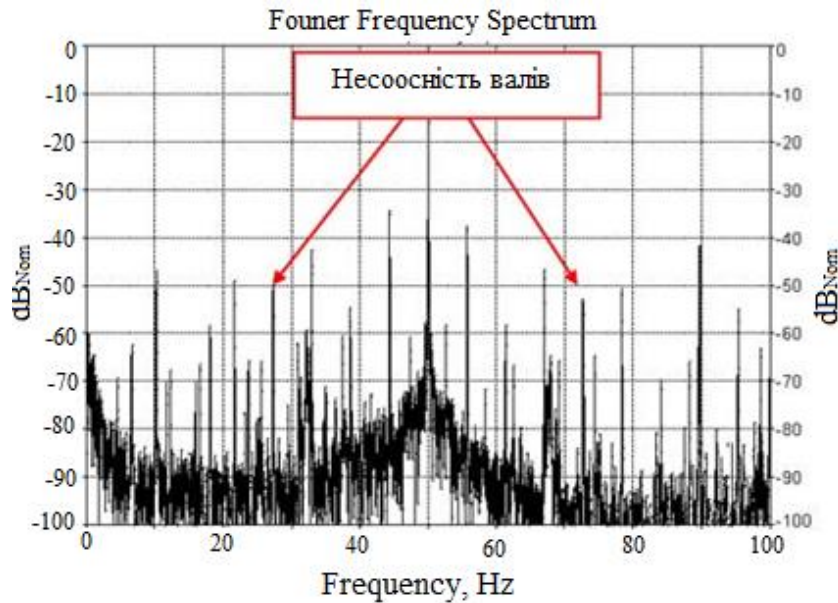


Рисунок 7.9 – Спектральний склад струму в обмотці статора при несоосності валів АД та приводного механізму

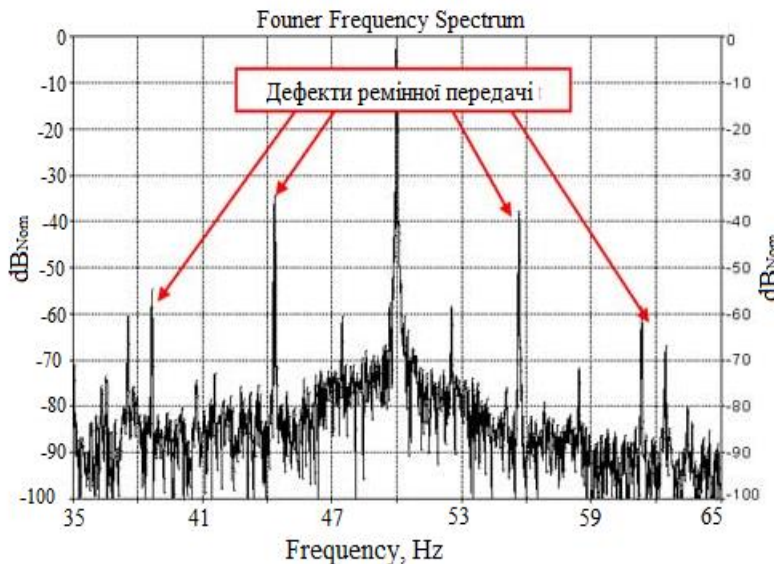


Рисунок 7.10 – Спектральний склад струму в обмотці статора при дефектах ремінної передачі, що з'єднує АД та приводний механізм

ремінної передачі, що з'єднує АД та приводний механізм.

Для виконання таких досліджень розроблено апаратно-програмний комплекс по виконанню аудиту стану і умовам роботи АД і з'єднаних з ними механічних пристроїв на основі спектрального аналізу струму, який АД споживає з мережі.

Блок-схема такого комплексу представлена на рис. 7.11. В складі комплексу є роз'ємний датчик струму з лінійною частотною характеристикою, кондиціонер сигналу (фільтр низьких частот, який не дає формуватися частотам хибних сигналів, аналого-цифровий перетворювач (АЦП), персональний комп'ютер (ПК) з необхідним програмним забезпеченням для збору і обробки інформації. Запис сигналів струму здійснюється на протязі часу, який необхідний для виконання спектрального аналізу з роздільною здатністю за частотою не менше 0.01-0.02 Гц.

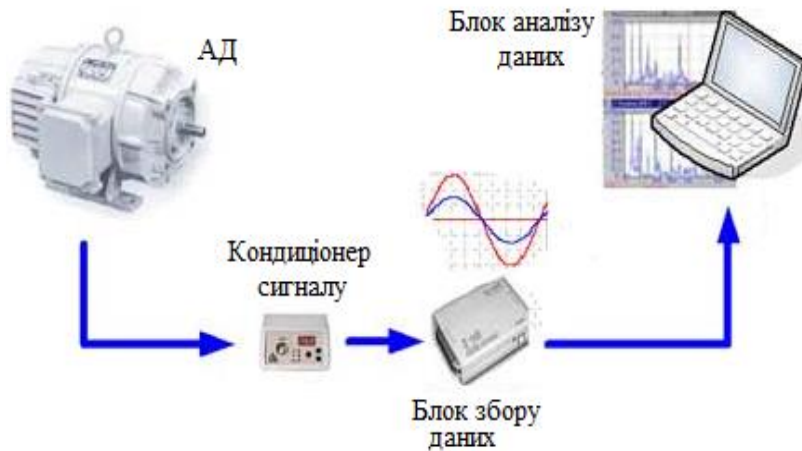


Рисунок 7.11 – Блок-схема апаратно-програмного комплексу для отримання спектрального аналізу струму, який АД споживає з мережі

пруги (струму) призводять до перегріву обмоток статора, до ушкодження підшипників за рахунок виникнення високочастотних обертових моментів зворотної послідовності. Причиною більшості аварій є радіальна вібрація через асиметрію напруги живлення, механічні перевантаження на валу АД, виробничий брак комплектуючих елементів або неакуратне складання. Більшість аварій має прихований характер і виявляється лише після відповідних випробувань або розбирання двигуна, однак постійний контроль мережевої напруги та струму ЕМ за допомогою засобів діагностування дозволяє у більшості випадків звести цю ймовірність до мінімуму.

Такі спектрограми складені для різних дефектів та аварійних режимів. В табл. 7.3 вказані види пошкоджень та їх вплив на АД.

Моніторинг струму ЕМ, на відміну від вібродіагностики, може бути виконаний безпосередньо на клемній коробці АД або в електрощиті живлення без будь-якого порушення режиму роботи. Аналізую спектрограми струму, можна заздалегідь, своєчасно визначити появу дефекту, загальмувати його розвиток, уникнути аварії. Наприклад, по спектрограмі на рис. 7.9 можна встановити пошкодженні ротора АД. В процесі практичних досліджень було встановлено, що по різниці в амплітуді між основною частотою і характерною для конкретної несправності частотою можна визначити критичність дефекту. Різниця є показником критичності дефекту. Дослідження показали, що різниця понад 54 дБ вказує на справний стан ротора, менш ніж 45 дБ – на погіршення його стану (наявні високо-омні сполучення, тріщини або обрив стрижнів).

Крім вищеописаних вимірювань, рекомендується проведення моніторингу прикладеної до АД напруги для визначення її несиметрії, наявності вищих гармонійних складових та імпульсів перенапруг. Це факторів, які безпосередньо впливають на термін служби та економічність роботи двигуна. Несиметрія та високі гармоніки в спектрі на-

Таблиця 7.3 – Види пошкоджень АД та характерні частоти, на яких вони визначаються

Вид пошкодження	Характерні ознаки
Пошкодження ротора АД (обрив стрижнів, ослаблення їх кріплення до контактних кілець, приховані дефекти лиття).	Виявляються за наявністю двох симетричних піків у спектрі струму відносно частоти живильної мережі. Характерна частота пошкодження пропорційна номінальному ковзанню.
Несоосність валів двигуна та механічного навантаження, пошкодження підшипників	Визначаються за частотами, що є кратними частоті обертання ротора
Міжвиткові замикання в обмотках статора	Поява піків частот, що кратні частоті живильної мережі
Ослаблення кріплення до фундаменту, чіплення ротора за статор двигуна	Визначаються на частоті кратній 0,5 від частоти обертання ротора
Дефекти ремінної передачі	Визначаються на частотах кратних частоті биття ременя, яка залежить від його довжини і діаметрів шківів
Ексцентриситет ротора	Численні бічні смуги на частоті непарних гармонік живильної мережі
Пошкодження механізмів з приводом від АД (насоси, вентилятори, компресори)	Визначаються на частоті лопатей приводу

В результаті створення та регулярного поповнення бази даних вимірювань, їх аналізу в процесі експлуатації ЕМС можна простежити динаміку фактичного розвитку окремих пошкоджень і прогнозувати їх подальший розвиток несправностей.

