

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

Діагностика технологічних систем і виробів машинобудування

Конспект лекцій

Краматорськ
ДДМА
2017

УДК 621:004.9

ББК 34.6

Д 44

Автори:

Ковалевський С. В., д-р техн. наук, професор, зав. кафедри Технології машинобудування Донбаської державної машинобудівної академії;

Ковалевська О. С., канд.техн.наук, доцент, докторант Національного технічного університету України «НТУ КПП»;

Рецензенти:

Анділахай О. О., д-р техн. наук, професор, Приазовський державний технічний університет;

Кіяновский М. В., д-р техн. наук, професор, Криворізький національний університет;

Суботін С. О., д-р техн. наук, професор, Запорізький національний технічний університет

Рекомендовано

Вченою радою Донбаської державної машинобудівної академії
(протокол № 10 від 30.06.2016)

Д 44 Діагностика технологічних систем і виробів машинобудування (з використанням нейромережевого підходу): монографія / С. В. Ковалевський, О. С. Ковалевська.– Краматорськ : ДДМА, 2017. – 74 с.

ISBN 978-966-379-726-7.

Подано основи інформаційної сутності діагностики технологічних систем і виробів машинобудування, наведено аналіз існуючих методів діагностики технологічних систем і машинобудівної продукції. Відмітна особливість монографії – надання результатів роботи авторів у напрямі розвитку методів діагностики характеристик металообробного інструменту і параметрів якості оброблених деталей машин. Також у монографії наведено особливості застосування математичного апарату нейромережевого моделювання при обробленні діагностичних даних. Може бути використана фахівцями і студентами машинобудівних та технологічних спеціальностей.

УДК 621:004.9

ББК 34.6

© С. В. Ковалевський,
О. С. Ковалевська. 2016

© ДДМА, 2016

ISBN 978-966-379-726-7

ЗМІСТ

стор.

ВСТУП.....	4
1 Поняття діагностики. Основні терміни та визначення.....	6
2 Елементи теорії ймовірності і математичної статистики.....	13
3 Математична логіка в діагностичних оцінках.....	21
4 Теорія інформації в діагностичних оцінках.....	28
5 Елементи теорії надійності в технічній діагностики.....	33
6 Принципи, методи та засоби неруйнівного контролю.....	43
6.1 Загальна характеристика засобів неруйнівного контролю та їх класифікація.....	43
6.2 Магнітний неруйнівний контроль.....	46
6.3 Електричні методи та засоби неруйнівного контролю.....	49
6.4 Вихроструміві методи контролю.....	52
6.5 Метод проникаючих речовин.....	55
6.6 Радіаційні методи неруйнівного контролю.....	57
7 Акустичні методи контролю і діагностики.....	61
ВИСНОВКИ.....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70

ВСТУП

Промислове виробництво виробів з різних матеріалів завжди супроводжується певним відсотком браку, пов'язаних з різними дефектами форми, прихованими дефектами, що проявляються при обробці, а також непридатністю робочих поверхонь до нормального функціонування готових виробів в подальшому.

До недавнього часу здійснення контролю якості вимагало, а на багатьох підприємствах і досі вимагає присутності контролерів, які здійснюють цей контроль візуально. Процес сортування деталей або виробів, що підлягають контролю (за участю людини), повинен здійснюватися безпосередньо на потокової лінії в режимі реального часу незалежно від темпів виробництва. Сам по собі процес є одноманітним і виснажливим. Контролери, на яких покладено реалізацію процесу контролю якості, можуть неадекватно оцінити стан деталі внаслідок втоми, неухважності або з якоїсь іншої причини. До того ж продуктивність праці людини в ряді випадків виявляється недостатньо високою для забезпечення необхідної швидкості виконання необхідного процесу і економного розподілу робочої сили. Наприклад, при виробництві деталей для автоматичних коробок перемикачів передач, час, відведений одному контролеру на перевірку деталі дорівнює 2,5 хвилинам, тоді як машині потрібно 6 секунд. Це означає, що машина може замінити в даному випадку від 25 до 75 осіб. Крім того, контролери вже не в змозі забезпечити дотримання вимог, що постійно посилюються, до точності, з якою повинен бути проведений контроль. Це призводить до того, що відсоток браку при візуальній перевірці за участю людини досить високий, що тягне за собою, наприклад, великі рекламації, які можуть значно перевищувати вартість обладнання для автоматичного контролю якості.

Сучасний стан промисловості вказує на необхідність розробки проблемно-орієнтованих систем управління, здатних прискорити процес автоматизації виробництва і одночасно забезпечити більш високий рівень якості виробів. Це обумовлено новими вимогами до конкурентоспроможності продукції в умовах сучасного ринку, а саме, потребою в зниженні вартості процесу виробництва з одночасним підвищенням його точності і надійності. Тому актуальним є питання розробки систем контролю якості виробів. Наявність подібного обладнання на підприємстві має на увазі повністю автоматичне розбракування або сортування виробів відповідно до існуючих на даному підприємстві критеріїв якості.

Передові виробництва розвинених країн в даний час стрімко переходять на повністю автоматичне виробництво виробів у всіх областях промисловості. Проблема автоматизації виробництва і впровадження автоматизованих систем контролю якості виробів є надзвичайно важливою як з технічної, так і з економічної точки зору.

Перехід на автоматичний контроль якості є неминучим і вимагає не тільки створення спеціальної апаратури, а й розробки відповідного математичного та програмного забезпечення систем обробки інформації [52, 87, 96, 114, 124, 130, 133, 137, 166, 232 та ін.].

Більш широкий спектр технічних питань охоплює термін «діагностика». Коло завдань діагностики постійно розширюється. Крім традиційних завдань, пов'язаних з контролем стану технічних об'єктів, до них відносяться багато завдань дослідження властивостей систем різноманітної природи. У монографії представлені окремі результати роботи авторів з розвитку методів діагностики в галузі забезпечення якості технологічних систем і визначення характеристик точності і якості поверхні деталей машин.

Ми сподіваємося, що представлені матеріали можуть виявитися корисними фахівцям і студентам машинобудівних спеціальностей.

1 Поняття діагностики. Основні терміни та визначення

Діагностикою називається наука про розпізнавання стану об'єкта. Аналіз стану проводиться в умовах, при яких отримання інформації вкрай складне, тому часто не є можливим за наявною інформацією зробити однозначний висновок і доводиться використовувати статистичні методи. Таким чином, основним завданням діагностики є розпізнавання стану об'єкта в умовах обмеженої інформації [58,59,83,203].

Метою діагностики є підвищення надійності й ресурсу об'єктів, зокрема технічних виробів [83,127,134].

Найбільш важливим показником надійності виробів є відсутність відмов під час його функціонування (безвідмовність). Технічна діагностика, завдяки передчасному виявленню дефектів і несправностей, дозволяє усунути подібні відмови в процесі технічного обслуговування і ремонту, що підвищує надійність і ефективність експлуатації виробів.

Теоретичним фундаментом для вирішення основного завдання діагностики є теорія розпізнавання образів. Тому, діагностика вивчає алгоритми розпізнавання стосовно завдань діагностики, які зазвичай можуть розглядатися як завдання класифікації [116,193,213,214,215,216,].

Алгоритми розпізнавання в діагностиці частково ґрунтуються на діагностичних моделях, що встановлюють зв'язок між станами об'єктів та їх відображеннями у просторі діагностичних ознак. Важливою частиною проблеми розпізнавання є правила прийняття рішень (вирішальні правила).

Рішення діагностичних завдань (віднесення виробу до справного або несправного) завжди пов'язане з ризиком помилкової тривоги або пропуску мети. Для прийняття обґрунтованого рішення залучаються методи теорії статистичних рішень. Рішення задач технічної діагностики пов'язане з прогнозуванням надійності на найближчий період експлуатації (до наступного технічного огляду). Тут рішення ґрунтуються на моделях відмов, досліджуваних у теорії надійності [104,161,169,221,222].

Іншим важливим напрямком технічної діагностики є теорія контролездібності.

Контролездібністю називається властивість виробу забезпечувати достовірну оцінку його технічного стану.

Контролездібності створюються конструкцією виробу і прийнятою системою діагностики. Основним завданням теорії контролездібності є вивчення засобів і методів отримання діагностичної інформації. У складних технічних системах використовується автоматизований контроль стану, яким передбачається обробка діагностичної інформації і формування керуючих

сигналів. Методи проектування автоматизованих систем контролю складають один з напрямків теорії контролездібності. Задачі теорії контролездібності пов'язані з розробкою алгоритмів пошуку несправностей, розробкою діагностичних тестів, мінімізацією процесу встановлення діагнозу [116].

Таким чином, структура технічної діагностики характеризується теорією розпізнавання і теорією контролездібності. Теорія розпізнавання містить розділи, пов'язані з побудовою алгоритмів розпізнавання, вирішальних правил і діагностичних моделей. Теорія контролездібності включає розробку засобів і методів отримання інформації, контроль і пошук несправностей [134].

Якість виробів представляє сукупність властивостей, що визначають їх придатність для експлуатації. Надійність є найважливішим техніко-економічним показником якості будь-якого технічного пристрою, тобто здатність безвідмовно працювати з незмінними технічними характеристиками протягом заданого проміжку часу за певних умов експлуатації. Проблема забезпечення надійності пов'язана з усіма етапами створення виробу і всім періодом його використання. Надійність виробу закладається в процесі його конструювання і розрахунку і забезпечується в процесі його виготовлення шляхом правильного вибору технології виробництва, контролю якості вихідних матеріалів, напівфабрикатів та готової продукції, контролю режимів і умов виготовлення. Надійність зберігається застосуванням заданих способів зберігання виробів і підтримується правильною експлуатацією їх, планомірним відходом, профілактичним контролем і ремонтом [67,134,168,186].

Технічна діагностика приділяє увагу теорії, методам і засобам виявлення і пошуку дефектів об'єктів технічної природи. Під дефектом слід розуміти будь-яку невідповідність властивості об'єкта заданим, необхідним або очікуваним його властивостям. Виявлення дефекту - це встановлення факту його наявності або відсутності в об'єкті.

Пошук дефекту полягає у вказівці з певною точністю його місця розташування в об'єкті. Основне призначення технічної діагностики полягає в підвищенні надійності об'єктів на етапі їх експлуатації, а також у запобіганні виробничого браку на етапі виготовлення об'єктів та їх складових частин.

Будь технічний об'єкт після проектування проходить дві основні стадії "життя" – виготовлення та експлуатацію. Стосовно до завдань технічної діагностики на стадії виготовлення можна виділити періоди приймання комплектуючих виробів і матеріалів, процесу виробництва, налагодження та

здачі об'єкта відділу технічного контролю. Для стадії експлуатації типовими є етапи застосування об'єкта за призначенням, профілактики, ремонту, транспортування і зберігання [127,134,221].

Об'єкт працездатний, якщо він може виконувати всі задані функції зі збереженням значень заданих параметрів в необхідних межах. Для етапу застосування важливим є поняття технічного стану правильного функціонування об'єкта, значення параметрів якого наразі відбувається реального часу застосування об'єкта за призначенням знаходиться в необхідних межах.

Виявлення і пошук дефектів є процесами визначення технічного стану об'єкта і об'єднуються загальним терміном "діагностування" [59,127,134,221].

Діагностування технічного стану будь-якого об'єкта здійснюється тими чи іншими засобами діагностування, які можуть бути апаратними або програмними, в якості засобу діагностування може також виступати людина - оператор, контролер, наладчик. Засоби і об'єкт діагностування, взаємодіючи між собою, утворюють систему діагностування. Розрізняють системи тестового і функціонального діагностування.

У системах тестового діагностування на об'єкт подаються спеціально організовані тестові впливи.

У системах функціонального діагностування, які працюють в процесі застосування об'єкта за призначенням, подача тестових впливів, як правило, виключається, на об'єкт надходять тільки робочі впливи, передбачені його алгоритмом функціонування. Система діагностування в процесі визначення технічного стану об'єкта реалізує деякий алгоритм діагностування, який в загальному випадку складається з певної сукупності так званих елементарних перевірок об'єкта, а також правил, що встановлюють послідовність реалізації елементарних перевірок. Будь-яка система діагностування є специфічною системою управління і контролю.

Під управлінням розуміють процес вироблення і здійснення цілеспрямованих впливів на об'єкт. Контроль є процес збору та обробки інформації з метою визначення подій. Якщо подією є факт досягнення деяким параметром об'єкта певного значення, то кажуть про контроль параметрів.

Якщо подія, яка фіксує, є встановлення факту перебування об'єкта в справному або несправному, працездатному або непрацездатному стані, то можна говорити про контроль технічного стану об'єкта.

Отже, системи тестового діагностування є системами управління, оскільки в них реалізується вироблення впливів на об'єкт з метою визначення

технічного стану останнього, а системи функціонального діагностування є типовими системами контролю.

Оцінювати області, що охоплюються технічної діагностикою, можна виходячи з трьох типів задач визначення технічного стану об'єкта. До першого типу відносяться завдання діагностування (визначення технічного стану), в якому знаходиться об'єкт в даний момент часу. Завдання другого типу (завдання прогнозування) – це пророкування технічного стану, в якому виявиться об'єкт в деякий майбутній момент часу. До третього типу відносяться завдання генезу, тобто визначення технічного стану, в якому знаходився об'єкт в деякий момент часу в минулому [127,134].

Для визначення працездатності виробу, пошуку дефектів і прогнозування стану машин необхідно вимірювати діагностичні параметри.

Діагностичні параметри, що вимірюються, вибирають з безлічі принципово можливих параметрів деякої обмеженої кількості для дослідження інформативності ознак, сформованих на цих параметрах. На підставі інформативності ознак визначають остаточний склад вимірюваних фізичних параметрів, які використовуються надалі для діагнозу несправних станів.

З ускладненням сучасного обладнання, підвищенням вимог до його надійності збільшується число контрольованих структурних параметрів, а отже, необхідних вимірювальних засобів.

Основу логічної процедури діагнозу становить сукупність фізичних величин, за допомогою яких при вимірюванні визначаються структурні параметри діагностування об'єктів.

Найбільший практичний інтерес представляють параметри призначення та надійності об'єктів, що знаходяться у функціональній залежності від вимірюваних фізичних величин. Наприклад, виявлення дефекту у вигляді тріщини і визначення його параметрів може бути виконано за допомогою вимірювання магнітної проникності, коерцитивної сили і магнітної індукції феромагнітного матеріалу (магнітні методи) або температуропровідності, теплоємності і теплопровідності матеріалу (теплові методи) або модуля пружності, щільності і питомої хвильового опору матеріалу (акустичні методи).

Для діагностування об'єктів використовують широку номенклатуру випробувальної техніки, у тому числі прилади для визначення твердості і пружних констант матеріалів, дослідження впливу кліматичних факторів, машини для випробування матеріалів на розтягування і стиснення, вигин, удар, кручення і т.д.

Перспектива розвитку методів і засобів технічного діагностування пов'язана з оптимальним застосуванням для вимірювання відомих фізичних величин і ефектів, А також з вивченням нових можливостей, які з'являються у зв'язку з розвитком фізики. Найбільш істотним і часто зустрічається в практиці технічного діагностування машин є наступні види вимірювань: електрометрія, віброакустика, дефектоскопія, інтроскопія, вимірювання механічних властивостей, складу речовини, розмірів, сил, деформацій, тиску, температури, часу, маси, витрати і рівня (табл.1.) [134].

