

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ДІАГНОСТИКА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОГО УСТАТКУВАННЯ ТЕПЛОВИХ ТА АТОМНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ: КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю
144 «Теплоенергетика»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Діагностика теплоенергетичного устаткування теплових та атомних електричних станцій: конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 144 «Теплоенергетика» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В. А. Пешко, О. Ю. Черноусенко, Д. В. Риндюк. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,6 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 81 с.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 10 від 18.06.2020 р.) за поданням Вченої ради Теплоенергетичного факультету (протокол № 10 від 25.05.2020 р.)

Електронне мережне навчальне видання

ДІАГНОСТИКА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОГО УСТАТКУВАННЯ ТЕПЛОВИХ ТА АТОМНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Укладачі: *Пешко Віталій Анатолійович*, канд. техн. наук., доц.
Черноусенко Ольга Юріївна, докт. техн. наук, проф.
Риндюк Дмитро Вікторович, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний редактор *Бутовський Леонід Сергійович*, канд. техн. наук, доц.

Рецензент: *Усатий Олександр Павлович*, докт. техн. наук, проф.

Забезпечення надійної та безаварійної експлуатації енергетичного обладнання є стратегічно важливою задачею для енергетичного сектору промисловості. Ця проблема вирішується із застосуванням методів технічної діагностики та контролю. Мета вивчення даної дисципліни – набуття магістрантами знань та навичок, щодо основних методів контролю енергетичного обладнання та типових приладів для діагностування.

Видання може бути корисним для студентів профільних спеціальностей, наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються експлуатацією, ремонтом, діагностуванням та проектуванням обладнання електричних станцій.

ЗМІСТ

Вступ	3
РОЗДІЛ 1. ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА ТА КОНТРОЛЬ. МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ	4
Лекція 1. Технічна діагностика та її основні поняття. Мета та завдання технічної діагностики. Технічний контроль	4
Лекція 2. Основи технічного контролю енергетичного обладнання. Стратегії технічного обслуговування. Методи діагностування	11
Лекція 3. Вірогіднісні методи діагностування та прогнозування технічного стану	17
Лекція 4. Акустична та візуальна інтро- та ендоскопія	22
Лекція 5. Теплові методи діагностування	31
Лекція 6. Віброметрія як метод технічного діагностування обертового обладнання	40
Лекція 7. Види неврівноваженості обертового обладнання та методи його балансування	49
РОЗДІЛ 2. НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ОСНОВНОГО МЕТАЛУ, ГРАНИЧНИЙ СТАН ТА РЕСУРС ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ	61
Лекція 8. Методи неруйнівного контролю основного металу та зварних швів енергетичного обладнання	61
Лекція 9. Прогнозування довговічності експлуатації енергетичного обладнання. Граничний стан та індивідуальний ресурс	72
Перелік посилань	80

Вступ

Забезпечення надійної та безаварійної експлуатації енергетичного обладнання є стратегічно важливою задачею для енергетичного сектору промисловості. Ця проблема вирішується із застосуванням методів технічної діагностики та контролю.

Устаткування теплових і атомних електростанцій об'єднане єдиним технологічним циклом, проте процеси, що протікають в цьому обладнанні можуть суттєво відрізнитись. З цієї причини існує величезна кількість різних методів діагностування, область застосування яких може бути невеликою. В даній дисципліні передбачено розгляд найбільш типових і поширених методів контролю, вивчення діагностичних ознак обладнання, приладів для технічного діагностування та інше.

В даному навчальному посібнику наведено основні поняття та терміни в технічній діагностиці, засоби контролю та стратегії технічного обслуговування. Розглядаються найбільш часто вживані на теплових і атомних електростанціях методи діагностування, а саме: вірогіднісні та статистичні методи, візуальні та акустичні, термометричні та тепловізійні, віброметричні, а також методи неруйнівного контролю основного металу та зварних швів. Детальна увага приділена прогнозуванню довговічності експлуатації енергетичного обладнання та питанням граничного стану і ресурсних показників устаткування.

Вивчення даних питань є важливим для магістрантів теплоенергетичних спеціальностей, оскільки дозволить отримати знання, щодо зв'язку певних діагностичних ознак з можливими технічними станами, знати які методи діагностування слід використовувати для типових експлуатаційних ситуацій на ТЕС і АЕС, користуватись спеціальними приладами для технічного контролю, враховувати отримані знання при проектуванні нового обладнання, визначати допустимий час та умови експлуатації енергетичного обладнання на ТЕС і АЕС, тощо.

РОЗДІЛ 1. ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА ТА КОНТРОЛЬ.

МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ

Лекція 1. Технічна діагностика та її основні поняття. Мета та завдання технічної діагностики. Технічний контроль

Технічна діагностика – область знань, що охоплює теорію, методи та засоби встановлення технічного стану досліджуваного об'єкта.

Дослідження технічного стану обладнання є *предметом технічної діагностики*, мета якої – вивчення проявів (ознак) різних технічних станів, розробка методів їх визначення, а також принципів побудови і використання систем діагностування.

Цілями діагностики є своєчасне виявлення порушень функціонування і працездатності об'єктів і запобігання серйозних наслідків можливих відмов.

Будь-який об'єкт діагностування може знаходитися в одному з наступних *технічних станів* (рис. 1.1):

- 1) справний або несправний;
- 2) працездатний або непрацездатний;
- 3) стан правильного або неправильного функціонування.

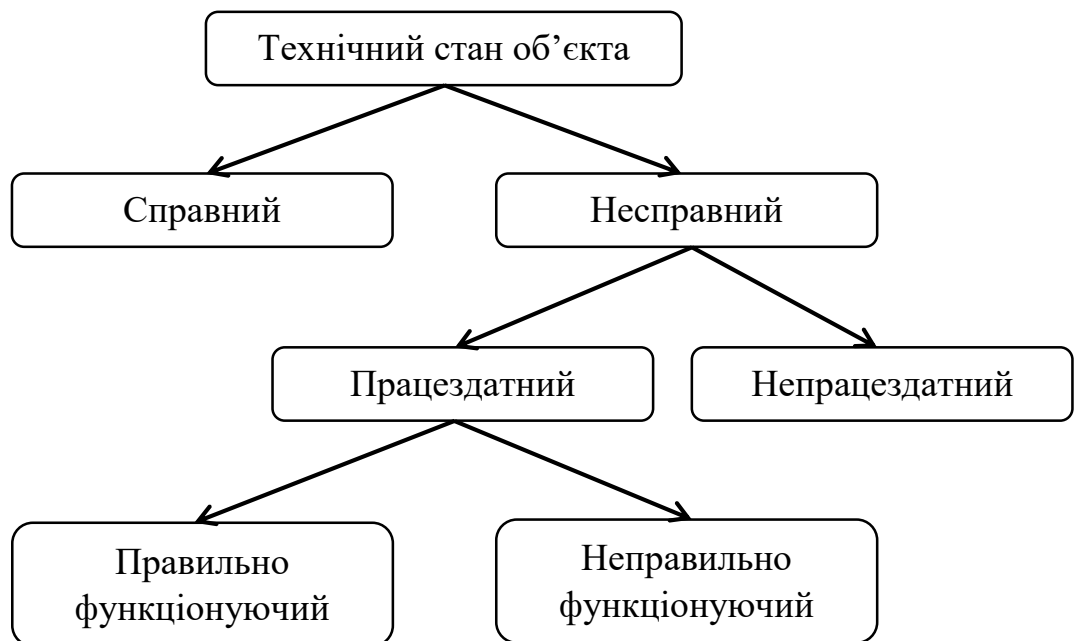


Рис. 1.1. Технічні стани об'єкта

Об'єкт, що задовольняє всім вимогам нормативно-технічної документації, є *справним*. Справний об'єкт знаходиться в справному технічному стані. Таким чином, справний об'єкт повністю задовольняє всім технічним вимогам.

Несправний об'єкт – той, що має дефект.

Дефект – будь-яка невідповідність властивостей об'єкта заданим, необхідним або очікуваним його властивостями.

Для несправного об'єкта можливі два технічних стани: працездатний і непрацездатний. *Працездатний* об'єкт – той, у якого технічним вимогам відповідають лише властивості, що характеризують здатність виконання його заданих (головних) функцій. Перехід справного об'єкта в працездатний стан називається *пошкодженням*. Перехід працездатного об'єкта в непрацездатний стан називається *відмовою*.

Для кращого розуміння різниці між справним-несправним та працездатним-непрацездатним технічним станом об'єкта розглянемо такий приклад. Головна функція радіоприймача – приймання електромагнітних хвиль радіодіапазону з наступним перетворенням інформації, яка у них зберігається до звукового стану. При цьому радіоприймач може бути обладнаний різними додатковими функціями, такими як індикатор (світлодіод) який загоряється коли пристрій ввімкнений. Згідно з наведеною вище термінологією, наявність будь-якого дефекту переводить об'єкт у несправний стан. Тому, якщо у радіоприймача не горить сигнальна лампочка – він є несправним. Проте свою основну функцію – сприймати радіохвилі та транслювати звук він все ще виконує, тому є працездатним. Таким чином, в даному прикладі радіоприймач є одночасно працездатним та несправним.

Правильно функціонуючим є об'єкт, значення параметрів якого в даний момент часу знаходяться в необхідних межах. Об'єкт може також знаходитися в несправному стані і в стані неправильного функціонування.

В умовах експлуатації необхідно підтримувати (як мінімум) працездатний стан. Це забезпечується завдяки проведенню *технічного обслуговування* (ТО) та *ремонтів*. Головна задача технічного обслуговування – контроль стану обладнання та його обслуговування з метою підтримки справності або працездатності. Завдання ремонту – відновлення справності або працездатності.

Головна задача технічної діагностики – пошук та своєчасне виявлення дефектів, тобто визначення їх наявності, характеру та місця знаходження. Виявлення дефекту – встановлення факту наявності дефекту у об'єкта. Пошук дефекту – зазначення з певною точністю його місцезнаходження в об'єкті.

Призначення технічної діагностики полягає в підвищенні надійності об'єктів на етапі експлуатації, а також запобігання виробничого браку на етапі виготовлення. Вимоги, яким повинен задовольняти об'єкт, визначаються відповідною нормативно-технічною документацією.

Технічний контроль – перевірка відповідності продукції або процесу встановленим технічним вимогам. Технічний контроль здійснюється на різних стадіях життєвого циклу виробу.

Технічний контроль і діагностика вирішують наступні завдання:

1. Створення виробу придатного до контролю.
2. Розробка системи контрольних засобів.
3. Розробка методів обробки та аналізу контрольньо-вимірювальної інформації.
4. Обґрунтування і реалізація способів подання діагностичної інформації.
5. Розробка рекомендацій щодо використання результатів контролю і діагностики і прийняття необхідних рішень.

Засоби діагностування

Процеси виявлення і пошуку дефектів здійснюються при визначенні технічного стану об'єкта і об'єднуються терміном «діагностування».

Розрізняють системи тестового і функціонального діагностування (рис. 1.2). У системах тестового діагностування на об'єкт подаються спеціально організовані тестові впливи, і вивчаються результати їх дії. У системах функціонального діагностування використовується тільки робочий вплив.

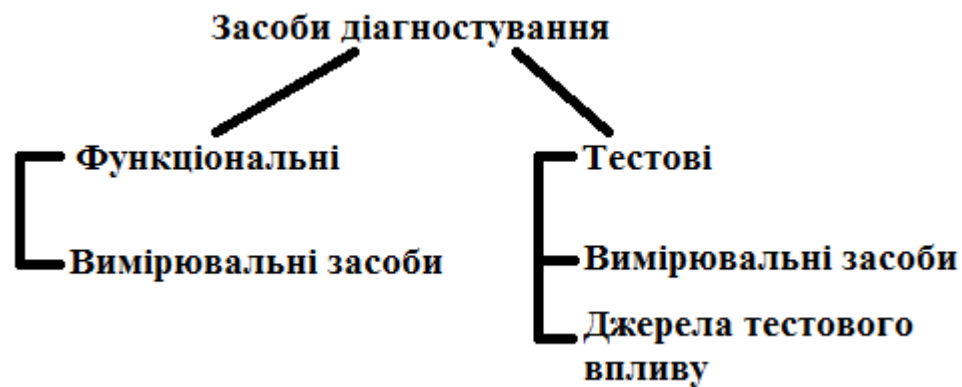


Рис. 1.2. Засоби технічного діагностування

Діагностика об'єкта здійснюється відповідно до алгоритму діагностування. *Алгоритм діагностування* визначає обсяг, послідовність і взаємозв'язок випробувань об'єкта. Алгоритм діагностування складається з елементарних перевірок об'єкта, а також правил, що встановлюють послідовність перевірок і правил аналізу результатів перевірок. Алгоритм встановлюється на основі діагностичної моделі об'єкту.

За результатами діагностики ставиться *діагноз*, який містить вказівку на виявлений стан об'єкта, наявність дефектів і їх місце розташування.

Будь-яка система діагностування є специфічною системою управління або контролю. До систем управління відносять системи тестового діагностування, а до систем контролю, системи функціонального діагностування.

При вирішенні задачі діагностування використовується формалізована модель об'єкта – його опис в аналітичній, графічній, табличній або іншій формі. Явна модель містить опис справного об'єкта і опис кожної з його

несправних модифікацій. Неявна модель передбачає наявність опису лише одної модифікації.

Діагностична модель створюється на основі вивчення схемно-технічних рішень об'єкта і досвіду його експлуатації. Модель включає:

- класифікацію можливих дефектів;
- виявлені ознаки появи дефектів;
- методи виявлення ознак.

Ознаки дефектів виявляються в зміні спостережуваних параметрів (характеристик) об'єкта. Тому необхідним є встановлення діагностичних параметрів і їх кількісного або якісного зв'язку з наявністю і ступенем розвитку дефекту. Значення діагностичних параметрів, встановлені при випробуваннях, характеризують технічний стан об'єкта в даний момент часу. Якість діагностування в значній мірі залежить від правильності вибору діагностичних ознак.

В діагностиці для об'єкта часто використовується термін *контролепридатність* – властивість об'єкта, що характеризує його пристосованість до проведення контролю заданими засобами.

Рівень контролепридатності об'єкта визначає ступінь ефективності вирішення завдань тестового контролю. Контролепридатність забезпечується в результаті перетворення структури об'єкта, що перевіряється до вигляду, зручного для діагностування. Наприклад, до складу об'єкта вводять додаткову апаратуру і передбачають додаткові контрольні точки.

Прогнозування технічних станів

При визначенні технічного стану об'єкта можна виділити три типи вирішуваних завдань:

1. Визначення поточного стану об'єкта - завдання діагностування.
2. Передбачення технічного стану об'єкта в майбутній момент часу - завдання прогнозування.

3. Визначення технічного стану об'єкта для минулих моментів часу - завдання генезису (наприклад, розслідування аварії).

В результаті можна розрізнити *технічну діагностику*, *технічне прогнозування* і *технічну генетику*.

Задача прогнозування може бути описана лінійною моделлю системи прогнозування (рис. 1.3).

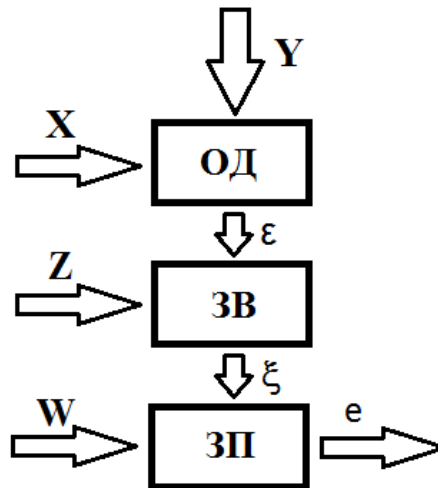


Рис. 1.3. Лінійна модель системи прогнозування

В дану лінійну модель входять наступні основні складові: ОД – об'єкт діагностування; ЗВ – засоби вимірювання; ЗП – засоби прогнозування. При цьому:

X – вектор, що описує фактори, які визначають незворотні процеси деградації фізико-хімічних властивостей об'єкта;

Y – вектор, що описує випадкові перешкоди;

ε – вектор прогнозованих параметрів, складові якого в першу чергу залежать від X ;

Z – вектор похибок вимірювання прогнозованих параметрів;

ξ – вектор вимірюваних значень прогнозованих параметрів;

W – похибки прогнозування;

e – майбутній технічний стан.

Модель процесу прогнозування носить вірогіднісний характер.

$$e = f(X, Y, Z, W) \quad (2.1)$$

Найбільш простою моделлю є явна аналітична модель в якій прогноз повністю визначається значеннями факторів, що визначають деградацію фізико-хімічних властивостей об'єкта (ідеальна модель).

$$e = f(X) \quad (2.2)$$

Здебільшого, задача описання моделі досить складна і не має загального розв'язку. За наявності прогнозу можна обрати критерій придатності і призначити його граничне значення, при досягненні якого, подальше використання об'єкта або неможливе, або недоцільне.

Найпростішими критеріями придатності можуть бути, наприклад, абсолютні значення, або швидкості зміни абсолютних значень інтенсивності відмов, або інших прогнозованих параметрів.

Найбільш складними є питання обґрунтованого призначення критерія придатності, а також вибір прогнозованих параметрів. Теоретично обґрунтовані відповіді на ці питання вдасться отримати не завжди і лише для простих об'єктів.

Контрольні запитання до лекції I

- 1. Наведіть поняття технічної діагностики. Що є її предметом?*
- 2. Які технічні стани об'єкта діагностування Ви знаєте? В чому відмінність між ними? Наведіть приклади.*
- 3. Надайте поняття дефекту.*
- 4. Що таке технічний контроль? Які завдання технічного контролю?*
- 5. Які засоби діагностування Ви знаєте? Що таке контроле-придатність?*
- 6. Поясніть, що таке технічна генетика та технічне прогнозування.*

***Лекція 2. Основи технічного контролю енергетичного обладнання.
Стратегії технічного обслуговування. Методи діагностування***

Основи технічного контролю енергетичного обладнання

Одним із ключових елементів системи діагностики є експлуатаційний контроль, під час проведення якого визначаються необхідні дані для вирішення задачі прогнозування. Залежно від характеру та типу задач діагностування, розрізняють контроль з прогнозуванням значень показників якості об'єкта у наступні моменти часу або контроль з прогнозуванням часу знаходження відмови.

Контроль це сукупність процедур, що необхідні для прийняття рішення про забезпечення нормальної експлуатації об'єкта. Періодичність контролю встановлюється швидкістю розвитку дефектів.

Зазвичай цілям діагностики відповідає контроль за прогнозуючим параметром, тобто за таким параметром, який найбільш тісно пов'язаний з відмовою. Зазвичай цей зв'язок носить стохастичний характер. Достовірність прогнозування залежить від того, наскільки тісний цей зв'язок.

Діагностування дає дані про стан об'єкта в момент контролю, тобто точкову оцінку. Для прогнозування необхідні знання, щодо процесу зміни технічних характеристик та її динаміка.

Сучасна система діагностування повинна, в першу чергу, бути системою раннього виявлення дефектів, що розвиваються. Для створення ефективної системи контролю необхідно:

1. На підставі досвіду експлуатації виявити дефекти, що призводять до відмов, причини їх виникнення та розвитку.
2. Визначити діагностичні параметри об'єкта, зміна яких пов'язана з виникненням і розвитком дефектів.
3. Виявити зв'язок між значеннями параметрів і технічним станом обладнання. Встановити граничні значення параметрів, що характеризують перехід об'єкта в інший клас технічних станів.

4. Розробити методи вимірювання цих параметрів в умовах експлуатації.

5. Визначити обсяг і періодичність випробувань, а також їх послідовність (алгоритм контролю).

6. Встановити критерії браку.

При контролі технічного стану енергетичного об'єкта виконується велика кількість вимірювальних операцій, за результатами яких отримується інформація про стан його параметрів. Носієм інформації про стан процесу є діагностичний сигнал, отриманий шляхом вимірювання параметрів, що контролюють, у фіксований момент часу.

Розрізняють наступні **типи технічного контролю** енергетичного обладнання:

1) *попередній контроль*, що повинен забезпечувати умови для безвідмовного перебігу експлуатаційних процесів;

2) *поточний контроль*, який забезпечує не лише безперебійну роботу обладнання, але й експлуатацію зі збереженням техніко-економічних показників роботи на необхідному рівні відповідно до технічної документації;

3) *вихідний контроль*, який призначений, головним чином, для забезпечення рівномірності та якості електричної та теплової енергії, що відпускається.

При створенні діагностичної системи для певного об'єкта вирішуються наступні завдання:

1. Вивчення функціональних властивостей об'єкта і основних параметричних залежностей.