7.4. Прогнозування залишкового ресурсу асинхронних двигунів

На сьогодні не існує загального критерію визначення технічного стану ЕМС з АД, який був би придатний для кількісної оцінки. На виробництвах, крім вказаних вище засобів, також використовують встановлення технічного стану АД за допомогою показника відносної зношеності ізоляції та аналізу складових втрат двигуна.

Якщо АД працює зі зниженим навантаженням, то відносна зношеність ізоляції, як правило, нижча від номінального значення (умовно прийmemo, що номінальне значення очікуваного зносу дорівнює одиниці). Коли робоча температура довго була вища припустимої, відносна зношеність перевищує одиницю. Тож, головна

умова справногo технічного стану ізоляції – відносна зношеність ізоляції за певний період часу (цикл роботи, зміну тощо) не повинна перевищувати одиницю.

Строк служби АД значною мірою визначається саме якістю ізоляції обмоток, для котрих головним чинником, який впливає на термін служби, є робоча температура. Одним з методів дослідження теплових процесів АД є метод еквівалентних теплових схем заміщення. Недоліком цього та багатьох інших методів є неврахування параметрів конкретного АД, використання геометричних величин (діаметру розточування і зовнішнього діаметру осердя статора), номінального ККД, хоча він не завжди працює в номінальному режимі. Кращим для діагностування енергоефективності АД є підхід, у якому розрахунок поточної температури здійснюється за фактичними втратами в двигуні.

Якщо АД працює з незмінною температурою ізоляції, оцінити швидкість процесу її старіння або залишковий ресурс машини порівняно нескладно. Відомі залежності, які пов'язують термін придатності ізоляції даного класу з певним сталим рівнем температури протягом строку служби АД. Для ізоляції класу *A* є правило «восьми градусів» (правило Монтзингера): якщо ЕО працює з перевищенням температури на 8 °С над прийнятим класом нагрівостійкості, строк його експлуатації скорочується в середньому вдвічі:

$$D_{\theta} = A_0 \cdot 2^{-\theta/\Delta\theta}$$

де θ_0 – термін служби ізоляції певного класу при постійній температурі θ , роки;
 $\Delta\theta$ – постійна величина збільшення температури, при якій термін служби електричного двигуна зменшується вдвічі. Згідно з правилом Монтзингера, $\Delta\theta = 5-10$ °С, а при $\Delta\theta = 8$ °С можна записати:

$$D_{\theta} = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{8}\theta} = A_0 \cdot e^{-0.0866\theta}.$$

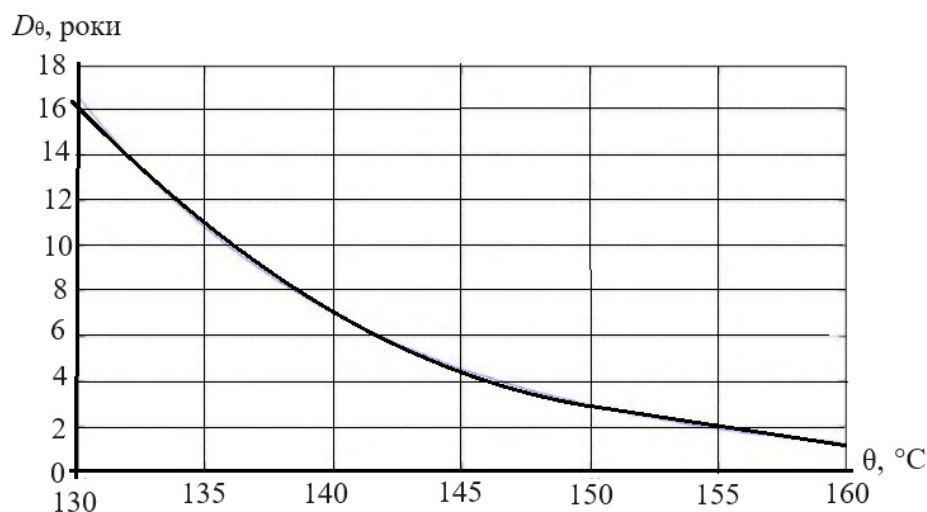
З деякими поправками це правило працює для всіх класів нагрівостійкості ізоляції. На рис. 7.12 наведена залежність терміну служби ізоляції для ізоляції класу *F* від температури. Аналіз графіку дозволяє зробити висновок: підвищення температури від 130 до 138 °С скорочує термін її експлуатації з 16 до 8 років, а нагрів до 155°С – до двох років.

В основі цього явища лежить загальний закон залежності швидкості хімічних реакцій від температури, описуваний рівнянням Вант-Гоффа: при збільшенні тем-

ператури на кожні 10 градусів в інтервалі від 0 до 100 °С константа швидкості гомогенної елементарної реакції збільшується у два-чотири рази. Правило можна записати рівнянням:

$$v_2 = v_1 \cdot \gamma^{(T_2 - T_1)/10},$$

де v_2 — швидкість реакції при температурі T_2 ; v_1 — швидкість реакції при температурі T_1 ; γ — температурний коефіцієнт швидкості реакції (якщо він, наприклад, дорівнює 2, то швидкість реакції буде збільшуватися вдвічі при збільшенні температури на 10 градусів).



Рисуюнок 7.12 – Залежність терміну служби ізоляції від температури

Найбільш реальні прогнози можна скласти для ізоляції двигунів, що працюють зі сталим навантаженням.

Ця теорія враховує лише теплове старіння, але під час роботи ізоляція зазнає ще й електричного і механічного впливу. Тому можна припустити, що насправді її руйнування внаслідок пробою відбудеться значно раніше. Вплив на строк служби АД спричиняє також якість напруги живлення: через несиметрію напруги зростає температура всього АД, проте найбільших теплових навантажень зазнають лобові частини обмотки статора в найбільш завантаженій фазі. Через несиметрію напруги, що складає 4 %, так само як і в разі зменшення напруги на 10%, термін служби АД скорочується вдвічі. Струми зворотної послідовності викликають додаткове нагрівання, що також призводить до зниження строку служби АД.

З погляду нагрівання АД небезпечнішими є негативні відхилення напруги. На рис. 7.13 зображено залежності строку служби ізоляції обмоток АД для різних коефіцієнтів завантаження й різних значень негативного відхилення напруги.

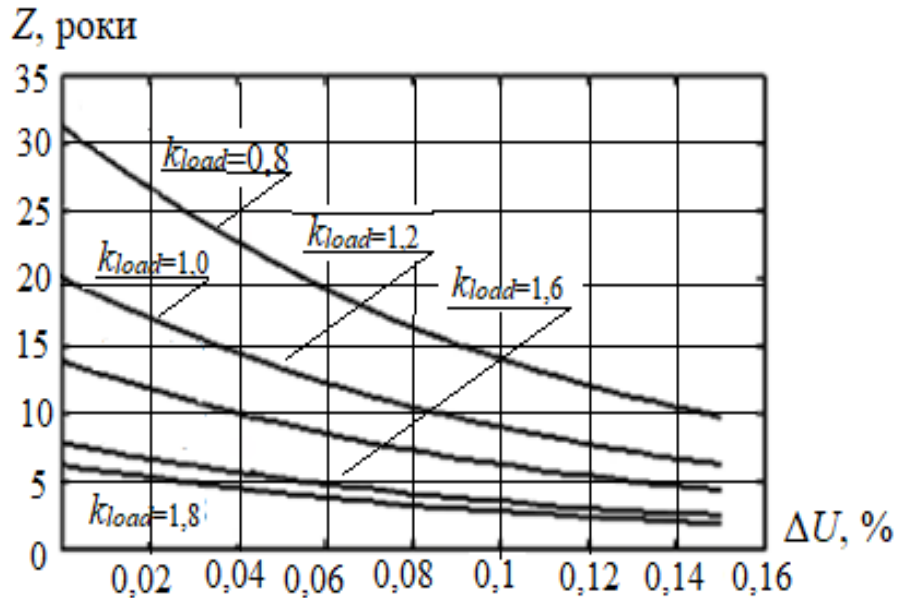


Рисунок 7.13 – Графіки залежності строку служби ізоляції від коефіцієнта завантаження k_{load} та негативного відхилення напруги ΔU , %

Можна зробити висновок, що при підвищенні струму, тож і температури обмоток, ресурс ізоляції зменшується з різною інтенсивністю. Якщо підвищуються оберти двигуна, збільшується вібрація, яка безпосередньо впливає на надійність підшипникового, контактної-щіткових вузлів та інших складників двигунів.