Таблиця 1 - Фізичні параметри діагностування

Група параметрів	Параметри
Кінематичні	градієнт швидкості, кутова швидкість, період, прискорення, фаза, Час, частота, швидкість, щільність об'ємної витрати
Геометричні	довжина, кривизна лінії і поверхні, осьовий і полярний моменти інерції площі плоскої фігури плоский і тілесний кут, площа
Статичні і динамічні	градієнт тиску, енергія, імпульс сили, кількість руху, коефіцієнт опору і пружності, коефіцієнт тертя, маса, момент сили та інерції та ін. об'ємна щільність, потужність, робота, сила, тиск

Механічні та молекулярні	<p>відносна молекулярна маса, кількість речовини, коефіцієнт дифузії коефіцієнт поверхневого натягу, коефіцієнт поздовжнього розтягування, модуль поздовжньої пружності, молекулярна маса і об'єм, питома обсяг і вага, твердість, ударна і динамічна в'язкість, щільність</p>
Теплові	<p>ентропія, кількість теплоти, коефіцієнти теплопровідності, температура, температурний градієнт, температуро-провідності тепловий потік, теплоємність (об'ємна і питома), теплопередачі, теплота згоряння палива, теплота фазового перетворення</p>
Акустичні	<p>звуковий тиск, об'ємна швидкість, звукова енергія, щільність звукової енергії, інтенсивність звуку, акустичне опір, питомий акустичний опір, висота, тембр, гучність звуку, акустичні коефіцієнти віддзеркалення і поглинання</p>
Електричні та магнітні	<p>діелектрична проникність, електрична провідність, електричний заряд, електричний опір, ємність,</p>

	індуктивність, магнітна індукція і потік, магнітна проникність і ін. магніторушійна сила, напруженість електричного поля, напруженість магнітного поля, питомий електричний опір, поверхнева щільність заряду, поляризована, потенціал, сила струму, щільність струму
Випромінювань	енергетична освітленість, енергія випромінювання, коефіцієнти відбиття, освітленість, поглинання, заломлення, потік випромінювання, пропускання сила світла, спектральна щільність енергії випромінювання, яскравість
Атомної фізики	момент диполя, момент кількості руху, поляризованість, доза поглинання випромінювання, радіоактивність
Універсальні фізичні константи	гравітаційна стала, маса (спокою) електрона, протона, нейтрона, постійна Планка, універсальна газова постійна та ін. число Фарадея, швидкість світла у вакуумі,

2 Елементи теорії ймовірності і математичної статистики

Теорія ймовірностей - розділ математики, що вивчає закономірності випадкових явищ: випадкові події, випадкові величини, їх властивості та операції над ними. Подією називається будь-яке явище, яке можна визначити яка звершилася або не звершилася. Реальність настання подій різна, тому можна вказати на достовірні та неможливі події. Ймовірністю події A називається число $P(A)$, що характеризує можливість появи події. Ймовірність достовірної події дорівнює одиниці, а ймовірність неможливого події дорівнює нулю, тому ймовірність випадкової події $0 \leq P(A) \leq 1$ [54,70,71,111, 194,201].

Також ймовірністю події A називається відношення числа m елементарних наслідків, що сприяють появі цієї події, до загальної кількості n всіх рівноможливих несумісних результатів, утворюючих повну групу:

$$P(A) = m/n, \quad (2.1)$$

де m -число випробувань, при яких подія A з'явилася; n - загальне число проведених випробувань.

Це визначення називається класичним. Воно може бути застосовано лише до випробувань з кінцевим числом рівноможливих випадків.

Властивості ймовірності [56]:

1. Ймовірність достовірної події $A = U \quad P(U) = 1$.
2. Ймовірність неможливої події $A = V \quad P(V) = 0$.
3. Ймовірність будь-якої події A є невід'ємне число, що задовольняє подвійній нерівності $0 \leq P(A) \leq 1$.

Для аналізу складних подій вводяться поняття логічної суми (диз'юнкції) і логічного добутку (кон'юнкції) подій. Сумою подій A і B називають подію C .

$$C = A \vee B, \quad (2.2)$$

де - \vee знак логічного підсумовування (диз'юнкції).

Зокрема, сумою двох подій A і B буде подія, що складається в появі або події A або події B , або обох разом. Якщо події A і B несумісні, то їх сума $A + B$ – подія, що складається в появі тільки одного з них (байдуже якого).

Подія вважається доконаною, якщо сталася хоча б одна з подій A і B або обидва разом. Добутком подій A і B називають подію C

$$C = A \wedge B, \quad (2.3)$$

де - \wedge знак логічного добутку (кон'юнкції). Подія вважається здійсненим, якщо сталося кожне з подій A і B .

Геометрична інтерпретація суми і добутку подій показана на так званій діаграмі Венна (рис.2.1). Якщо подія А – попадання випадкової точки в ліву область, В- потрапляння випадкової точки в праву область, то сума подій (А + В) – потрапляння навмання кинutoї точки в область, обмежену зовнішнім контуром, добуток подій АВ- в замальовану область:

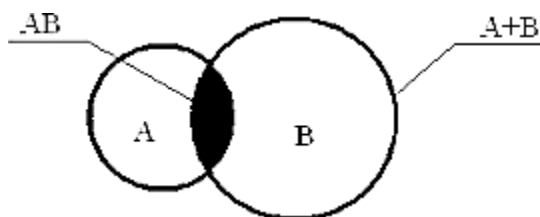


Рисунок 2.1 - Діаграмі Венна

Сукупність декількох подій називається групою подій. Повна група подій – сукупність подій, хоча б одна з яких має відбутися. Наприклад, подія А (відмова виробу) і протилежна подія \bar{A} (безвідмовність виробу) складають повну групу подій, так як виріб не може одночасно перебувати в несправному і справному стані. Група подій вважається несумісною, якщо будь-які дві події цієї групи не можуть відбутися одночасно. Наприклад, якщо ознака (вимірюваний параметр) розбитий на три діагностичних інтервали (обрив, коротке замикання і нормальний стан обмотки електричної машини), а події A_1, A_2, A_3 означають появу ознаки у відповідному інтервалі, то зазначені події – несумісні. Події А і \bar{A} завжди утворюють повну групу несумісних подій.

Ймовірність суми двох подій А і В:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B), \quad (2.4)$$

де $P(A \cap B)$ - ймовірність спільного появи подій А і В, а якщо події А і В несумісні, то:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B). \quad (2.5)$$

Ймовірність суми трьох подій А, В і С:

$$P(A \cup B \cup C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A \cap B) - P(B \cap C) - P(C \cap A) + P(A \cap B \cap C) \quad (2.6)$$

Для несумісних подій А, В і С:

$$P(A \cup B \cup C) = P(A) + P(B) + P(C). \quad (2.7)$$

Якщо події A , B і C утворюють повну групу подій, тобто хоча б одна з них обов'язково здійсниться, то:

$$P(A \vee B \vee C) = 1. \quad (2.8)$$

Для повної групи несумісних подій з умов (7) і (8) слід:

$$P(A) + P(B) + P(C) = 1. \quad (2.9)$$

Зокрема, для суми ймовірностей протилежних подій:

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1. \quad (2.10)$$

Величина $P(B / A)$ називається умовною ймовірністю події B (за умови, що подія A сталася), тоді

$$P(A \wedge B) = P(A) \cdot P(B / A), \quad (2.11)$$

або

$$P(A \wedge B) = P(B) \cdot P(A / B). \quad (2.12)$$

У теорії ймовірності більш прийняті скорочені позначення логічного твору подій у вигляді звичайного алгебраїчного твору, тоді рівності (2.11) і (2.12) запишуться так:

$$P(AB) = P(A) \cdot P(B / A) = P(B) \cdot P(A / B). \quad (2.13)$$

Означення умовної ймовірності призводить до умови незалежності подій.

Подія B вважається незалежним від події A , якщо

$$P(B / A) = P(B). \quad (2.14)$$

Несумісні події завжди залежні, тоді як спільні події можуть бути залежними або незалежними. Для незалежних подій

$$P(AB) = P(A) P(B). \quad (2.15)$$

Зі співвідношень (2.12) і (2.14) випливає умова $P(A / B) = P(A)$, тобто незалежність подій-поняття взаємне. Для групи з трьох подій

$$P(ABC) = P(A) P(B / A) P(C / AB) = P(B) P(A / B) P(C / BA) = P(C) P(A / C) P(B / AC), \quad (2.16)$$

а для незалежних подій

$$P(ABC) = P(A)P(B)P(C). \quad (2.17)$$

Характеризуючи випадкові величини, закони розподілу випадкових величин і їх узагальнені характеристики зазначено наступне.

Випадковою називають величину, яка в результаті випробування може прийняти одне з можливих заздалегідь невідомих значень. Випадковим величинам протиставляються величини детерміновані, значення яких визначаються початковими умовами [56,70,71].

Випадкові величини поділяються на дискретні (приймаючі окремі значення) і безперервні. Числом дефектних деталей в партії виробів є дискретна випадкова величина, можливі значення якої 0,1,2,3, Час безвідмовної роботи виробу – безперервна випадкова величина.

Приклади випадкових величин:

- Дискретних: число влучень і промахів в серії пострілів, число випадків герба або решки при підкиданні монети, в схемі Бернуллі повторюваних незалежних випробувань - число появ події при n випробуваннях і т.п. ;

- Безперервних: відхилення розміру деталі від номінального, ресурс (час безвідмовної роботи) системи, фізичні параметри системи (температура, тиск, вологість), довжина гальмівного шляху автомобіля, тривалість життя людини і т.п.

Закон розподілу випадкових величин вказує на взаємозв'язок між можливими значеннями випадкової величини і їх можливостями:

Можливі значення	x_1	x_2	x_r
Ймовірності	P_1	P_2	P_r

Основна властивість будь-якого закону розподілу

$$\sum_{i=1}^r P_i = 1, \quad (2.18)$$

де P_i - ймовірність значення випадкової величини x_i .

Ця властивість стає зрозумілим, якщо врахувати, що ймовірність значення x_i є відносна частка загального числа випадків, що припадає на дане значення параметра. Іноді використовують інші рівнозначні записи:

$$P_i = P(x_i) = \text{Вер}(X = x_i) = P(X = x_i). \quad (2.19)$$

Основними узагальненими характеристиками (параметрами) закону розподілу є середнє значення і середньоквадратичне відхилення. Середнє значення випадкової величини являє собою звичайне середнє всіх значень,

отриманих під час випробувань. Загальна сукупність великого числа однорідних виробів (теоретично нескінченна) називається генеральною, а партія n випробовуваних виробів - вибіркою (обсягу n) з генеральної сукупності.

У теорії ймовірності велику роль грає поняття математичного очікування (середнє значення для генеральної сукупності) [56,70,71,194]. У деяких випадках математичне сподівання випадкової величини x прийнято позначати $M[x]$.

Середньоквадратичне відхилення випадкової величини x визначають за формулою:

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^r (x_i - \bar{x})^2 P_i} = \sqrt{\sum_{i=1}^r x_i^2 P_i - \bar{x}^2}. \quad (2.20)$$

Для теоретичного аналізу часто виявляється більш зручним поняття дисперсії випадкової величини x , яка представляє собою математичне сподівання квадрата відхилення випадкової величини:

$$D_x = \sigma_x^2 = \sum_{i=1}^r (x_i - \bar{x})^2 P_i = \overline{(x_i - \bar{x})^2}. \quad (2.21)$$

Безперервна випадкова величина може мати будь-яке значення в деякій області $a \leq x \leq b$. Область з нескінченними межами $-\infty < x < +\infty$ часто розглядається загальний випадок. Якщо ймовірність знаходження x в межах інтервалу Δx становить ΔP , то щільність ймовірності або щільність розподілу $f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \Delta P / \Delta x$. Імовірність того, що випадкова величина виявиться в інтервалі Δx , дорівнює $f(x) \Delta x$. Щільність ймовірності варто розглядати як ймовірність появи випадкової величини - довжини в перерізі x . Щільність розподілу або щільність ймовірності $f(x)$ має розмірність величини $1/x$.

Імовірність появи неперервної випадкової величини x на ділянці $a \leq x \leq b$

$$P(a \leq x \leq b) = \int_a^b f(x) dx, \quad \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1, \quad (2.22)$$

так як цілком вірогідно, що $-\infty < x < +\infty$.

Функція $F(x)$ називається інтегральною функцією розподілу неперервної випадкової величини:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = \int_{-\infty}^x f(X) dX, \quad (2.23)$$

де X - поточне значення випадкової величини (змінна інтегрування в межах $-\infty < X \leq x$).

У теоретичних висновках необхідно розрізняти позначення змінного межі інтегрування і змінної інтегрування. Інтегральна функція розподілу має такі властивості:

$$F(-\infty) = 0; F(\infty) = 1. \quad (2.24)$$

Зі співвідношення випливає диференціальний закон щільності розподілу неперервної випадкової величини:

$$\frac{dF(x)}{dx} = f(x). \quad (2.25)$$

На рис. 2.2 наведено графік функції розподілу неперервної випадкової величини.

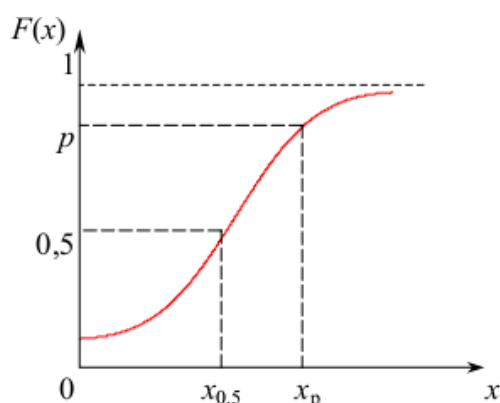


Рисунок 2.2 - Графік функції розподілу неперервної випадкової величини.

Заданій величині ймовірності, наприклад $P = 0,9$, відповідає абсциса x_p , так що $P(x < x_p) = F(x_p) = P$. Величина x_p називається квантиль ймовірності P . Наприклад, якщо відомі квантилі $x_{0,1}$ і $x_{0,9}$, то $P(x_{0,1} \leq x \leq x_{0,9}) = F(x_{0,9}) - F(x_{0,1}) = 0,9 - 0,1 = 0,8$. Квантиль, відповідний ймовірності $P=0,5$, називається медіаною розподілу. Медіана розподілу $x = x_{0,5}$ ділить криву щільності розподілу на дві рівні частини

$$\int_{-\infty}^{x_{0,5}} f(x)dx = \int_{x_{0,5}}^{\infty} f(x)dx = 0,5. \quad (2.26)$$

Для математичного очікування і середньоквадратичного відхилення безперервних і дискретних випадкових величин справедливі такі властивості.

Математичне сподівання постійної величини з одно їй самій $\bar{c} = c$. Постійний множник може бути винесений з-під знака математичного очікування $M [cx] = cM [x]$.

Середньоквадратичне відхилення постійної величини $\sigma [c] = 0$. Середньоквадратичне відхилення при лінійному перетворенні випадкової величини $\sigma [cx + a] = |c| \sigma [x]$, тобто додаток постійної величини до випадкової не змінює середньоквадратичного відхилення.

Важливу роль в теорії ймовірності грають моментні характеристики розподілів. Розрізняють початкові та центральні моменти розподілення, які визначаються порядком k .

Початковий момент порядку k для безперервних розподілів:

$$m_k = \int_{-\infty}^{+\infty} x^k f(x) dx = M[x^k], \quad (2.27)$$

для дискретних розподілів:

$$m_k = \sum_{i=1}^r x_i^k P_i = M[x^k]. \quad (2.28)$$

$M(X)$ називають ще центром розподілу або характеристикою положення випадкової величини на числовій осі. Це середнє значення, навколо якого групуються інші можливі значення випадкової величини. Центральний момент порядку k для безперервних розподілів:

$$M_k = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^k f(x) dx = M[(x - \bar{x})^k], \quad (2.29)$$

Центральний момент нульового порядку $M_0 = 1$.

Центральний момент першого порядку:

$$M_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x}) f(x) dx = 0. \quad (2.30)$$

Дисперсія - це характеристика розсіювання (розкиданості) можливих значень випадкової величини щодо її середнього значення. Центральний момент другого порядку (дисперсія):

$$M_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 f(x) dx = D = \sigma^2. \quad (2.31)$$

Крім основних характеристик розподілу - центру (математичного очікування) і розсіювання (дисперсії) на практиці часто потрібно описати і

інші важливі числові характеристики розподілу. Найбільш вживані з них: мода, медіана, коефіцієнти асиметрії, ексцесу.

Моду дискретної випадкової величини називається її найбільш ймовірне значення, модою неперервної випадкової величини - то її значення, при якому щільність ймовірності максимальна.

Медіаною M_e випадкової величини називається таке її значення, для якого $P(X < M_e) = P(X > M_e)$.

Центральний момент третього порядку (асиметрія)

$$A = \frac{\dot{M}_3}{\sigma^3}. \quad (2.32)$$

Центральний момент четвертого порядку (ексцес)

$$\frac{M_4}{\sigma^4} - 3 = E. \quad (2.33)$$

На рис. 2.3 наведені графіки центральних моментів третього (а) і четвертого (б) порядку з різною асиметрією і ексцесом.

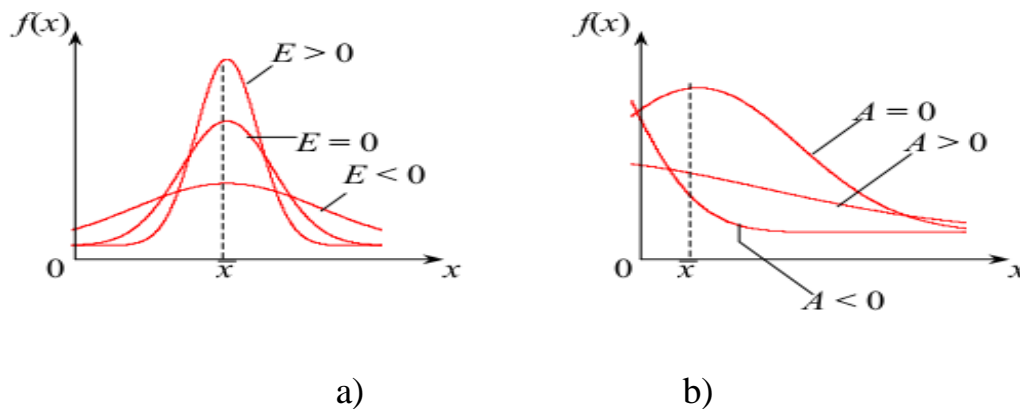


Рисунок 2.3 - Графіки центральних моментів третього (а) і четвертого (б) порядку з різною асиметрією і ексцесом.