2. Визначення найбільш ефективних методів інструментального контролю.

3. Формування діагностичних ознак на основі параметричної інформації.

4. Формування діагностичних алгоритмів на основі параметричної інформації.

5. Розробка програмно-математичного забезпечення.

6. Відпрацювання методів ідентифікації результатів діагностики.

7. Розробка методів і правил використання результатів діагностування для прийняття рішень.

Після вирішення вказаних вище завдань виконується перевірка умов працездатності енергетичного об'єкта:

$$S_i \leq S_i^f \quad (3.1)$$

де S_i – прогнозований параметр, S_i^f – його граничне значення.

Для оцінки працездатності вимірюється комплекс параметрів S_i . Ці параметри зручно перевести до безрозмірного виду:

$$\bar{S}_i(t) = \frac{S_i(t) - S_i^f}{S_{i \max} - S_i^f} \quad (3.2)$$

Тоді умовою працездатності ЕО є:

$$\bar{S}_i(t) \geq 0, \quad i = 1, 2, 3 \dots n \quad (3.3)$$

Узагальнений показник працездатності:

$$W[S(t)] = \sqrt{\frac{\prod_{i=1}^n \bar{S}_i(t)}{\sum_{i=1}^n a_i \bar{S}_i(t)}} \quad (3.4)$$

де a_i – вагові коефіцієнти.

У вихідному стані $\bar{S}_i(t) = 1$ та $W[S(t)] = 1$. По мірі наближення до граничного стану $W[S(t)] \rightarrow 0$.

Стратегії технічного контролю та обслуговування

Обсяг та вид технічного контролю, що застосовується для кожного конкретного типу енергетичного обладнання, визначається виходячи зі стратегії технічного контролю, яка обирається для цього устаткування. Оскільки різне обладнання на електричних станціях працює не в однакових умовах експлуатації та є не завжди однорідним, застосування такого підходу є виправданим, як з економічної, так і з точки зору надійності.

В технічній діагностиці розрізняють чотири основні, принципово відмінні стратегії технічного контролю та обслуговування:

1. *Стратегія ремонтів до відмови.* Є найбільш маловитратною на технічне обслуговування стратегією, однак в енергетичному секторі застосовується рідко. Може розглядатися у випадку використання численних, недорогих і мало відповідальних елементів, що експлуатуються до виходу з працездатного стану (до відмови). Не зважаючи на мінімальні експлуатаційні затрати, витрата ресурсів на ліквідацію наслідків відмов можуть бути високими.

2. *Стратегія планово-попереджувального обслуговування.* Дана стратегія повинна забезпечити безвідмовну роботу обладнання шляхом примусової заміни певних вузлів та деталей у термін, що визначається на основі статистичного аналізу відмов. Така стратегія є найбільш прийнятною для більшості мало відповідального обладнання електричних станцій.

3. *Стратегія обслуговування за технічним станом.* Ця стратегія передбачає організацію безперервного контролю та діагностики технічного стану енергетичного об'єкта, що дозволить проводити ремонтні роботи в раціональні строки та в достатньому обсязі. Ефективність застосування даної стратегії може бути еквівалентною заощадженню до 30 % від загальної вартості даного об'єкта.

4. *Стратегія виправданого ризику.* В ній передбачено визначення доцільності та можливості продовження експлуатації за певного несправного технічного стану з частковою втратою працездатності.

В залежності від обраної стратегії визначається обсяг та характер встановлення діагностичного контролю, як найбільш доцільний та раціональний для кожного конкретного типу енергетичного устаткування.

Методи діагностування енергетичного обладнання

Значний досвід в експлуатації та технічному контролі енергетичного обладнання дозволив розробити та апробувати величезну кількість методів діагностування. Часто певні методи є досить «нішовими» і застосовуються в окремих рідких випадках. В даній дисципліні передбачається розгляд найбільш типових та поширених методів діагностування в енергетиці.

1. *Вірогіднісні та статистичні методи діагностування.* Через наявність певного зв'язку між деякими експлуатаційними ознаками та діагностичними станами, вірогіднісні методи дозволяють прогнозувати можливий стан обладнання без застосування безпосереднього прямого контролю.

2. *Візуальні (оптичні) та акустичні методи* є одними з найбільш поширених, оскільки дозволяють виконувати швидкий контроль, часто, без застосування складного діагностичного обладнання. Ключовою особливістю цих методів є висока залежність точності контролю від навичок та досвіду персоналу, що здійснює огляд.

3. *Термометричні та тепловізійні методи.* Специфіка технологічних процесів на ТЕС і АЕС передбачає нагрівання його окремих елементів. Температура часто є носієм діагностичної інформації, яка і застосовується в цих методах діагностування.

4. *Віброметричні методи діагностування.* Близько половини обладнання на ТЕС і АЕС знаходиться у стані оберту. Слідкуючи за основними вібраційними показниками такого обладнання можна з високою точністю встановлювати його діагностичний стан. Окремий інтерес представляють засоби для усунення невірноваженості обертового обладнання та його балансування.

5. *Методи неруйнівного контролю основного металу та зварних швів* призначені для виявлення дефектів у вигляді тріщин, розтріскувань, промивів та багатьох інших. Ця група найбільш широко представлена різноманітними методами діагностування, такими як: ультразвукова дефектоскопія,

акустична емісія, вихрострумний контроль, радіодефектоскопія, капілярний контроль, магнітне діагностування, лазерна голографія та ін.

Контрольні запитання до лекції 2

- 1. Що таке технічний контроль? Як обирається його періодичність?*
- 2. Вкажіть типи технічного контролю, які Ви знаєте та поясніть відмінність між ними.*
- 3. Що таке граничне значення контрольного параметру? Як визначається умова працездатності об'єкта контролю?*
- 4. Які стратегії технічного контролю Ви знаєте? В чому відмінність між ними?*
- 5. Вкажіть переваги та недоліки основних стратегій технічного контролю. Які стратегії є більш доцільними для застосування на ТЕС і АЕС?*
- 6. Перерахуйте методи діагностування, які Ви знаєте.*

Лекція 3. Вірогіднісні методи діагностування та прогнозування технічного стану

Головною задачею технічної діагностики є визначення технічного стану об'єкта діагностування, як уже було зазначено. Однак часто ця задача ускладнюється умовами обмеженої діагностичної інформації через складність технологічних процесів на електричних станціях.

Теоретичним обґрунтуванням для визначення технічного стану в умовах дефіциту діагностичної інформації слугує загальна теорія розпізнавання образів. Існують два основні підходи до рішення задачі розпізнавання: вірогіднісний та детермінований.

Вірогіднісні методи є більш загальними, однак потребують технічного аудиту: попереднього накопичення, обробки та узагальнення значних обсягів діагностичної інформації.

Детерміновані методи здатні більш коротко описати процес розпізнавання, оскільки пов'язані з послідовно структурованими подіями, які є логічними і однозначними ознаками певного діагнозу.

Вірогіднісні методи діагностування набули широкого розповсюдження для оцінки технічного стану мало відповідальних елементів на електричних станціях, а також для внесення корективів до завчасно прийнятої стратегії технічного обслуговування.

Одним із найбільш поширених вірогіднісних методів діагностування є оцінка технічного стану за узагальненим законом Баєса. У теорії ймовірностей та статистиці теорема Баєса описує ймовірність події, спираючись на обставини, що могли би бути пов'язані з цією подією. Так, наприклад, поява глухого переривчатого стуку при роботі електродвигуна може свідчити про його несправний стан, а саме про порушення умов змащення підшипників.

Недоліками такого методу діагностування є необхідність попередньої обробки значної кількості статистичної інформації, а також пригнічення мало ймовірних діагнозів у порівнянні з більш поширеними.

Розглянемо узагальнену формулу Баєса у відношенні до задач технічної діагностики. Якщо наявний діагноз D_i (diagnosis) та ознака S_j (sign), які спостерігаються при даному діагнозі, тоді вірогідність одночасної появи двох залежних подій (наявність у об'єкта діагностування ознаки S_j та діагнозу D_i):

$$P(D_i \cdot S_j) = P(D_i) \cdot P(S_j|D_i) = P(S_j) \cdot P(D_i|S_j) \quad (3.1)$$

Звідси слідує формула Баєса:

$$P(D_i|S_j) = P(D_i) \cdot P(S_j|D_i)/P(S_j) \quad (3.2)$$

де $P(D_i)$ – вірогідність діагнозу D_i , що визначається за статистичними даними (апріорна вірогідність діагнозу). Тобто, якщо оглянуто N об'єктів і у N_i об'єктів встановлено технічний стан D_i , то:

$$P(D_i) = N_i/N \quad (3.3)$$

$P(S_j|D_i)$ – вірогідність появи ознаки S_j у об'єктів з технічним станом D_i . Якщо серед N_i об'єктів, що мали діагноз D_i у N_{ij} проявилась ознака S_j , то:

$$P(S_j|D_i) = N_{ij}/N_i \quad (3.4)$$

$P(S_j)$ – вірогідність появи ознаки S_j у всіх об'єктах незалежно від стану (діагнозу) об'єкта.

Якщо з загального числа N ознаку S_j було діагностовано у N_j об'єктів, тоді вірогідність появи цієї ознаки:

$$P(S_j) = N_j/N \quad (3.5)$$

Для встановлення діагнозу, додатковий розрахунок значення $P(S_j)$ не потрібен.

Величина $P(D_i|S_j)$ – вірогідність діагнозу D_i для об'єкта діагностування, у якого вже встановлено наявність ознаки S_j .

Якщо діагностування проводилось за комплексом ознак S , що включає ознаки S_1, S_2, \dots, S_v слід використовувати узагальнену формулу Баєса. Кожна з

ознак S_j може мати m розрядів. В результаті діагностування може бути відома реалізація ознаки $S_j' = S_{jS}$ і всього комплексу ознак S' . Тоді формула Баєса для комплексу ознак:

$$P(D_i|S') = P(D_i) \cdot P(S'|D_i)/P(S') \quad (3.6)$$

де $P(D_i|S')$ – вірогідність діагнозу D_i після того, як стали відомими результати діагностування за комплексом ознак S' ;

$P(D_i)$ – попередня вірогідність діагнозу D_i .

В теорії надійності прийнято вважати, що система знаходиться лише в одному з вказаних станів, тому за загальною теорією ймовірностей:

$$\sum_{z=1}^n P(D_z) = 1 \quad (3.7)$$

На практиці ж, об'єкти діагностування досить часто мають кілька діагностичних станів D_1, D_2, \dots, D_z , при чому деякі можуть існувати у поєднанні один з одним. В такому випадку узагальнена формула Баєса матиме вигляд:

$$P(D_i|S') = [P(D_i) \cdot P(S'|D_i)] / [\sum_{z=1}^n P(D_z) \cdot P(S'|D_z)] \quad (3.8)$$

При цьому, варто враховувати, що ознаки можуть бути як залежними одна від одної, так і незалежними.

У випадку діагностування залежних ознак, вірогідність появи їхнього комплексу S' при діагностичному стані D_i :

$$P(S'|D_i) = P(S_1'|D_i) \cdot P(S_2'|S_1' \cdot D_i) \cdot \dots \cdot P(S_v'|S_1' \cdot \dots \cdot S_{v-1}' \cdot D_i) \quad (3.9)$$

А при діагностуванні незалежних ознак:

$$P(S'|D_i) = P(S_1'|D_i) \cdot P(S_2'|D_i) \cdot \dots \cdot P(S_v'|D_i) \quad (3.10)$$

Розглянемо приклад застосування вірогіднісного методу оцінки діагностичного стану за формулою Баєса. На електростанції, що має в своєму складі декілька енергоблоків потужністю 200 МВт, проводиться діагностування технічного стану дренажного насоса. Раніше під час планового оновлення насосного обладнання було встановлено, що з 40 дренажних насосів, які вичерпали свій проектний ресурс та підлягали заміні, 30 все ще знаходились у справному стані. З досвіду експлуатації відомо, що поява ознаки S_1 - підвищення рівня шуму та характерний стук зустрічається у

справних насосів лише в 15 % випадків. Оцініть вірогідність знаходження у справному стані насоса, який не вичерпав свій проектний ресурс, при появі у нього ознаки S_1 .

Розв'язання:

Для даного прикладу можливі два діагностичних стани: справний D_0 та несправний D_1 .

З умови відомо, що з 40 дренажних насосів, які вичерпали свій проектний ресурс та підлягали заміні, 30 все ще знаходились у справному стані D_0 . Тоді вірогідність справного стану для діючого насоса:

$$P(D_0) = N_0 / N = 30 / 40 = 0,75 \quad (3.11)$$

Вірогідність несправного стану для діючого насоса:

$$P(D_1) = 1 - P(D_0) = 1 - 0,75 = 0,25 \quad (3.12)$$

Оскільки підвищення рівня шуму та характерний стук зустрічається у справних насосів лише в 15 % випадків є умовною вірогідністю, то вона позначається:

$$P(S_1|D_0) = 0,15 \quad (3.13)$$

Решту випадків така діагностична ознака зустрічатиметься у несправних насосів:

$$P(S_1|D_1) = 1 - P(S_1|D_0) = 0,85 \quad (3.14)$$

Тоді за формулою Баєса, вірогідність насоса бути у справному стані при появі ознаки S_1 дорівнює:

$$P(D_0|S_1) = P(D_0) \cdot P(S_1|D_0) / P(S_1) \quad (3.15)$$

Однак за умовою задачі невідомо чому дорівнює апріорна вірогідність появи ознаки S_1 , відомі лише умовні вірогідності появи цієї ознаки за різних діагностичних станів. Тому з теорії ймовірності:

$$P(S_1) = P(S_1|D_0) \cdot P(D_0) + P(S_1|D_1) \cdot P(D_1) \quad (3.16)$$

В цьому випадку рівняння (3.15) з врахування (3.16) прийме вигляд:

$$\begin{aligned} P(D_0|S_1) &= \frac{P(D_0) \cdot P(S_1|D_0)}{P(S_1|D_0) \cdot P(D_0) + P(S_1|D_1) \cdot P(D_1)} = \\ &= (0,75 \cdot 0,15) / (0,15 \cdot 0,75 + 0,85 \cdot 0,25) = 0,35 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Таким чином, вірогідність дренажного насоса бути в справному стані при підвищенні рівня шуму та появі характерного стуку зменшилась з 75 % до 35 %. Очевидно, що таке значення є досить низьким і тому для запобігання аварійної ситуації, цей насос потребує проведення позапланового технічного огляду для уточнення діагнозу.

Зазвичай на електростанціях встановлюється певне гранично-допустиме значення вірогідності працездатного стану, при зменшенні якого, проводиться обов'язковий технічний контроль обладнання. Воно обирається виходячи з досвіду експлуатації широкого парку однотипного обладнання на багатьох електростанціях, а також стратегії технічного обслуговування.

Контрольні запитання до лекції 3

- 1. Які переваги та недоліки вірогіднісних методів діагностування?*
- 2. Що таке умовна вірогідність? Чим вона відрізняється від апріорної вірогідності?*
- 3. Запишіть узагальнену формулу Баєса для задач технічної діагностики визначення технічного стану за наявною ознакою. Поясніть складові.*
- 4. Як запишеться формула Баєса, якщо технічний стан визначається за комплексом ознак?*
- 5. Для чого проводиться вірогіднісна діагностика обладнання на теплових і атомних електростанціях?*
- 6. Що таке гранично-допустима вірогідність працездатного стану?*

Лекція 4. Акустична та візуальна інтро- та ендоскопія

Зазвичай при проведенні початкового технічного контролю передбачуваний обсяг досліджень є дуже значним. Застосування точних методів діагностування може бути економічно невиправданим та, інколи, неможливим.

Аналіз акустичних шумів та візуальний огляд внутрішнього та зовнішнього стану об'єкта є одними з найбільш поширених засобів технічного діагностування. Вони є недорогими, простими та можуть бути швидко організованими. Також, суттєвою перевагою вказаних методів є можливість, а часто і необхідність організації технічного контролю на діючому енергетичному обладнанні.

Візуальний контроль

Близько 90 % від всієї оточуючої інформації людина отримує візуально. З огляду на цю обставину зрозумілим стає таке широке розповсюдження методів візуального контролю та діагностування не лише в енергетиці, а й в багатьох інших сферах.

Ефективність візуального діагностування в першу чергу залежить від можливостей зорового сприйняття людини. Найбільш оптимальна відстань для спостереження у середньо-статистичного ока становить 30 см. На такій відстані можна розрізнити об'єкт розміром більше 80 мкм, а дві точки на відстані більше 0,1 мм перестануть «зливатися» в єдину.

Проте слід мати на увазі, що величезний вплив на якість візуального сприйняття має освітленість. В більшості випадків діагностування енергетичних об'єктів відбувається в умовах цеху, де освітленість значно гірша ніж при сонячному світлі. Так, для якісного діагностування і можливості чітко розрізнити дефекти на поверхні необхідна освітленість близько 1000-2000 лк. Для прикладу, згідно до СНіП 23-05-95 середня горизонтальна освітленість житлових кімнат має становити 150 лк, аудиторії

в університеті – 400 лк. В той же час середня освітленість в турбінному цесі становить біля 15-50 лк. Тобто за таких умов, діагностування без додаткових засобів освітлення не зможе бути достатньо ефективним та інформативним.

Для визначення межі зорового сприйняття часто користуються кутовими хвилинами, які дозволяють за значенням кута зору встановити якого мінімального розміру об'єкт можна побачити на певній відстані. Так, в середньому можна досить ясно розгледіти об'єкт за гостроти зору в 30-40' (1 кутова хвилина дорівнює $1/60$ від градуса), при цьому межа гостроти зору становить біля 1'. Тобто, на відстані в 1 м досить ясно можна розглядати об'єкт розміром більше 1 см, при цьому мінімальний розмір, що не стане зливатись з навколишнім середовищем – 0,3 мм. Все вказане вище наведено для умов достатньої освітленості.

Основними задачами, що вирішуються при візуальному огляді є:

- 1) слідкування за показниками вимірювальної апаратури;
- 2) контроль надходження якогось рідкого, твердого чи газоподібного носія, а також відсутність його протікань, просипань, свищів;
- 3) виявлення тріщин в елементах;
- 4) визначення характеру та причин зносу або руйнування деталей, та інші.

В технічному візуальному контролі діагностичними параметрами найчастіше є форма, колір, щільність і шорсткість поверхні.

Очевидним недоліком такого методу контролю є обставина того, що результати діагностування є суб'єктивними і дуже залежними від умов контролю. Проте саме діагностування є достатньо простим, мало трудоемним і дозволяє оглядати велику кількість об'єктів за відносно невеликий час. Додатково слід зазначити, що візуальний контроль найчастіше застосовується для локалізації можливих дефектів та збоїв і дозволяє встановити зону та доцільний метод діагностування для більшої ефективності та інформативності.

Візуально-оптичне діагностування

Досить часто в енергетиці неможливо виконати візуальний огляд певного устаткування, або виникає необхідність провести внутрішній контроль без зупинки обладнання. Візуальний контроль для якого застосовуються додаткові оптичні пристрої називають візуально-оптичним.

В більшості випадків для такого діагностування застосовують спеціальні технічні ендоскопи (з грецької endon – всередині, scopeo – розглядаю). В ньому слід виділити два основних вузла деталей – оптична та освітлювальна системи. В залежності від конструктивних властивостей цих систем ендоскопи поділяються на:

- 1) жорсткі ендоскопи – бороскопи (рис. 4.1);
- 2) гнучкі ендоскопи – фіброскопи (рис. 4.2.)

Оптична система ендоскопів складається зі значною кількості оптичних волокон, або лінз, які передають зображення до окуляру приладу. Для надання чіткості зображенню, воно освітлюється за допомогою спеціальних світловодів – гнучких дзеркальних трубок, що передають світло від джерела випромінювання до об'єкта діагностування.