Відхилення температури та струму двигуна від номінального значення незначно впливає на вібрацію. Підвищена вібрація спостерігається у разі збільшення частоти обертання двигуна. Однією з основних особливостей теплових перехідних процесів в ЕМ є їхня інерційність, що виражається в значному відставанні змін температури від впливу електромеханічних перехідних процесів. Завдяки цьому машини можуть витримувати протягом деякого часу вплив перевантажень, струмів КЗ та інших неномінальних режимів. Облік теплової інерційності в розрахунках нестационарного нагріву є обов'язковою умовою отримання достовірності результатів.

РОЗДІЛ 8**Лекція 16****ПОДОВЖЕННЯ СТРОКУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЗА
РАХУНОК ДІАГНОСТИКИ ТА ОБСЛУГОВУВАННЯ**

Комплексне обстеження ЕО для продовження строку експлуатації.
Типові дефекти турбогенераторів та можливості попередження їх відмов
за допомогою діагностування. Передремонтна та післяремонтна
діагностика турбогенераторів

[Література: 5, 13, 25, 32, 39, 40, 42, 43]

**8.1. Комплексне обстеження електрообладнання для продовження строку
експлуатації**

В останні роки при відмові від обслуговування та ремонту техніки за графіком ППР на практиці здійснюється трьома основними засобами:

- робота до відмови,
- виведення техніки в ремонт за результатами експертних оцінок,
- виведення техніки в ремонт за результатами діагностики та прогнозу стану.

Значний економічний ефект дає лише третій спосіб. Його успішне використання дозволяє:

- скоротити час, об'єм ремонту та кількість запасних частин не менше ніж в три рази;
- зменшити кількість раптових відмов у десятки разів,
- скоротити втрачений прибуток через простої у кілька разів.

Для способу виведення техніки в ремонт за результатами діагностики та прогнозу стану необхідна повна діагностика об'єкта, причому бажано виявляти всі дефекти, що впливають на ресурс, задовго до відмови, щоб підготуватися до ремонту. Як показала практика, найбільш ефективна діагностика буде за даними віброконтролю, оскільки доказано, що вібрація містить максимальний об'єм діагностичної інформації, діагностувати можна на місці, без розбирання та зупинки обладнання тому що коливальні сили виникають безпосередньо в місці появи дефекту, а машина "прозора" для вібрації.

В такому разі такі загальноновизнані методи, як контроль температури, аналіз оливи та інші практично не потрібні – їх замінює аналіз вібрації.

Сучасні дослідження стану ТГ орієнтований лише на отримання найпростішої відповіді: чи перебуває ТГ на даний час у працездатному стані (СОУ-Н МЕВ 40.1-00013741:2014), тобто чи відповідає ТГ вимогам цього документа.

Точного та однозначного методу оцінки залишкового ресурсу ТГ в даний час не існує. У таких обставинах найкращим є комплексне обстеження (КО) ТГ, тобто перевірка ТГ за всіма параметрами, що відображають його технічний стан, з використанням максимально можливого набору методів та засобів, що дозволяють оцінити ступінь зносу та залишковий ресурс з найбільшою ймовірністю.

Ресурс ТГ на момент обстеження, як і любого іншого ЕО, визначається вузлом, який має найменший залишковий ресурс. Виявлення такого вузла може бути здійснено тільки під час КО. Так як оцінка залишкового ресурсу має імовірнісний характер, то для отримання більш точної оцінки необхідно забезпечити підтвердження очікуваних дефектів декількома методами. Для прийняття обґрунтованих рішень про виведення ТГ в ремонт, про обсяг ремонту або про залишення його в експлуатації необхідно, крім визначення вузла з найменшим залишковим ресурсом, отримати надійну інформацію про залишковий ресурс всіх інших вузлів, деталей і систем.

Найбільша ефективність КО може бути отримана при наявності розвиненої організаційної та технологічної системи контролю технічного стану ТГ, яка б дозволяла отримувати максимум інформації про технічний стан при мінімальному втручанні в процес експлуатації. Така система повинна включати:

- спеціалізовані бригади, укомплектовані висококваліфікованими та досвідченими фахівцями, які працюють на постійній основі;
- парк високотехнологічних сучасних приладів;
- розвинену та регулярно обновлювану методичну базу обслуговування і контролю ТГ;
- систему дистанційного моніторингу функціональних параметрів працюючих ТГ з можливістю архівування даних;
- налагоджену систему ведення ремонтної та експлуатаційної документації ТГ, що експлуатуються;
- постійно оснащувати ТГ новими, ефективними засобами контролю.

Набір робіт, виконуваних у рамках КО, не може бути повністю вичерпним. Завжди залишаються якісь властивості або параметри, для перевірки яких немає відповідних методів та засобів контролю, або існуючі кошти на момент обстеження недоступні з тих чи інших причин. Тому методи і засоби, що застосовуються при конкретному КО, визначається конструктивними особливостями ТГ, обставинами обстеження, що склалися, і поставленими завданнями. Основна ознака комплексності – це максимальне, виходячи з наявних засобів, охоплення властивостей і характеристик контрольованого об'єкта і використання засобів і методів, що взаємно доповнюють, уточнюють і перекривають один одного.

Дослідження виконують на працюючому ТГ та на ТГ, що знаходиться в розібраному стані. Їх виконують шляхом лабораторних досліджень і шляхом теоретичного аналізу зібраних матеріалів.

Роботи, які можуть виконувати при комплексному обстеженні ТГ:

1) *На працюючому генераторі можна виконувати:*

- відбір мікрочастинок зносу вузлів і деталей з циркулюючого всередині генератора охолоджуючого газу; виконувати аналіз складу мікрочастинок з видачою висновків про можливі дефекти;
- вібраційне обстеження генератора та оцінка стану механічної системи статора;
- теплові випробування ТГ з обробкою результатів спеціальною комп'ютерною програмою з розширеними можливостями аналізу;
- аналіз відомостей ремонтної та експлуатаційної документації, та оцінка на їх основі технічного стану вузлів та систем генератора.

2) *На зупиненому ТГ при виконанні ремонтів різного виду.*

На статорі, з якого виведено ротор:

- ендоскопічний огляд статора;
- ендоскопічний огляд трубок газоохолоджувачів;
- відбір інформаційно-змістовних продуктів зносу, зламів і відкладень. Подальший їх аналіз;
- вимірювання рівня пазових розрядів в ізоляції статора обмотки;
- оцінка ступеня коронування обмотки статора з використанням оптико-електронних приладів;

- виявлення за допомогою тепловізора локальних послаблень ізоляції обмотки статора;

- оцінка щільності та жорсткості осердя статора вібраційним методом;

- вібраційне обстеження стяжних призм осердя статора;

- ультразвуковий контроль щільності локальних зон осердя, що мають ознаки ослаблення;

- тепловізійний контроль при випробуваннях осердя статора на нагрівання (від втрат);

- перевірка правильності показань та маркування належності термодатчиків статора при випробуваннях осердя статора індукційними втратами.

На роторі, виведеному зі статора:

- огляд за допомогою ендоскопів лобових частин обмотки;

- огляд «бочки» ротора щодо виявлення підгарів, підколов та інших можливих дефектів;

- ендоскопічний огляд вентиляційних каналів пазової частини обмоток роторів з безпосереднім газовим охолодженням;

- ендоскопічний огляд гідравлічних каналів обмоток роторів із безпосереднім водяним охолодженням.

Як приклад реального ефекту від можна навести результати обстеження статора турбогенератора ТГВ-200-2У3 (випуску 1962 р.). Його перемотування планувалося в 1993 р. У результаті проведеного КО, діагностичних робіт із залученням експертів-фахівців заводу-виробника було зроблено висновок про недоцільність заміни обмотки статора у 1993 р., але були надані рекомендації щодо підтримки ресурсу його працездатності при подальшій експлуатації. Залишковий ресурс статора було оцінено терміном щонайменше 6 років. Заплановане перемотування було скасовано. Статор після обстеження безаварійно пропрацював 11 років, а приготовлений до перемотування комплект нової обмотки був використаний для перемотування іншого статора, що дійсно потребував заміни обмотки.

Завдання продовження терміну служби та забезпечення надійності ТГ вирішується шляхом своєчасного виявлення та усунення дефектів, не даючи їм розкинутися до такого ступеня, при якому настане аварійне відключення або незворотне руйнування ТГ.