Ексцес характеризує «гостру» ($E > 0$) або «згладжену» ($E < 0$) вершину розподілу в порівнянні з деяким еталонним розподілом ($E = 0$), в якості якого приймається нормальний розподіл. Асиметрія характеризує форму кривої розподілу.

3 Математична логіка в діагностичних оцінках

Стан об'єкту описується сукупністю визначаючих його параметрів. Розпізнавання стану об'єкта – віднесення стану об'єкта до одного з можливих класів (діагнозів). Кількість діагнозів (класів, типових станів, еталонів) залежить від особливостей задачі і цілей досліджень. Найчастіше потрібно провести вибір одного з двох діагнозів (диференціальна діагностика або дихотомія); наприклад, «справний стан» або «несправний стан». В інших випадках необхідно більш детально охарактеризувати несправний стан. У більшості задач технічної діагностики діагнози (класи) встановлюються заздалегідь, і в цих умовах завдання розпізнавання часто називають завданням класифікації [56,127].

Сукупність послідовних дій у процесі розпізнавання називається алгоритмом розпізнавання. Вагомою частиною процесу розпізнавання є вибір параметрів стану об'єкта. Вони повинні бути достатньо інформативні, щоб при вибраній кількості діагнозів процес поділу (розпізнавання) міг бути здійснений. В задачах діагностики стан об'єкта частіше описується за допомогою комплексу ознак:

$$K = (k_1, k_2, \dots, k_j, \dots, k_v), \quad (3.1)$$

де k_j – ознака, що має m_j розрядів. Нехай, наприклад, ознака k_j являє собою трьохрозрядну ознаку ($m_j = 3$), що характеризує температуру газу за турбіною: знижена, нормальна, підвищена. Кожен розряд (інтервал) ознаки k_j позначається k_{js} , наприклад, підвищена температура за турбіною k_{j3} . Фактично досліджуваний стан відповідає певній реалізації ознаки, що відзначається верхнім індексом $*$. Наприклад, при підвищеній температурі реалізація ознаки $k_j^* = k_{j3}$.

Об'єкт відповідає деякій реалізації комплексу ознак:

$$K^* = (k_1^*, k_2^*, \dots, k_j^*, \dots, k_v^*). \quad (3.2)$$

У багатьох алгоритмах розпізнавання об'єкт зручно характеризувати параметрами x_j , що утворюють v -мірний вектор або крапку у v -мірному просторі.

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_v). \quad (3.3)$$

За допомогою ознаки k_j виходить дискретний опис, тоді як параметр x_j дає безперервний опис. Принципових відмінностей при описі об'єкту за допомогою ознак, параметрів, немає, тому використовують обидва види опису. Існують два основних підходи до задачі розпізнавання: імовірнісний і детерміністський.

Постановка задачі при імовірнісних методах розпізнавання така. Є об'єкт, який знаходиться в одному з n випадкових станів D_i . Відома сукупність ознак (параметрів), кожен з яких з певною ймовірністю характеризує стан об'єкта.

Потрібно побудувати вирішальне правило, за допомогою якого пред'явлена сукупність ознак була б віднесена до одного з можливих станів (діагнозів). Бажано також оцінити достовірність прийнятого рішення і ступінь ризику помилкового рішення. При детерміністських методах розпізнавання зручно формулювати завдання за допомогою геометричної мови. Якщо об'єкт характеризується v -мірним вектором, то будь-який стан об'єкта являє собою точку в v -мірному просторі параметрів. Передбачається, що діагноз D_i відповідає деякій області розглянутих ознак.

Потрібно знайти вирішальне правило, відповідно до якого пред'явлений вектор X^* буде віднесений до певної області діагнозу. Таким чином, завдання зводиться до поділу простору ознак на області діагнозів. При детерміністському підході області діагнозів зазвичай вважаються «неперетинаючимися», тобто ймовірність одного діагнозу (в область якого потрапляє точка) дорівнює одиниці, ймовірність інших дорівнює нулю. Подібним чином передбачається, що кожна ознака або зустрічається при даному діагнозі, або відсутня. Ймовірнісний і детерміністський підходи не мають принципових відмінностей. Більш загальними є ймовірнісні методи, але вони вимагають значно більшого обсягу попередньої інформації.

Серед методів технічної діагностики використовуються методи, що базуються на узагальненій формулі Байєса, і методи послідовного аналізу, запропоновані Вальдом [56,58134].

Узагальнену формулу Байєса розглянемо на наступному прикладі. Нехай подія A пов'язана з однією з подій B_1, B_2, \dots, B_n , що утворюють повну групу несумісних подій. Для визначеності будемо вважати, що A – поява ознаки (наприклад, поява стружки в олії), а B_1, B_2, \dots, B_n – несправність відповідних вузлів електричної машини. Приймається, що при цих ознаках один з вузлів машини є несправним, а одночасна відмова двох вузлів малоімовірною і виключається з розгляду. На підставі статистичної інформації про відмови при випробуваннях і експлуатації відома ймовірність відмови окремих вузлів: $P(B_1), P(B_2), \dots, P(B_n)$. Завдання сформульоване

таким чином: відбулася подія A (поява стружки). Яка ймовірність, що причиною появи стружки є несправність вузла B_i .

Передбачається, що частота ймовірності ознаки A при несправності окремих вузлів $P(A/B_i)$ розрахована на підставі статистичної інформації про відмови. Ймовірність одночасної появи ознаки A та стану

$$P(B_i)P(A \wedge B_i) = P(A)P(B_i/A) = P(B_i)P(A/B_i). \quad (3.4)$$

З цієї рівності знаходимо ймовірність стану B_i (несправність вузла B_i):

$$P(B_i/A) = P(B_i)P(A/B_i). \quad (3.5)$$

Необхідна ймовірність знайдена, але залишається з'ясувати $P(A)$ – ймовірність появи ознаки A . Так як ознака з'являється разом з несправністю якогось вузла, то це подія являє собою логічну суму окремих подій.

$$A = (A \wedge B_1) \vee (A \wedge B_2) \vee \dots \vee (A \wedge B_n). \quad (3.6)$$

У відповідності зі зробленим припущенням має реалізуватися лише одне з можливих подій, і тому $P(A) = P(A \wedge B_1) + P(A \wedge B_2) + \dots + P(A \wedge B_n)$ або

$$P(A) = \sum_{j=1}^n P(B_j)P(A/B_j). \quad (3.7)$$

Цю рівність називають формулою повної ймовірності події A , що відбувається разом з повною групою незалежних подій. Вона виражає наступний принцип: якщо об'єкт має кілька можливих несумісних шляхів переходу в інший стан, то ймовірність переходу дорівнює сумі ймовірностей здійснення кожного з них. Несумісні шляхи – це шляхи, які не можуть реалізуватися одночасно.

$$P(B_i/A) = \frac{P(B_i)P(A/B_i)}{\sum_{j=1}^n P(B_j)P(A/B_j)}. \quad (3.8)$$

Ймовірність стану після появи ознаки A , тобто $P(B/A)$, називають апостеріорною (на відміну від апіорної ймовірності $P(B_i)$) Примітка. Терміни «апіорі» та «апостеріорі» означають «до досвіду» і «після досвіду», тобто представляють наявність або відсутність ознаки A :

$$\sum_{i=1}^n P(B_i/A) = 1. \quad (3.9)$$

За формулою Байєса виходить, що для двох станів ставлення апостеріорних ймовірностей:

$$\frac{P(B_k/A)}{P(B_1/A)} = \frac{P(B_k)P(A/B_k)}{P(B_1)P(A/B_1)}. \quad (3.10)$$

Якщо при стані B_k , ознака A зустрічається частіше, ніж при стані B_1 , тобто $P(A/B_k) > P(A/B_1)$, то ймовірність цього стану після отримання інформації про появу ознаки A збільшується.

Приклад. Відомо, що 90% підшипників редукторів виробляє ресурс в справному стані. Ознака A – підвищення температури масла вище нормальної на 30°C – зустрічається у справних підшипників тільки в 5% випадків. Потрібно визначити ймовірність справного стану підшипника при появі ознаки A .

Рішення: Назвемо справний стан B_1 , несправне B_2 . Відомо, що $P(B_1) = 0,05$; $P(B_2) = 0,95$.

$$P(B_1/A) = \frac{P(B_1)P(A/B_1)}{P(B_1)P(A/B_1) + P(B_2)P(A/B_2)} = \frac{0,9 \cdot 0,05}{0,9 \cdot 0,05 + 0,1 \cdot 0,95} = 0,32.$$

Ймовірність справного стану підшипника знизилася з 0,9 до 0,32. Метод послідовного аналізу, запропонований Вальдом, застосовується для диференціальної діагностики (розпізнавання двох станів), контролю якості продукції і планування контрольних випробувань на надійність. На відміну від методу Байєса для розпізнавання станів D_1 і D_2 складається ставлення (для незалежних ознак)

$$\frac{P(D_2/K^*)}{P(D_1/K^*)} = \frac{P(D_2)}{P(D_1)} \cdot \frac{P(k_1^*/D_2) \dots P(k_n^*/D_2)}{P(k_1^*/D_1) \dots P(k_n^*/D_1)}, \quad (3.11)$$

де

$$\frac{P(D_2/K^*)}{P(D_1/K^*)} > 1 \quad (3.12)$$

і

$$\frac{P(k_1^*/D_2) \dots P(k_n^*/D_2)}{P(k_1^*/D_1) \dots P(k_n^*/D_1)} > \frac{P(D_1)}{P(D_2)}, \quad (3.13)$$

То приймаємо рішення $K^* \in D_2$.

У методі послідовного аналізу розглянуті відносини ймовірностей ознак (відношення правдоподібності) складаються не відразу, а в послідовному порядку; тому потрібна менша кількість обстежень.

При діагнозі D_1 простий ознака k_1 зустрічається з імовірністю $P(k_1/D_1)$ і відсутній з імовірністю $P(\bar{k}_1/D_1)$, для діагнозу D_2 відповідно $P(k_1/D_2)$ і $P(\bar{k}_1/D_2)$. Якщо у об'єкта K^* спостерігається ознака k_1 і при діагнозі D_2 він зустрічається значно частіше, ніж при D_1 , то можна зробити висновок на користь D_2 при:

$$\frac{P(k_1/D_2)}{P(k_1/D_1)} > A \quad K^* \in D_2, \quad (3.14)$$

де A – верхня межа прийняття рішення. У протилежному разі, коли ознака k_1 значно частіше зустрічається при діагнозі D_1 , приймається рішення на користь D_1 при:

$$\frac{P(k_1/D_2)}{P(k_1/D_1)} < B \quad K^* \in D_1, \quad (3.15)$$

де B – кінцева межа прийняття.

Якщо відношення ймовірностей (відношення правдоподібності):

$$B < \frac{P(k_1/D_2)}{P(k_1/D_1)} < A, \quad (3.16)$$

то для вирішення потрібна додаткова інформація. Тоді проводяться випробування за ознакою k_2 , і нехай у об'єкту, який діагностується ця ознака відсутня. Складається множення двох відношень правдоподібності і при

$$\frac{P(k_1/D_2)}{P(k_1/D_1)} \cdot \frac{P(\bar{k}_2/D_2)}{P(\bar{k}_2/D_1)} > A \quad K^* \in D_2 \quad (3.17)$$

приймається рішення про віднесення об'єкта до діагнозу D . Подібним чином враховується кінцева межа прийняття рішення.

Якщо ознаки залежні, то використовується відношення:

$$P(\bar{k}_2/k_1 D_2) / P(\bar{k}_2/k_1 D_1), \quad (3.18)$$

в якому враховується ймовірність відсутності ознаки k_2 , за умови, що ознака k_1 є. Додаткові випробування проводять до тих пір, поки при виділених границях A і B можна прийняти певне рішення.

Іноді розглядають не відношення правдоподібності, а натуральний логарифм, тоді умова приймає вигляд:

$$\ln[P(k_1/D_2)/P(k_1/D_1)] + \ln[P(\bar{k}_2/D_2)/P(\bar{k}_2/D_1)] > \ln A. \quad (3.19)$$

Подібна форма застосовується при нормальному розподілі кількісних ознак. Загальна процедура методу така. Приймається гіпотеза, що ознаки є незалежними та проведено $v - 1$ випробувань, які ще не дали можливості прийняття рішення,

$$B < \frac{P(k'_1/D_2) \dots P(k'_r/D_2)}{P(k'_1/D_1) \dots P(k'_r/D_1)} < A; \quad r = 1, 2, \dots, v-1, \quad (3.20)$$

Але після v -го випробування

$$\frac{P(k'_1/D_2) \dots P(k'_v/D_2)}{P(k'_1/D_1) \dots P(k'_v/D_1)} > A. \quad (3.21)$$

Тоді приймається рішення про віднесення об'єкту до діагнозу D_2 , тобто

$$K^* \in D_2.$$

Тоді після v -го випробування:

$$\frac{P(k'_1/D_2) \dots P(k'_v/D_2)}{P(k'_1/D_1) \dots P(k'_v/D_1)} < B \quad (3.22)$$

Об'єкт відноситься до діагнозу D_1 . Для скорочення вартості та обсягу випробувань на надійність, їх планування слід проводити з урахуванням найбільш інформативних ознак.

Цей метод придатний і для безперервно розподілених діагностичних параметрів, x_1 і x_2 , але замість ймовірностей ознак в нерівності входять щільності ймовірностей параметрів.

При розпізнаванні можуть бути помилки двоякого роду [54, 56,70,71,111,194]. Помилка, яка відноситься до діагнозу D_1 (приймається рішення про наявність діагнозу D_2 , коли в дійсності об'єкт належить діагнозу D_1), називається помилкою першого роду α . Помилка, що відноситься до

діагнозу D_2 (приймається рішення на користь діагнозу D_1 , коли справедливий діагноз D_2), називається помилкою другого роду β .

Допускаємо виконання нерівностей і приймаємо рішення на користь діагнозу D_2 ; тоді ймовірність того, що це рішення буде справедливим, дорівнює $1 - \beta$. Ймовірність належності об'єкта з іншого реалізацією ознак до діагнозу D_1 становить α . З іншого боку ймовірність діагнозу D_2 , принаймні, в A разів більше, ніж діагнозу D_1 , тобто.

$$\frac{1-\beta}{\alpha} \geq A. \quad (3.23)$$

Подібним чином можна отримати наступну оцінку

$$B \geq \frac{\beta}{1-\alpha}. \quad (3.24)$$

При плануванні і нормуванні випробувань на надійність зазвичай приймають $\alpha = \beta = 0,05 \div 0,20$. При цьому, чим менше значення помилок α і β , тим більше об'єм і дорожче випробування.

4 Теорія інформації в діагностичних оцінках

В технічній діагностиці, особливо при побудові оптимальних діагностичних процесів, широко використовується теорія інформації, як загальна теорія зв'язку статистичних систем. У діагностиці такими системами є система станів (діагнозів) і пов'язана з нею система ознак. Центральне місце в теорії інформації займає поняття ентропії системи [159,209].

Величина $H(A)$ називається ентропією (ступенем невизначеності) системи A , що має n можливих станів з ймовірностями $P(A_1), P(A_2), \dots, P(A_n)$

$$H(A) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \log \frac{1}{P(A_i)} = - \sum_{i=1}^n P(A_i) \log P(A_i). \quad (4.1)$$

Ентропію системи часто обчислюють за допомогою бінарних логарифмів

$$H(A) = - \sum_{i=1}^n P(A_i) \log_2 P(A_i). \quad (4.2)$$

У формулі логарифм може бути взятий на будь-якій підставі – зміна підстави призводить лише до появи множини, тобто до зміни одиниці вимірювання.

При виборі бінарних логарифмів в якості одиниці ентропії приймається ступінь невизначеності системи, що має два можливих, одно - ймовірних стани. Ця одиниця вимірювання називається бінарною одиницею або бітом. Назва біт походить від англійських слів binary digit – бінарна одиниця (дві початкові і кінцева літери). Якщо прийняти при обчисленні ентропії десяткові логарифми, то в якості одиниці використовувалася невизначеність системи, яка має 10 рівних станів (десятькова одиниця).

Приклад 2.3. Обчислити ентропію системи, що має два рівних стани $P(A_1) = P(A_2) = 0,5$.