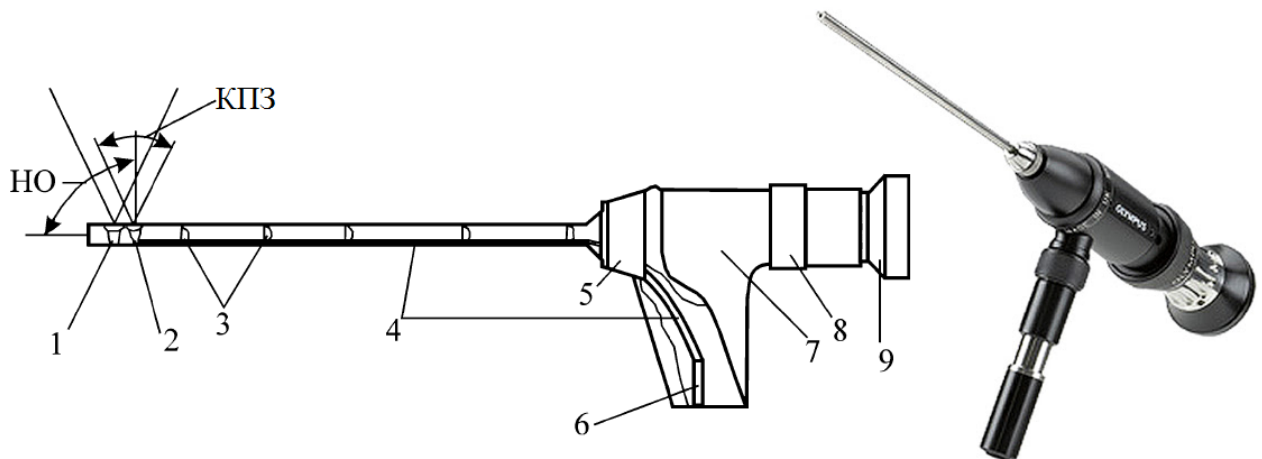


Рис. 4.1. Схема технічного бороскопа: НО – напрямок огляду, КПЗ – кут поля зору, 1 – лінза освітлення, 2 – об'єктив, 3 – лінзи, 4 – світловод, 5 – система повороту оглядової трубки, 6 – підключення світловода, 7 – окуляр, 8 – регулювання фокусу, 9 – регулювання гостроти зору

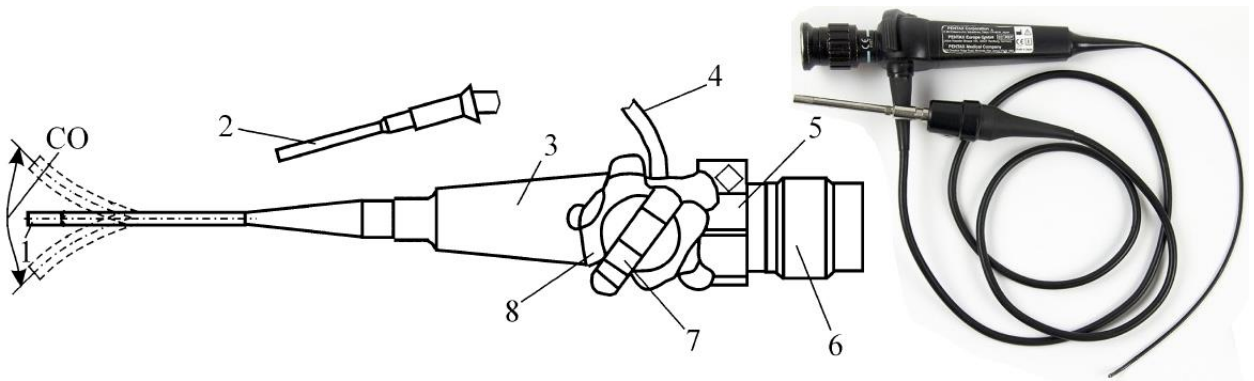


Рис. 4.2. Схема технічного фіброскопа: CO – сектор огляду, 1 – насадка об’єктиву, 2 – кінець світловода, 3 – окуляр, 4 – світловод, 5 – регулювання фокусу, 6 – регулювання гостроти зору, 7, 8 – керування насадкою об’єктива

Здебільшого, ендоскопи застосовують для огляду внутрішніх областей механізмів: трубопроводів, котлів, теплообмінників, насосів, компресорів, турбін, електрогенераторів, редукторів, гідро- і пневмоциліндрів, систем масло постачання, тощо.

Часто виникає потреба оглядати динамічні об’єкти. Проблема людського зору полягає в тому, що він не здатний чітко уловлювати послідовність зміни положень механізму, що дуже швидко рухається. Таке зображення сприймається як єдиний змазаний простір, обмежений крайніми положеннями своїх амплітуд.

В таких випадках застосовується, так званий, стробоскопічний ефект. Суть його полягає в тому, що якщо якийсь об’єкт освітлювати короткими спалахами, людське око здатне сприйняти динамічний об’єкт, як статичний. Для цього необхідно, щоб час освітлювального спалаху, був значно менший ніж період обертання, або коливання досліджуваного механізму.

Приклад технічного стробоскопу представлено на рис. 4.3. Він представляє собою систему світлодіодних ламп, що оточені рефлектором (світло відбиваючою поверхнею). Ввімкнення ламп забезпечуються за допомогою генератора електричних імпульсів. Частота спалахувань може регулюватись.



Рис. 4.3. Технічний світлодіодний стробоскоп

Наприклад, при дослідженні працюючого ротора, у випадку, якщо частота спалахів стробоскопа дорівнюватиме частоті обертання, то для спостерігача ротор сприйматиметься як статичний механізм.

Таким чином, можна відзначити що візуально-оптичні методи є найбільш простими, доступними та достатньо ефективними для виявлення зовнішніх дефектів та огляду внутрішніх поверхонь без зупинки механізму.

Акустичне інтро- та ендоскопічне діагностування

Досить часто одним із пошкоджень механізмів є поява зазору між деталями. Наслідком появи таких зазорів може слугувати створення ударної взаємодії між контактними поверхнями. Фізичним проявом цих ударів слугує розповсюдження пружних акустичних хвиль, поява ударних імпульсів та вібрацій. Доцільно організовувати контроль за даними параметрами.

Більшість акустичних коливань розповсюджують пружні хвилі в діапазоні 20-16000 Гц, які можуть сприйматися людським слухом. Вказані акустичні коливання поділяють на дві основні групи:

1) шумова група – неперіодичні звукові коливання зі змінною частотою та амплітудою;

2) музична група – періодичні коливання, що часто характеризуються певним тоном, який легко класифікується досвідченим слухом.

Розглянемо основні фізичні параметри звуку.

1. *Гучність* залежить від амплітуди коливань звукової хвилі. Гучність не слід плутати з таким параметром, як сила звуку, оскільки вони є не зовсім тотожними. Сила звуку характеризує фізичний процес існування звуку, а гучність визначає якість його сприймання. Сила звуку, для пересічної людини, може змінюватись від порогу чутності (визначається звуковим тиском 0 дБ) до больового порогу (120 дБ). Для низьких частот, гучність сприймається більшою мірою, ніж для високих, при однаковій амплітуді коливань звукової хвилі.

2. *Висота* звуку відображає частоту коливань звукової хвилі. Нижня межа слуху у людини становить 15-19 Гц, верхня – 15000-20000 Гц. Чутливість вуха має індивідуальні відхилення.

Частоти 200-3500 Гц відповідають спектру людської мови. Мінімальна тривалість звуку, при якій можна оцінити спектральний склад акустичних коливань становить 20-50 мс. За меншої тривалості, звук сприймається як клацання. При частотах більше 15000 Гц слух стає менш чутливим.

Через особливості функціонування барабанної перетинки людини, найбільш якісно сприймаються звуки в діапазоні від 1000 до 3000 Гц.

3. *Тембр* є наслідком взаємного накладання окремих частот, який надає характер забарвлення звуку. Тембр відображає акустичний склад звуку – число, порядок і силу складових (гармонійних і негармонійних). Тембр залежить від того, які гармонійні частоти складаються з основною частотою і від амплітуди складових частот. В слухових відчуттях тембр складного звуку відіграє значну роль.

Іншою важливою фізичною величиною звуку, що обов'язково враховується в технічній діагностиці є *швидкість поширення звуку*. Вона прямо залежить від середовища в якому розповсюджується. Так для

атмосферного сухого повітря швидкість звуку складає 343 м/с, в воді – 1500 м/с, в сталі – приблизно 5000 м/с.

Прослуховування механічних коливань

Механічні коливання низької і середньої частоти легко поширюються по корпусним деталям обладнання. Для прослуховування механічних коливань використовується технічний стетоскоп, що складається з металевої чутливої трубки і навушників (рис. 4.4 а). Металева трубка, встановлена на корпусі механізму, дозволяє перетворити механічні коливання в акустичні, поширювані по стінках трубки до навушника.

Іншим поширеним типом приладів для акустичного прослуховування слугує електронний стетоскоп (рис. 4.4 б). Ключовою його відмінністю є те, що акустичний сигнал не передається напряму до навушника, а за допомогою п'єзоелектричного елемента (спеціальний матеріал, що може змінювати свій електричний опір в залежності від своєї деформації) перетворюється в електричний і подається на посилювач звукових частот. Далі він знову конвертується в акустичний сигнал і подається на навушники.



Рис. 4.4. Пристрої для акустичної діагностики:
а – технічний стетоскоп; б – електронний стетоскоп

Чутливим елементом стетоскопа може слугувати не лише металевий щуп, а й мембранна поверхня (як в медичних стетоскопах). Окрім того, часто, в електронних стетоскопах отриманий сигнал може бути перетворений у цифровий (рис. 4.5).



Рис. 4.5. Електронний стетоскоп з цифровим перетворювачем

Існують ультразвукові стетоскопи, які дозволяють діагностувати діапазони частот вище 20000 Гц. Такими частотами характеризується просочення газів або пари з областей надвисокого тиску в атмосферу. Аналогічним чином можна встановити електричні розряди, кавітацію, недостатнє змащення підшипників.

Перевагами акустичного методу діагностування є можливість проведення обстеження на діючому устаткуванні, простота та низька вартість, щодо використання. Ключовим недоліком такого методу є неможливість формалізації отриманих даних і висока залежність від кваліфікації та досвіду тієї людини, що проводить діагностику. Отримані дані несуть дещо суб'єктивний характер і потребують проведення додаткового аналізу. Доцільним є одночасне застосування кількох методів діагностування для покращення точності встановлення технічного стану.

Розглянемо приклади характерних шумів устаткування. Робота більшості обертового обладнання супроводжується монотонним шумом, що

подібний до гудіння або шелесту. При цьому поява глухого переривчатого шуму може свідчити про погіршення умов змащення підшипників, свист свідчить про появу небажаного тертя, а глухі періодичні удари вказують на наявність дисбалансу в роторі, тощо. Однак слід розуміти, що шумові картини розглядаються для кожного механізму окремо, оскільки вони є індивідуальними.

Додатково слід зазначити, що дзвін металевих деталей при ударі, наприклад, молотком, використовується для визначення наявності дефектів. Звук, що видається сталеву деталлю, яка містить дефект нижчий і глухий у порівнянні зі звуком бездефектної деталі (чистий, високий, дзвінкий). Даний метод досить ефективний стосовно контролю затягування різьбових з'єднань, таких як шпильки фланцевих з'єднань.

Контрольні запитання до лекції 4

- 1. Які переваги та недоліки візуально-оптичних методів діагностування?*
- 2. Вкажіть за якої освітленості можливе проведення якісного візуального контролю.*
- 3. Наведіть діагностичні параметри, за якими виконується візуальний контроль.*
- 4. Що таке технічний ендоскоп? Вкажіть основні системи ендоскопів.*
- 5. В чому відмінність між бороскопом та фіброскопом?*
- 6. З якою метою та як саме досягається стробоскопічний ефект в технічній діагностиці?*
- 7. Вкажіть основні фізичні параметри звуку, які Ви знаєте.*
- 8. Поясніть принцип дії та наведіть основні системи технічного стетоскопа.*
- 9. Які основні переваги та недоліки мають акустичні методи діагностики?*

Лекція 5. Теплові методи діагностування

Більше 90 % усіх енергетичних перетворень в світі супроводжуються тепловою конверсією. Враховуючи специфіку технологічних процесів на теплових та атомних електростанціях, можна з впевненістю сказати, що застосування теплового діагностування в цій галузі є виправданим як з економічної точки зору так і з технічної.

За засобами діагностування теплові методи можна поділити на дві основні групи:

1) термометричні методи, що дозволяють отримати інформацію, щодо характеру перебігу робочого процесу і розвитку якихось технологічних відхилень, або несправностей;

2) тепловізійні методи, що дозволяють отримати теплові епюри діагностичного об'єкта, за допомогою спеціальних приладів – тепловізорів.

Термометричні методи контролю на ТЕС і АЕС

Термометричні методи контролю є невід'ємною складовою експлуатації енергетичного обладнання. Температура – це одна із основних теплових величин, що є параметром стану термодинамічних систем. Розрізняють контактні та безконтактні методи вимірювання температури.

Основними приладами, що застосовуються для контактних методів вимірювання температури в енергетиці є:

1. Термопари – термоелектричні датчики, що працюють за рахунок ефекту Зеєбека (рис. 5.1 а). В замкнутому контурі з двох провідників, які складаються з різного матеріалу, виникає електрорушійна сила, якщо температура кінців провідників у місці їх з'єднання різна. Діапазон вимірювання температур залежить від матеріалів, що застосовуються в термопарі і, в широкому сенсі, може складати від $-185\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. Термоперетворювачі опору – прилади на основі металевого або напівпровідникового матеріалу, які здатні змінювати свій електричний опір в

залежності від температури (рис. 5.1 б). Термоперетворювачі застосовуються разом з вторинними електровимірювальними пристроями – логометрами, мостовими схемами, тощо. Діапазон вимірювання температур, також, залежить від матеріалу, однак є відносно низьким – від $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. Рідинні термометри, принцип дії яких базується на здатності рідких тіл змінювати свій питомий об'єм, в залежності від температури (рис. 5.1 в). В якості робочого тіла в термометрах, зазвичай, застосовують спирти та ртуть. Робочий діапазон вимірювання становить від $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ для спиртових термометрів та від $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ для ртутних. Верхня межа вимірювання пояснюється температурою розм'якшування скла.

Інколи застосовуються додаткові прилади для вимірювання температур: манометричні, дилатометричні, біметалічні термометри та інші.

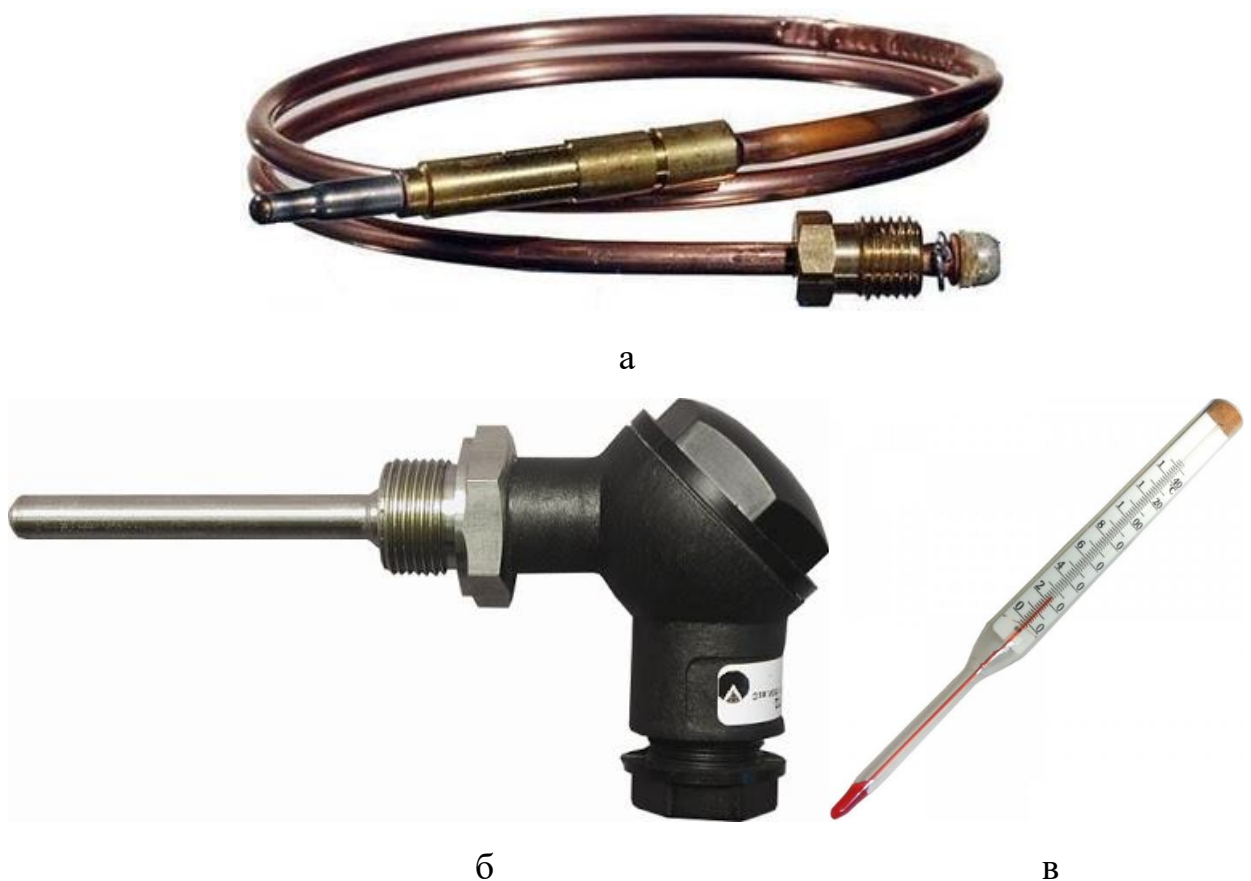


Рис. 5.1. Основні прилади для вимірювання температури на ТЕС і АЕС:
а – термопара, б – термоперетворювач опору, в – рідинний термометр

Наведені вище пристрої застосовуються для вимірювання температур води, пари, продуктів згоряння, масла, металу в майже кожному теплоенергетичному обладнанні на ТЕС і АЕС.

Часто при проведенні візуального контролю корпусних елементів енергетичного устаткування виникає потреба в експрес вимірюванні температури. Для цього можна застосовувати безпосередньо органи відчуття людини. Так, тильною стороною кисті можна суб'єктивно оцінювати нагрів деталей з температурою до 60 °С без болювого відчуття. Цей діапазон оцінки можна розширити застосовуючи бризки рідини, щоб відстежити чи не зазнають вони випаровування. За швидкістю випаровування бризок, можна наближено оцінити на скільки температура корпусу вища від 100 °С.

Інколи для контактної оцінки температури елементів застосовують спеціальні термоіндикатори – плавкі з'єднання на основі воску, парафіну, стеарину, цинку, свинця та ін. Виготовляються такі термоіндикатори у вигляді олівців, крейди (рис. 5.2), порошоків, лаків, тощо. Індикатор попередньо наносять на поверхню діагностування і після досягнення нею певної температури – індикатор плавиться, або змінює свій колір.



Рис. 5.2. Термоіндикатор у вигляді спеціальної крейди

Додаткову теплову діагностичну інформацію мають і, так звані, кольори мінливості (рис. 5.3). Це явище, яке виникає на гладких металевих поверхнях, внаслідок дії локального джерела тепла. Собою це являє надтонкий шар оксидної плівки, товщиною в декілька молекул. Колір металу залежить від товщини плівки, а та, в свою чергу, залежить від температури що діяла на метал.

Так на рис. 5.3 представлені кольори мінливості для сталі 12Х17. Цифрами на зразках вказані температури, за яких було досягнуто даного кольору мінливості. Верхні зразки мають товщину металу 0,5 мм, нижні – 0,8 мм.



Рис. 5.3. Кольори мінливості на сталі 12Х17

Додатково в енергетиці поширене застосування безконтактних методів термометрії. Основними приладами для безконтактного вимірювання температури слугують пірометри та тепловізори.

Принцип дії пірометрів (рис. 5.4) базується на фотоелектричній, візуальній і фотографічній реєстрації інтенсивності теплового випромінювання нагрітого об'єкту, пропорційно до його температури. Зазвичай, пірометри складаються з об'єктиву для фокусування випромінювання, фотодетектора, світлофільтрів та системи електронної обробки сигналу. Розрізняють наступні види пірометрів:

1. В оптичних пірометрах інтенсивність випромінювання нагрітого тіла зіставляється спостерігачем з яскравістю абсолютно чорного тіла. Цим тілом, зазвичай, слугує нитка пірометричної лампи-еталона. Діапазон вимірювання такого пірометра складає 600-7000 °С.

2. В радіаційному пірометрі (рис. 5.4 а) потік теплового випромінення, уловлюється та фокусується на теплочутливій частині приладу, яка з'єднана з термопарою. Їхній діапазон вимірювання становить від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, проте зазвичай такі пірометри застосовують для вимірювання температур слабо нагрітих тіл.