Поряд з усуненням виявлених дефектів, відомим способом заощадження ресурсу працездатності є уповільнення або припинення розвитку цього дефекту. Цій засіб отримав назву «*Управління розвитком дефекту*».

Таке управління здійснюється підбором та витримуванням таких параметрів функціонування ТГ, при яких дефект не розвивається або розвивається з мінімальною швидкістю. Для реалізації методу необхідно спочатку за допомогою повний комплексу діагностичних досліджень виявити причини і механізми розвитку дефекту, потім створити модель розвитку дефекту і далі на їх основі розробити алгоритм управління розвитком.

ТГ є виробом, що відновлюється, і більшість його вузлів можна відновити або замінити. Таким чином ресурс працездатності ТГ відновиться повністю або частково (як правило).

Є лише один вузол, заміна якого рівнозначна заміні всього ТГ – це осердя статора. Методи контролю стану осердя статора зводяться в основному до контролю якості міжлистової ізоляції та питомих втрат в осерді. Вимірювання вібрації осердя і корпусу статора передбачаються лише «при введенні в експлуатацію головних зразків нових типів ТГ» і «при виявленні незадовільного стану сталевих конструкцій статора» [1].

Механічна властивість осердя статора, що визначає його працездатність, це стан пружного стиснення. Саме це є необхідною умовою тривалого збереження якості міжлистової ізоляції та попередження руйнування листів активної сталі внаслідок їх вібрації. Неминуче з часом і під впливом експлуатаційних навантажень зусиль, що стискають осердя, зменшуються, що є потенційною причиною аварійних пошкоджень статора і, отже, основним фактором, що обмежує термін служби і ТГ. Правильна оцінка технічного стану осердя стає особливо актуальною у випадках, коли необхідно ухвалити рішення про доцільність заміни обмотки статора.

Заміна обмотки може виявитися невиправданою, якщо осердя статора вже втратило механічні властивості. Але оцінка механічного стану осердя можливе також за непрямыми ознаками, коли ослаблення пресування осердя значне. Найкращим для контролю та оцінка стану осердя вважають вібраційний контроль як працюючих ТГ, так і під час їх ремонтів. Вібраційні методи дозволяють виявляти ознаки погіршення на ранній стадії їх появи. Багаторічний досвід використання нами таких методів ґрунтується на виявленні та аналізі стійких тенденцій зміни контрольованих вібраційних параметрів за відносно тривалий термін регулярних спостережень.

Критеріями, що дозволяють оцінювати певні аспекти технічного стану, є як граничні рівні окремих вібраційних компонентів, так і тенденції їх зміни, що виявляються в ході вібраційних обстежень. Вібраційні методи контролю стану статора ТГ дозволяють відстежувати зміну та оцінювати його стан, визначати ресурс працездатності. Для підвищення ефективності контролю технічного стану статорів ТГ вібраційними методами доцільно оснащувати їх вібродатчиками, стаціонарно встановленими безпосередньо на осерді статора.

8.2. Типові дефекти турбогенераторів та можливості попередження їх відмов за допомогою діагностування

Для стійкого прогнозування ризиків відмов ТГ на основі статистичних даних необхідно дослідження стану однотипних машин за час, протягом якого відбудеться не менше однієї відмови, а для оцінки надійності та зниження величини розсіювання результатів – за час, що дорівнює часу їх потрійного середнього напруцювання на відмову. Такі ТГ повинні бути близькі за потужністю, конструкцією та способом охолодження, а час спостереження має бути максимально збільшено. При виконанні оцінки необхідно враховувати історію експлуатації та ремонтів, що проводились. Але ТГ – одиничне обладнання, їх кількість недостатня для утворення статистично однорідної вибірки, що веде до значного розсіювання результатів. Тому необхідно встановлювати найімовірніші причини відмов за фактичними даними працюючих ТГ.

Перелік відмов ТГ на ТЕС та АЕС України (по зменшенню ризику):

- ушкодження оливних ущільнень у місцях виходу валів ТГ з водневим охолодженням;
- порушення пресування і «розпушування» крайніх пакетів осердь статорів (в основному), руйнування шихтованих листів пакетів осердя;
- порушення бандажів лобових частин обмотки статора, поява тріщин у паяних з'єднаннях головок лобових частин і кріплень обмотки статора в пазах, втомних тріщин у мідних сполучних трубках подачі води у виводи обмотки статора поблизу пайки мідної трубки до сталевого штуцера; нещільність порожнистих провідників;

- пошкодження елементів систем охолодження обмоток статорів та газо-охолоджувачів, обрив болтів кріплення зливного колектора, тріщини у зварних швах напірного та зливного колекторів;

- дефекти балансування роторів та пов'язані з ними пошкодження струмопідводів і валів, дефекти контактних кілець, порушення щіткового апарату, зміщення лобових частин у номінальних та в неномінальних режимах роботи ТГ, ослаблення кріплення радіальних шпильок у лобових частинах обмоток з пошкодженням термомонтролю нижніх стрижнів;

- технологічні та експлуатаційні дефекти ізоляції обмотки статора.

Найбільш важкими за ризиком наслідків є такі дефекти:

- тріщини у валу ротора та в деталях бандажних вузлів ротора;
- руйнування торцевих частин шихтованих осердь статорів, що призводить до руйнувань бандажів та ізоляції лобових частин обмоток статорів;
- порушення оливних ущільнень ТГ з водневої системою охолодження, що призводять до викиду водню в машинний зал.

Ці дефекти становлять велику небезпеку, тому що призводять до серйозних аварій, пожеж, до вибухів, до тривалих вимушених простоїв (рік і більше), до руйнувань ТГ, машинних залів, до можливих жертв. У табл. 8.1 представлені дані про збитки від сумарного недовироблення електроенергії через різні відмови ТГ потужністю від 220 до 1000 МВт з воднево-водяним охолодженням, отримані на електростанціях України.

Таблиця 8.1 – Збитки від різних видів відмов турбогенераторів

Можливі збитки (ризики)				
Потужність ТГ, МВт	Середня частота відмов ТГ, 1/(ТГ в год)	Тривалість середнього простоя на одну відмову ТГ, години	Питомий простій, години/(ТГ в год)	Питоме недовироблення електроенергії, 10^6 (кВт годин)/(ТГ в рік)
1000	0,33	46,8	15,4	15,4
800	0,36	47,3	16,8	13,2
350	0,41	45,0	18,4	9,2
220	0,57	65,0	37,0	8,2

Аналіз даних табл. 8.1 показує, що навіть невелика кількість відмов може викликати велике недовироблення електроенергії. Істотний вплив на кількість відмов та на недовироблення електроенергії надає стан систем збудження та охолодження.

Для ТГ з водневим охолодженням ротора (серії ТГВ і ТВВ) переважними є відмови через дефекти статорів, а для ТГ з водяним охолодженням ротора (серія ТЗВ) значна частка відмов відбувається через дефекти ротора. Дані про відмови ТГ потужністю 800 МВт з воднево-водяним (серія ТВВ) та з повним водяним охолодженням (серія ТЗВ) за період від 1990 р. до 2013 р. представлені в табл. 8.2.

Таблиця 8.2 – Кількість відмов через дефекти у вузлах ТГ серій ТГВ, ТВВ та ТЗВ за даними ТЕС та АЕС України за період від 1990 р.

Серія ТГ, тип охолодження	Кількість дефектів			
	Статор	Найменування вузлів ТГ, у яких визначено дефекти		Інше
		Ротор і щітко-контактний вузол	Ущільнення валу і система охолодження	
ТВВ (з воднево-водяним охолодженням)	75	4	17	4
ТЗВ (с водяним охолодженням статора и ротора)	57	43	-	0

Дані про надійність та можливі ризики експлуатації ТГ потужністю від 300 до 1000 МВт з різними системами охолодження наведені в табл. 8.3.

Можна відзначити досить великий розкид значень ризиків експлуатаційних відмов ТГ, які можна систематизувати за типами відмов різних вузлів і допоміжних систем забезпечення. У табл. 8.4 представлені дані про експлуатаційні відмови ТГ різної потужності та з різними системами охолодження.