Рішення:

$$H(A) = - P(A_1) \log_2 P(A_1) - P(A_2) \log_2 P(A_2) = - 0,5 \log_2 0,5 - 0,5 \log_2 0,5 = 1.$$

Частіше при визначенні кількості інформації відносно системи A отримують за допомогою спостереження за іншою, пов'язаною з нею системою B . Але, необхідне зазначити, що ентропійні оцінки ще не набули кінцевого визначення, тобто є різні погляди на методику розрахунку. Наведена формула (4.1) запропонована Р. Хартлі і К.Шенноном [233]. Зазвичай ця

друга система дає інформацію про стан основної системи. Середню величину цієї інформації, або інформативність системи В відносно системи А, можна визначити з рівності

$$J_A(B) = H(A) - H(A/B). \quad (4.2)$$

У правій частині рівняння міститься різниця первісної ентропії системи А і її ентропії після того, як стало відомим перебування системи сигналів В. Так як системи А і В є пов'язаними, то знання стану системи А змінить апіорну ймовірність станів системи В. Наприклад, якщо відомо, що об'єкт знаходиться в несправному стані, то ймовірність надходження тих чи інших сигналів також зміниться [134,159,209].

Середня інформація, що міститься в системі А щодо системи:

$$J_B(A) = H(B) - H(B/A), \quad (4.3)$$

тоді

$$J_A(B) = J_B(A) \quad (4.4)$$

виражає властивість взаємності інформації, так як

$$H(A/B) = H(AB) - H(B), \quad (4.5)$$

$$J_A(B) = H(A) + H(B) - H(AB), \quad (4.6)$$

$$J_A(B) = -\sum_{i=1}^n P(A_i) \log_2 P(A_i) - \sum_{j=1}^m P(B_j) \log_2 P(B_j) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(A_i B_j) \log_2 P(A_i B_j). \quad (4.7)$$

$$P(A_i) = \sum_{j=1}^m P(A_i B_j) \text{ и } P(B_j) = \sum_{i=1}^n P(A_i B_j), \text{ то}$$

$$J_A(B) = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(A_i B_j) \log_2 P(A_i) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(A_i B_j) \log_2 P(B_j) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(A_i B_j) \log_2 P(A_i B_j) \quad (4.8)$$

Якщо системи А і В незалежні, то $P(A_i B_j) = P(A_i)P(B_j)$ і тоді із співвідношення випливає $J_A(B) = J_B(A) = 0$.

З фізичної точки зору цей результат очевидний: спостереження над однією із систем не може дати інформації щодо іншого, якщо між станами цих систем немає зв'язку.

Приклад 4.1. Нехай проводиться діагностика стану підшипника з визначення вмісту частинок заліза в маслі. Дослідження проведене на 100 редукторів, серед яких 64 мали справний стан підшипника (стан A_1), а решта 36 – несправний стан A_2). Були розглянуті три стани, що розрізняються вмістом заліза в г/т олії (табл.1).

Таблиця 4.1- Розподіл редукторів в залежності від вмісту заліза в маслі [134]

Вміст заліза	Стан системи вимірювань	Стан A_1	Стан A_2
<4	B_1	40	0
4-8	B_2	20	6
>8	B_3	4	30

Значення ймовірностей $P(A_i B_j)$, $P(A_i)$ і $P(B_j)$, отримані на підставі табл. 1, наведені в табл.4.2 [134].

Таблиця 4.2 - Імовірності $P(A_i B_j)$ згідно з табл. 4.1.

A_i	B_j			$P(A_i)$
	B_1	B_2	B_3	
A_1	0,40	0,20	0,04	0,64
A_2	0	0,06	0,30	0,36
$P(B_j)$	0,40	0,26	0,34	

Наприклад, з 100 редукторів 40 характеризувалися приналежністю до станів A_1 і B_1 одночасно (справні редуктори з вмістом заліза в 1т олії 4г), тоді $P(A_1, B_1) = 0,4$. Серед 100 редукторів стан B_3 мали 34, і тому $P(B_3) = 0,34$. Обчислимо середню інформацію про стан підшипників редуктора (система A), яка міститься в дослідженні масла (система). За формулою знаходимо:

$$J_A(B) = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 P(A_i B_j) \log_2 \frac{P(A_i B_j)}{P(A_i) P(B_j)} = \frac{1}{\lg 2} \left[0,40 \lg \frac{0,40}{0,64 \cdot 0,40} + 0,20 \lg \frac{0,20}{0,64 \cdot 0,26} + 0,04 \lg \frac{0,04}{0,64 \cdot 0,34} + 0 \lg \frac{0}{0,36 \cdot 0,40} + 0,06 \lg \frac{0,06}{0,36 \cdot 0,26} + 0,30 \lg \frac{0,30}{0,36 \cdot 0,34} \right] = 0,56.$$

Знайдемо величину інформації щодо справного стану підшипника, яка міститься в дослідженні масла:

$$J_{A_1}(B) = \sum_{j=1}^3 P(B_j/A_1) \log_2 \frac{P(A_1 B_j)}{P(A_1)P(B_j)} = \frac{1}{\lg 2} \left[\frac{0,40}{0,64} \lg \frac{0,40}{0,64 \cdot 0,40} + \frac{0,20}{0,64} \lg \frac{0,20}{0,64 \cdot 0,26} + \frac{0,04}{0,64} \lg \frac{0,04}{0,64 \cdot 0,34} \right] = 0,33.$$

При обчисленні використовувалася формула $P(B_j/A_1) = P(A_1 B_j)/P(A_1)$. Подібна інформація щодо несправного стану:

$$J_{A_2}(B) = \sum_{j=1}^3 P(B_j/A_2) \log_2 \frac{P(A_2 B_j)}{P(A_2)P(B_j)} = \frac{1}{\lg 2} \left[\frac{0}{0,36} \lg \frac{0}{0,36 \cdot 0,40} + \frac{0,06}{0,36} \lg \frac{0,06}{0,36 \cdot 0,26} + \frac{0,30}{0,36} \lg \frac{0,30}{0,36 \cdot 0,34} \right] = 0,97.$$

З'ясуємо значення інформації щодо стану підшипника двигуна, яка утворюється після того, як стає відомим вміст заліза в маслі. Якщо вміст заліза в 1т олії $< 4\text{г}$ (стан B_1), то

$$J_A(B_1) = \sum_{j=1}^2 P(A_j/B_1) \log_2 \frac{P(A_j B_1)}{P(A_j)P(B_1)} = \frac{1}{\lg 2} \left[\frac{0,40}{0,40} \lg \frac{0,40}{0,64 \cdot 0,40} + \frac{0}{0,40} \lg \frac{0}{0,36 \cdot 0,40} \right] = 0,64.$$

$$J_A(B_2) = \sum_{j=1}^2 P(A_j/B_2) \log_2 \frac{P(A_j B_2)}{P(A_j)P(B_2)} = \frac{1}{\lg 2} \left[\frac{0,20}{0,20} \lg \frac{0,20}{0,64 \cdot 0,26} + \frac{0,06}{0,26} \lg \frac{0,06}{0,36 \cdot 0,26} \right] = 0,05.$$

$$J_A(B_3) = \sum_{j=1}^2 P(A_j/B_3) \log_2 \frac{P(A_j B_3)}{P(A_j)P(B_3)} = \frac{1}{\lg 2} \left[\frac{0,04}{0,34} \lg \frac{0,04}{0,64 \cdot 0,34} + \frac{0,30}{0,34} \lg \frac{0,30}{0,36 \cdot 0,34} \right] = 0,85.$$

Природно, що найбільшою інформацією володіють стану B_1 і B_3 . На закінчення обчислимо величину інформації, що міститься в стані B_j щодо стану A_i . Ці стани наведено у табл.4.3

Таблиця 4.3 - Значення інформації $J_{A_i}(B_j)$ за даними табл. 4.2.

A_i	B_i		
	B_1	B_2	B_3
A_1	0,64	0,26	-2,45
A_2	$-\infty$	-0,64	1,29

Як видно з таблиці, найбільше значення має $J_{A_2}(B_1)$, що відповідає інтуїтивним уявленням про цінності інформації.

У теорії інформації передбачається, що значення ймовірностей станів систем точно відомі. Насправді, ці ймовірності визначаються на підставі

статистичних даних, і тому являють собою випадкові величини. Тільки при нескінченно великому обсязі вибірок їх значення можна вважати точними [134].

Наведені розрахункові співвідношення відносяться до середніх значень, інтервальні оцінки можуть бути встановлені з допомогою загальних методів математичної статистики.

5 Елементи теорії надійності в технічній діагностики

Для нормативного забезпечення методів, заходів і засобів, направлених на досягнення необхідного рівня надійності, використовується система стандартів «Надійність в техніці». Ця система відповідно до ДСТУ 2861-94. «Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення» забезпечує ефективність організаційно-технічних, конструкторсько-технологічних і експлуатаційних заходів, направлених на досягнення необхідного рівня надійності виробів [102].

Працездатність – стан виробу, при якому воно здатне виконувати задані функції з параметрами, встановленими вимогами нормативно-технічною і конструкторсько-технологічною документацією.

Відмова – подія, що полягає в порушенні працездатності виробу.

Критерій відмови – ознака, по якій оцінюється надійність різних виробів.

Безвідмовність – властивість виробу безперервно зберігати працездатний стан протягом деякого часу.

Напрацювання – тривалість роботи виробу в годинах, циклах і т.п.

Напрацювання до відмови – напрацювання виробу від початку його експлуатації до виникнення першої відмови.

Граничний стан – стан виробу, при якому його подальше використання за призначенням недопустимо або недоцільно.

Довговічність – властивість виробу зберігати працездатний стан до наступу граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонтів.

Ремонтопридатність – властивість, виробу що полягає в можливості до запобігання й виявлення причин виникнення відмов, до підтримки і відновлення працездатного стану шляхом проведення технічного обслуговування і ремонтів.

Збереженість – властивість виробу зберігати значення показників безвідмовності, довговічності і ремонтпридатності протягом експлуатації, зберігання і транспортування.

Ресурс – напрацювання виробу від початку його експлуатації або її відновлення після ремонту до переходу в граничний стан.

Термін служби – календарна тривалість від початку експлуатації виробу або її відновлення після ремонту до переходу в граничний стан.

Середній час відновлення – це математичне очікування часу відновлення працездатного стану.

Конструктивно вироби ділять на невідновлювані і відновлювані. Невідновлюваними називають такі вироби, які в процесі виконання своїх функцій не допускають ремонту, а відновлювані допускають. Враховуючи цю властивість, окремо розраховують і нормують показники надійності для відновлюваних і не відновлюваних виробів [101,103].

Показник надійності – це кількісна характеристика одного або декількох властивостей, що визначають надійність виробу.

Основними нормованими показниками надійності невідновлюваних виробів є:

- вірогідність безвідмовної роботи $P(t)$;
- вірогідність відмови $Q(t)$;
- частота відмов $a(t)$;
- інтенсивність відмов $\lambda(t)$;
- середнє напрацювання до першої відмови $T_{\text{ср}}$.

Оскільки час настання відмови T є величина випадкова, тому $Q(t)$ – це вірогідність того, що випадкова величина T набуде значення менше або рівне t (інтегральна функція розподілу відмов), де t – час за яке визначається показник надійності, тобто вірогідністю відмови називається вірогідність того, що за певних умов експлуатації в заданому інтервалі часу виникає хоч одна відмова

$$Q(t) = P(T \leq t). \quad (5.1)$$

Вірогідністю безвідмовної роботи $P(t)$ називається вірогідність того, що за певних умов експлуатації в заданому інтервалі часу або в межах заданого напрацювання t не станеться жодної відмови

$$P(t) = P(T < t). \quad (5.2)$$

Оскільки безвідмовна робота і відмова є подіями неспільними і протилежними, то між ними справедливо наступне відношення:

$$P(t) + Q(t) = 1. \quad (5.3)$$

Оскільки $Q(t)$ є закон розподілу випадкової величини (відмов), то залежність між можливими значеннями безперервної випадкової величини T і вірогідністю попадання в їх околицю називається її щільністю вірогідності.

Частота відмов $a(t)$ є щільність вірогідності часу роботи виробу до першої відмови

$$a(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{dP(t)}{dt}. \quad (5.4)$$

Інтенсивністю відмов називається відношення числа виробів, що відмовили, в одиницю часу до середнього числа виробів, що справно працюють в даний відрізок часу. Імовірнісна оцінка цієї характеристики знаходиться з вираження

$$\lambda(t) = a(t)/P(t). \quad (5.5)$$

Середнім напрацюванням до першої відмови T_{cp} називається математичне очікування $M[t]$ часу роботи виробу повністю. T_{cp} обчислюється через частоту відмов (щільність розподілу часу безвідмовної роботи):

$$M[t] = T_{cp} = \int_{-\infty}^{+\infty} ta(t)dt, \quad (5.6)$$

оскільки $t > 0$ и $P(0) = 1$, а $P(\infty) = 0$, тоді $T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t)dt$.

Знаючи один з показників надійності і закон розподілу відмов, можна обчислити останні характеристики надійності з врахуванням наступних формул:

$$Q(t) = \int_0^t a(t)dt, P(t) = 1 - \int_0^t a(t)dt, \lambda(t) = a(t)/P(t), P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}. \quad (5.7)$$

Статистичні оцінки показників надійності невідновлюваних виробів розраховуються наступними формулами. Статистична оцінка вірогідності відмови визначається формулою:

$$\bar{Q}(t) = n(t)/N_0, \quad (5.8)$$

де $n(t)$ – число виробів, що відмовили за час t ; N_0 – число випробовуваних виробів.

Статистична оцінка вірогідності безвідмовної роботи буде рівна:

$$\bar{P}(t) = [N_0 - n(t)]/N_0. \quad (5.9)$$

Статистична оцінка частоти відмов:

$$\bar{a}(t) = n(\Delta t)/\Delta t N_0, \quad (5.10)$$

де $n(\Delta t)$ - число виробів, що відмовили в інтервалі часу від $t - \Delta t/2$ до $t + \Delta t/2$.

Статистична оцінка інтенсивності відмов:

$$\bar{\lambda}(t) = n(\Delta t)/\Delta t N_{\text{ср}}, \quad (5.11)$$

де $N_{\text{ср}} = (N_i + N_{i+1})/2$ – середнє число справно працюючих виробів в інтервалі Δt ; N_i – число виробів, що справно працюють на початку інтервалу Δt ; N_{i+1} – число виробів, що справно працюють в кінці інтервалу Δt .

Знаючи моменти виходу з ладу всіх спостережувальних виробів, можна дати статистичну оцінку середнього напрацювання до першої відмови:

$$\bar{T}_{\text{ср}} = (\sum_{i=1}^{N_0} t_i)/N_0, \quad (5.12)$$

де t_i – час безвідмовної роботи i -го зразка.

Маючи дані про кількість виробів n , що вийшли з ладу, в кожному i -м інтервалі часу, статистичну оцінку середнього напрацювання до першої відмови можна визначити з рівняння:

$$\bar{T}_{\text{ср}} \approx (\sum_{i=1}^m n_i t_{\text{ср}i})/N_0, \quad (5.13)$$

де $t_{\text{ср}i} = (t_{i-1} + t_i)/2$, $m = t_k/\Delta t$; t_{i-1} - час початку i -го, t_i – час кінця i -го інтервалу; t_k – час, протягом якого вийшли з ладу всі вироби; $\Delta t = (t_{i-1} - t_i)$ – інтервал часу.

Найбільш часто нормованими показниками надійності відновлюваних виробів є параметр потоку відмов $w(t)$ і середнє напрацювання на відмову $t_{\text{ср}}$. Статистичною оцінкою параметра відмов називається відношення числа виробів, що відмовили, в одиницю часу до випробовуваних виробів за умови, що всі вироби, що вийшли з ладу, замінюються справними:

$$\bar{w}(t) = n(\Delta t)/N(\Delta t), \quad (5.14)$$

де $n(\Delta t)$ – число виробів, що відмовили в інтервалі часу $t - \Delta t/2$ до $t + \Delta t/2$; N – число випробовуваних виробів; Δt – інтервал часу.

Середнім напрацюванням на відмову відновлюваного виробу називається середнє значення часу між сусідніми відмовами.

Для одного виробу статистична оцінка середнього напрацювання на відмову буде рівна:

$$\bar{t}_{cp} = (\sum_{i=1}^n t_i) / n, \quad (5.15)$$

де t_i – час справної роботи виробу між $(i - 1)$ -м і i -м відмовами; n – число відмов за час t .

Для N спостережуваних протягом часу t виробів *статистична оцінка* середнього напрацювання на відмову визначається по формулі

$$\bar{t}_{cp} = (\sum_{j=1}^N \sum_{i=1} t_{ji}) / \sum_{j=1}^N n_j, \quad (5.16)$$

де t_{ji} – час справної роботи j -го виробу між $(i - 1)$ -м і i -м відмовами; n_j – число відмов j -го виробу за час t .