3. Інфрачервоні пірометри (рис. 5.4 б) реєструють амплітуду електромагнітного випромінення від об'єктива в інфрачервоній частині спектру і перетворюють вимірне значення в інтенсивність теплового випромінювання. Діапазон роботи складає від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $4000\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Рис. 5.4. Пірометри: а – радіаційний, б – інфрачервоний

Ключовими недоліками пірометрів є достатньо висока похибка вимірювання, яка може становити 2-10 % та певна інерційність у замірюванні (час реакції). Проте через простоту застосування пірометрія знайшла широке розповсюдження у практиці технічного діагностування.

Тепловізійний контроль в енергетиці

Тепловізійний контроль є одним із безконтактних методів термометричного діагностування. Проте через його широку поширеність, останнім часом, тепловізійне діагностування виноситься в окремий метод неруйнівного контролю.

Ключовим елементом для такого контролю є, безпосередньо сам, тепловізор (рис. 5.5). Це оптично-електронний пристрій для візуалізації температурного поля та вимірювання температури. Переважно працює в інфрачервоній частині електромагнітного спектру. Робота тепловізорів у інфрачервоному спектрі пояснюється областю їх застосування.

Оскільки, здебільшого, тепловізор використовується для діагностування об'єктів з температурою близькою до температури навколишнього середовища, важливо забезпечити максимуми спектру випромінювання підібравши достатню довжину хвилі. Для температур порядку $-50 - 80$ °C найбільш інтенсивне електромагнітне теплове випромінювання відповідає довжині хвилі 7-16 мкм, що відповідає інфрачервоному діапазону.

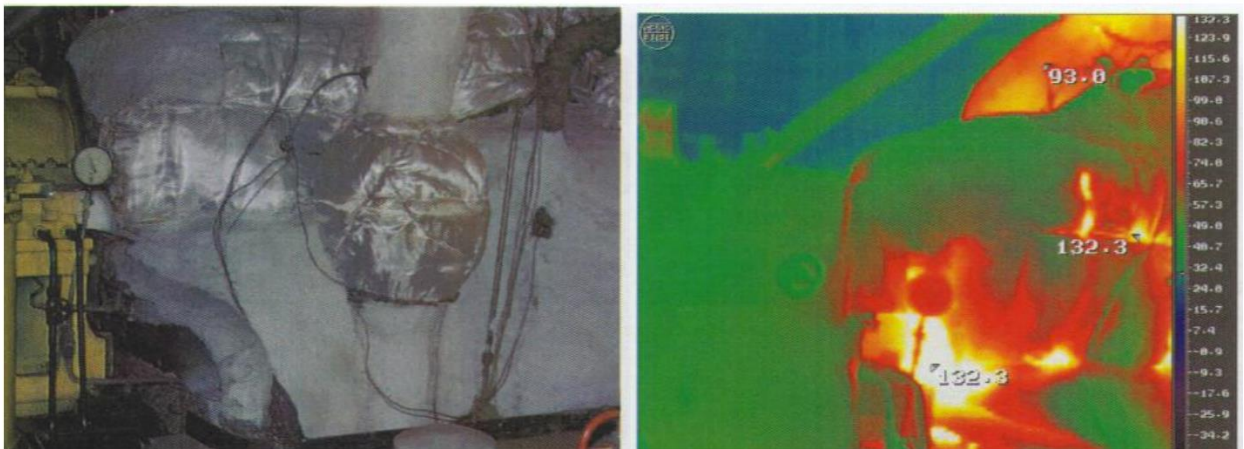


Рис. 5.5. Тепловізори в різному конструктивному виконанні [6]

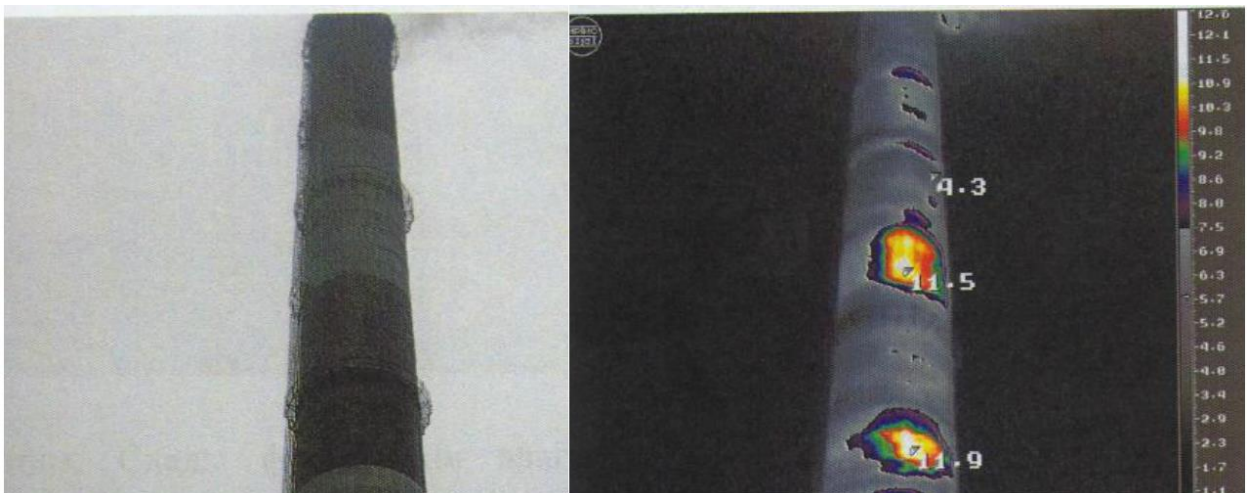
Зазвичай, тепловізор складається з інфрачервоного приймача (детектора випромінювання), сканера, вмонтованого еталона температури, електронно-обчислювального блока, операційної системи та дисплею.

В енергетиці, тепловізійний контроль, здебільшого, застосовується для оцінки якості теплової ізоляції обладнання, виявлення дефектів та областей зношення, порушень режимів роботи обладнання, тощо.

Приклади застосування тепловізійного контролю для оцінки якості теплової ізоляції циліндра високого тиску парової турбіни наведено на рис. 5.6 а. Середня температура ізоляції циліндра становить близько 50 °С, що відповідає правилам технічної експлуатації. В той же час, в області паровихлопного патрубку спостерігається температура на рівні 132 °С, що свідчить про погіршення ізолюючих властивостей покриття. Це призводить до зменшення ефективності роботи турбоустановки та до додаткових енергетичних втрат.



а



б

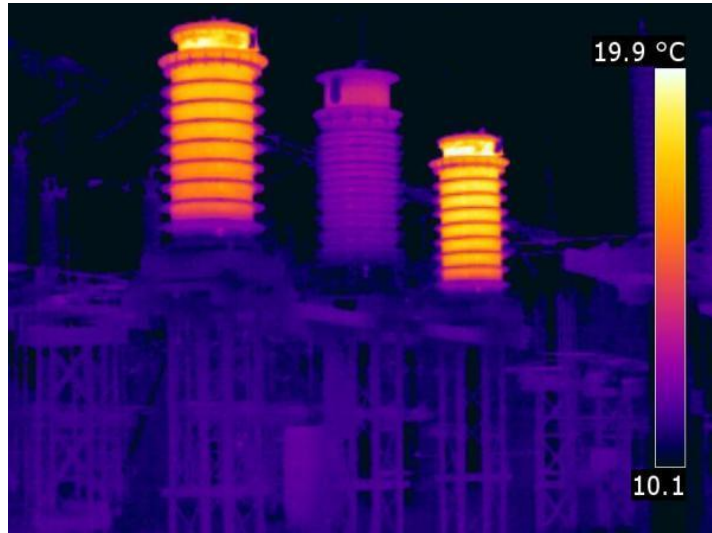
Рис. 5.6. Картограми теплового контролю: а – ізоляція циліндра високого тиску парової турбіни (в аварійному стані), б – невелике руйнування бетонної поверхні димової труби [6]

На рис. 5.6 б помітні локальні області підвищення температур поверхні димової труби. Це є наслідком стоншення стінок труби, що може свідчити про певне руйнування бетонної поверхні.

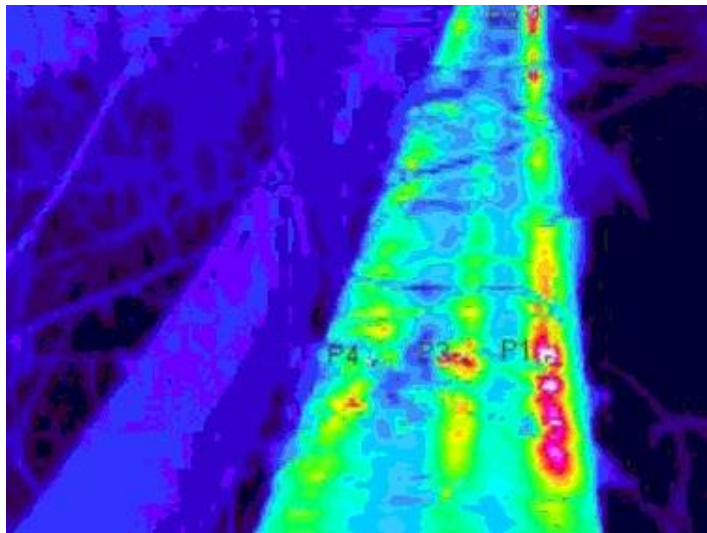
Окрім застосування безпосередньо в цехах електростанції, тепловізійні методи контролю знайшли використання і для діагностики електричного устаткування підстанцій, електричних та теплових мереж (рис. 5.7), тощо.



а



б



в

Рис. 5.7. Картограми теплового контролю: а – працюючої топки котла, б – масляних колонок трансформатора, в – ділянки підземної теплотраси в залізобетонному коробі

Таким чином, слід відзначити широке розповсюдження тепловізійних методів контролю в енергетиці, що пов'язане зі значними перевагами цього способу, а саме: безконтактність (можливе проведення діагностування на відстанях до 500 м), висока інформативність та швидкість контролю, відсутність потреби великого діагностичного досвіду та інші.

Недоліки тепловізійних методів контролю подібні до пірометричних. Проте оскільки головним призначенням пірометрів є вимірювання температури, а тепловізорів – отримання теплової епюри, яка дозволить виконати порівняльний аналіз різних вузлів деталей з однією і тією ж похибкою, то ці недоліки вимірювання частково нівелюються.

Контрольні запитання до лекції 5

- 1. Поясніть, які переваги має температура, як діагностичний параметр в енергетиці.*
- 2. Які прилади для проведення термометричного контролю Ви знаєте?*
- 3. Поясніть яким чином існує можливість виміряти температуру корпусних елементів енергетичного обладнання без застосування спеціальних приладів.*
- 4. Що таке кольори мінливості? Яку діагностичну інформацію вони надають?*
- 5. опишіть принцип дії та область застосування пірометрів?*
- 6. Який на Вашу думку найбільш точний метод для вимірювання температури? Який найбільш простий? Який найбільш інформативний?*
- 7. Що таке тепловізор? Для чого він застосовується в енергетиці?*
- 8. Вкажіть переваги та недоліки тепловізійних методів контролю. Наведіть приклади.*

**Лекція 6. Віброметрія як метод технічного діагностування
обертового обладнання**

Механічні коливання як ознака якості роботи обертового обладнання

Величезну частину обладнання електричних станцій складає обертове обладнання, до якого можна віднести турбінне, насосне, тягодуттєве та компресорне обладнання.

Наявність вібрації у обертового обладнання є порушенням його справно́го стану. Вібраційні процеси поділяються на стаціонарні детерміновані (ті що визначені у часі) і нестаціонарні (не визначені у часі). В свою чергу, стаціонарні процеси можуть бути періодичними, гармонічними та полігармонічними, а також перехідними і випадковими.

Періодичні коливання – коливання, при яких кожне значення величини повторюється через рівні інтервали часу. Найпростіший випадок періодичних коливань – гармонічні коливання (рис. 6.1). Ці коливання можуть бути описані за законом синуса, або косинуса.

$$X(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (6.1)$$

де A – амплітуда коливань;

ω – кутова швидкість;

φ – початкова фаза коливань.

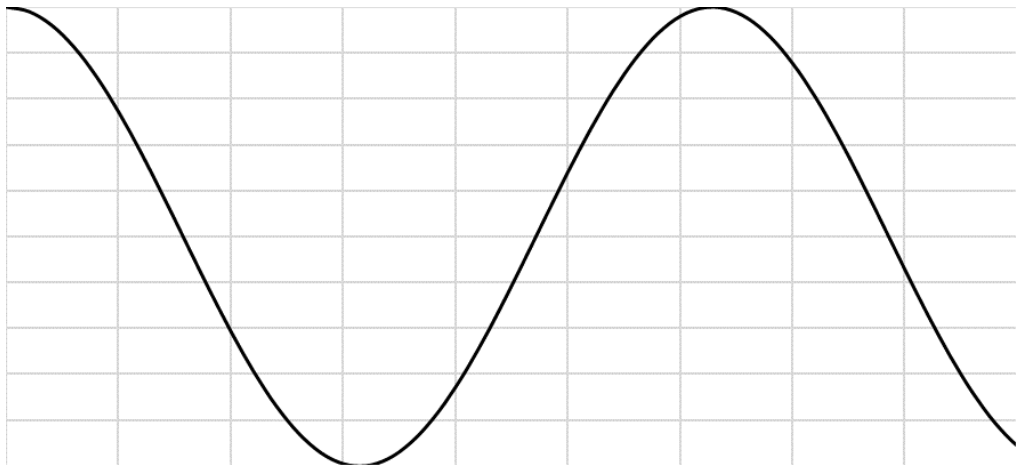


Рис. 6.1. Зміна параметру у часі за гармонічного коливання

При *гармонічних коливаннях*, коефіцієнти, що входять до закону косинуса або синуса мають бути постійними $A, \omega, \varphi = \text{const}$. При майже гармонічних коливаннях, ці функції повільно змінюються у часі. Наприклад амплітуда A та кутова швидкість ω поступово зменшуються при зупинці механізму.

Полігармонічні коливання можуть бути представлені у вигляді суми двох та більше гармонічних кривих (**гармонік**), при цьому частоти гармонік кратні основній частоті. Приклад полігармонічної кривої побудованої на базі трьох гармонічних кривих наведено на рис. 6.2.

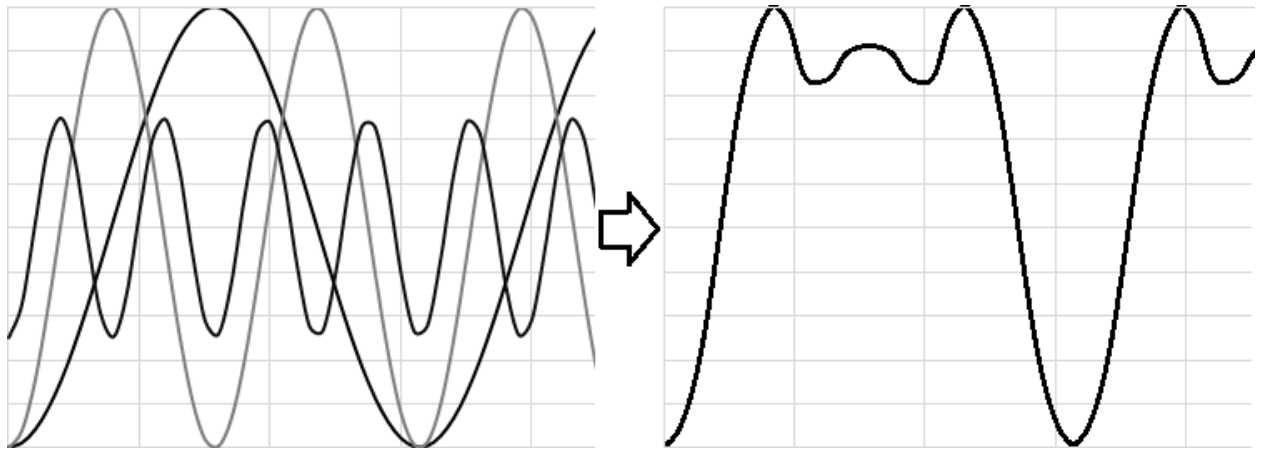


Рис. 6.2. Результуюча полігармонічна крива побудована на основі 3 гармонік

Випадкові процеси непередбачувані за своїми параметрами (амплітуда, кутова швидкість), однак вони зберігають свої статистичні характеристики (середні значення, дисперсія) протягом усього процесу діагностування. Прикладом випадкового процесу може бути шум працюючого двигуна.

Нестаціонарні процеси можна поділити на короткочасні та безперервні. Вірогіднісні характеристики таких процесів є функціями часу. Наприклад: ударні процеси, поява пошкоджень або тріщин під час роботи.

Величини, що описують вібраційні та коливальні процеси

Частота вібрації ν – фізична величина, що дорівнює кількості повторювань (циклів) вібраційного відхилення в одиницю часу.

$$\nu = n / t, [\text{с}^{-1}, \text{Гц}] \quad (6.2)$$

Період вібрації T – час повного циклу вібрації, обернена до частоти величина.

$$T = 1 / \nu, [\text{с}] \quad (6.3)$$

Кутова швидкість ω – величина, що описує швидкість обертання матеріальної точки навколо центра обертання.

$$\omega = 2 \pi \nu, [\text{рад/с}] \quad (6.4)$$

Вібросміщення S , [мм, мкм] – складова руху описуваного вібраційним процесом. Вібросміщення, як діагностичний параметр, представляє інтерес у тих випадках, коли необхідно знати відносне переміщення елементів об'єкта, або ступінь його деформації.

Віброшвидкість V – похідна від вібросміщення у часі. Віброшвидкість застосовується для визначення технічного стану машини при полігармонічному характері вібрації. Цю величину, зазвичай, пов'язують з енергією механічних коливань, що спрямовані на руйнування механізму.

$$V = dS / dt = 2 \pi \nu S, [\text{мм/с}] \quad (6.5)$$

Віброприскорення a – похідна від віброшвидкості у часі, або друга похідна вібросміщення. Як діагностичний параметр, віброприскорення застосовується при визначення степені пошкодження, наявності дефектів та сили удари в підшипниках та зубчастих передачах.

$$a = dV / dt = d^2S / dt^2 = 2 \pi \nu V 10^{-3}, [\text{м/с}^2] \quad (6.5)$$

Розмах коливань X_p – різниця між найбільшим та найменшим значенням величини, що коливається в досліджуваному інтервалі часу (подвійна амплітуда коливань X_a).

Пікове значення коливань X_{max} – найбільше відхилення коливальної величини.

Середнє квадратичне коливальної величини X_c – квадратний корінь із середнього інтегрального значення квадрата коливальної величини у досліджуваному діапазоні часу:

$$X_c = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} X^2(t) dt} \quad (6.6)$$

Пікфактор (коефіцієнт амплітуди) K_{nf} – величина для класифікації інтенсивності та характеру вібраційного процесу. Наприклад, для гармонічних коливань $K_{nf} = 1,41$.

$$K_{nf} = X_p / X_c \quad (6.7)$$

Інтенсивність вібраційного процесу прямим чином залежить від частоти. Тому, при оцінці рівня вібрації, вісь частот прийнято розбивати на відрізки – *смуги частот* і визначати рівень вібрації для кожної смуги окремо.

Октава f , [Гц] – смуга частот між двома сусідніми частотами із співвідношенням 2. Таким чином відношення частот будь-яких октавних смуг завжди кратне 2.

Датчики для вимірювання вібраційних параметрів

Для вимірювання механічних коливань обов'язковою умовою є наявність нерухомої точки відліку – штучного «нуля», відносно якої і будуть виконуватись виміри. Широкий діапазон вимірюваних значень параметрів вібрації обмежує використання механічних систем. Основним конструктивним рішенням на поточний час є перетворювання механічних коливань в електричний сигнал за допомогою вібродатчиків.

Вібродатчик – технічний прилад, що генерує електричний сигнал, який пропорційний до досліджуваного вібраційного параметру.

Проксиметр (датчик зміщення) – стаціонарно встановлений прилад, що має підсилювач сигналу і генерує напруження на виході, яке пропорційне відстані до об'єкта діагностування, наприклад до ротора, що обертається. Зазвичай, датчик є вихрострумовим і переміщення валу вимірює безконтактно (рис. 6.3). Робочий діапазон проксиметрів, зазвичай, складає від 0 до 1000 Гц.