За часом формування дефекти в ТГ можна класифікувати:

1) дефекти, допущені заводом-виробником: недоробки у конструкції, помилки у технології виготовлення та монтажу;

2) експлуатаційні дефекти, пов'язані з низькою якістю технічного обслуговування та проведення ремонтів, з роботою ТГ у неномінальних режимах, при пікових навантаженнях в енергосистемі;

Таблиця 8.3 – Показники надійності та дані про наслідки появи дефектів у ТГ потужністю від 300 МВт до 1000 МВт з різними системами охолодження

Охолоджувальне середовище, що застосовується в ТГ	Потужність ТГ, МВт	Середня частота відмов ТГ, од./(ТГ/год)	Середній час відновлення (середній час простою на одну відмову), години	Питомий простий, години/(ТГ в рік)
Водяне охолодження обмоток статора, водневе – ротора та внутрішнього об'єму	1000	0,33	46,8	15,4
	800	0,5	40,0	20,0
	500	0,41	45,0	18,4
Водяне охолодження обмоток статора і ротора, повітря в об'ємі ТГ	800	1,0	70,0	70,0
Водяне охолодження обмоток статора та ротора, повітря в об'ємі ТГ	300	1,5	200	300
Оливне охолодження статора обмоток, водяне – обмоток ротора, повітря у внутрішньому об'ємі ТГ	500	2	300	600

Таблиця 8.4 – Розподіл кількості відмов по різним причинам

Види ТГ	Кількість аварійних зупинок ТГ в % к загальній кількості непланових зупинок				
	Електричні	Механічні	Теплові	Дефекти ущільнень і трубопроводів	Інше*
ТГ серій ТГВ и ТВВ потужністю от 220 до 1000 МВт з воднево-водяним охолодженням	14,4	18,9	17,3	32,2	17,5
ТГ серії ТЗВ 800 МВт з повним водяним охолодженням	13,2	6,1	6,2	72,5	2,0
ТГ серії ТГВ потужністю 220 и 300(325) МВт с повним водневим охолодженням	11,2	11,5	10,8	56,8	9,7

3) дефекти, зумовлені перевищенням заданого часу експлуатації; дефекти, які призводять до активізації прихованих дефектів, тобто пов'язані зі старінням генераторів і допоміжних систем.

Відповідно до наведеної класифікації виникнення дефектів ТГ, можна визначити основні напрями робіт із запобігання їх відмов:

1) вдосконалення технологій та якості систем контролю при виготовленні, забезпечення якості ремонтів при сервісному обслуговуванні на станціях;

2) встановлення систем контролю стану ТГ на блоках електростанцій у режимі *on-line* та встановлення додаткових систем захисту від неномінальних режимів; своєчасна заміна зношених вузлів та деталей новими деталями удосконаленої конструкції;

3) коригування нормативів та правил технічної експлуатації, відповідно до впровадження нових рішень в сучасних ТГ.

При створенні систем моніторингу для оцінки стану та виявлення дефектів ТГ слід враховувати економічний фактор, забезпечувати зниження витрат, пов'язаних з відмовами як працюючих, так і нових ТГ, забезпечувати швидку окупність вкладень.

Система безперервної діагностики («*on-line* діагностика») є фактично єдиним способом попередження аварійних ситуацій на блоці станції у разі виникнення дефектів, що швидко розвиваються. Планова діагностика та штатні контрольні дії персоналу неефективні для попередження таких відмов. Своєчасне виявлення дефекту означає, що термін встановлення можливої відмови достатній для виключення позапланових зупинок ТГ, для зменшення термінів вимушених простоїв і зниження витрат на ремонти. Натепер використовують управління розвитком дефекту.

В даний час існує велика кількість методів і засобів обробки результатів діагностики стану ТГ в процесі експлуатації. Для раннього виявлення дефектів найбільш наочна система обробки даних шляхом подання їх у вигляді матриць-таблиць, в яких можливо зіставити причини ушкоджуваності ТГ, що значно підвищує достовірність і своєчасність їх виявлення. Використання для діагностики таких систем контролю передбачає обробку даних за вибраними параметрами. Наприклад, для контролю теплового стану обмоток статора рекомендується досліджувати відхилення температури охолоджувальної рідини від середньої температури в гідравлічних гілках. Для поточного контролю стану щіток і кілець ротора використовують сигналізатори іскріння і прилади для контролю рівномірності розподілу струмів.

На діючих та зупинених ТГ проводять додаткові випробування:

- вимірювання інфрачервоного випромінювання зовні корпусу ТГ для оцінки розподілу теплового поля та виявлення дефектів газо-охолоджувачів;
- віброакустичне обстеження корпусу і осердя статора для виявлення дефектів кріплення підвіски осердя в корпусі статора;
- аналіз складу домішок в охолодному газі та (або) в сухих залишках оливи з дренажів для виявлення продуктів зносу стали осердя та ізоляції обмотки;
- вимірювання рівня та встановлення місця формування часткових розрядів;
- вібраційні дослідження для виявлення тріщин у валу, виткових замикань у роторі, дефектів підшипників тощо.

За загальносвітовою тенденцією при проведенні модернізації блоків електростанцій підвищують потужність ТГ. При цьому обов'язковою є вимога збереження габаритних розмірів для використання існуючих фундаментів та систем забезпечення. Тому при підвищенні потужності ТГ у встановлених габаритах при їх проектуванні або модернізації необхідно впроваджувати нові конструктивні рішення, що знижують ймовірність виникнення дефектів, які, згідно зі статистичними даними, були найчастішою причиною їх відмов та аварійних зупинок.

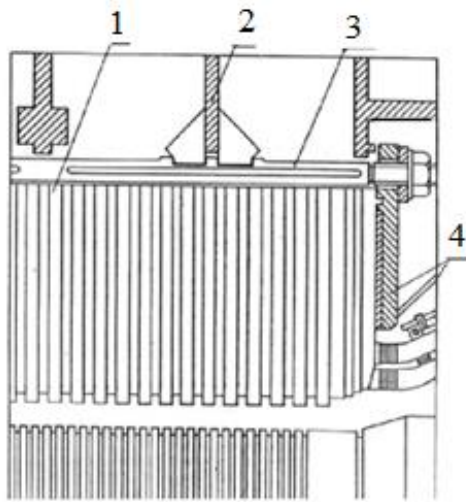


Рисунок 8.1 – Еластична підвіска осердя статора в корпусі:
 1 – осердя статора;
 2 – полиця корпусу; 3 – ребро;
 4 – натискна плита

чиною їх відмов та аварійних зупинок.

При роботі машини під навантаженням на осердя статора діють радіальні зусилля магнітного тяжіння від електромагнітних сил. Під дією цих сил осердя деформується і здійснює коливальний рух з подвійною частотою напруги мережі. Тому в місці закріплення осердя в корпусі виникають значні зусилля. Від осердя вібрації передаються до корпусу, йде руйнування пакетів осердь, з'являється контактна ерозія дотичних поверхонь осердя і ребер-клинів. Для зниження вібрації корпусу та підвищення гнучкості елементів кріплення виконують пружну підвіску осердя в корпусі. Найбільш простий і добре зарекомендувала себе конструкцією пружної

підвіски є конструкція з виконанням довгих поздовжніх прорізів в області кріплення ребер-клинів до корпусу, рис. 8.1. Ці прорізи дозволяють ребру-клину деформуватися в радіальному напрямку.

Самостійно усунути результати руйнування осердя на блоках станцій практично неможливо, генератори вимагають проведення капітальних ремонтів із залученням фахівців та технологічного обладнання заводу-виробника. Тому оцінка стану шихтованого осердя та встановлення причин його руйнування є особливо актуальною.

У загальносвітовій практиці оцінка можливих ризиків відмов ТГ виконується на базі аналізу статистичних даних про типові дефекти і пошкодження, що мають певну неточність через недостатню кількість встановлених на блоках однотипних ТГ. Для зниження розкиду аналізуємих виробничих та експлуатаційних відмов, зниження неточності оцінки стану необхідно зменшувати неоднорідності ТГ, які порівнюють. Також необхідно збільшувати час спостереження до потроєного часу середнього напрацювання на відмову, враховувати історію експлуатації та ремонтів, що проводилися раніш.

Досить більше відмов ТГ відбувається через порушення у роботі допоміжних систем ТГ, які забезпечують подачу води, газу, оливи. Часто причинами відмов є тріщини у валах, деталях бандажних вузлів ротора, руйнування елементів торцевих частин шихтованих пакетів осердь статорів.

Поняття про типові дефекти засноване на відомих дефектах ТГ і повторюваності ряду дефектів, які призводили до відмов ТГ одного типу, а також на аналізі конструкції та умов експлуатації. На основі досвіду експлуатації можна навести перелік характерних дефектів різних ЕМ, що найчастіше зустрічаються, табл. 8.5. Слід вважати, що коли відношення кількості встановлених дефектів та пошкоджень до загальної кількості можливих дефектів та пошкоджень перевищує 50 %, будь-який вид ремонту недоцільний. Рекомендується заміна ТГ або його основних елементів: статора та/або ротора.