Коефіцієнтом готовності називається відношення часу справної роботи до суми часу справної роботи і вимушених простоїв виробу, узятих за один і той же календарний термін. Згідно з визначенням статистична оцінка коефіцієнта готовності буде рівна:

$$\bar{K}_r = t_p / (t_p + t_{\pi}), \quad (5.17)$$

де $t_p = \sum_{i=1}^n t_{pi}$ – сумарний час справної роботи виробу;
 $t_{\pi} = \sum_{i=1}^n t_{\pi i}$ – сумарний час вимушеного простою виробу; t_{pi} – час роботи виробу між $(i - 1)$ -м і i -м відмовами; $t_{\pi i}$ – час вимушеного простою після i -ої відмови; n – число відмов (ремонтів) виробу.

Імовірнісне визначення коефіцієнта готовності можна отримати переходячи від t_p і t_{π} до їх математичних чекань:

$$K_r = t_{cp} / (t_{cp} + t_{\pi}), \quad (5.18)$$

де t_{π} – середній час відновлення.

При $t_{cp} = T_{cp}$ (потік відмов простий):

$$K_r = T_{cp} / (T_{cp} + t_b). \quad (5.19)$$

Коефіцієнтом вимушеного простою називається відношення вимушеного простою до суми часу справної роботи і вимушених простоїв виробу, узятих за один і той же календарний термін. Статистична оцінка коефіцієнта вимушеного простою буде рівна:

$$\bar{K}_r = t_p / (t_p + t_n), \quad (5.20)$$

а імовірнісне значення визначається по формулі

$$K_n = t_b / (t_{cp} + t_b). \quad (5.21)$$

Між коефіцієнтом готовності і коефіцієнтом вимушеного простою існує залежність

$$K_r = 1 - K_n. \quad (5.22)$$

Коефіцієнт готовності не є функцією часу роботи виробу. Якщо інтенсивність відмов $\lambda = const$ і інтенсивність відновлення $\mu = const$, то вірогідність застати виріб в справному стані у будь-який момент часу t визначається по формулах (функції готовності):

$$P_r(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}, \quad (5.23)$$

або

$$P_r(t) = K_r + (1 - K_r) e^{-t/K_r t_b}. \quad (5.24)$$

Будь-який технічний виріб з початку і до кінця експлуатації має три характерні періоди роботи: прироблення ($0 < t < t_1$), нормальної експлуатації ($t_1 < t < t_2$) і старіння або зносу ($t > t_2$) (див. рис. 5.1) [51,85,102,103,134,159,221,227].

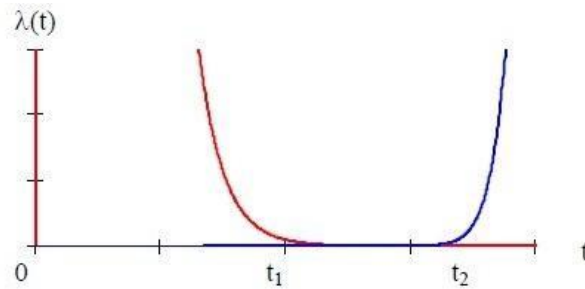


Рисунок 5.1 - Періоди роботи технічного виробу

1. Період прироблення характеризується високою інтенсивністю відмов (прироблені відмови), викликані відхиленням від вимог конструкторсько-технологічної документації, які підкоряються розподілу Вейбулла і усуваються за рахунок введення технологічного прироблення («технологічного прогону»).

2. Період нормальної експлуатації характеризується мінімальною і постійною інтенсивностями відмов. Ці відмови називаються раптовими, носять випадковий характер і підкоряються експоненціальному закону розподілу.

3. Період старіння або зносу характеризується різким збільшенням інтенсивності відмов зносу, які підкоряються нормальному закону розподілу (закону Гауса).

Експоненціальний закон розподілу – однопараметричний закон з постійною інтенсивністю відмов ($\lambda = \text{const}$). Вірогідність безвідмовної роботи, частота відмов і середнє напрацювання до відмови визначаються по формулах

$$P(t) = e^{-\lambda t}, a(t) = \lambda e^{-\lambda t}, T_{\text{cp}} = 1/\lambda \quad (5.25)$$

Зміни вірогідності безвідмовної роботи від часу при експоненціальному розподілі відмов підпорядкується закону розподілу Вейбулла – двохпараметричному закону з параметрами: λ_0 , що визначає масштаб, і k , що визначає асиметрію. Показники надійності при цьому будуть рівні:

$$P(t) = e^{-\lambda_0 t^k}, a(t) = \lambda_0 k t^{k-1} e^{-\lambda_0 t^k}, \lambda(t) = \lambda_0 k t^{k-1}, T_{\text{cp}} = \Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right) / \lambda_0^{\frac{1}{k}}, \quad (5.26)$$

де $\Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right)$ – гамма-функція.

Нормальний закон розподілу – двохпараметричний закон з параметрами розподілу: T – математичне чекання і σ – середньоквадратичне відхилення. Вірогідність події в інтервалі часу від t_1 до t_2 визначається по формулі:

$$P(t_1 < t < t_2) = \frac{1}{2} [\Phi(x_2) - \Phi(x_1)] = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{t_2 - T}{\sigma\sqrt{2}}\right) - \Phi\left(\frac{t_1 - T}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right], \quad (5.27)$$

де $\Phi(x)$ – інтеграл вірогідності (інтеграл Лапласа) виду:

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt.$$

При використанні центрованої і нормованої функції Лапласа $\Phi(z)$, де $z = (t - T)/\sigma$, вірогідність безвідмовної роботи визначається по формулі:

$$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - T}{\sigma}\right). \quad (5.28)$$

Структурною надійністю виробу називається результуюча надійність при заданій структурі і відомих значеннях надійності всіх вхідних в нього блоків і елементів. Розбиття виробу на блоки і елементи здійснюється на базі єдності функціонування і фізичних процесів, які відбуваються при його роботі [103].

Якщо відмова технічного пристрою настає при відмові одного з його елементів, то такий пристрій має основне з'єднання елементів. При розрахунку надійності таких пристроїв відмова елементу є подією випадковим і незалежним, а вірогідність безвідмовної роботи виробу протягом часу t дорівнює твору вірогідності його елементів протягом того ж часу:

$$P(t) = p(t_1)p(t_2) \dots p(t_N) = \prod_{i=1}^N p_i(t), \quad (5.29)$$

або

$$P(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^N \int_0^1 \lambda_i(t) dt\right). \quad (5.30)$$

При експоненціальному законі розподілу відмов, тобто для нормального періоду роботи:

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-t/T_{cp}}, a(t) = \lambda e^{-\lambda t}, T_{cp} = 1/\lambda, \lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i, \quad (5.31)$$

де λ_i – інтенсивність відмов i -го елемента.

При розрахунку високонадійних виробів з достатньою для практики точністю можна користуватися наближеними формулами:

$$P(t) \approx 1 - t \sum_{i=1}^r N_i \lambda_i = 1 - \lambda t, \quad \lambda = \sum_{i=1}^r N_i \lambda_i, \quad T = 1 / \sum_{i=1}^r N_i \lambda_i = 1 / \lambda, \quad a(t) \approx \lambda(1 - \lambda t)$$

(5.32)

$$p_1(t)p_2(t) \dots p_N(t) \approx 1 - \sum_{i=1}^N q_i(t), \quad p_i^N(t) = 1 - Nq_i(t), \quad \sqrt[N]{p_i(t)} = 1 - q_i(t)/N$$

(5.33)

де r – число типів елементів, $q_i(t)$ – вірогідність відмови i -го елемента.

Одним з методів підвищення надійності є резервування. Резервованим з'єднанням виробів називається таке з'єднання, при якому відмова настає лише після відмови основного виробу і всіх резервних виробів. Основним параметром резервування є його кратність m , відношення числа резервних виробів до резервованих (основних). Розрізняють резервування з цілою і дробовою кратністю. При резервуванні з цілою кратністю величина m – ціле число, при резервуванні з дробовою кратністю m – дрібне. За способом включення резервування ділиться на постійне і резервування заміщенням. Постійне резервування – резервування, при якому резервні вироби підключені до основних протягом всього часу роботи і знаходяться в однаковому з ними режимі. Резервування заміщенням – резервування при якому резервні вироби заміщують основні після їх відмови.

При включенні резерву за способом заміщення резервні елементи до моменту включення в роботу можуть знаходитися в трьох станах:

- навантаженому резерві;
- полегшеному резерві;
- ненавантаженому резерві.

Якщо елементи резервованих пристроїв мають відмови вигляду: «обрив» або «коротке замикання», то вірогідність безвідмовної роботи слід обчислювати, підсумовуючи вірогідність всіх сприятливих (що не приводять до відмови) гіпотез

$$P(t) = \sum_{j=1}^k p_j(t), \quad (5.34)$$

де $p_j(t)$ – вірогідність j -й сприятливої гіпотези, обчисленої з врахуванням двох видів відмов; k – число сприятливих гіпотез.

Для елементів складної системи справедливі вирази

$$p(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right], q_0 + q_{кз} = 1, \quad (103)$$

де $\lambda(t)$ – інтенсивність відмов елементу; $q_0, q_{кз}$ – вірогідність виникнення «обриву» і «короткого замикання» відповідно.

При експоненціальному законі розподілу відмов

$$p(t) = e^{-\lambda t}, q_0 = \lambda_0 / (\lambda_0 + \lambda_{кз}), q_{кз} = \lambda_{кз} / (\lambda_0 + \lambda_{кз}), \quad (104)$$

де $\lambda_0, \lambda_{кз}$ – інтенсивність відмов елементу по «обриву» і «короткому замиканню».

6 Принципи, методи та засоби неруйнівного контролю

6.1 Загальна характеристика засобів неруйнівного контролю та їх класифікація

До засобів неруйнівного контролю (НК) відносять вимірювальну апаратуру, в якій використовуються проникаючі поля, випромінювання і речовини для вивчення отриманої інформації про якість досліджуваних матеріалів та об'єктів. Неруйнівний контроль поділяють на 9 видів: магнітний, вихрострумний, електричний, радіохвильовий, тепловий оптичний, радіаційний, акустичний і проникаючими речовинами. Кожен вид НК здійснюють методами, які класифікують за такими ознаками: характером взаємодії фізичних полів або речовин з контрольованим об'єктом; первинним інформаційним параметром; способам отримання первинної інформації.

Характер взаємодії поля і речовини з об'єктом має бути таким, щоб контрольована ознака об'єкта викликала певні зміни поля або стан речовини.

Наприклад, наявність несплошності викликала зміну минулого через неї випромінювання або проникнення в неї пробної речовини. У деяких випадках використовуване для контролю фізичне поле виникає під дією інших фізичних ефектів, пов'язаних з контрольованою ознакою. Наприклад, електрорушійна сила, що виникає при нагріванні різнорідних матеріалів, дозволяє контролювати хімічний склад матеріалів (термоелектричний ефект).

Первинний інформативний параметр - конкретний параметр поля і речовини (амплітуда поля, час його поширення, кількість речовини і т.д.), зміну якого використовують для характеристики контрольованого об'єкту. Наприклад, наявність несплошності збільшує або зменшує амплітуду випромінювання, що пройшло через неї.

Спосіб отримання первинної інформації – конкретний тип датчика або речовини, які використовують для вимірювання та фіксації згаданого інформаційного параметра.

За технічним виконанням засоби контролю можна поділити на три класи:

- автономні прилади для контролю однієї або декількох взаємопов'язаних якісних характеристик;
- комплексні системи, автоматичні лінії і роботи-контролери, призначені для визначення ряду основних параметрів, що характеризують якість об'єкта;
- системи НК для автоматичного управління технологічними процесами за якісними ознаками.

За видами контрольованих параметрів системи НК поділяються на:

- прилади-дефектоскопи (прилади або установки), призначені для виявлення дефектів типу порушення суцільності (тріщин, раковин, розшарувань і т.д.):

- прилади для контролю геометричних характеристик (зовнішні і внутрішні діаметри, товщина стінки, покриттів, шарів, ступінь зносу, ширина і довжина виробу і т.д.);

- прилади для вимірювання фізико-хімічних і фізико-механічних характеристик (електричних, магнітних і структурних параметрів, відхилень від заданого хімічного складу, замір твердості, пластичності, коерцитивної сили, контролю якості зміцнених шарів, змісту і розширення ферритної бази і та ін.);

- системи технічної діагностики для передбачення виникнення різного роду дефектів, в тому числі порушень суцільності, трансформаційних змін розмірів і фізико-механічних властивостей виробів на період їх експлуатації.

Сучасна технологія не гарантує відсутності в виробах тих чи інших дефектів, що знижують якість продукції. Залежно від розмірів, характеру і розташування цих дефектів, а також назначенія і умов роботи деталі або вузла дефекти можуть бути допустимими або недопустимими. Питання про те, які дефекти допустимі в даному вузлі або деталі, вирішується конструктором спільно з технологами. Проблема вибору критеріїв бракування вельми складна. Для її оптимального рішення необхідні складні розрахунки, натурні випробування виробів з різними дефектами, узагальнення результатів експлуатації і т.п. Крім того, слід враховувати реальні можливості існуючих методів і засобів неруйнівного контролю. Тому в багатьох випадках розміри допустимих дефектів призначаються рішеннями відповідних фахівців. Максимальні розміри допустимих дефектів вказують у технічній документації на неруйнівного контролю конкретних виробів [148,149,150,151,152,153,154,155,156,157,158]. Для неруйнівного контролю застосовуються методи, засновані на різних фізичних законах і явищах. наприклад:

- Голографічний метод, який заснований на реєстрації відмінності голограм доброякісних і дефектних ділянок контрольованих об'єктів. Їх відмінність обумовлена збільшенням деформацій в дефектних зонах в порівнянні з доброякісними при механічному навантаженні виробів. Метод застосовується для неруйнівного контролю клейових конструкцій [22,57, 98, 184,189, з'єднань обшивок з корпусами охолоджуваних лопаток, виробів з композиційних матеріалів [38,170] і т. п. Його переваги - безконтактність і

виключення сканування, а недоліки - необхідність механічного навантаження виробів, висока вартість і складність апаратури;

- Радіохвильові методи, які використовують взаємодію СВЧ радіовипромінювання з матеріалами контрольованих виробів [163,170,188,189,218]. Ці методи застосовуються для НК виробів з діелектричних і напів-провідникових матеріалів і дозволяють виявляти порушення цілісності, сторонні включення, структурні неоднорідності. Їх недоліки - неможливість виявлення дефектів під металевими шарами, значні розміри і маса апаратури, труднощі контролю в умовах одиничного і дрібносерійного виробництва з великою номенклатурою виробів;

- Теплові методи, засновані на спостереженні змін температурного рельєфу на поверхні контрольованого об'єкта, що викликаються дефектами [9,76,188,189,212]. Способи індикації цього рельєфу різні. Найбільш зручні безконтактні прилади, що реєструють інфрачервоне випромінювання (радіометри, тепловізори). Зокрема, методи застосовують для контролю багат шарових конструкцій - зі зменшенням теплопровідності матеріалу зовнішнього шару виробу чутливість вимірювального пристрою збільшується. Недоліки теплових методів - вплив на результати контролю коефіцієнта відображення інфрачервоного випромінювання, складність і висока вартість апаратури, яка використовується, труднощі її використання в умовах виробництва з широкою номенклатурою виробів;

- Радіаційні методи, які широко застосовують для виявлення порожнеч, пористості, сторонніх включень, (наприклад - дефектів стільникових блоків, визначення орієнтації волокон в армованих пелюстках і т.п.) [38,189,218]. При контролі використовують в основному довгохвильове рентгенівське випромінювання. Цікавими можливостями контролю композиційних полімерних матеріалів має рентгенівська обчислювальна томографія [189], однак і вона мало ефективна для виявлення, наприклад, основних дефектів клейових з'єднань [78]. Для контролю виробів з легких матеріалів (пластику і т.п.), особливо при їх поєднанні з металами, застосовують нейтронографії [184].

Вибір методу НК залежить від параметрів контрольованого об'єкта і умов його обстеження. Жоден з методів і приладів не є універсальним і не може задовольнити в повному обсязі практики. Відповідно до призначення приладів вимірювані параметри і дефекти поділяють на чотири групи (табл. 6.1).

Таблиця 6.1 - Класифікація контрольованих параметрів і дефектів

Група	Параметри і дефекти
1	Дефекти типу порушення суцільності: пори, раковини, розшарування, тріщини та ін.
2	Відхилення розмірів – довжини, висоти, ширини, діаметра, товщини стінки, а також товщини покриття і глибини поверхневого шару (загартованого, обезуглероженного і т.д.)
3	Питома електрична провідність, магнітна проникність, коерцитивна сила, залишкова індукція, твердість, вологість, напруга, структура, хімічний склад, межа міцності, границя текучості, відносне подовження, щільність і ін.
4	Збільшення напруг, збільшення зазору, емісія хвиль напруги, розвиток тріщин протягом часу, стоншення стінки, і т.д.