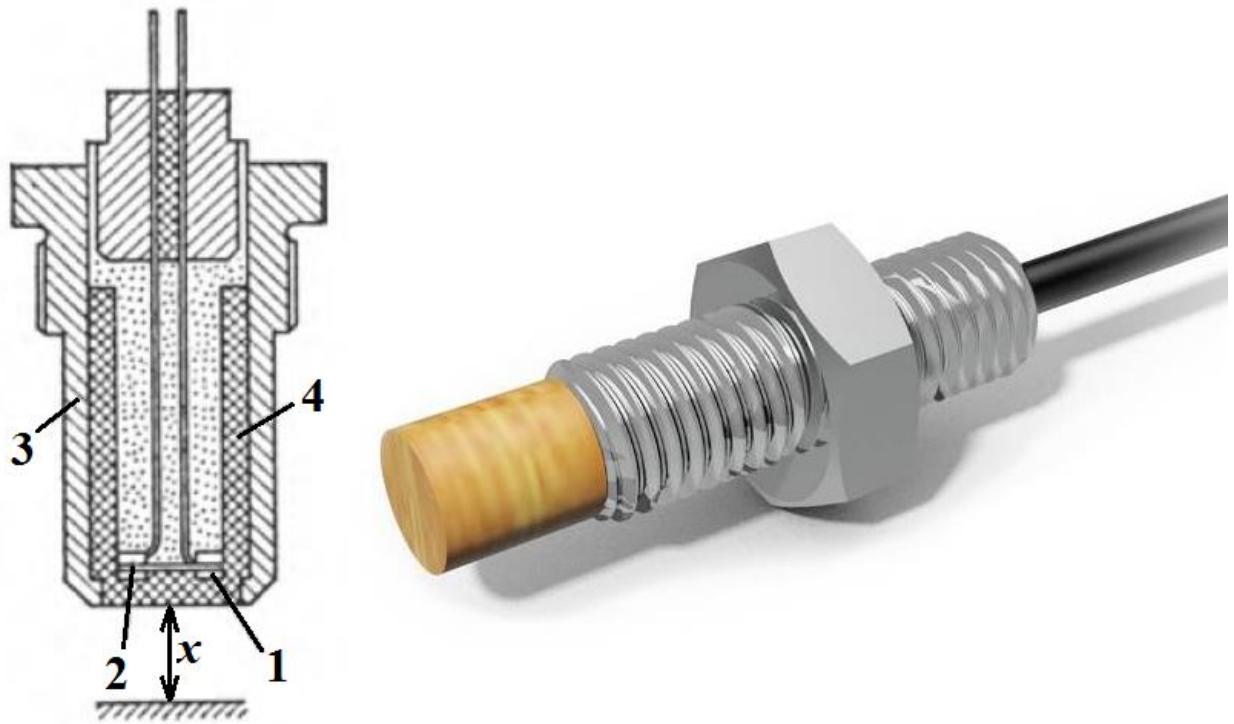


Рис. 6.3. Вихрострумний проксиметр: 1 – робоча котушка, 2 – котушка температурної компенсації, 3 – корпус, 4 – ізоляційна втулка

Велосиметр – прилад для вимірювання віброшвидкості. У найпростішому випадку складається з котушки індуктивності та рухомого магніту, який розміщений всередині (рис. 6.4). Відносний рух магнітного поля в котушці провокує електричний струм, сила якого пропорційна швидкості переміщення. Частотний діапазон таких датчиків складає від 10 до 1000 Гц. Пружина та магніт створюють резонансну систему з власною частотою коливань в районі 10 Гц, таким чином існує можливість підсилення усіх низькочастотних сигналів для більш точного вимірювання.

Акселерометр – перетворювач механічних коливань об'єкта в електричний сигнал пропорційний до віброприскорення. На сьогоднішній день є найбільш універсальними та широкочастотними датчиками. Чутливий елемент акселерометру складається з одного або кількох дисків, чи пластинок з п'єзоелектричного матеріалу (рис. 6.5). Особливістю цього матеріалу є можливість генерації електричного заряду пропорційно до деформації (зазвичай стиснення). Ця особливість зветься прямим

п'єзоелектричним ефектом. Над чутливим елементом встановлено інерційну масу, яка притиснута жорсткою пружиною. Під дією механічних коливань інерційна маса діє на п'єзоелемент із силою, що пропорційна віброприскоренню $F = m a$. В результаті п'єзоелектричного ефекту на поверхні п'єзоелемента виникає електричний сигнал U , який пропорційний силі F , що може бути зареєстрований у подальшому.

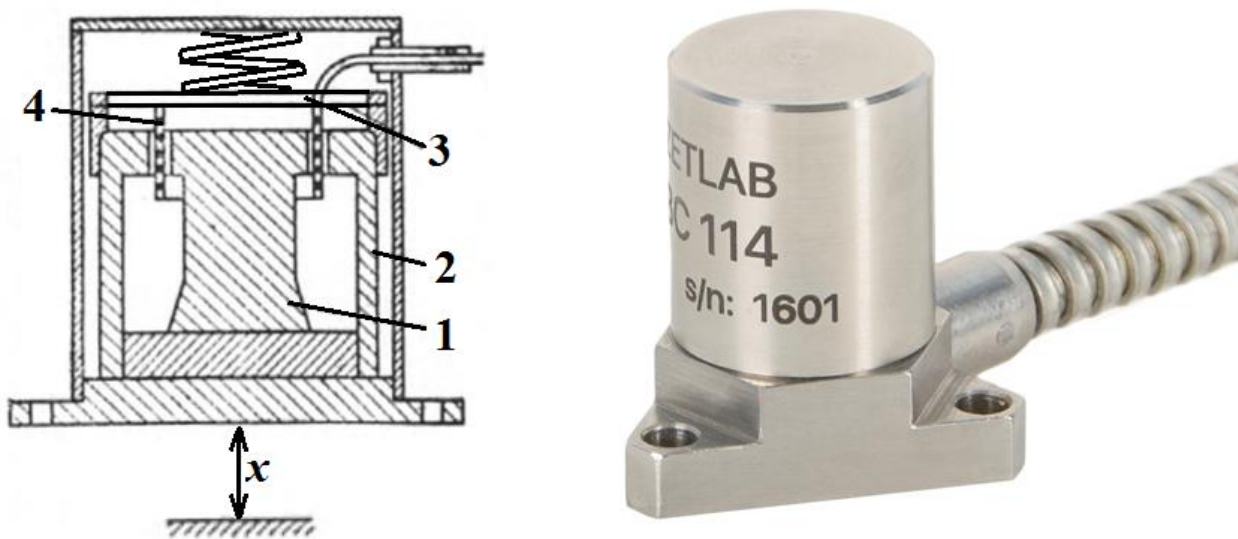


Рис. 6.4. Велосиметр: 1 – магніт, 2 – магнітопровід, 3 – пружина, 4 – інерційна котушка



Рис. 6.5. Акселерометр з чутливим елементом стиснення: 1 – п'єзоелементи, 2 – пружина, 3 – інерційна маса

Діапазон роботи акселерометрів залежить від заводського калібрування, але зазвичай є дуже високим і може досягати 100 кГц.

Вібраційні складові та причини їхньої появи

З точки зору вібраційних процесів, для кращого розуміння причин їхньої появи, слід ввести поняття ідеальної машини. В ній уся енергія перетворюється в корисну роботу.

В реальному ж механізмі, вібрації – побічне явище, що виникає від взаємодії елементів машини. Значення вібрації визначає ступінь пошкодження нормальної передачі динамічних сил через механічну систему. Характерною особливістю нормально функціонуючої машини є низький рівень вібрації.

Важливе значення при встановленні причин вібрації є напрямок вимірювання. Регламентовано проводити вимірювання у трьох взаємно перпендикулярних напрямках (рис. 6.6): вертикальному (vertical 1V-2V), горизонтальному (horizontal 1H-2H) та осьовому (axial 1A-2A). За нормального режиму роботи механізмів роторного типу, осьова складова вібрації має мінімальне значення, а горизонтальна – максимальне.

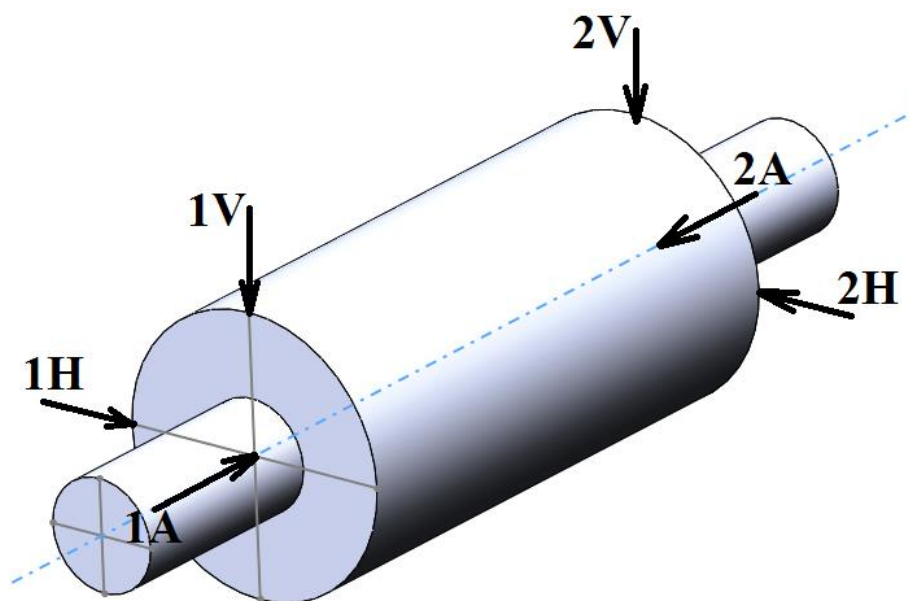


Рис. 6.6. Основні напрями для вимірювання вібрації

Основною причиною появи вібрації слід вважати появу неврівноваженості обертального елемента – валу, дисків, робочих органів, зношення підшипників.

Відцентрова сила що проковує механічні коливання має радіальний напрямок. Однак жорсткість механізму у вертикальному напрямі зазвичай вища, ніж в горизонтальному. Відповідно вертикальна складова вібрації менша за горизонтальну. Оскільки головною задачею механізму є реалізація обертального руху, то для осевого руху об'єкт не призначений. Тому осева складова вібрації повинна мати найменше значення. Збільшення осевої складової може бути пов'язане з появою додаткового ступеня свободи, або з дією дефектів, що проковують динамічні сили в осевому напрямі.

Ці основні наслідки дозволяють сформулювати ознаки та причини появи можливих дефектів. Приклад такого причинно-наслідкового зв'язку для корпусу підшипника [7] наведено на рис. 6.7.



Рис. 6.7. Причинно-наслідкові зв'язки появи вібрації у корпусі підшипника [7]

Збільшення вібрації переважно у вертикальному напрямі викликається появою тріщин в опорах або основі, низькою жорсткістю основи, послабленням з'єднань. Підвищена горизонтальна складова вібрації визначається дисбалансом ротора, зношенням підшипників, послабленням посадки підшипників. Підвищення осьової складової вібраційних процесів виникає при порушенні центровки валів, дефектах муфт і неправильному монтажі або регулюванні підшипників.

Контрольні запитання до лекції 6

- 1. Яким чином прийнято класифікувати вібраційні процеси?*
- 2. Що таке полігармонічні коливання?*
- 3. Поясніть зміст понять віброшвидкість та віброприскорення.*
- 4. Які найбільш поширені датчики вимірювання вібраційних параметрів Ви знаєте? Яка область їхнього застосування?*
- 5. Що таке основні напрямки для вимірювання вібрації? В якому напрямку віброскладова найбільша та найменша за нормальної роботи?*

Лекція 7. Види неврівноваженості обертового обладнання та методи його балансування

Більша частина енергетичного обладнання на теплових та атомних електростанціях є обертовими: парові та привідні турбіни, електрогенератори, електродвигуни, живильні, конденсатні, дренажні та мережеві насоси, тягодуттєві вентилятори, повітрорудувки та ін. Через високі вимоги до надійності та безперервності генерації електричної енергії, велика увага приділяється безаварійності роботи даного обладнання.

Роторні елементи більшості обертових машин за своїми пружно-деформаційними властивостями прийнято поділяти на жорсткі та гнучкі. З точки зору балансування ротор є жорстким, якщо його можна збалансувати у будь-яких двох довільно обраних площинах і після цього вплив залишкового дисбалансу не буде змінюватись за будь-якої частоти обертання, а також при будь-яких нормальних режимах експлуатації.

Будь-яка маса дисбалансу провокуватиме вібраційні процеси за рахунок появи збуджуючої сили C :

$$C = m \omega^2 R \quad (7.1)$$

де m – маса відповідного дисбалансу, R – радіус його прикладання, ω – кутова швидкість обертання ротора.

Дані сили можуть призвести до зниження техніко-економічних показників роботи обертового обладнання, або ж до аварійного виходу з ладу. З метою недопущення цього, налагоджувальними організаціями виконується балансування роторів.

Задача балансування полягає в компенсації сил дисбалансу таким чином, щоб центр ваги ротора лежав на його осі обертання, а геометрична сума відцентрових сил інерції ротора дорівнювала нулю. Необхідно, щоб вісь обертання ротора було його головною центральною віссю інерції.

Дисбаланс – векторна величина, що дорівнює добутку незрівноваженої маси m на її ексцентриситет e в обраній площині.

В залежності від розподілу дисбалансу по довжині ротора, розрізняють наступні види дисбалансу:

1. *Статична нерівноваженість* – нерівноваженість ротора, при якій вісь ротора і його головна центральна вісь інерції паралельні (рис. 7.1). Статична нерівноваженість повністю визначається головним вектором дисбалансів $D_{ст}$, або ексцентриситетом $e_{ст}$ центру мас ротора, або відносним зсувом головної центральної осі інерції і його ротора, рівним значенню ексцентриситету центру його маси.

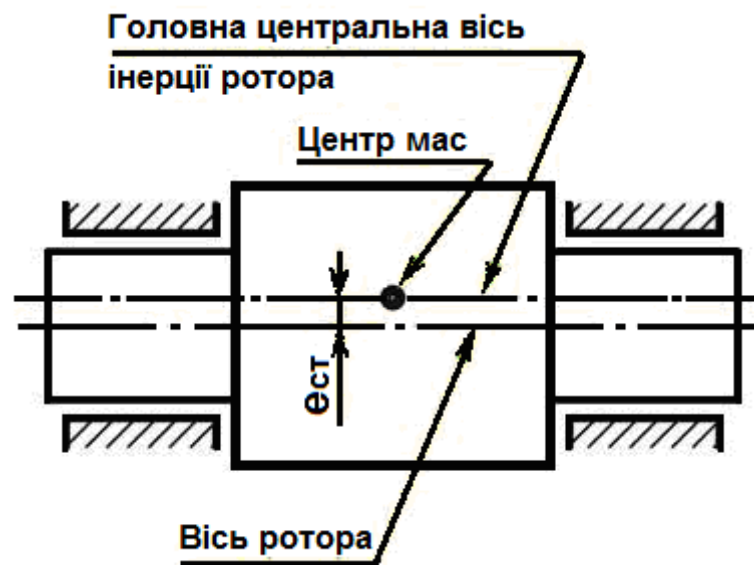


Рис. 7.1. Статична нерівноваженість ротора

2. *Моментна нерівноваженість* – нерівноваженість ротора, при якій вісь ротора і його головна центральна вісь інерції перетинаються в центрі мас ротора, але не паралельні (рис. 7.2). Моментна нерівноваженість повністю визначається головним моментом дисбалансів ротора або двома рівними за значенням антипаралельними векторами дисбалансів, що лежать в двох довільних площинах, перпендикулярних до осі ротора.

Дуже часто ротори мають як статичну, так і динамічну нерівноваженість, в такому випадку вони мають *динамічний дисбаланс*.

3. *Динамічна нерівноваженість* – нерівноваженість ротора, при якій вісь ротора і його головна центральна вісь інерції перетинаються не в центрі

мас або мимобіжно перехрещуються (рис. 7.3). Динамічна неврівноваженість повністю визначається: головним вектором і головним моментом дисбалансів ротора або двома векторами дисбалансів, в загальному випадку різних за значенням і непаралельних, що лежать у двох довільних площинах, перпендикулярних до осі ротора (хрест дисбалансів).

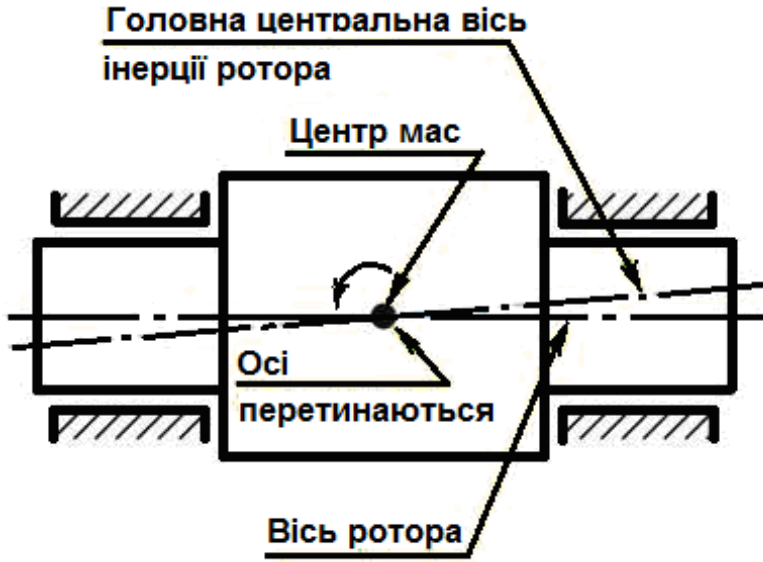


Рис. 7.2. Моментна неврівноваженість ротора

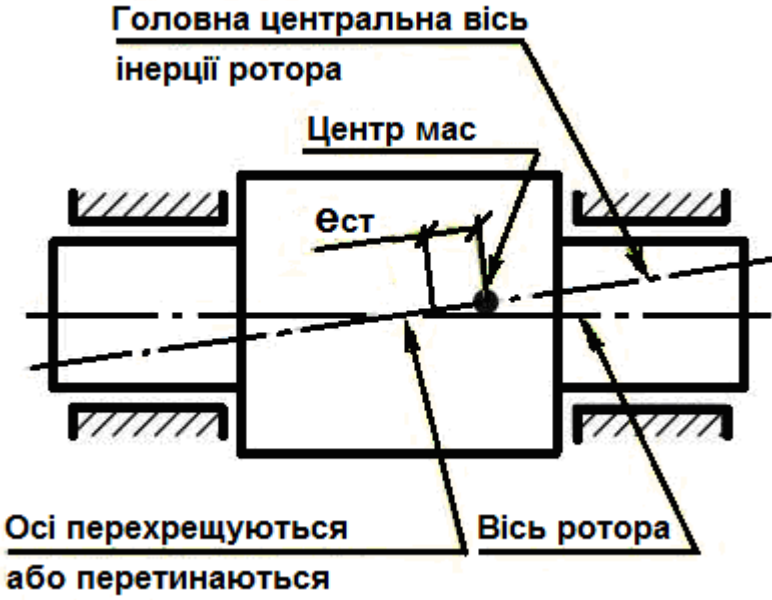


Рис. 7.3. Динамічна неврівноваженість ротора

Балансування ротора базується на прийнятті пропорційності амплітуд коливань, що викликані його силами, а також незмінності кута зсуву фаз між вектором вібрації корпусу підшипника і вектором дисбалансу.

При проведенні балансування роторів у власних підшипниках розрізняють два різних підходи до технології балансування:

1) *одноплщинне балансування*, за якого відбувається усунення коливань кожного кінця ротора, при цьому вважається, що коливання відповідного підшипника спричинене дисбалансом даної сторони ротора і балансувальний тягарець, встановлений на одному з кінців ротора буде діяти на коливання лише найближчого підшипника;

2) *двоплщинне балансування*, за якого розрахунок положення та маси балансувальних тягарців відбувається з урахування взаємного коливання обох сторін ротора.

Площина балансування (корекції) – площина в якій відбувається корекція невірноваженості шляхом додавання, або знімання певної коригуючої маси.

Площина вимірювання – площина в якій проводяться заміри вібраційних параметрів. Площина балансування та площина вимірювання повинні знаходитись якомога ближче одна до одної.

Визначення та усунення дисбалансу (зрівноважування) проводиться при балансуванні, яке поділяється так само, як і види невірноваженості:

Статичне балансування – балансування, при якому визначається і мінімізується головний вектор дисбалансів ротора, що характеризує його статичну невірноваженість. Статичне балансування проводять в одній площині корекції. Визначену для цієї площини коректуючи масу іноді зручно рознести у декількох паралельних площинах.

Моментне балансування – балансування, при якому визначається і мінімізується головний момент дисбалансів ротора, що характеризує його моментну невірноваженість. Моменте балансування проводять не менше ніж у двох площинах корекції.