8.3. Передремонтна діагностика та післяремонтні випробування ТГ

Високий ступінь зносу діючого ЕО електричних станцій, низький коефіцієнт оновлення обладнання головних схем видачі потужності підвищує роль створення ефективної системи ремонту та технічного обслуговування, а також діагностики технічного стану таких дорогих об'єктів, до яких відносяться ТГ великої потужності.

Таблиця 8.5 – Характерні дефекти ЕМ, що зустрічаються найчастіше

Елемент ЕМ	Дефект	На що впливає цей дефект. Наслідки
1	2	3
Осердя статора	ушкодження міжлистової ізоляції шихтованих осердь	викликає місцеві перегріву, навіть можливі «пожежі в сталі»
	ослаблення пресування осердя	викликає вібрацію пластин сталі з пошкодженням міжлистової ізоляції; розпушування крайніх пакетів, що викликає злам листів
	зміна форми статора гідрогенераторів через ослаблення стикування секторів статора	може призвести до торкання («затирання») ротора і статора
Обмотка статора	ослаблення кріплення стрижнів у пазу	викликає стирання ізоляції стрижня
	пошкодження напівпровідного покриття стрижня та ізоляції елементарних провідників	викликає появу часткових розрядів (ЧР); розшарування ізоляції, що викликає збільшення циркуляційних струмів, місцевий перегрів обмотки і її прискорене старіння
	ослаблення кріплення лобових частин	викликає стирання ізоляції, зміщення провідників та підвищену вібрацію
	забруднення, замазлювання та зволоження ізоляції	викликає зниження електричної міцності ізоляції
	тріщини в ізоляції	призводять до зниження електричної міцності ізоляції
	зволоження ізоляції через порушення герметичності системи охолодження	викликає пробій у зоні стрижня на виході з паза. Дуже небезпечний дефект для машин з безпосереднім водяним охолодженням
Система безпосереднього охолодження	закупорка каналів безпосереднього охолодження	веде до місцевого перегріву обмотки
	порушення герметичності	призводить до появи дистилату всередині корпусу і зволоження ізоляції
Ротор	тріщини в різних частинах ротора ТГ або валу гідрогенератора	призводять до підвищених вібрацій на зворотній частоті та зміни фази вібрації
	порушення цілості бандажних кілець і клинів обмотки ротору	призводить до підвищених вібрацій

Продовження табл. 8.5

1	2	3
Обмотка збудження	пошкодження корпусної ізоляції та виткові замикання	призводять до підвищених вібрацій на оборотній частоті та появі підшипникових струмів
	знос порожнистих провідників при водяному охолодженні	призводить до теплового небалансу ротора та підвищених вібрацій
Повітряний зазор	викликає стирання ізоляції стрижня(для гідрогенераторів та великих асинхронних двигунів)	викликає стирання ізоляції стрижня, що призводить до асиметрії струму в паралельних гілках і до можливого зачеплення ротора за статор з їх подальшим руйнуванням
Підшипники та підп'ятники	порушення ізоляції	призводить до появи підшипникових струмів і підвищеного нагрівання підшипників
	знос робочих поверхонь та перекося	призводять до підвищення температури та рівня вібрації
Ущільнення валу ротора (для ТГ з водневим охолодженням)	знос ущільнень або їх пошкодження	призводять до збільшення витрат водню та попадання оливи всередину корпусу
	перекіс ущільнень	призводить до їх підвищеного нагрівання

Розглянемо етапи проведенні післяремонтних випробувань ТГ на прикладі стрижня обмотки статора. Для ізоляції ЕМ основна причина пошкоджень обмоток – термомеханічні дії. Під їх впливом, а також від вібрацій в умовах підвищених температур відбуваються механічні пошкодження ізоляції у вигляді розшарування або утворення тріщин. Це викликає всередині діелектрика в газових включеннях появу часткових розрядів, які і зумовлюють зрештою пробій ізоляції. Таким чином, часткові розряди, поряд із струмами витoku характеризують характер та ступінь розвитку дефектів.

Діагностика котушок (стрижнів), виконується ще до укладання в пази:

1) при ступінчастому підйомі напруги від стороннього джерела з низьким рівнем власних часткових розрядів вимірюються характеристики часткових розрядів в ізоляції стрижня (розподіл $n(q)$);

2) якщо дефекти породжують часткові розряди, що перевищують рівень 500 пКл, проводиться їх геометрична локація за часом запізнення сигналів від датчиків часткових розрядів, розміщених на кінцях стрижня;

3) за результатами діагностики визначається обсяг робіт з відновлення ізоляції стрижня. Обстеження стрижнів проводять за схемою, показаною на рис.8.2.

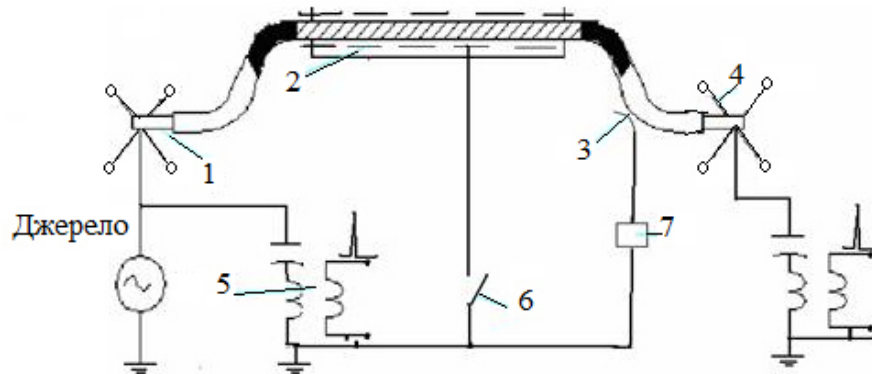


Рисунок 8.2 – Схема проведення високовольтних випробувань окремих стрижнів обмотки статора ТГ від стороннього джерела

Така діагностика обмоток генераторів дозволяє в короткі терміни визначити обсяг і глибину необхідних ремонтних операцій, а при застосуванні їх на всіх етапах проведення робіт забезпечити надійність та високу якість проведення ремонту одного з найважливіших складових елементів ТГ – статорної обмотки.

Після встановлення стрижнів (котушок) у пази та їх монтажу проводиться вимірювання характеристик електро-розрядної активності, метою та результатом яких є виявлення дефектів та пошкоджень при проведенні монтажних робіт. Про це може свідчити незмінність показників часткових розрядів обмотки та рівень коронної активності. Критерієм успішності проведеного ремонту є відсутність нових дефектів.

По даним вібраційного контролю можна встановити наступні дефекти:

- ексцентриситет зовнішньої поверхні ротора щодо осі його обертання. На спектрі вібросигналу цей дефект проявляється у посиленні першої гармоніки частоти обертання ротора. Посилюється частота електромагнітної сили, навколо якої іноді з'являються бічні гармоніки, зрушені одна від одної на частоту ковзання ротора, помножену на кількість полюсів;

- обрив або порушення контакту в стрижнях або в кільцях "білячій клітині" ротора АД. Зазвичай проявляється поблизу частоти обертання валу ротора і супроводжується появою бічних смуг, зрушених щодо гармоніки частоти обертання ротора на інтервал, рівний добутку частоти ковзання на кількість полюсів двигуна;

- ослаблення пресування всього пакета сталі ротора або лише в області зубців. Супроводжується посиленням другої гармоніки напругі мережі або, при ослабленні сталі в області зубців, появою пазової частоти ротора з бічними смугами, зрушеними один від одного на частоту, що дорівнює подвійній частоті живлення.

Усунення та попередження пошкоджень торцевої зони осердя статора при планових ремонтах.

При планових ремонтах ТГ, які вже мали дефекти осердя, зазвичай проводиться ретельне обстеження торцевих зон, виявляються нагріті і ослаблені пакети, знайдені дефекти усуваються. Слід зазначити, що у ряді випадків випробування осердя на нагрівання при індукції 1,4 Тл при неущільненій торцевій зоні не виявляють нагрівання дефектних ділянок. У цьому випадку результати випробування можуть виявитися не коректними.

Зазвичай відновлення щільності пресування крайніх пакетів осердя статора робиться шляхом місцевого ущільнення пакетів за допомогою встановлення сталевих та склотекстолітових клинів. При цьому необхідно контролювати відсутність замикань при ущільненні зубців. Для цих цілей найкращим методом може бути визнаний контроль активної сталі при малих індукціях намагнічування.