6.2 Магнітний неруйнівний контроль

Магнітний неруйнівний контроль заснований на аналізі взаємодії магнітного поля з об'єктом контролю. Як правило, його застосовують для контролю зразків з феромагнітних матеріалів. Властивості, які потрібно контролювати (хімічний склад, структура, наявність несплошностей і ін.), зазвичай пов'язані з параметрами процесу намагнічування і петлею гістерезису.

Залежно від конкретних завдань НК можуть використовуватися ті чи інші інформаційні параметри. Найбільш поширені параметри: коерцитивна сила, намагніченість, індукція, магнітна проникність, напруженість.

За способом отримання первинної інформації магнітний НК можна розділити на: магнітопорошковий (МП), магнітографічний (МГ), ферозондовий (ФЗ), ефекту Холла (ЕХ), індукційний (І), пондеромоторний (ПМ), магніторезисторний (МР). З їх допомогою можна здійснювати контроль суцільності (МП, МГ, ФЗ, ЕХ, І); розмірів (ФЗ, ЕХ, І, ПМ); структури і механічних властивостей (ФЗ, ЕХ, І).

Із зазначених методів тільки МП вимагає обов'язкової участі в контрольованих операціях людини, інші дозволяють отримувати первинну інформацію у вигляді електричного сигналу, що робить можливою повну автоматизацію процесу контролю. Методи МП і МГ виявлення несплошностей є контактними, при інших методах контролю знімання інформації відбувається безконтактно.

Основні поняття і терміни:

Намагніченість – векторна фізична величина, що характеризує стан речовини при її намагнічуванні. Кількісно вона дорівнює:

$$M = \lim_{V \rightarrow 0} \sum \frac{m}{V}, \quad (6.1)$$

де V – об'єм речовини, m – елементарний магнітний момент, вимірюється в А/м.

Магнітною індукцією називається силова характеристика магнітного поля (величина векторна)

$$B = \mu_0 \cdot (H + M), \quad (6.2)$$

де $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ Гн / м - магнітна постійна; H – напруженість магнітного поля. Одиниця виміру магнітної індукції – тесла (Тл).

Магнітна сприйнятливість – безрозмірна величина, що характеризує здатність речовини намагнічуватися в магнітному полі $X_m = M/H$.

Крива намагнічування – це графічне зображення функції $B=f(H)$ (рис.6.1)

Магнітною індукцією насичення B_s називають індукцію, відповідну максимальній H .

Залишковою магнітною індукцією B_r називають індукцію, яка залишається в попередньому намагніченому до насичення матеріалі після зняття магнітного поля.

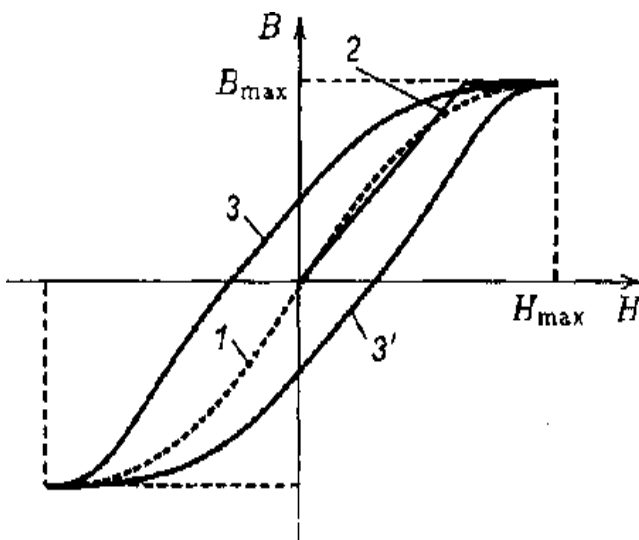


Рисунок 6.1 - Крива намагнічування:

- 1 – Основна крива намагнічування.
- 2 - Ідеальна крива намагнічування.
- 3 - Висхідна гілка гістерезису.
- 3' - Спадна гілка гістерезису.

Коерцитивна сила H_c – напруженість магнітного поля, необхідна для повного розмагнічування попереднього намагніченого феромагнетика

Відносна магнітна проникність – безрозмірна фізична величина, що характеризує магнітні властивості магнетиків;

$$\mu = 1 + \chi_m, \text{ или } B = \mu_0(H + H\chi_m) = \mu_0(1 + \chi_m)H = \mu\mu_0 H. \quad (6.3)$$

Величину $\mu_a = \mu * \mu_0$ називають абсолютною магнітною проникністю.

Коефіцієнт розмагнічування. При намагнічуванні виробів розімкнутої форми в зовнішньому полі (H_e) на їх кінцях утворюються полюси, що створюють розмагнічуюче поле (H_p), так що поле всередині виробу $H_i = H_e - H_p$ або наближено $H_p = N * M$, де N – коефіцієнт розмагнічування.

Магнітна проникність тіла:

$$\mu_T = B / \mu_0 H_e, \text{ или } \mu_T = \mu / [1 + N(\mu - 1)]; \quad (6.4)$$

при $\mu \rightarrow \infty$ $\mu_T = 1/N = \mu_f$, де μ_f - магнітна проникність форми (залежить від геометрії виробу).

Для вимірювання магнітних полів поблизу поверхні виробу застосовують різні магнітні перетворювачі.

Пасивний індукційний перетворювач являє собою катушку (контур) з числом витків W .

У відповідності зі знаком електромагнітної індукції на кінцях катушки виникає миттєва ЕРС

$$e = -W d\Phi / dt, \quad (6.5)$$

де $d\Phi$ – зміна за малий час dt повного магнітного потоку; $\Phi = \mu\mu_0 S H \cos \alpha$, де H – модуль напруженості магнітного поля, розмірність Φ [BS]; α - кут між вектором H і нормаллю до площі катушки; S - площа катушки.

Магнітна індукційна голівка являє собою різновид пасивного індукційного перетворювача (рис.6.2). Вона складається з катушки, що знаходиться на кільцевому магнітопроводі з робочим зазором. Локальний магнітний потік Φ_g носія 1 через голівку розгалужується на потік Φ_d , що

проходить через кільцевий сердечник 2 і зчіплюється з обмоткою 3 (корисний лоток) Φ , обминаючи сердечник.

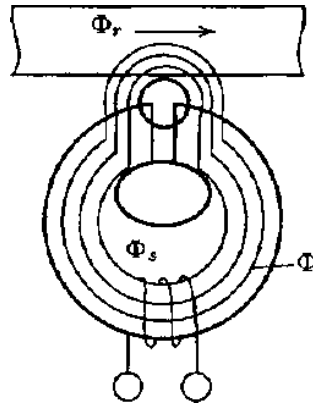


Рисунок 6.2 - Магнітна індукційна голівка

Ефективність сердечника магнітної головки:

$$E = \Phi_R / \Phi_s = 1 / (1 + l_c \Omega_c / l_s \Omega_s \bar{\mu}_c), \quad (6.6)$$

де l_s – середня довжина магнітних силових ліній в зазорі з площею Ω_s ; l_c – середня довжина магнітних силових ліній в сердечнику головки з площею Ω_c ; $\bar{\mu}_c$ – середня магнітна проникність матеріалу сердечника головки.

6.3 Електричні методи та засоби неруйнівного контролю

Електричний неруйнівний контроль заснований на реєстрації параметрів електричного поля, що взаємодіє з контролюємим об'єктом (власне електричний метод), або поля, виникаючого в об'єкті контролю в результаті зовнішнього впливу (термоелектричний і трибоелектричний методи). Первинними інформаційними параметрами є електрична ємність або потенціал.

Так, електроємнісний метод контролю (ЕМК) передбачає введення об'єкта контролю або його досліджуваної ділянки в електромагнітне поле і визначення шуканих характеристик матеріалу по викликаному ним зворотною реакцією на джерело цього поля (рис. 6.3).

В якості джерела поля застосовують електричний конденсатор, який є одночасно і первинним електроємнісним перетворювачем (ЕП).

Інформативність ЕМ До визначається залежністю первинних інформаційних параметрів ЕП від характеристик об'єкта контролю

безпосередньо від електричних характеристик (наприклад, діелектричної проникності і коефіцієнта діелектричних втрат) і геометричних розмірів об'єкта контролю.

До найбільш інформативних геометричних параметрів об'єкта контролю слід віднести товщину пластин, оболонок і діелектричних покриттів на провідному і непровідному підставах, поперечні розміри лінійно-протяжних провідних і діелектричних виробів.

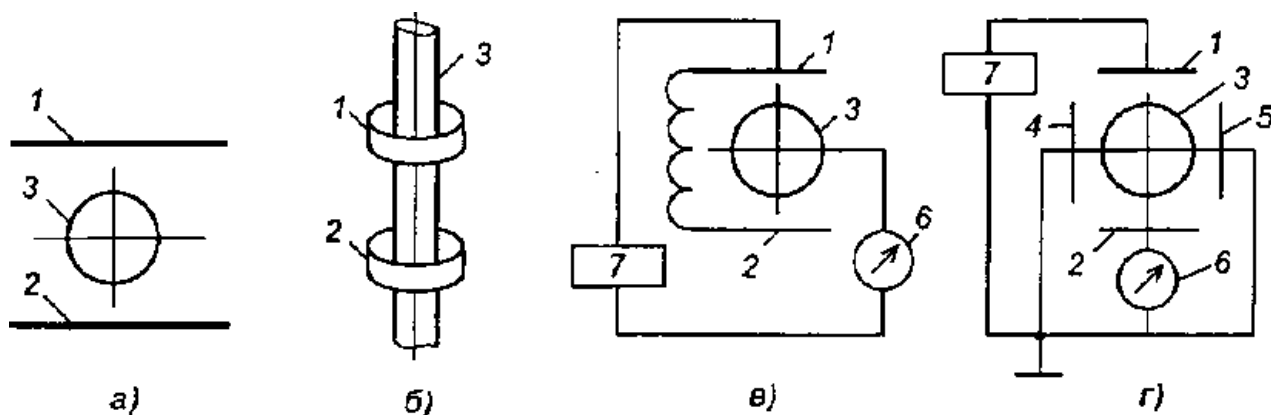


Рисунок 6.3 - Схеми конструкцій прохідних ЕП з вимірюванням ємності: а ~ в - вимірювання повної С; г-зміна частковій С; д, е - зміна перехресної С; 1 - високо потенційний електрод; 2 - низько потенційного електрод; 3 - об'єкт контролю; 4, 5 - охоронні електроди; 6 - індикатор; 7 - джерело живлення

Інформативні параметри ЕП залежать також від його конструкції і електричних характеристик середовища, в яку поміщений об'єкт контролю. В якості інформативного параметру доцільно використовувати ємність ЕП і тангенс кута втрат (C і $\operatorname{tg} \delta$). В електричних методах контролю основним елементом є ємнісний перетворювач. Зокрема, він є основним елементом для контролю вібрації, шуму та удару. Складається з нерухомої (статора) і рухомої (ротора) частин. Ємнісний ПП, що містить дві плоскопаралельні пластини з площею перекриття S , розташовані на відстані d в середовищі з діелектричною проникністю ϵ , має ємність (пФ):

$$C = 0,866\epsilon S/d. \quad (6.7)$$

Для вимірювання параметрів вібрації можна використовувати зміну площі перекриття пластин, відстань між пластинами або діелектричної проникності діелектрика конденсатора.

Недоліками ємнісних ІІ є залежність від зміни температури і вологості, а також від впливу ємності і індуктивності провідних проводів (кабелів), що призводить до калібрування спільно з кабелем. Еквівалентна ємність ІІ з кабелем визначається виразом:

$$C_{\text{экв}} = C[1 + \omega^2 L_{\text{к}}(C_{\text{к}} + C)] + C_{\text{к}}, \quad (6.8)$$

де C – ємність ІІ; $C_{\text{к}}$ – ємність кабелю; $L_{\text{к}}$ – індуктивність кабелю.

Зважаючи на малу ємності ІІ, що складає тисячі пікофарад, як правило, потрібно застосовувати в якості джерел живлення високоякісні генератори.

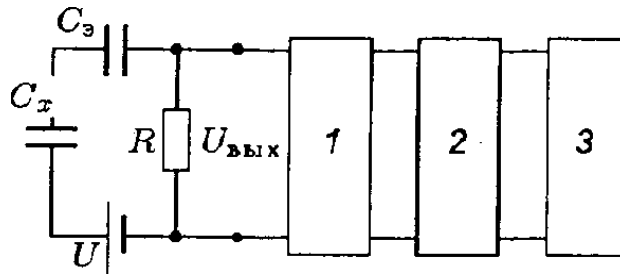


Рисунок 6.4 - Схема з ІІ у ланцюзі постійного струму: 1 – попередній підсилювач; 2 – вимірювальний підсилювач; 3 – індикатор; $C_{\text{х}}$ – ємність ІІ; $C_{\text{э}}$ – еквівалентна ємність з урахуванням проводів; U – напруга джерела живлення.

Для схем з ІІ у ланцюгах постійного струму вихідними величинами є амплітуда і фаза напруги, що знімається з ВП. При синусоїдальній вібрації напруга на виході ІІ

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{C_{\text{х}}}{C_{\text{э}}} \frac{U_{\text{ВХ}}}{\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega C_{\text{э}} R)^2}}} \sin(\omega t + \varphi) \quad (6.9)$$

де $C_{\text{х}}$ – зміна ємності конденсатора ІІ при впливі вібрації; $U_{\text{ВХ}}$ – напруга живлення схеми; $C_{\text{э}}$ – постійна ємність МП і підвідних проводів; R – опір навантаження; ω – кругова частота вібрації; $\varphi = -1 / \omega C_{\text{э}} R$

Застосування ЕМП характеризується наступними особливостями:

- інформація, що отримується від об'єкту контролю, многопараметрична, що, з одного боку, свідчить на користь цього методу, так як дозволяє отримати більш докладні відомості про об'єкт контролю, а з

іншого боку, створює додаткові труднощі при поділі параметрів контролю. Так, при зміні одного з параметрів на результат контролю впливають інші параметри, які є заважаючими факторами;

- можливість проведення безконтактних вимірювань в динамічному режимі, що грає важливу роль при автоматизації процесу контролю;
- ЕМП дозволяє отримати інформацію про середні значення контрольованих параметрів в порівняно великих обсягах матеріалу або поле в певній ділянці, а також на певній глибині досліджуваного об'єкта.

6.4 Вихрострумові методи контролю

Вихрострумові методи контролю засновані на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться збудливою котушкою в електропровідному об'єкті контролю. Щільність вихрових струмів в об'єкті залежить від геометричних і електромагнітних параметрів об'єкту, а також взаємного розташування вимірювального перетворювача (АТП) і об'єкту.

В якості перетворювача зазвичай використовують індуктивні катушки (одну або кілька). Синусоїдальний або імпульсний струм, що діє в котушці ВТП, створює електромагнітне поле, яке збуджує вихрові струми в електропровідному об'єкті. Електромагнітне поле вихрових струмів впливає на котушку перетворювача, наводячи в ній ЕРС або змінюючи їх повний електричний опір. Реєструючи напругу на затискачах катушки або їх опір, отримують інформацію про властивості об'єкта і про становище перетворювача щодо нього. ЕРС (або опір) перетворювача залежить від багатьох параметрів об'єкту контролю, тобто інформація, що надається перетворювачем, багатопараметрична.

Особливість вихрострумового контролю в тому, що його можна проводити без контакту перетворювача і об'єкта.

Отримання первинної інформації у вигляді електричних сигналів, безконтактність і висока продуктивність визначають широкі можливості автоматизації вихрострумового контролю. На сигнали перетворювача практично не впливають вологість, тиск і забрудненість газового середовища, радіоактивне випромінювання і ін., Але застосовують їх в основному для контролю електропровідних об'єктів: металів, сплавів, графіту, напівпровідників.

За робочим положенням відносно об'єкта контролю перетворювачі поділяють на прохідні, накладні і комбіновані.

Накладні ВТП зазвичай являють собою одну або кілька котушок, до торців яких підводиться поверхня об'єкта (рис. 6.5).

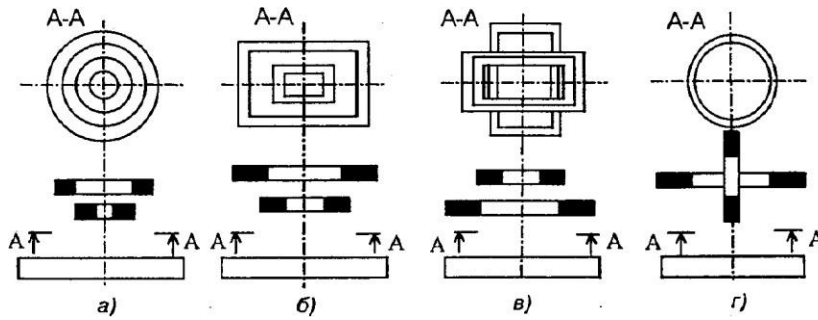


Рисунок 6.5 - Накладні ВТП: а – круглий коаксіальний; б – прямокутний; в -прямокутний хрестоподібний; г – зі взаємно перпендикулярними осями.