Динамічне балансування – балансування, при якому визначаються і мінімізуються дисбаланси ротора, що характеризують його динамічну нерівноваженість. Динамічне балансування жорсткого ротора достатньо проводити у двох площинах. Балансування гнучкого ротора проводять зазвичай у більше, ніж двох площинах. При динамічному балансуванні зменшуються як моментна, так і статична нерівноваженість ротора одночасно.

Приклади найбільш простих методів статичного та моментного балансування розглянемо далі.

Статичне балансування явно нерівноваженого ротора

Статичне балансування, в результаті якого зміщений при обробці деталі центр мас повертається на вісь обертання, може бути проведене за допомогою досить простих пристроїв.

Ротор, що потребує балансування розміщують валом на двох паралельних горизонтальних призмах. В цьому випадку ротор буде перекинутися по призмах доти, поки центр мас не займе найнижче положення, тобто буде розташований внизу на вертикалі, що проходить через її вісь обертання (рис. 7.4).

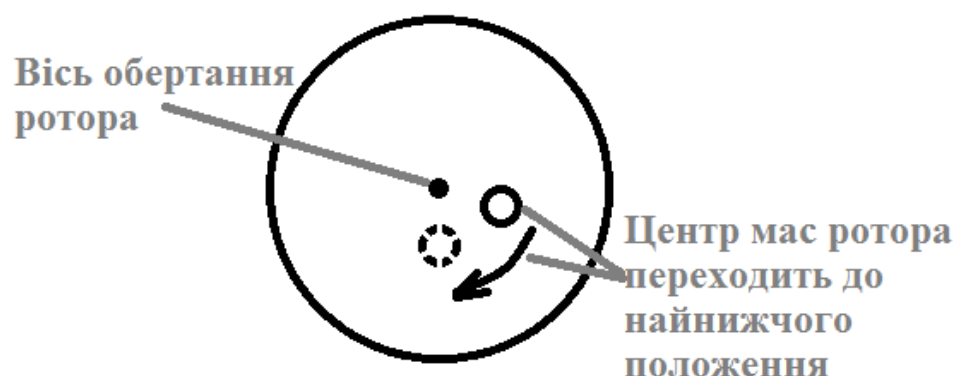


Рис. 7.4. Явна статична нерівноваженість

Довжина призм береться такою, щоб деталь вільно могла робити не менше двох вільних обертів. Прикріплюючи у верхній частині деталі

пробний вантаж (противагу), можна домогтися її байдужого кутового положення на призмах. Противагу кріплять на певному радіусі. Часто замість встановлення противаг з протилежного боку видаляють частину металу деталі з боку дисбалансу, або, якщо це допустимо, висвердлюють отвори.

Найчастіше для статичного балансування застосовують пристрої, в яких замість сталевих призм застосовуються дві пари загартованих сталевих роликів, що вільно обертаються у підшипниках кочення. Процес балансування деталей здійснюється аналогічно.

Такий випадок, коли ротор розміщений на опорах починає рух доти, доки його центр мас не перейде в найнижче положення прийнято називати *явним небалансом ротора*. Однак можливі випадки, коли ротор байдуже знаходиться на опорах, при цьому маючи дисбаланс. В такому випадку ротор має *неявний небаланс*.

Статичне балансування неявно неврівноваженого ротора методом важкої точки

Найпростішим способом балансування неявно неврівноваженого ротора є використання методу важкої та легкої точки. Для цього, ротор розміщується на призматичних опорах так само, як було описано вище. Наступним кроком найбільший діаметр ротора розбивається лініями на певне число секторів, лінії обов'язково нумеруються. Чим більше число секторів, тим вища ступінь точності балансування (зазвичай 8-16 секторів). Далі ротор прокручується таким чином, щоб лінія № 1 прийняла горизонтальне положення. Після цього на найбільшому діаметрі ротора на лінії № 1 прикріплюється контрольний тягарець. Якщо ротор не починає переміщення – прикріплюється тягарець з більшою масою. Процес продовжується доти, доки ротор не «зірветься» з байдужого положення і далі маса необхідного контрольного тягарця заміряється (рис. 7.5). Зазвичай таким контрольним тягарцем слугує пластилін, або постійний магніт. Також можливе застосування динамометру, який вільним кінцем закріплюють в місці для

встановлення контрольного тягарця, а вектор прикладання сили динамометра направляють вертикально вниз.

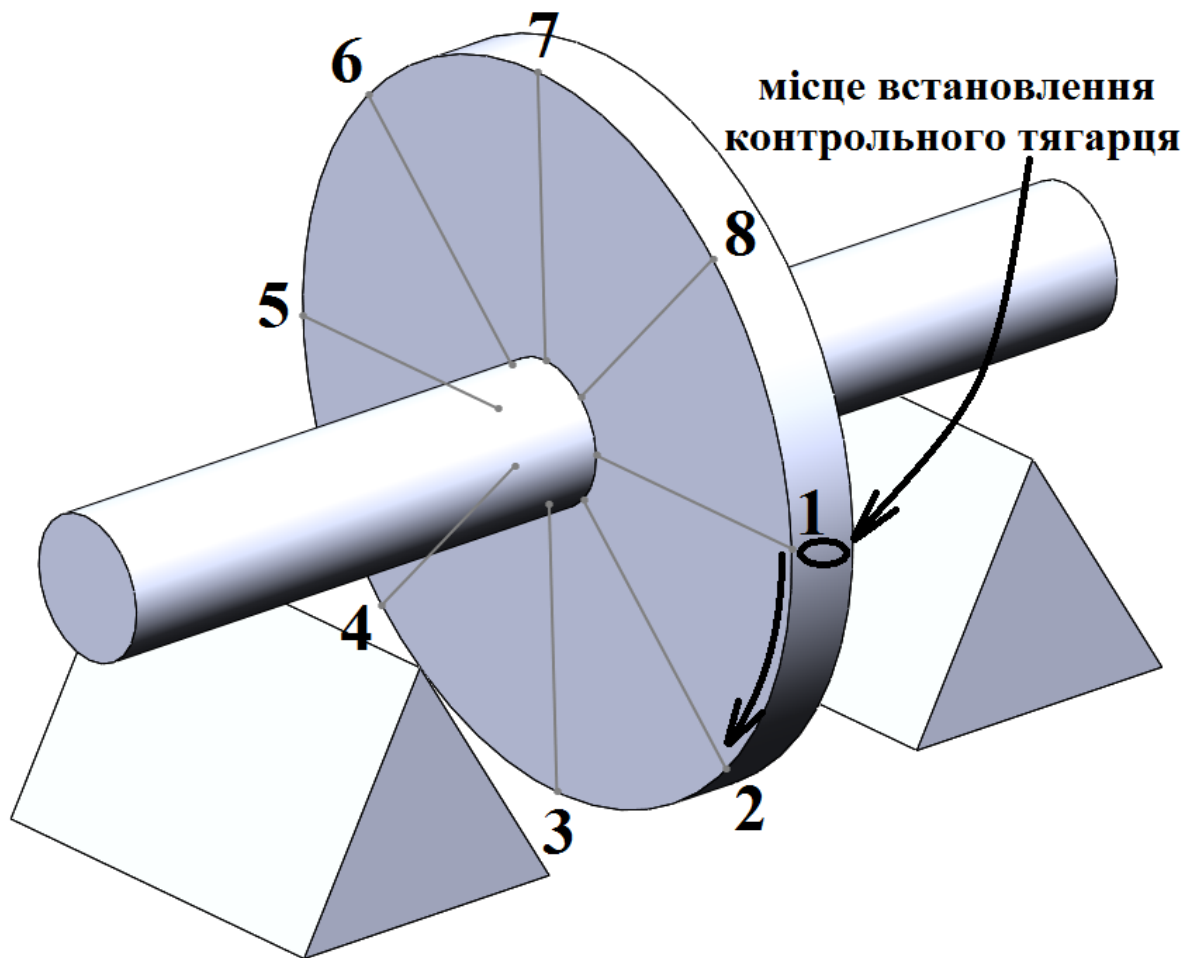


Рис. 7.5. Статичне балансування неявної неврівноваженості методом важкої та легкої точки

На наступному етапі лінію 2 переводять у горизонтальне положення і процес, описаний вище, повторюється. Провівши такі заміри для усіх контрольних точок зазвичай отримують результати подібні до тих, що показані на рис. 7.6. В даному випадку, на лінії № 3 для «зриву» ротору з байдужого положення було застосовано найважчий тягарець масою 67 г. Місце встановлення даного тягарця називається *легкою точкою*. На лінії № 7 навпаки було встановлено найлегшу масу 19 г – це *важка точка*. Таким чином, маса балансувального вантажу може бути знайдена за формулою:

$$m_0 = (m_l - m_v) / 2 \quad (7.2)$$

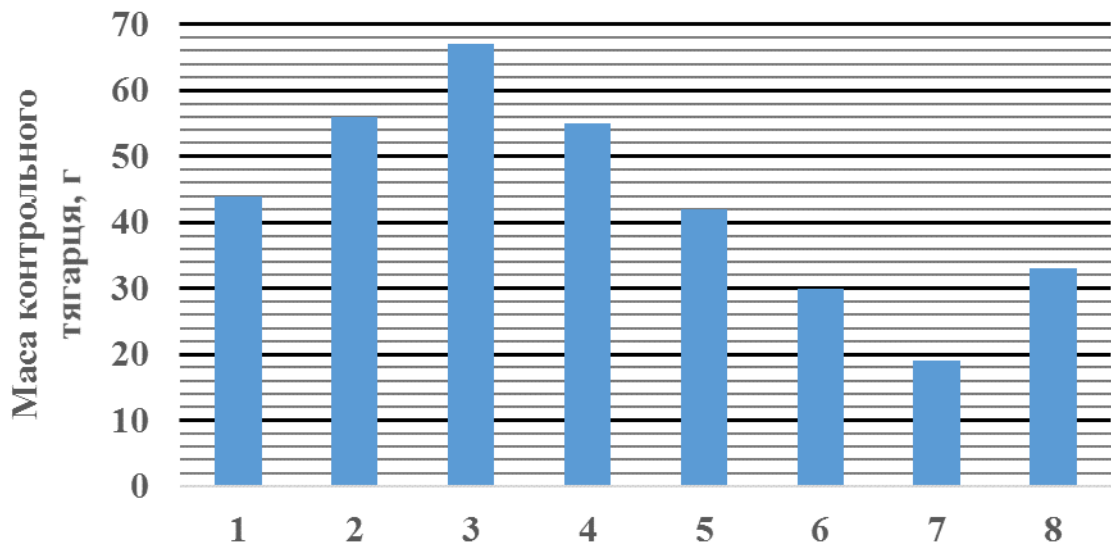


Рис. 7.6. Результати контрольних замірів статичного балансування неявно неврівноваженого ротора

Розрахований балансувальний вантаж може бути встановлений (наплавлений, приварений, тощо) в легкій точці, або ж навпаки знятий (зашліфований, зісвердлений, тощо) у важкій точці.

Моментне балансування неврівноваженого ротора методом трьох пусків

Метод трьох пусків є одним із найпростіших і досить точних методів моментного балансування. Ключовою його особливістю є те, що він може бути застосований лише для, так званих, вузьких роторів. *Вузький ротор* – це ротор для якого виконується умова $D/s > 4$, де D і s – відповідно діаметр та ширина ротора. Для такого ротора дозволяється виконувати лише одноплщинне балансування. Також метод трьох пусків передбачає проведення діагностичних робіт на номінальній частоті обертання ротора та застосування вібродатчиків. Найчастіше таким вібродатчиком слугує велосиметр. Розглянемо алгоритм балансування вузького ротора методом трьох пусків.

1. Виконується замір рівня вібрації на опорі, що є найближчою до ротора, та визначається напрямок з найбільшою вібрацією (як зазначалось

вище, часто це горизонтальний напрямок). Таким чином, у напрямку найбільшої вібрації встановлюється початкове значення віброшвидкості V_0 .

2. Далі обирається маса пробного тягарця $m_{пр}$. Ця маса обирається з міркувань досвіду балансування, але з обов'язковим врахуванням, що відцентрова сила пробного тягарця за робочої частоти обертання не повинна перевищувати 20 % ваги ротора, що припадає на найближчий підшипник. Однак чим вищою буде маса тягарця, тим більш точним буде балансування. Тому рекомендується використовувати формулу:

$$m_{пр} = 0,2 \frac{m_a g}{\omega^2 r_a} \quad (7.3)$$

де m_a – маса ротора, що припадає на найближчий підшипник;

r_a – радіус встановлення пробного тягарця;

ω – номінальна кутова швидкість обертання ротора.

3. Ротор умовно розбивається на 3 сектори за допомогою трьох ліній, що розміщені під кутом 120° . Лінії нумеруються.

4. Пробний тягарець встановлюється в верхній точці ротора на лінії № 1 та відбувається запуск ротора до номінальної частоти обертання. Віброшвидкість, що визначена за допомогою велосиметра у цьому випадку позначається V_1 .

5. Після зупинки механізму, пробний тягарець переноситься з точки 1 в точку 2 і вимірюється віброшвидкість V_2 на номінальній частоті обертання.

6. Аналогічні дії проводяться для точки 3.

7. Подальші розрахунки виконуються вручну графо-аналітичним методом, який розглянемо на прикладі таких даних вимірювання: віброшвидкість на номінальному режимі роботи $V_0 = 8$ мм/с, маса пробного тягарця $m_{пр} = 20$ г, віброшвидкість при встановленні тягарця в точку 1, 2 і 3 – відповідно $V_1 = 10$ мм/с, $V_2 = 4$ мм/с і $V_3 = 12$ мм/с. Отримані дані дозволять визначити масу балансувального тягарця m_6 та місце його встановлення.

8. Будуються 3 осі, що розміщуються під кутом 120° , вздовж яких у масштабі відкладається значення початкової віброшвидкості V_0 (рис. 7.7).

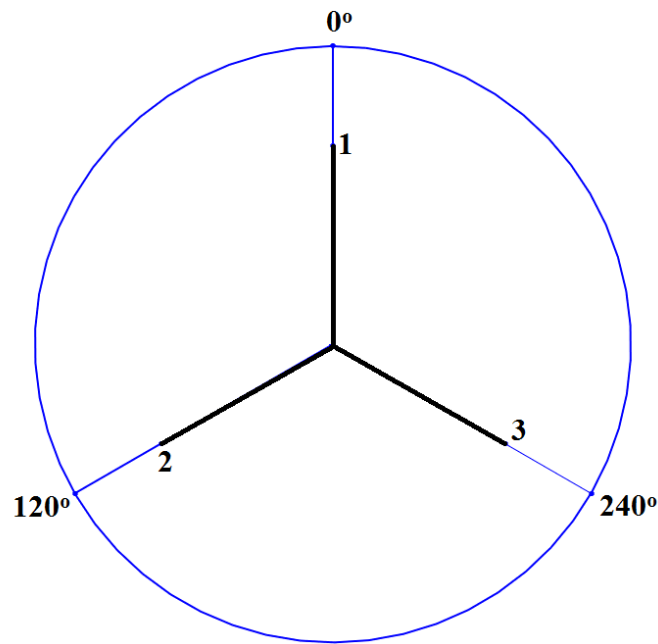


Рис. 7.7. Початкові віброшвидкості на головних осях вимірювання

9. Значення віброшвидкостей при встановленні пробного тягарця в точках 1, 2 і 3 порівнюються між собою та знаходиться найменше. Балансувальна маса залежить від двох більших значень віброшвидкості, а менше значення визначає місце встановлення балансувального тягарця. У нашому випадку $V_3 > V_1 > V_2$.

10. З точки 3 у напрямі точки 2 проводиться дуга радіусом V_3 в такому ж масштабі, як раніше було відкладено V_0 (рис. 7.8 а).

11. З точки 1 також у напрямі точки 2 проводиться дуга радіусом V_1 .

12. З точки перетину двох побудованих дуг проводиться лінія до початку координат довжина якої позначається V_t і описує сумарний вплив пробного вантажу на вібростан ротора. Також знаходиться кут α під яким необхідно встановити балансувальний вантаж (рис. 7.8 б). В нашому випадку $V_t = 4,7$ мм/с, $\alpha = 100^\circ$.

13. Знаючи сумарний вплив пробного вантажу на віброшвидкість ротора V_t та масу пробного вантажу $m_{пр}$ можна знайти масу балансувального вантажу $m_б$ за формулою:

$$m_б = m_{пр} V_0 / V_t \quad (7.4)$$

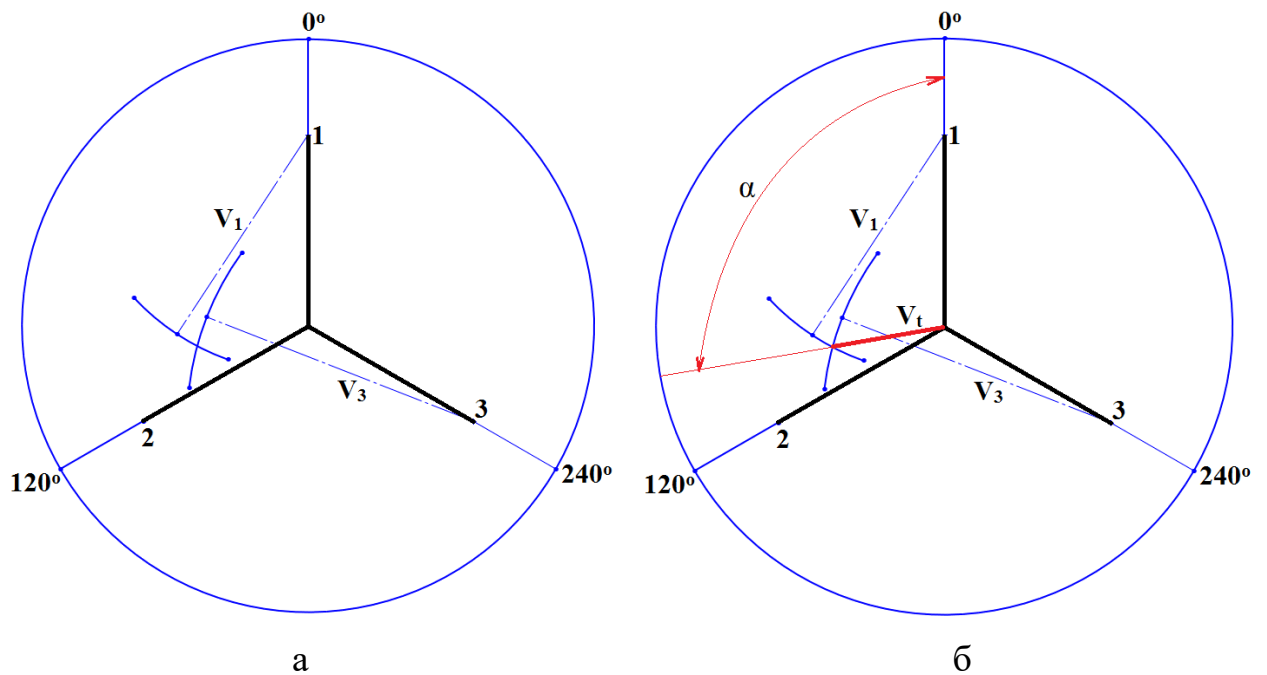


Рис. 7.8. Графо-аналітичні розрахунки до методу трьох пусків: а – побудова дуг з радіусами максимальних віброшвидкостей; б – визначення впливу балансувального вантажу

В нашому випадку, маса балансувального вантажу складає $m_6 = 34$ г.

Таким чином, для моментного балансування даного ротора необхідно закріпити вантаж масою 34 г під кутом 100° до лінії 1 на тому ж радіусі на якому було закріплено пробний вантаж (у нашому випадку – на зовнішньому діаметрі ротора).

Допустимий залишковий дисбаланс

Зрозумілою є неможливість досягнення повного балансу для об'єкта будь-якої складності, однак сучасне балансувальне обладнання дозволяє досить суттєво знизити дисбаланс роторів. Також слід вважати, що з економічної точки зору надмірне завищення вимог до якості балансування є нерациональним. Тому вирішення питання: до якого ступеня доцільно знизити дисбаланс ротора повинне знаходитись виходячи з компромісу між технічними і економічними вимогами.

Зазвичай, завод-виробник певного устаткування сам регламентує у правилах технічної експлуатації допустимі значення вібрації та залишкового небалансу для конкретного елемента обертового обладнання.

Значення рекомендованих класів точності балансування жорстких роторів для різних машин і механізмів можна переглянути в ISO 1940-1:2003.