Виконаний ремонт не виключає можливості ослаблення пресування та ушкодження окремих пакетів при подальшій експлуатації ТГ, якщо середній тиск пресування знизився до неприпустимих значень. Використання коротких клинів у ряді випадків посилює дефект, оскільки за зоною ущільнення утворюється проміжок, в якому неущільнена частина листів може вібрувати. Відомі випадки сколу листів у цих зонах з подальшим пошкодженням ізоляції статорної обмотки.

Ступінь зниження тиску пресування активної сталі в зубцевій зоні може контролюватись шляхом вимірювання швидкості проходження ультразвуку низької частоти по довжині пакета активної сталі, що слід робити не тільки перед усуненням нещільностей на окремих дефектних ділянках, але і після ремонту для оцінки його

ефективності. При масовій появі ділянок з ослабленою пресуванням по колу торцевої зони, що можливо при значному зниженні середнього тиску пресування, місцеві ущільнення пакетів будуть неефективні, і слід розглянути заходи щодо відновлення необхідного середнього тиску. Для уточнення цього питання доцільно визначити залишковий тиск пресування у торцевій зоні осердя.

Наближену оцінку залишкового тиску можна зробити в процесі ремонту за величиною залишкових зусиль у стяжних ребрах, які визначаються наступним чином: кілька ребер, розташованих симетрично по колу, розвантажуються шляхом демонтажу гайок, що зв'язують ребра з натискною плитою; при цьому вимірюються аксіальні деформації стяжних ребер. При вимірах слід мати на увазі, що деформація ребра, який розвантажуються, в торцевій зоні розподілена по довжині нерівномірно, значно зменшуючись в напрямку від торця до середини. Це пояснюється досить жорстким пружно-фрикційним зв'язком шихтованих пакетів з ребрами по довжині останніх. Впливає також приварювання ребер до полиць (перегородок) корпусу статора, але значно меншою мірою, оскільки ці перегородки мають високу податливість в аксіальному напрямку.

Література

1. Бандурян Б. Б., Федоренко Г. М., Остапчук Л. Б., Саратов В. О. Контроль та діагностика технічного стану основного електротехнічного та теплового обладнання АЕС, ТЕС і ГЕС на основі тепловізійних технологій. // Київ: Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2006. – Вип. 4. – С. 125-131. [Електронний ресурс]. Адреса доступу: https://www.ispnpp.kiev.ua/wp-content/uploads/2017/2006_04/c125.pdf
2. Будстандарт: РД 34.45.605-72 Временные указания по технологии перемотки обмоток роторов турбогенераторов ТВВ-165-2, ТВВ-200-2, ТВВ-320-2. [Електронний ресурс]. Адреса доступу: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=71961
3. Васілевський О. М., Ігнатенко О. Г. Нормування показників надійності технічних засобів: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 160 с. [Електронний ресурс]. Адреса доступу: <https://core.ac.uk/download/pdf/52159027.pdf>
4. Вишнівський В. В., Василенко В. В., Гніденко М. П. та ін. Основи надійності та діагностики інформаційних систем. Навчальний посібник підготовлено для самостійної роботи студентів та аспірантів вищих навч. закладів. – Київ: ННІТ ДУТ, 2020. – 184 с.
5. ДСТУ 16372-93 (МЕК 34-9-90) Машини електричні обертові. Допустимі рівні шуму. [Електронний ресурс]. Адреса доступу: <http://surl.li/qrrpmw>
6. Губаревич О. В. Надійність і діагностика електрообладнання: Підручник. – Севе-родонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2016. – 248 с. [Електронний ресурс]. Адреса доступу: <http://surl.li/qqcyn>
7. Діагностика і надійність електромеханічного обладнання промислових підприємств і електростанцій. Методичні вказівки та контрольні завдання з дисципліни «Надійність і діагностика» для студентів всіх форм навчання по спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Укладач Шевченко В. В. – Харків: НТУ «ХП», 2023. – 50 с. [Електронний ресурс]. Адреса доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/5371bf58-7d4c-4c7f-b27d-41210665a989>
8. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку
9. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення (2273). – Київ: Держстандарт України, 1994. – 91 с. [Електронний ресурс]. Адреса доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25034
10. Закладний О. О. Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем: монографія. – Київ: Видавництво «Лібра», 2013. – 195 с. [Електронний ресурс]. Адреса доступу: <https://ela.kpi.ua/items/f1b27717-acd0-4462-a06a-5e0822ba54e5>

11. Журахівський А. В., Казанський С. В., Матеєнко Ю. П., Пастух О. Р. Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж: підручник. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – 457 с. [Електронний ресурс]. Адреса доступу: <https://ela.kpi.ua/items/daf1fdc22-21eb-4315-b1a9-24580381a30c>

12. Застосування засобів технічного контролю і діагностики. [Електронний ресурс]. Адреса доступу: <http://surl.li/qproh>

13. Звіт про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, у 2018 р.: Постанова НКРЕКП № 440 від 29.03.2019. – Київ: НКРЕКП, 2018. – 304 с.

14. Зіа І., Курач Т. Ю. Аналіз самозапуску асинхронного двигуна при несиметрії напруги в енергосистемі. // Наукові вісті НТУУ "КПІ": Енергетика та нові енергогенеруючі технології. – 2008. – № 5. – С. 33-38.

15. Казанський С. В. Надійність електроенергетичних систем: практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 67 с.

16. Кенсицкий О. Г., Ключников А. А., Федоренко Г. М. Безопасность, надежность и эффективность эксплуатации электротехнического и электроэнергетического оборудования блоков АЭС: монография. – Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС, 2009. – 240 с.

17. Козаков Ю. Б., Морозов А. М., Океанський А. П., Шумілов Є. А. Метод діагностики дефектів синхронних генераторів щодо змін зовнішнього електромагнітного поля. // Вісник Іванівського державного енергетичного університету. – 2019. – № 1. – С. 55-61.

18. Ключников О. О., Федоренко Г. М., Виговський О. В. Прогнозування термодфектів в обмотці та осерді статора потужних турбогенераторів блоків АЕС та їхня локалізація за допомогою інтелектуальних методів і засобів // Київ: Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – 2011, вип. 17. – С. 17-26.

19. Конспект лекцій з дисципліни «Надійність і діагностика електрообладнання» для студентів за напрямом 6.050702 “ Електромеханіка”/ Укладач: к.т.н., доцент Ключев О.В. - Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013, 143 с. [Електронний ресурс]. Адреса доступу: <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/6/30/6-30-kl7.pdf>

20. Кустов В. Ф. Основи теорії надійності та функційної безпечності систем залізничної автоматики: Навчальний посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. - 218 с.

21. Кутін В. М., Ілюхін М. О., Кутіна М. В. Діагностика електрообладнання: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 161 с.

22. Лозинський О. Ю., Марущак Я. Ю., Костробій П. П. Розрахунок надійності електроприводів: Підручник, – Львів, вид. ДУ «Львівська політехніка», 1996. – 234 с
23. Лут М. Т., Мірошник О. В., Трунова І. М. Основи технічної експлуатації енергетичного обладнання АПК. – Харків: Факт, 2008. – 438 с.
24. Матусевич О. О. Наукові напрями підвищення експлуатаційної надійності електрообладнання тягових підстанцій з урахуванням його фактичного технічного стану. [Електронний ресурс]. Адреса доступу: <http://surl.li/qpptf>
25. Міністерство палива та енергетики України. НЕК «Укренерго». Офіційний сайт [Електронний ресурс]. <http://www.ukrenergo.energy.gov.ua/ukrenergo>
26. Minko A. N., Shevchenko V. V. Improvement of heat exchange systems of turbogenerators in order to increase their efficiency // Moldova: Kishinev. - Problemele energeticii regionale. – 2019. – № 1(39). – Р.р. 80-89. doi: 10.5281/zenodo.2650425
27. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне – Київ: Міненерговугілля України, 2017. – 617 с. [Електронний ресурс]. Адреса доступу: <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf>
28. Про затвердження Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів. Наказ Міністерства палива та енергетики України 25.07.2006 № 258, зареєстровано в Міністерстві юстиції України 25 жовтня 2006 р. за № 1143/13017 (Із змінами, внесеними згідно з наказами Міністерства енергетики та вугільної промисловості 11.01.2017 № 7).
29. Циценков Д. В., Іванов О. Б., Бобров О. В. та інш. Проектування електричних машин: навч. посібник: Дніпр: НТУ «Дніпровська політехніка», 2020. – 408 с.
30. Рубаненко О. О., Янович В. П., Гунько І. О. Дослідження причин пошкодження синхронних генераторів. // Кременчук: КНТУ. – 2019. – Вип. 5(277). – С. 176-179.
31. Севостьянов І. В. Експлуатація а обслуговування машин. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 127 с.
32. Сивокобиленко В. Ф., Лебедєв В. К. Перехідні процеси в системах електропостачання власних потреб електростанцій. – Донецьк: РВА Дон НТУ, 2002. – 136 с.
33. Сивокобиленко В. Ф., Лисенко В.А. Аналіз поведінки синхронних двигунів у режимах перемикання на резервне живлення. // Донецьк: Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика». – 2020. – №2(23). – С. 28-37.
34. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 Норми випробування електрообладнання. Видання офіційне. – 2007. – 271 с.