Прохідні ВТП діляться на зовнішні, внутрішні, заглибні і комбіновані (рис. 6.6). Комбіновані перетворювачі являють собою комбінацію накладних і прохідних ВТП з прохідної збудливою і накладною вимірювальною обмотками.

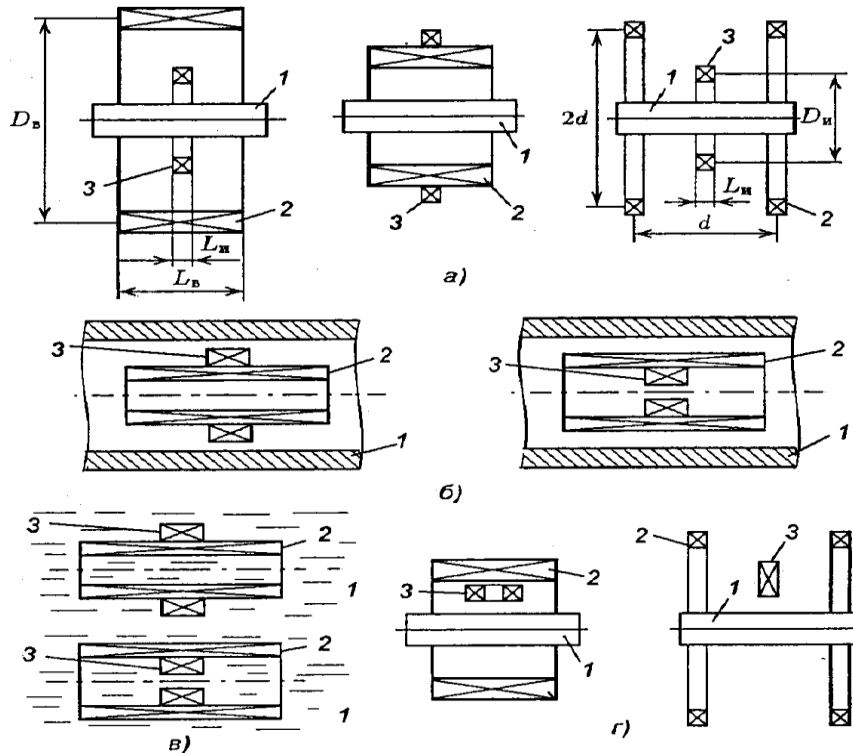


Рисунок 6.6 - Прохідні ВТП: а – зони об'єкта; б – всередині об'єкта; в – в рідкому обсязі; Г – комбіновані; 1 – об'єкт контролю; 2 – збудлива обмотка (L_B); 3 – вимірювальна обмотка; $L_B > 3/4 D_B$; $L_M < L_B$; $L_M < 2d$; $D_1 < 2d$

Фізичні процеси ВМТ. В основі вихрострумів методів лежать залежність інтенсивності і розподілу вихрових струмів в об'єкті контролю від взаємного розташування ВТП об'єкта. Змінний струм, що діє в котушці ВТП,

створює електромагнітне поле, яке збуджує вихрові струми в електропровідному об'єкті контролю.

Узагальнена функціональна схема вихрострумowego контролю показана на рис. 6.7. Зі схеми видно, що щільність вихрових струмів максимальна на поверхні об'єкту в контурі, діаметр якого близький до діаметру збудливої котушки, і убуває до нуля на осі ВТП при $\gamma \rightarrow +\infty$.

Щільність вихрових струмів зменшується також і по глибині об'єкту контролю. Глибина проникнення:

$$\delta = \sqrt{2/\omega\mu_a\sigma}, \quad (6.9)$$

де ω – кругова частота струму збудження ВТП; μ_a – абсолютна магнітна проникність, Гн /м; σ – питома електрична провідність матеріалу об'єкту, См / м.

Риунок 6.7 - Узагальнена функціональна схема вихрострумowego контролю

Формула дає завищене значення параметру, тому вводять узагальнений параметр:

$$\beta = R\sqrt{\omega\mu_a\sigma}, \quad (6.10)$$

де R – радіус збудливої обмотки.

При цьому $\delta = \sqrt{2/\beta}$. У практиці використовують номограми для визначення і при відомих значеннях частоти f і питомої електричної провідності σ .

Основним елементом ВМК є вихрострумівий перетворювач ВТП. В основі ВТП лежить котушка, яка характеризується активним R_0 і індуктивним опором L_0 (або індуктивністю L_0). R_0 залежить від діаметра дроту, способу намотування, частоти струму живлення:

$$R_0 = 4\rho l_{\text{ср}} n / \pi d^2; \quad L_0 = n^2 S l / \mu = n^2 R_m, \quad (6.11)$$

де $\rho = 1 / \sigma$ – опір; σ – електропровідність; $l_{\text{ср}}$ – середня довжина витка; n – число витків; d – діаметр проводу; μ – магнітна проникність речовини; S – площа перетину котушки; R_m – магнітний опір; l – довжина проводу котушки.

Це формули для розрахунку простих одношарових котушок без урахування впливу підкладки. Накладний датчик може бути включений при паралельному і послідовному резонансному контурі (рис. 6.8).

Рисунок 6.8 - Накладні датчики: а – паралельний; б – послідовний; В – робочі характеристики; ГВЧ – генератор високої частоти

Робочими характеристиками ІП є $U_{\text{вих}} = f(H)$, при $t = \text{const}$, и $U_{\text{вих}} = f(t)$ при $h = \text{const}$. Показник роботи датчика – його чутливість S_h . До зміни відстані h : $S_h = dU_{\text{вих}} / dh$ при $t = \text{const}$, або до зміни товщини підкладки t : $S_t = dU_{\text{вих}} / dt$ при $h = \text{const}$. Це елементарні формули, що характеризують ВТП як первинний ІП. У реальному житті все складніше, і щоб зробити правильний коректний розрахунок ВТП, необхідно врахувати ще цілий ряд параметрів, що характеризують матеріал підкладки, матеріал обмотувального проводу та середовища, діапазон лінійності АЧХ датчика і багато іншого.

6.5 Метод проникаючих речовин

Метод проникаючих речовин заснован на проникненні пробних речовин в порожнину дефектів об'єкту контролю. Його ділять на методи течнопошуку і капілярні.

Течнопошук – це область науки і техніки, що забезпечує створення і застосування комплексу апаратури та методів контролю якості герметизації

різномірних систем і виробів. При цьому пробна речовина в порожнину дефекту проникає під дією різниці тисків.

Герметичними прийнято вважати конструкції, якщо перетікання через них проникаючих речовин досить мало для того, щоб його впливом можна було б знехтувати в умовах експлуатації і зберігання. Якщо герметизація здійснюється заради збереження речовини, то гранично допустимі потоки $Q_{\text{доп}}$ речовин, що перетікають через течі, визначаються формулами:

$$Q_{\text{доп}} \leq q_{\text{доп}}/t, \quad \text{или} \quad Q_{\text{доп}} = PV/\gamma t, \quad (6.11)$$

де $q_{\text{доп}}$ – гранично допустима до втрати кількість речовини; t – заданий час зберігання; P – допустима зміна тиску критичного компонента газового середовища в обсязі V ізольованої порожнини за час t ; γ – концентрація критичного компонента в перетікаючій суміші.

Капілярні методи НК засновані на капілярному проникненні індикаторних рідин в порожнині поверхневих і наскрізних несплошностей матеріалу ОК і реєстрації індикаторних слідів, що утворюються візуальним способом або за допомогою перетворювача. Капілярний НК призначений для виявлення невидимих і слабовидимих незброєним оком поверхневих або наскрізних дефектів в об'єктах контролю, визначення їх розташування, протяжності і орієнтації по поверхні. Капілярні методи підрозділяють на основні, які використовують капілярні явища, і комбіновані. Основні капілярні методи в залежності від типу проникаючої речовини підрозділяються на:

- метод проникаючих розчинів – рідинний метод, заснований на використанні в якості проникаючої речовини рідкого індикаторного розчину;
- метод фільтруючих суспензій, заснований на використанні в якості рідкої проникаючої речовини індикаторної суспензії, яка утворює індикаторний малюнок з відфільтрованих частинок дисперсної фази.

Комбіновані методи НК поєднують два або більше різних по фізичній суті методів НК, один з яких обов'язково рідинний.

Капілярно-електростатичний метод заснований на виявленні індикаторного малюнка, утвореного скупченням електрично заряджених частинок у поверхневій або наскрізній несплошності не електропровідного об'єкту, заповненого іоногенною рідиною.

Капілярно-електроіндуктивний метод заснований на електроіндуктивному виявленні електропровідної індикаторної рідини в поверхневих і наскрізних несплошностях не електропровідного об'єкту.

Капілярно-магнітопорошковий метод заснований на виявленні комплексного індикаторного малюнка, утвореного індикаторною рідиною і феромагнітним порошком, при контролі намагніченого об'єкту.

Рідинний капілярно-радіаційний метод випромінювання заснований на реєстрації іонізуючого випромінювання відповідної індикаторної рідини в поверхневих і наскрізних несплошностях.

6.6 Радіаційні методи неруйнівного контролю

Радіаційні методи засновані на реєстрації і аналізі проникаючого іонізуючого випромінювання після взаємодії з ОК. Найбільш широко використовують для контролю рентгенівське і гамма-випромінювання.

При радіаційному контролі використовують, як мінімум, три основні елементи: джерело, виріб і детектор, реєструючий Дефектоскопічний інформацію (рис. 6.9). При проходженні через виріб іонізуюче випромінювання ослабляється, поглинається і розсіюється. Ступінь ослаблення залежить від товщини і щільності об'єкта контролю, а також від інтенсивності M_0 і енергії E_0 випромінювання. При наявності в речовині внутрішніх дефектів рентгеном змінюються інтенсивність і енергія пучка випромінювання.

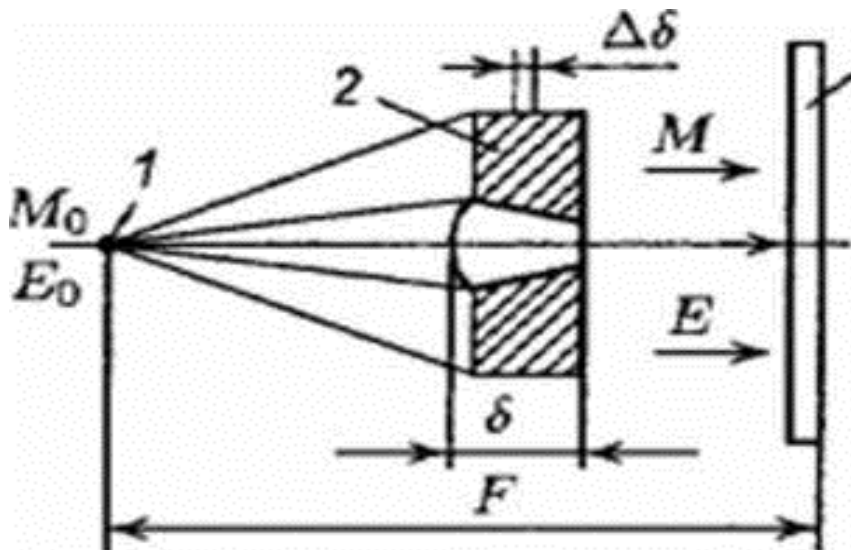


Рисунок 6.9 - Схема радіаційного контролю: 1 - джерело; 2 - виріб; 3 - детектор

Методи радіаційного контролю розрізняються за способами детектування дефектоскопічної інформації (рис. 6.10).

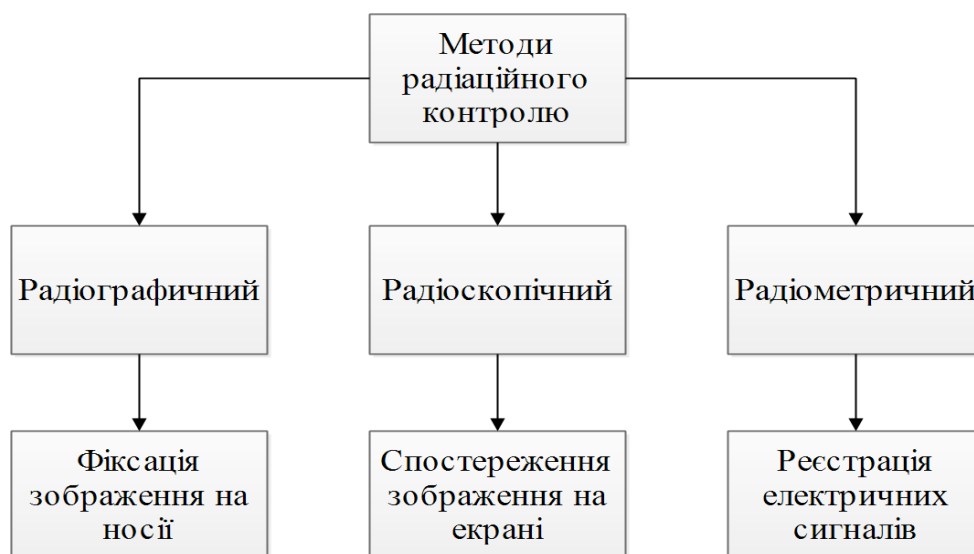


Рисунок 6.10 - Методи радіаційного контролю

До радіографічних відносять два методи: прямий експозиції, коли використовуються всі джерела іонізуючого випромінювання, а просвічування виробу проводиться на радіографічних плівку; метод перенесення зображення - зображення спочатку отримують на металевому яка активується екрані, розміщеному за виробом в нейтральному потоці, а потім переносять на радіографічних плівку шляхом притиску до екрану.

Радіоскопічний метод неруйнівного контролю базується на перетворенні радіаційного зображення об'єкта контролю в світлове зображення на вихідному екрані радіаційно-оптичного перетворювача, причому Дефектоскопічний аналіз отриманого зображення проводиться в процесі контролю. Зберігаючи такі гідності радіографічного методу, як можливість визначення характеру і форми виявленого дефекту, методи радіоскопії дозволяють досліджувати об'єкт контролю безпосередньо в момент його просвічування, тому скорочується час між початком контролю і моментом отримання висновку про якість об'єкта контролю (рис. 6.11а).

До основних параметрів радіаційного контролю відносять: абсолютну (відносну) чутливість, продуктивність, межа дозволу.

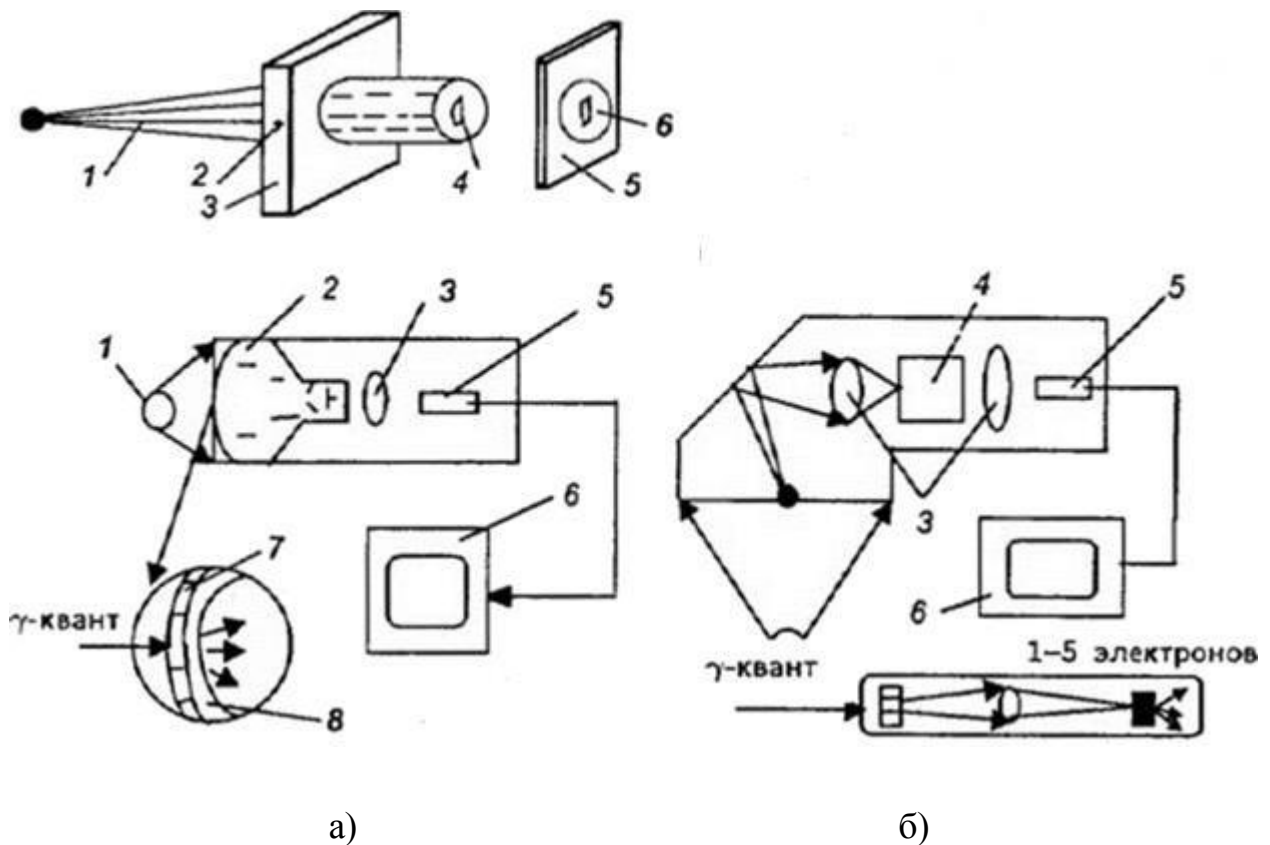


Рисунок 6.11 - Схеми підсилювачів радіаційного зображення: а - з радіаційним; б - зі світловим електронно-оптичним перетворювачем (ЕОП); 1 - джерело випромінювання; 2 - радіаційний ЕОП; 3 - об'єктиви; 4 - світловий ЕОП; 5 - передавальні телевізійні трубки; 6 - відеоконтрольний пристрій; 7 - рентгенолюмінофори; 8 - фотокатоди підсилювачів

Абсолютна чутливість визначається як мінімальна зміна параметра просвічує об'єкта, яке може бути виявлено аналізом світлового зображення об'єкта на вихідному екрані. Продуктивність радіаційного контролю визначається часом, що витрачається на контроль об'єкта. Межа дозволу - умовне найбільше число штрихів в 1 мм вихідного зображення. Перетворювачем радіаційного зображення називають пристрій для перетворення зображення, сформованого іонізуючим випромінюванням в результаті його взаємодії з контрольованим об'єктом, в зображення іншого виду.