Контрольні запитання до лекції 7

- 1. Що таке дисбаланс та який його вплив на вібрацію обертового обладнання?*
- 2. Які види неврівноваженостей Ви знаєте? Чим вони відрізняються один від одного?*
- 3. В чому різниця між явним та неявним статичним небалансом роторів?*
- 4. Що таке важка та легка точка на роторі?*
- 5. Як механічно компенсується небаланс ротора якщо відома необхідна балансувальна вага?*
- 6. Як знаходиться необхідне місце встановлення балансувального вантажу за методом трьох пусків?*

РОЗДІЛ 2. НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ОСНОВНОГО МЕТАЛУ, ГРАНИЧНИЙ СТАН ТА РЕСУРС ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Лекція 8. Методи неруйнівного контролю основного металу та зварних швів енергетичного обладнання

Неруйнівний контроль – технічне діагностування властивостей та параметрів об'єкта без порушення його придатності до експлуатації.

До основних методів неруйнівного контролю металу слід віднести:

1. Ультразвуковий контроль. В основі методу лежить дослідження процесу поширення ультразвукових коливань з частотою 0,5–25,0 МГц в об'єктах контролю. Простір, в якому поширюються ультразвукові коливання, називають ультразвуковим (акустичним) полем. Оскільки ультразвукові поля можуть створюватися в будь-яких середовищах і матеріалах, методи ультразвукового контролю є універсальними. Їх застосовують для контролю деталей, виготовлених із металів, пластмаси, скла, гуми, залізобетону та ін. Контроль із використанням ультразвуку має високу чутливість і продуктивність. Він виявляє об'ємні, лінійні і точкові дефекти – порушення суцільності, зони поверхневого розтріскування, міжкристалічної корозії, неоднорідність структури і т.д. (рис. 8.1).

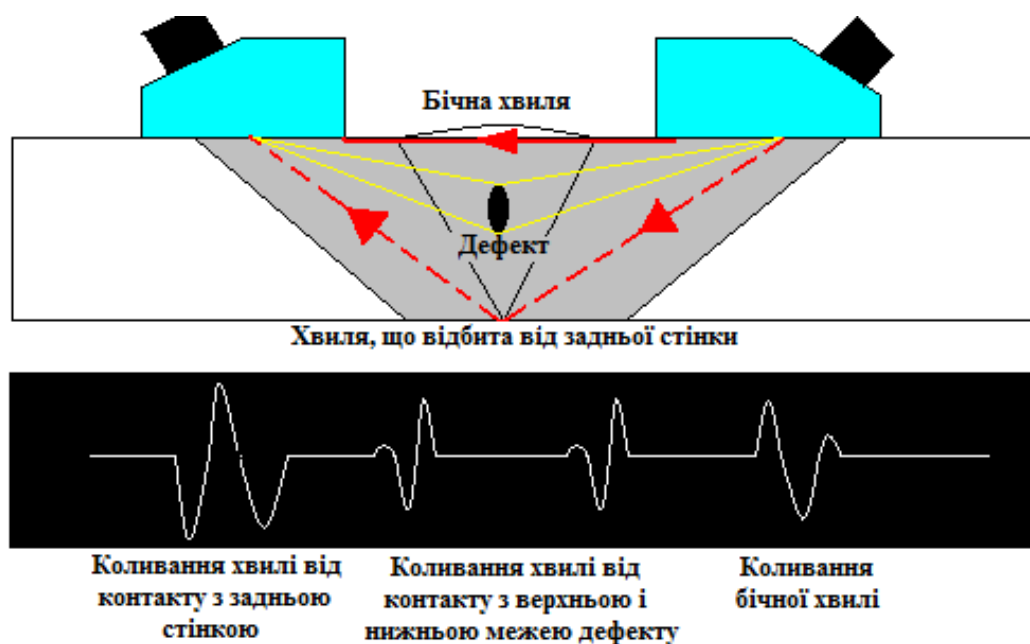


Рис. 8.1. Характер зміни довжини хвилі при проходженні через дефект

Акустичні методи неруйнівного контролю поділяються на дві підгрупи: активні та пасивні. До *активних* належать методи, що засновані на випроміненні акустичного сигналу (зондувального імпульсу) в об'єкт контролю та на дослідженні сигналу, що пройшов, а також відбитого сигналу. До *пасивних* відносять методи, що ґрунтуються на реєстрації та вивченні сигналів, утворених у результаті проходження в об'єкті контролю певних фізичних процесів (наприклад розвиток тріщини під навантаженням). Пасивні методи також називають ще *методами акустичної емісії*.

Активні методи у свою чергу поділяють на:

методи проходження – використовують випромінювальний та приймальний перетворювачі, розташовані по різні боки об'єкту контролю, або контрольованої ділянки; при цьому аналізуються зміни інтенсивності сигналу, що пройшов крізь об'єкт;

методи відбиття – ґрунтуються на реєстрації та аналізі акустичних імпульсів що відбилися від несучільностей або від границь об'єкту контролю;

комбіновані методи – комбінація методів проходження та відбиття; аналізують акустичні сигнали, що пройшли крізь об'єкт контролю а також сигнали, що відбилися від несучільностей або від границь об'єкту контролю;

методи власних коливань — використовують вільні або вимушені коливання об'єкту контролю, аналізуючи їх параметри (частоту, спектри коливань, згасання тощо);

імпедансні (комплексний опір – сума активного і реактивного опору) методи базуються на визначенні відмінності повного механічного опору (імпедансу) дефектної ділянки в порівнянні з доброякісним, для чого контрольована поверхня сканується за допомогою двох п'єзоелементів, один з яких збуджує коливання в матеріалі, а інший сприймає коливання.

Акустична емісія – технічна діагностика заснована на явищі виникнення і поширення пружних коливань (акустичних хвиль) в різних процесах, наприклад, при деформації напруженого матеріалу, витіканні газів,

рідин, горіння і вибуху (рис. 8.2). Дані хвилі можуть бути зареєстровані за допомогою спеціальних чутливих датчиків (мембран, п'єзоелементів, тощо).

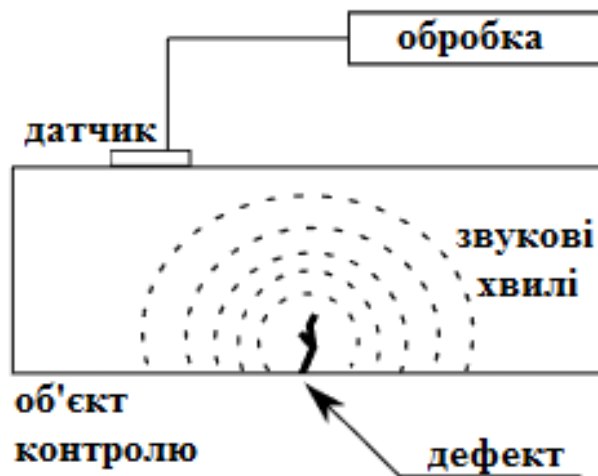


Рис. 8.2. Реєстрація акустичних хвиль емісіїю

2. Вихрострумний метод контролю ґрунтується на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться котушкою збудження в електропровідному об'єкті контролю цього поля. Як джерело електромагнітного поля найчастіше використовується котушка індуктивності (одна або декілька), що носить назву «вихрострумного перетворювача».

Синусоїдальний (або імпульсний) струм, що протікає в котушках вихрострумного перетворювача, створює електромагнітне поле, яке збуджує вихрові струми в електромагнітному об'єкті. Електромагнітне поле вихрових струмів впливає на котушки перетворювача, наводячи в них ЕРС (електрорушійну силу) або змінюючи їх повний електричний опір. Реєструючи напругу на котушках або їх опір, отримують інформацію про властивості об'єкта і про стан перетворювача залежно від його розташування відносно об'єкта (рис. 8.3). Особливість вихрострумного контролю полягає у тому, що його можна проводити без механічного контакту перетворювача з об'єктом. Їх взаємодія відбувається на відстанях, достатніх для вільного руху перетворювача відносно об'єкта (від часток міліметра до декількох

міліметрів). Тому цими методами можна отримувати точні результати контролю навіть за високих швидкостей відносного руху об'єктів.

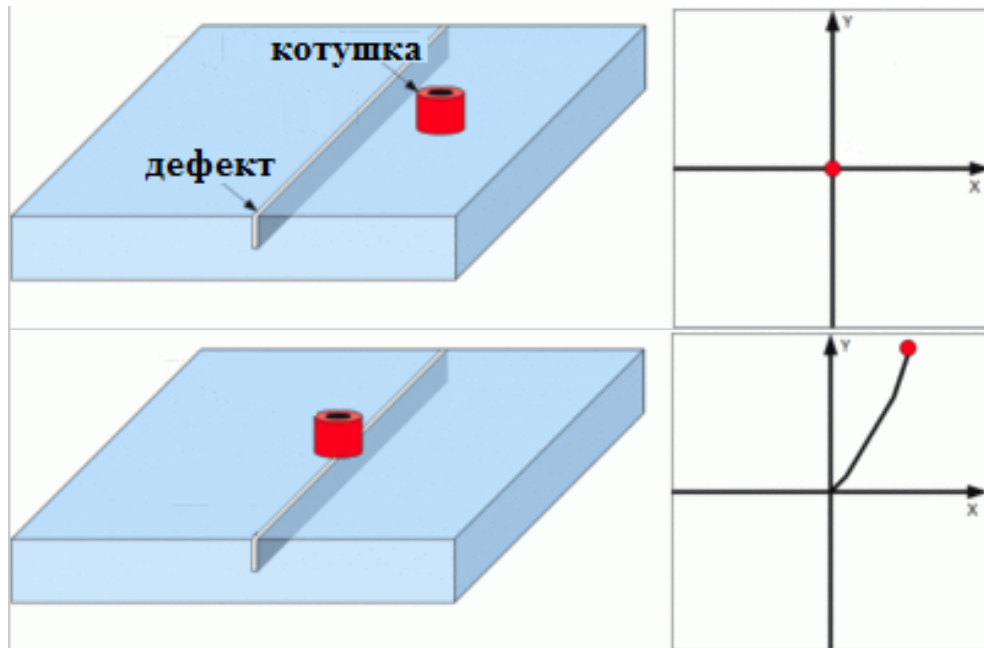


Рис. 8.3. Вихрострумний контроль діелектричної пластини

3. Радіодефектоскопія

поліляється на радіаційну та радіохвильову.

У *радіаційних* дефектоскопах здійснюється опромінювання об'єктів рентгенівськими, α , β і γ променями, а також нейтронами. Джерела випромінювань — рентгенівські апарати, радіоактивні ізотопи, лінійні прискорювачі, бетатрони, мікротрони. Радіаційне зображення дефекту перетворюють в радіографічний знімок (радіографія), електричний сигнал (радіометрія) або світлове зображення на вихідному екрані радіаційно-оптичного перетворювача або приладу (радіаційна інтроскопія, радіоскопія).

Радіохвильова дефектоскопія заснована на проникаючих властивостях радіохвиль сантиметрового і міліметрового діапазонів (мікрорадіохвиль), дозволяє виявляти дефекти головним чином на поверхні виробів зазвичай з неметалевих матеріалів. Радіодефектоскопія металевих виробів через малу проникаючої здатність мікрорадіохвиль обмежена. Цим методом визначають дефекти в сталевих листах, прутах, дроті в процесі їх виготовлення, а також вимірюють їх товщину або діаметр, товщину діелектричних покриттів і т. д.

Від генератора, що працює в безперервному або імпульсному режимі, мікrorадіохвилі через рупорні антени проникають у виріб і, пройшовши підсилювач прийнятих сигналів, реєструються приймальним пристроєм (рис. 8.4).

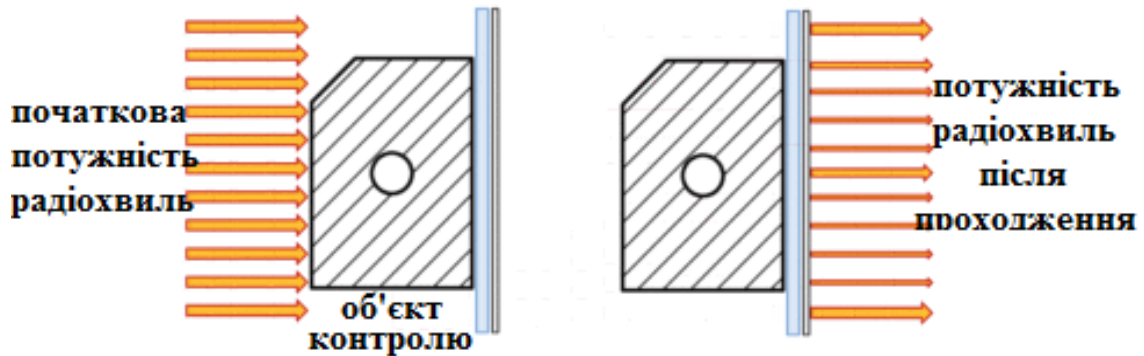


Рис. 8.4. Радіохвильова дефектоскопія

4. Капілярні методи неруйнівного контролю ґрунтуються на проникненні індикаторних речовин в об'єми поверхонь і наскрізних несучільностей матеріальних об'єктів та наступної реєстрації утворених індикаторних слідів візуальним способом (рис. 8.5).

При контролі на деталь наносять спеціальну змочуючу речовину, яка заповнює об'єми поверхневих дефектів, а залишки видаляють із поверхні. Дефекти ідентифікуються виявляючи або речовину, або накопичення порошку, що введений у речовину.

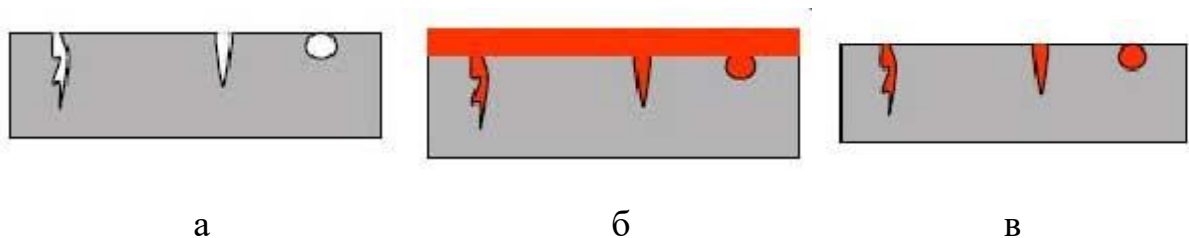


Рис. 8.5. Капілярна дефектоскопія: а) зачищення поверхні, б) нанесення індикатору, в) усунення надлишку індикатору

Найпоширеніші сліди та відповідні дефекти:

1. Сліди у вигляді суцільних ліній, що вказують на існування тріщин.

2. Сліди у вигляді перерваних ліній – про існування дефектів типу непроварювання шва, мікротріщини.
3. Сліди у вигляді округлих ділянок – про наявність дефектів типу газових включень, пар та ін.
4. Сліди у вигляді окремих точок – виявляють пористість та ін.
5. Сліди у вигляді окремих груп коротких ліній – на наявність міжкристалічної корозії або розтріскування металів.

Перевагами даного методу неруйнівного контролю є висока чутливість та достовірність, наглядність та можливість контролю деталей різної складності, можливість контролю в один прийом широких зон деталей, велика номенклатура деталей для перевірки, простота технічних операцій контролю і швидке навчання персоналу, порівняно низька вартість матеріалів.

Недоліки: висока тривалість процесу діагностування; переважна оцінка поверхневих дефектів; гірша достовірність при зниженні температури середовища; необхідність у вентиляції робочих приміщень через шкідливість деяких речовин.

5. Магнітний контроль, в основі якого лежить аналіз взаємодії магнітного поля з об'єктом контролю.

При використанні методів магнітного контролю вимірюють параметри магнітних полів, які створюються в об'єктах контролю шляхом намагнічування.

Методи магнітного неруйнівного контролю застосовують переважно для дефектоскопії феромагнетиків (заліза і сплавів на його основі, нікелю, кобальту), в яких при намагнічуванні значно посилюється магнітне поле.

У процесі магнітного контролю реєструються магнітні поля розсіювання дефектів.

Методами магнітного контролю виявляють такі характерні дефекти: тріщини (шліфувальні, гартувальні, зварні, кувальні, штампувальні),

розшарування, надриви, непровари в зварних з'єднаннях, неметалічні включення тощо. Крім того, можна контролювати і сортувати сталі деталі (в тому числі й автоматично) за твердістю після термічної обробки. Можливе проведення контролю цементованих, азотованих і загартованих шарів машин. Можливий також контроль немагнітних покриттів на феромагнітній основі.

Переваги методу: висока чутливість, відносна простота і надійність операцій контролю, можливість контролю деталей складної форми і майже будь-яких розмірів.

Найпоширенішими в промисловості є магнітопорошковий, ферозондовий і магнітографічний методи магнітного контролю.

Магнітопорошковим методом контролюють деталі з великою магнітною проникністю μ . Він базується на виявленні локальних магнітних полів розсіювання, що виникають над дефектом, за допомогою ферромагнітних частинок, що грають роль індикатора.

Магнітне поле розсіювання (рис. 8.6) виникає над дефектом внаслідок того, що в магнітній деталі магнітні силові лінії, зустрічаючи на своєму шляху дефект, обводять його як перешкоду з малою магнітною проникністю, внаслідок чого магнітне поле викривається, окремі магнітні силові лінії викидаються дефектом на поверхню, виходять з деталі і входять в неї назад. При цьому по обидві сторони дефекту виникають місцеві магнітні полюси N і S, що створюють локальне магнітне поле розсіювання.

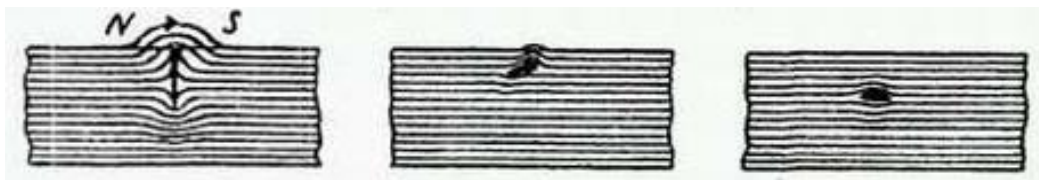


Рис. 8.6. Магнітне поле розсіювання над дефектами

Магнітне поле розсіювання виявляється завдяки тому, що на феромагнітні частинки порошку діють пондеромоторні сили цього поля, які

прагнуть зтягнути ці частинки в місця найбільшої концентрації магнітних силових ліній. В результаті феромагнітні частинки збираються над дефектом, утворюючи малюнок у вигляді смужок або ланцюжків (рис. 8.7). Ширина смужок з скопившихся частинок зазвичай значно більше ширини дефекту, тому цим методом контролю можуть бути виявлені навіть дрібні тріщини, надриви, волосовини і інші дрібні дефекти.



Рис. 8.7. Магнітопорошкові сліди на об'єкті контролю

Магнітографічний метод призначений для контролю якості зварних швів у трубопроводах, резервуарах, листових конструкціях із феромагнітних матеріалів. Індикатором магнітних полів є не магнітний порошок, а магнітна стрічка.

Магнітографічний метод контролю полягає в намагнічуванні контрольованої зони зварного шва для створення над дефектом магнітного поля розсіяння, “записи” цього магнітного поля на магнітну стрічку і прослуховування “запису” для встановлення розміщення і розмірів дефекту.

Магнітну стрічку протягують у стрічкопротяжному механізмі дефектоскопа в напрямку магнітної головки блока і підсилений сигнал зчитується з екрана осцилографа. Наявність дефекту, його місцезнаходження і характер визначають за протяжністю, величиною і формою імпульсів. Магнітну стрічку використовують багаторазово.

Ферозондовий метод магнітного неруйнівного контролю ґрунтується на виявленні і вимірюванні магнітних полів (в тому числі і полів розсіяння, які виникають в зоні дефекту) за допомогою ферозондів – приладів, які дозволяють виявляти і вимірювати магнітні поля.

Ферозондовим методом можна виявляти не тільки поверхневі порушення суцільності феромагнетичних матеріалів, але і ті, які знаходяться на глибині 10–15 мм.

Застосування ферозондів дозволяє організувати автоматизоване і автоматичне сортування сталених деталей по твердості. Вони дають якісну і кількісну характеристики магнітних властивостей матеріалу виробів, за якими можна судити про структуру і механічні властивості при магнітоструктурному аналізі. Цей метод дозволяє виміряти товщину стінок складних відливків і листів великої площі із неферомагнітних матеріалів.

Ферозондовий метод застосовують також для визначення ступеня розмагніченості виробів, підданих магнітному контролю.