35. Степанов В. І. Надійність електроенергетичних систем: практикум: Національний транспортний університет. – 2020. – 67 с. [Електронний ресурс]. Адреса доступу: <https://studfile.net/preview/5609068/>

36. Трунова І. М. Методичні вказівки для виконання практичних робіт з дисципліни «Надійність технічних пристроїв» для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної та заочної форми навчання, спеці. 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Харків: Харків. нац. техн. у-т сіл. госп-ва ім. П. Василенка. – 2020. – 32 с.

37. Чорний О. П., Зачепа Ю. В., Титюк В. К., Чорна О. А. Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів: навч. посібник. – Кременчук: ЧП Щербатих А. В., 2019. – 122 с.

38. Федоренко Г. М., Кенсицький О. Г. Науково-методичні засади оптимізації структури генеруючих потужностей в електроенергетиці України // Гідроенергетика України. – 2009. – № 1. – С. 7-10.

39. Burykin O. B., Malogulko Yu. V., Tomashevskiy V. V. Optimization of the functioning of the renewable energy sources in the local electrical systems. // Journal Przegląd Elektrotechniczny. – 2017. – № 3. – Pp. 97-103. doi: 10.15199/48.2017.03.23.

41. Gabor Csaba. “Generator diagnostics from failure modes to risk for forced outage”. 2018 [Online]. Available: <https://irispower.com/wp-content/uploads/2018/06/Generator-diagnostics-From-failure-modes-to-riskforced-outage.pdf>.

42. Shevchenko Valentina V. Basics of Electric Power Engineering. Beginning Training manual for students of electrical engineering specialty 141 "Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". – Khariv: 2022. – 256 p. Available: <https://zenodo.org/records/6465750>

43. Shevchenko V. V., Minko A. N., Dimov M. Improvement of Turbogenerators as a Technical Basis for Ensuring the Energy Independence of Ukraine // Kharkiv: NTU "KhPI". – Electrical Engineering & Electromechanics. – 2021, no. 4. – Pp. 19-30. doi: 10.20998/2074-272X.2021.4.03

ЗМІСТ

Скорочення, що використовуються в конспекті	3
РОЗДІЛ 1. Лекція 1-3.	
ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ	4
1. Поняття надійності в теорії електричних машин	4
1.1 Показники надійності	4
1.2. Структурна надійність електрообладнання. <i>Service-factor</i> в електромашинобудуванні	9
1.2.1. Властивості, які характеризують якість обладнання	9
1.2.2. Відмови в теорії надійності. Інтенсивність відмов електрообладнання	10
1.2.3. Структурна надійність ЕО	15
1.3. Розрахунки показників безвідмовності обладнання. Вплив з'єднань елементів на надійність ЕО та методи їх розрахунку	18
1.3.1. Розрахунки показників безвідмовності обладнання	18
1.3.2. Системи з послідовним з'єднанням елементів	19
1.3.3. Системи з паралельним з'єднанням елементів	21
1.3.4. Системи з паралельно-послідовним з'єднанням елементів	22
1.3.5. Системи типу " <i>m з n</i> "	23
1.3.6. Перетворення схем складних комбінованих систем	27
РОЗДІЛ 2. Лекції № 4-5.	
РОЗРАХУНКИ ТА ЗАСОБИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ	30
2.1. Загальні відомості про методи оцінки надійності	30
2.1.1. Ймовірність появи подій, які впливають на надійність	30
2.1.2. Засоби оцінки надійності об'єктів	32
2.2. Шляхи і засоби забезпечення надійності ЕО	34
2.3. Забезпечення надійності системи в залежності від навантаження та заданої міцності	39
2.4. Встановлення техніко-економічної ефективності прийнятого рішення з забезпеченням надійності об'єкта	40
РОЗДІЛ 3. Лекції № 6-7.	
ВПЛИВ МЕХАНІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПОКАЗНИКИ НАДІЙНОСТІ ОБЛАДНАННЯ. СИСТЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ І ДІАГНОСТИКИ	43

3.1. Поняття експлуатаційної витривалості обладнання	43
3.1.1 Утрата працездатності машини внаслідок втоми матеріалу	43
3.1.2. Основні показники безвідмовності роботи об'єктів	45
3.2. Система планово-попереджувальних ремонтів (Система ППР)	47
3.3. Технічне обслуговування та ремонт електрообладнання з урахуванням технічного стану	54
РОЗДІЛ 4. Лекції № 8-9.	
ВПЛИВ КОНСТРУКЦІЙ І ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН НА ЇХ НАДІЙНІСТЬ	56
4.1. Технічні характеристики, що повинні враховуватись під час проектування ЕМ	56
4.1.1. Загальні умови забезпечення надійності ЕМ при проектуванні	56
4.1.2. Особливості проектування ЕМ в залежності від режиму роботи	57
4.2. Особливості конструкції електричних машин, що визначаються умовами їх експлуатації	60
4.2.1. Захист ЕМ від зовнішніх впливів	60
4.2.2. Вплив кліматичних умов і умови розміщення ЕМ на їх надійність	65
4.2.3. Підтримка надійності ЕМ під час експлуатації шляхом забезпечення достатнього охолодження	67
4.2.4. Конструктивні групи ЕМ	71
4.3. Електротехнічні матеріали, що застосовують в ЕМ	76
РОЗДІЛ 5. Лекції № 10-11.	
ВПЛИВ СТРОКУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ НА ЙОГО НАДІЙНІСТЬ	85
5.1. Експлуатаційна надійність ЕО	85
5.2. Причини та види пошкоджень ЕО, що впливають на його надійність	89
5.3. Основні шляхи підвищення надійності ЕО з урахуванням процесів старіння	92
5.4. Врахування амортизації ЕО для оцінки рентабельності проведення ремонтів	98

РОДІЛ 6. Лекції № 12-13.

ПІДТРИМАННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ. ВПЛИВ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ (на прикладі асинхронного двигуна)	102
6.1. Визначення експлуатаційних ушкоджень і відмов ЕО	102
6.2. Методи підвищення експлуатаційної надійності ЕО	104
6.3. Покращення пускових характеристик асинхронних короткозамкнених двигунів як засіб енергозбереження та підвищення їх надійності	111
6.4. Вплив конструктивних рішень на надійність електрообладнання. Вирішення проблеми пуску асинхронних двигунів з мідною обмоткою ротора, як показник підвищення експлуатаційної надійності	116

РОЗДІЛ 7. Лекції №14-15.

ДІАГНОСТИКА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ І ЗАСОБИ ПРОВЕДЕННЯ ДІАГНОСТИКИ	123
7.1. Класифікація засобів діагностування електротехнічного обладнання ..	123
7.2. Методи діагностики електричного обладнання	128
7.3. Діагностика АД по спектрограмам струмів статора	139
7.4. Прогнозування залишкового ресурсу асинхронних двигунів	144

РОЗДІЛ 8. Лекція №16

ПОДОВЖЕННЯ СТРОКУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЗА РАХУНОК ДІАГНОСТИКИ ТА ОБСЛУГОВУВАННЯ	147
8.1. Комплексне обстеження електрообладнання для продовження строку експлуатації	147
8.2. Типові дефекти турбогенераторів та можливості попередження їх відмов за допомогою діагностування	152
8.3. Передремонтна діагностика та післяремонтні випробування ТГ	161
Література	165

Учбове видання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни «Надійність і діагностика»
для студентів всіх форм навчання за спеціальністю
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Укладач Валентина ШЕВЧЕНКО

Відповідальний за випуск проф. Володимир МІЛИХ
Роботу рекомендував до друку проф. Володимир МІЛИХ

В авторській редакції

План 2023 р., поз. 70

Підп. до друку _____.
Гарнітура *Times New Roman*. Обсяг – 7,9 др. арк.

Видавничий центр НТУ «ХП».
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2