6. Лазерна голографія – метод одержання об'ємного зображення об'єкта, що ґрунтується на інтерференції хвиль.

Голографія забезпечує одержання повнішої інформації про об'єкт, тому що реєструє на фотоплівці не тільки амплітуду, а й фази світлових хвиль, розсіяних об'єктом. Для цього на фотопластинку одночасно з хвилею, розсіяною об'єктом (сигнальна хвиля), потрібно направити допоміжну хвилю, що йде від того самого джерела світла (лазера), з фіксованими амплітудою і фазою (опорна хвиля) (рис. 8.8). В оптиці даний метод отримання зображення називається схемою Лейта–Упатнієкса.

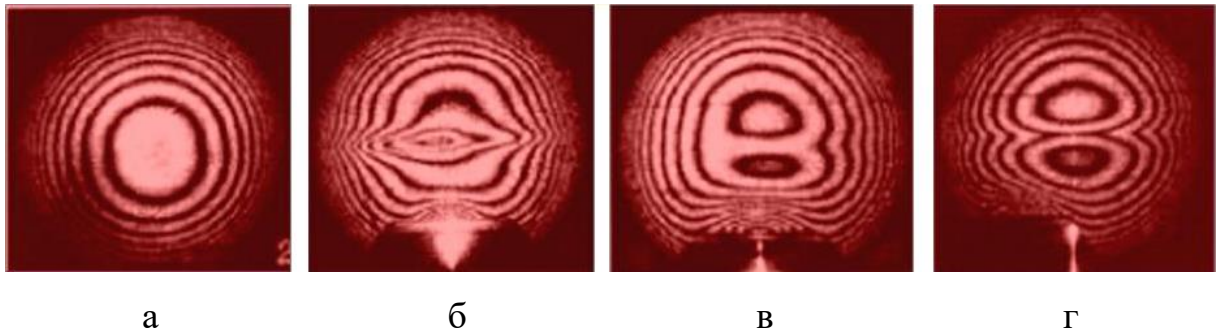


Рис. 8.9. Інтерферограми деформації посудин під тиском:
 а) бездефектна посудина; б) зварний шов з провисанням;
 в) локальний непровар; г) тривалий непровар.

Контрольні запитання до лекції 8

- 1. Які найбільш поширені методи неруйнівного контролю Ви знаєте?*
- 2. Яка область застосування активних та пасивних акустичних методів діагностичного контролю?*
- 3. За рахунок чого вихрострумові методи контролю придатні до застосування на працюючих енергетичних установках?*
- 4. В чому особливість застосування радіохвильового контролю для металевих виробів?*
- 5. Що таке магнітне поле розсіювання та яка його область застосування у технічній діагностиці?*
- 6. В чому переваги застосування інтерферографічних методів діагностування?*
- 7. Узагальнивши отримані знання щодо неруйнівного контролю вкажіть яке його місце у технічній діагностиці, а також які у нього переваги та недоліки?*

Лекція 9. Прогнозування довговічності експлуатації енергетичного обладнання. Граничний стан та індивідуальний ресурс

Окрім встановлення поточного технічного стану об'єкта діагностування та розслідування наслідків виходу з ладу, як вже зазначалось раніше, діагностування енергетичного устаткування дозволяє виконувати прогнозування технічних станів. До вказаних в лекції № 1 типових технічних станів слід додати важливий для задач прогнозування – **граничний стан**. Він характеризує вихід об'єкта з області працездатного стану.

Граничним станом в технічній діагностиці прийнято називати такий стан обладнання, за якого його подальша експлуатація є недопустимою або економічно недоцільною. В цей стан можуть переходити як окремі елементи енергетичного обладнання, так і все устаткування.

Вимоги до обладнання, щодо забезпечення належних техніко-економічних показників, надійності експлуатації, впливу на навколишнє середовище визначаються в правилах технічної експлуатації. При досягненні граничного стану за будь-яким з цих показників необхідно припинити експлуатацію обладнання та розглянути можливість її продовження, після виконання відповідних ремонтних заходів, або повної заміни зношених вузлів.

Граничний стан може бути встановлений за багатьма технологічними, економічними, екологічними або надійнісними показниками. Проте, зазвичай, для високотемпературного та найбільш високовартісного обладнання він встановлюється за показниками пошкодження.

Головними критеріями граничного стану є певні екстремальні значення параметрів вказаних вище, що допускаються правилами технічної експлуатації. Разом з тим, сама динаміка зміни критеріїв граничного стану несе в собі діагностичну інформацію [9].

Умовно виділяють три основні групи критеріїв (табл. 9.1) [9]:

1-ша група – для якої в результаті зношення або інших пошкоджень відбувається стрибкоподібна зміна стану обладнання і воно переходить в

граничний стан. Прикладами таких пошкоджень слугує крихке руйнування деталі, наскрізна корозія, тощо. Для цієї групи доцільно встановлювати граничне значення допустимого пошкодження.

2-га група – для якої в результаті тривалого зношення настає зона експоненційного зростання регламентованих параметрів. Для такої групи варто встановлювати цей момент початку інтенсифікації, з метою запобігання аварійних відмов.

3-тя група – для якої характерним є лінійний характер зношення без екстремальних зон. В цьому випадку граничне значення параметрів встановлюється виходячи з правил технічної експлуатації та діагностичного досвіду.

Таблиця 9.1.

Типові групи критеріїв граничного стану [9]

Тип пошкодження	1-ша група	2-га група	3-тя група
Втрата жорсткості та міцності			
Теплові деформації	Виникнення теплових тріщин	Деформація з виникненням зон пластичності	Деформація без зміни стану матеріалу
Корозія	Наскрізна корозія	Втрата несучої здатності елемента	Окиснення поверхні
Зношення	Злам в результаті зношення	Зміна типу зношення	Викривлення поверхні тертя

В задачах прогнозування та для планування експлуатації досить зручним параметром, що визначає час до настання граничного стану є ресурс.

Ресурс обладнання – це сумарне напрацювання об'єкта від початку його експлуатації або її відновлення після ремонту до переходу в граничний стан. Розрізняють проектний, парковий, індивідуальний та залишковий ресурси.

Проектний ресурс – напрацювання, на яке запроектовано деталь з необхідними запасами міцності для запобігання руйнуванню. Більшість енергетичного обладнання, що зараз експлуатується в Україні, спроектоване в 60-70-х роках минулого століття. Через відсутність достатнього досвіду в проектуванні такого устаткування та інформації, щодо довговічності експлуатації високолегованих сталей, проектний ресурс більшості обладнання встановлено зі значними запасами міцності.

Так, для значної частини турбінного та парогенераторного обладнання ТЕС і АЕС проектний ресурс встановлено на рівні 100 тис. год. З накопиченням діагностичної інформації під час експлуатації та проведенням додаткових досліджень в сфері механіку руйнувань відбулося перепризначення допустимого терміну експлуатації енергетичного обладнання не по проектному, а по парковому ресурсу.

Парковий ресурс – це напрацювання однотипних за конструкцією, маркою сталі та умовами експлуатації елементів енергетичного обладнання, в межах якого забезпечується їх безаварійна робота при дотриманні вимог діючої нормативної документації з технічної діагностики.

При призначенні паркового ресурсу враховується досвід експлуатації однотипного по конструкції обладнання, а також досвід пошкодження устаткування при певних параметрах середовища (тиск та температура). Парковий ресурс не має чіткого регламенту для розрахунку та не може врахувати специфіку експлуатації обладнання за певних умов на окремих електростанціях. Він призначається для обґрунтування можливості подальшої експлуатації енергетичного устаткування понад проектний ресурс, який був закладений достатньо консервативно – з великими запасами по міцності та надійності.

Для прикладу, значення паркового ресурсу турбін, що встановлені на ТЕС України, в залежності від їх експлуатаційних параметрів, потужності та заводу виробника, представлені в табл. 9.2.

Таблиця 9.2

Значення паркового ресурсу деяких турбін ТЕС України

Завод-виробник	Тиск свіжої пари, МПа	Потужність, МВт	Парковий ресурс	
			Напрацювання, тис. год.	Кількість пусків
ПАТ «ТМЗ»	9 та менше	50 та менше	270	900
	13-24	50-250	220	600
АТ «ЛМЗ»	9 та менше	100 та менше	270	900
	13-24	50-300	220	600
	24	50-1200	100	300
ПАТ «Турбоатом»	9 та менше	50 та менше	270	900
	13-24	160	200	600
	24	300	170	450
	24	500	100	300

Як видно з табл. 9.2, критеріями паркового ресурсу окрім часу роботи (напрацювання) слугують і число пусків обладнання. Справа в тому, що при пускових режимах роботи основне високотемпературне обладнання зазнає значних напружень, через значну зміну параметрів теплоносія та, як наслідок, певну нерівномірність температурних полів. В такому випадку обладнання зазнає впливу дещо іншого механізму руйнування, про що буде вестись мова далі, який також має бути врахований.

Після вичерпання обладнанням, свого паркового ресурсу існує можливість продовження його експлуатації після розрахунку індивідуального ресурсу для кожного вузла енергоблоку.

Індивідуальний ресурс встановлюється за результатами індивідуального обстеження окремого елемента, або невеликої групи однотипних елементів

обладнання конкретної ТЕС. Він здатен врахувати специфіку експлуатації кожного окремого блоку, результати планово-попереджувальних ремонтних робіт та проведених модернізацій. Критерії оцінки та алгоритм прийняття рішення про можливість та умови експлуатації обладнання протягом залишкового ресурсу є більш визначеними. Це є наслідком накопичення та аналізу досвіду експлуатації обладнання протягом проектного і подальшого за ним паркового терміну служби.

Залишковий ресурс – це залишковий допустимий час роботи об'єкта на момент його оцінки за умови дотримання певних коефіцієнтів запасу міцності. Тобто іншими словами залишковий ресурс є різницею між індивідуальним ресурсом та напрацюванням обладнання на момент оцінки ресурсу.

Як тепер зрозуміло, фізичною причиною наближення граничного стану та вичерпання індивідуального ресурсу є накопичення пошкоджуваності в металі основних деталей та вузлів установок.

Пошкоджуваність в механіці руйнування – це стохастична величина, що характеризує степінь зношення основного металу обладнання та його наближення до переходу в граничний стан, за певних прийнятих запасах міцності.

Пошкоджуваність встановлюється на базі експериментальних випробувань для певної групи однотипного обладнання. Зрозумілим є те, що в процесі виготовлення обладнання, або його монтажу існує можливість незначного відхилення його деяких фізико-механічних властивостей. Це може призвести до того, що експлуатуючись в однакових умовах на протязі часу t , одне устаткування перейде в граничний стан, а інше – ні. Саме тому, пошкоджуваність визначається осереднено для групи обладнання і при аналітичних розрахунках обов'язково має визначатись з деякими запасами міцності, що встановлюються нормативною документацією.

Для кращого розуміння вищевказаних термінів розглянемо такий приклад: нехай досліджується ротор високого тиску турбіни К-200-130 ЛМЗ.

Згідно до табл. 9.2, його проектний ресурс складає 220 тис. год. Це значення не розрахункове, а встановлено опираючись на досвід експлуатації багатьох турбін 200 МВт. Після вичерпання його проектного ресурсу, було виконано розрахункове дослідження індивідуального ресурсу і встановлено, що він дорівнює 300 тис. год. Тоді залишковий ресурс становить 80 тис. год. Через цей час обладнання перейде в граничний стан і його пошкоджуваність дорівнюватиме 1. На поточний момент, коли напрацювання ротора складає 220 тис. год, його пошкоджуваність – $\Pi = 220/300 = 0,733$. Даний приклад розглянуто без застосування конкретних аналітичних виразів, а лише опираючись на логіку для кращого розуміння вказаних термінів.

Як вже було сказано, розрахунок залишкового ресурсу виконується у відповідності до певних нормативних документів та керівних матеріалів. Наприклад, в Україні такими документами є [10-12].

В загальному випадку, залишковий ресурс розраховується за формулою:

$$[G] = (1 - \Pi') / \Pi'' \quad (9.1)$$

де Π' – накопичена на момент оцінки ресурсу пошкоджуваність основного металу;

Π'' – прогнозована на наступний за оцінкою період експлуатації осереднена пошкоджуваність, яка буде накопичуватись за 1 годину експлуатації.

У випадку, якщо передбачається, що обладнання продовжить експлуатуватись у тому ж режимі, що й до оцінки ресурсу прогнозована пошкоджуваність може бути прийнята:

$$\Pi'' = \Pi' / t \quad (9.2)$$

де t – поточне напрацювання обладнання;

Накопичена пошкоджуваність в металі визначається сумою двох основних складових:

$$\Pi' = \Pi'_{ст} + \Pi'_{ц} \quad (9.3)$$

де $\Pi'_{ст}$ – пошкоджуваність, що накопичена за статичними механізмами руйнування, такими як вичерпання довготривалої міцності, накопичення повзучості, тощо;

$\Pi'_{ц}$ – пошкоджуваність, що накопичена за циклічними механізмами руйнування, такими як накопичення мало- та високоциклової втоми, пошкодження від крутильних коливань, тощо.

Методи розрахунку статичної та циклічної складової пошкоджуваності описуються відповідними нормативними документами. Їхня оцінка дозволяє встановити необхідні терміни та обсяги проведення попереджувальних ремонтних робіт, з метою запобігання передчасному виходу з ладу обладнання та аварійних ситуацій (рис. 9.1).

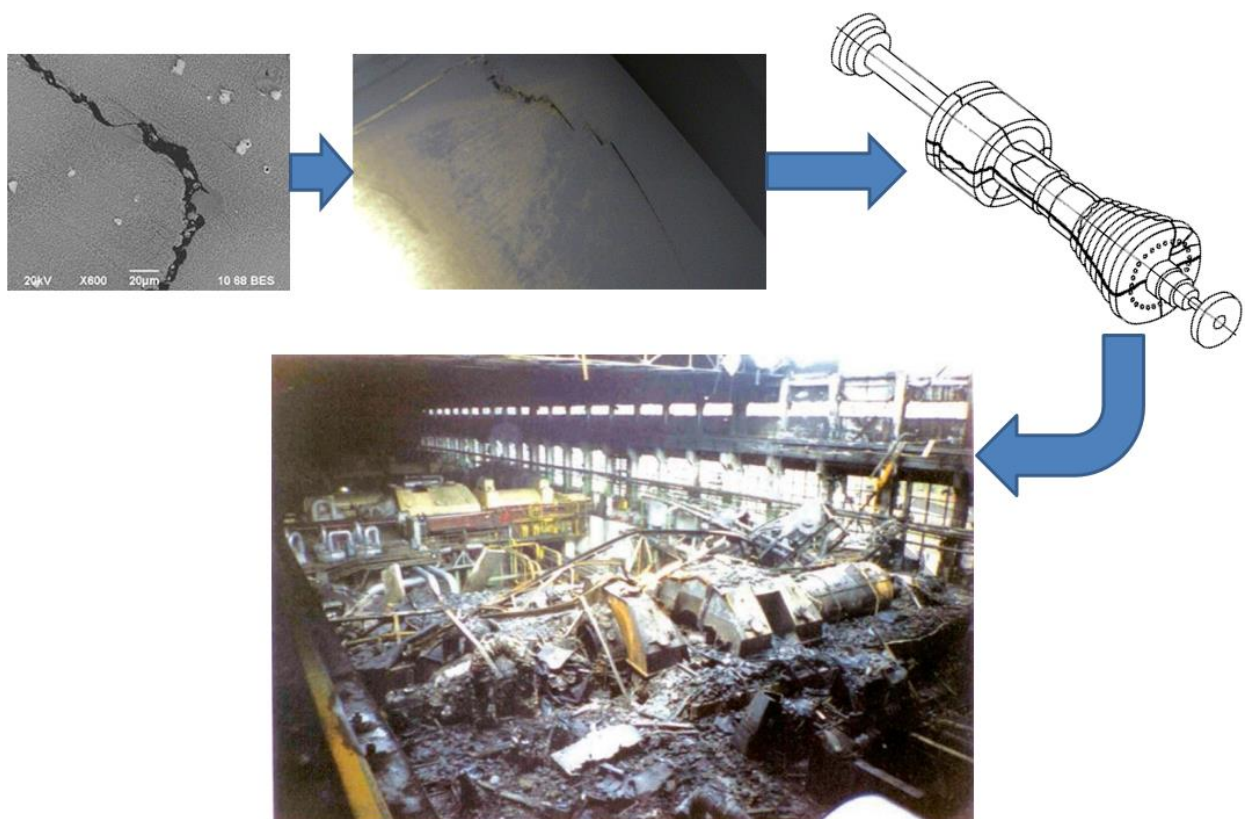


Рис. 9.1. Аварія на Каширській ТЕС у 2002 р. через критичне накопичення циклічної пошкоджуваності та значного росту коливально-втомних тріщин

Проведення оцінки індивідуального залишкового ресурсу є складною науковою задачею, яка потребує проведення великого комплексу технічних

робіт. Таких як аналіз та аудит технічної документації ТЕС і АЕС, щодо умов експлуатації, контроль металу основних елементів, дослідження структури і властивостей металу основних елементів, розрахункової оцінки напруженого стану і залишкового ресурсу найбільш напружених деталей енергетичних установок.

В той же час, проведення таких робіт дозволяє запобігти аварійним ситуаціям та надає можливість встановити допустимий термін роботи обладнання понад парковий строк служби. Обґрунтоване продовження ресурсу дозволяє скоротити основні фінансові та матеріальні фонди на введення нових генеруючих потужностей та забезпечити надійність роботи енергосистеми.

Контрольні запитання до лекції 9

- 1. Надайте поняття граничного стану в технічній діагностиці. Як він встановлюється?*
- 2. На які групи поділяються критерії для встановлення граничного стану пошкодження основного металу?*
- 3. Що таке ресурс обладнання? В чому відмінність між проектним та парковим ресурсом?*
- 4. Поясніть поняття пошкоджуваності та залишкового ресурсу в механіці руйнування. Як пошкоджуваність пов'язана з залишковим ресурсом?*
- 5. Чому дорівнює накопичена в металі пошкоджуваність при переході обладнання в граничний стан?*
- 6. Вкажіть рівняння, за яким розраховується залишковий ресурс. Поясніть складові.*

Перелік посилань

1. Методы технической диагностики: Материалы лекций / Науменко А.П. – Омск: Омский Государственный Технический Университет, 2016. – 125 с.
2. Діагностика електрообладнання: навчальний посібник / В. М. Кутін, М. О. Ілюхін, М. В. Кутіна – Вінниця: Вінницький Національний Технічний Університет, 2013. – 161 с.
3. Діагностика та контроль технологічних процесів: конспект лекцій з курсу «Діагностика та контроль технологічних процесів » / В. М. Доля. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2008. – 55 с.
4. Конспект лекцій з дисциплін «Технічна діагностика електромеханічних систем», «Діагностування рухомого складу електричного транспорту» (для студентів усіх форм навчання за напрямом підготовки 6.050702 «Електромеханіка» спеціальності "Електричний транспорт") / С. А. Калкаманов, А. В. Коваленко, В. М. Шавкун. – Х.: ХНУМГ, 2014. – 152 с.
5. Тепловой контроль и диагностика. Учебное пособие / Д.А. Нестерук, В.П. Вавилов. – Томск: Томский политехнический университет, 2007. – 104 с.
6. Электронный учебно-методический комплекс по учебной дисциплине Контроль и диагностика тепломеханического оборудования ТЭС / Герасимова А. Г., Качан С. А. – Минск: Белорусский Национальный Технический Университет, 2017. – 191 с.
7. Техническая диагностика механического оборудования / Сидоров В.А., Кравченко В.М., Седуш В.Я., Ошовская Е.В. – Донецк: Новый мир, 2003. – 125 с.
8. Основы теории надежности и технической диагностики: конспект лекций / А. В. Федотов, Н. Г. Скабкин. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – 64 с.
9. Введення в технічну діагностику машин: навчальний посібник / В.М. Нагорний. – Суми: Сумський державний університет, 2011. – 483 с.

10. НД МПЕ України. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій: СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2004. – Офіц. вид.- К.: ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2005. – 76 с.

11. СОУ-Н МЕНВ 40.1-21677681-52:2011 Визначення розрахункового ресурсу та оцінки живучості роторів та корпусних деталей турбіни: Методичні вказівки / Міненерговугілля України / М.Г. Шульженко. – Офіц. вид., 2011. – 24 с.

12. ГНД 34.09.453.2003. Розрахунок показників надійності для електростанцій, теплових мереж та енергокомпаній. – Методика. – Офіц. Вид., 2003. – 26 с.