Найбільшого поширення набули радіаційно-оптичні перетворювачі - це пристрої для перетворення радіаційного зображення в світлове зображення (рис. 6.11б).

Апаратуру радіометричного контролю відносять до приладів, які використовують контролюючі випромінювання для вимірювання фізичних характеристик просвічує об'єктів. При радіометричному методі контролю

детекторами випромінювання є різного роду лічильники, іонізаційні камери, сцинтиляційні перетворювачі (рис. 6.12).

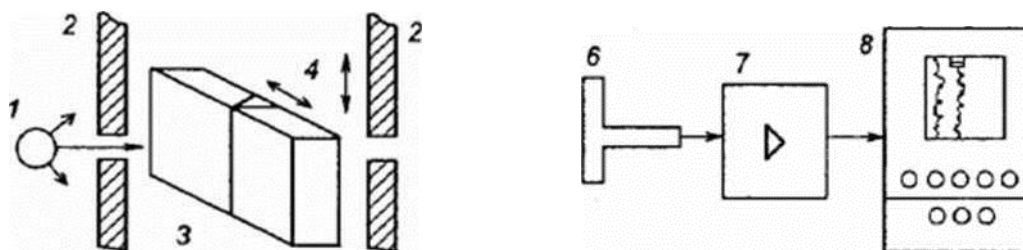


Рисунок 6.12 - Схемы радиометрического контроля: 1 — источник излучения; 2 — коллиматоры; 3 — контролируемый объект; 4 — направление перемещений; 5 — сцинтиляционный кристалл; 6 — фотоэлектронный умножитель; 7 — усилитель; 8 — регистрирующий прибор

За характером апаратура радіометричного контролю поділяються на толщиномери і дефектоскопи. Крім того, класифікаційними ознаками є умови вимірювання (поглинання випромінювання і його зворотне розсіювання), вид використовуваного іонізуючого випромінювання (рентгенівські трубки, ізотопні джерела, прискорювачі і конструктивно-експлуатаційні особливості).

7 Акустичні методи контролю і діагностики

Однак, досить перспективним з точки зору наукового дослідження властивостей і можливостей стає розділ акустичних методів неруйнівного контролю та діагностики виробів машинобудування.

Акустичні методи засновані на взаємодії з контрольованим виробом пружних коливань і хвиль широкого діапазону частот [110,190]. Наприклад, для неруйнівного контролю багатошарових конструкцій ці методи використовуються найбільш широко. Основними з них є низькочастотні методи, ультразвуковий метод проходження і, в меншій мірі, ревербераційний і акустико-топографічний, хоча можливості їх розкриті далеко не повністю. Очевидно, основна проблема полягає в методології і застосовується математичному апараті для обробки даних акустичних сигналів.

Серед методів акустичного контролю виділяють: активні - використовують випромінювання і прийом акустичних сигналів, і пасивні - засновані тільки на прийомі акустичних сигналів.

До активних методів акустичного контролю відносяться:

- Метод проходження пружних хвиль (тіньової);
- Тимчасової тіньової метод;
- Дзеркально-тіньовий метод;
- Луна-метод;
- Луна-дзеркальний метод;
- Луна-наскрізний метод;
- Ультразвуковий луна-метод;
- Дельта-метод;
- Ревербераційний метод;
- Локальний метод вільних коливань;
- Інтегральний метод вільних коливань;
- Локальний резонансний метод;
- Інтегральний резонансний метод;
- Акустико-топографічний метод.
- Імпедансний метод;
- Велосіметрічний метод.

Метод проходження пружних хвиль (тіньової) застосовують для НК клейових вузлів [29,37,100,188,190] і виробів з композиційних матеріалів [10,13,19,220]. Він дозволяє виявляти зони з під'єднанням, порожнечі, пористість, розшарування і інші подібні дефекти. Для контролю зазвичай використовують механізовані установки із записом результатів. У розглянутих у наведеній літературі випадках використовується амплітудний

варіант методу проходження. Тимчасової його варіант, в якому ознакою дефекту служить зміна часу проходження акустичного імпульсу, використовують в основному для контролю будівельних матеріалів - вогнеупорних цеглин, бетону і т.п. [197]. Загальний недолік тіньового методу, який істотно обмежує область його застосування - необхідність двостороннього доступу до контрольованого виробу. Метод заснований на ослабленні проходять ультразвукових хвиль при наявності всередині деталі дефектів, що створюють ультразвукову тінь. При тіньовому методі використовуються два перетворювача. Один з них випромінює УЗК, а інший приймає їх. Зменшення інтенсивності коливань залежить від величини дефекту. Чим більше дефект, тим більше послаблюється звуковий потік. Тіньовий метод є малочутливим. Дефект можна виявити, якщо зміна сигналу, що викликається, становить 15-20%. Більш дрібні дефекти не виявляються. Істотний недолік тіньового методу - неможливість визначити глибину залягання дефекту. Крім того, при контролі важко визначити зміни сигналу за рахунок дефекту від зміни сигналу за рахунок зміни товщини деталі. Так як тіньовий метод не залежить від роздільної здатності випромінювача, він знайшов широке застосування при дефектоскопії тонких деталей (сталевих листів, автомобільних покришок і ін.).

Тимчасової тіньовий метод заснований на вимірюванні тимчасового запізнювання УЗ імпульсу при обгинанні дефекту. Має ті ж переваги і недоліки що і тіньовий метод.

Дзеркально-тіньовий метод заснований на тому, що вимірюється амплітуда ультразвукових коливань, відбитих від протилежної поверхні виробу (донний імпульс), тобто двічі пройшли через виріб. Величина ослаблення сигналу залежить від розмірів дефекту.

Ехо-метод в своєму основному варіанті застосовують, наприклад, для виявлення дефектів в товстих (більше 10 мм) виробих із пластмас [61] і композиційних матеріалів [86, 188]. Зважаючи на значний загасання пружних хвиль в цих матеріалах для контролю використовують відносно низькі частоти (0,14 МГц). В роботі [42] описано застосування луна-методу для виявлення дефектів клейових з'єднань труб з полівінілхлориду. Зважаючи на близькість характеристичних імпедансов цього пластика і клею відображення від клейового шва в зоні доброякісного склеювання невелика і завдання зводиться до виміру загальної товщини матеріалу в зоні контролю. Ехо-метод має низку переваг перед тіньовим. Він дозволяє використовувати вироби при односторонньому доступі до них. Це особливо цінно при перевірці виробів, в яких відсутня двосторонній доступ. Крім того, чутливість луна-методу значно вище тіньового. При тіньовому методі

ослаблення УЗК на 5% важко зареєструвати, а при ехо-метод відображення навіть 1% енергії дуже добре не лише виявляється, але і вимірюється. Крім того, луна-метод дозволяє визначити, на якій глибині знаходиться дефект. Якщо часова відстань між зондируючим і відбитим від протилежної поверхні деталі (донний імпульс) прийняти за розмір деталі, то час між посланим імпульсом і моментом приходу відбитого від дефекту імпульсу дає глибину залягання дефекту. Крім того, за амплітудою відбитого сигналу можна судити про розміри дефекту, а вивчаючи спектральний склад відбитого імпульсу, можна отримати інформацію про тип і формі дефекту. Головний недолік луна-методу - наявність мертвої зони під датчиком, що не дає можливості застосовувати його для тонких виробів. Наявність мертвої зони пов'язано з тим, що при близько розташованому дефекті в момент приходу луна-сигналу від нього ще триває випромінювання зондуючого імпульсу. Для зменшення мертвої зони підвищують частоту УЗК, що дозволяє зменшити тривалість зондуючого імпульсу. Тривалість імпульсу визначає і роздільну здатність методу, тобто мінімальна відстань між дефектами по глибині, при якому їх луна-сигнали сприймаються окремо. Роздільна здатність луна-методу по глибині дорівнює тривалості зондуючого імпульсу. Підвищення частоти з метою збільшення дозволу обмежено зверху тим, що короткі хвилі починають відбиватися від кордонів кристалічних зерен металу, що викликає появу перешкод. Крім того, зі збільшенням частоти зростає загасання УЗК.

Ехо-дзеркальний метод, будучи різновидом луна-методу, використовується для виявлення дефектів, орієнтованих вертикально до поверхні виробу. Звичайним луна-методом такий дефект не виявляється через дуже малу площу його перерізу в площині поверхні. Для виявлення таких дефектів похилі шукачі А і В розташовуються на деякій відстані L з одного боку виробу, або другий теж похилих шукач З розташовується з протилежного боку. Відстань L визначається товщиною виробу і кутом введення УЗК в виріб. Оскільки площа дефекту в перерізі, перпендикулярному вводиться похилому променю значно перевищує площу нормального до поверхні перетину дефекту, то підвищується ймовірність виявлення і чутливість контролю.

Ехо-наскрізний метод полягає в тому, що в цьому методі фіксується наскрізний сигнал I і сигнал II, що випробував дворазове відображення. При появі дефекту ці сигнали зменшуються як в тіньовому та дзеркально-тіньовому методах. Крім того, з'являються луна-сигнали III і IV, відповідні відображенням дефектів променів I і II. У порівнянні з тіньовим методом луна-наскрізний метод має підвищену чутливість. Перевагою в порівнянні зі

звичайним луна-методом є зменшення розмірів мертвої зони через збільшення шляху відбитого сигналу. Недолік - складність точної оцінки місця розташування дефекту і його розмірів.

Ультразвуковий ехо-метод, успішно розвинений в роботі [36], був розроблений і випробуваний як неруйнівний метод оцінки міцності клейових з'єднань в будівельних конструкціях, заснований на кореляційному зв'язку міцності з'єднання з характеристичним імпедансом клею. Останній оцінюється за величиною коефіцієнта відображення ультразвукових імпульсів на кордоні розділу обшивка - клей або (рідше) клей - внутрішній елемент конструкції. У 95% випадків похибка не перевищує 0.4-0,2 номінальної когезійної міцності з'єднання. Розвитком цього напрямку є роботи [5, 11, 34, 35, 36], в яких крім оцінки характеристичного імпедансу клею враховуються його коефіцієнт загасання і товщина клейового шва. У роботах [5, 34] для оцінки міцності склеювання конструкції з двох металевих листів в неї за допомогою ширококутового перетворювача вводили короткі акустичні імпульси з несучої частотою 15 МГц. Ехо-сигнали від кордонів клейового шва спостерігали на осциллографі і досліджували за допомогою спектроаналізатора. Високоякісний генератор виробляє короткочасні імпульси (або з високочастотним заповненням - радіоімпульси, або просто короткі імпульси). Посланий випромінювачем імпульс, відбившись, повертається назад до перетворювача, який працює в цей час на прийом.

Дельта-метод є різновидом дзеркального методу і відрізняється механізмом відображення хвилі від дефекту і способом прийняття сигналу - використовує розсіювання ультразвукових коливань на дефектах контрольованого об'єкта. У діагностиці використовується для пошуку специфічно розташованих дефектів. Даний метод дуже чутливий до вертикально-орієнтованим тріщинах, які не завжди вдається виявити звичайним луна-методом.

Ревербераційний метод (метод багаторазових відображень) представляють собою варіант ехо-методу. Він використовує вплив дефекту на затухання багаторазово відбитих пружних імпульсів в шарах контрольованого виробу [188, 190,18] і застосовується в імерсійному і контактному варіантах. Контроль ведеться з боку шару з меншим загасанням (металу), іноді з боку пластику. При контролі із сторони металу доцільно використовувати безконтактні акустичні перетворювачі [188,231]. Загальний недолік ревербераційного методу - вузька область застосування (вироби з металевими шарами), труднощі виявлення дефектів з'єднання на кордоні клею з внутрішнім елементом конструкції в разі малого характеристичного імпедансу матеріала діагностується елемента. Для контролю шаруватих

конструкцій, наприклад, метал-пластик, цей метод використовується наступним чином. Коли перетворювач розташований в точці з щільним контактом між шарами, то ультразвукові коливання проходять з металу в пластик і там гасяться. В результаті втрати енергії ультразвукові коливання виявляються досить великими, що призводить до швидкого гасіння реверберації. А області нещільного контакту між шарами велика частина енергії ультразвукових хвиль відбивається назад в метал. Оскільки поглинання енергії УЗК в металі мало, то ультразвукові коливання будуть затухати досить повільно, тобто тривалість реверберації буде збільшуватися.

Локальний метод вільних коливань полягає в тому, щов частини контрольованого виробу збуджують коливання за допомогою ударів молоточка вібратора і аналізують спектр порушуваних частот. У дефектних виробках, як правило, спектр зміщується в високочастотну сторону. До цієї ж групи належить спосіб, який отримав скорочену назву «Предеф». Сутність його полягає в порушенні через шар рідини вимушених коливань в стінці виробу з частотою, близькою до резонансної. Після закінчення збудження стінка продовжує колитися в вільному режимі. За частотою цих вільних коливань з дуже високою точністю вимірюють товщину стінки.

Інтегральний метод вільних коливань, при якому ударом збуджуються вільні коливання в усьому виробі або значною нею частини, використовується, наприклад, при перевірці бандажів залізничних коліс або скляного посуду по частоті дзвону. Застосовується він також в медицині для визначення стану внутрішніх органів (простукування).

Локальний резонансний метод заснований на використанні діапазону частот генератора що хитається частоти як варіанти збудження власних частот виробу в широкому діапазоні. У стінці виробу за допомогою перетворювача збуджують ультразвукові хвилі. Частоту коливань модулюють і фіксують частоти, на яких виникають резонанси, відповідні цілому числу півхвиль в стінці виробу. За резонансним частотам вимірюють товщину стінки. Дефекти фіксують по різкої зміни товщини або пропажі резонансів. Метод найчастіше застосовується в товщиномерів при односторонньому доступі (обшивка кораблів, котлів, труб і т.д.). Порівняно недавно резонансний метод став застосовуватися для перевірки якості будівельних матеріалів (цегли, бетону, лісу і т.д.).

Інтегральний резонансний метод застосовують для визначення модулів пружності матеріалу по резонансних частотах поздовжніх, згинальних або крутильних коливань зразків простої геометричної форми. Метод застосовують для контролю невеликих виробів: абразивних кіл, турбінних

лопаток і т.д. Поява дефектів або зміна властивостей матеріалів визначають за відхиленнями резонансних частот.

Акустико-топографічний метод відноситься до методів вимушених коливань. У цьому методі розподіл амплітуд пружних коливань на поверхні контрольованого об'єкта реєструють за допомогою порошку, що наноситься на поверхню. Дефектну ділянку відрізняють збільшенням амплітуди коливань в результаті резонансних явищ, внаслідок чого осідання порошку на ньому менше. Також, в акустико-топографічному методі використовують збудження в контрольованому виробі потужних коливань хитається частоти [190]. Метод застосовують для контролю конструкцій з високою добротністю (майнові металевих). Переваги акустико-топографічного методу - відсутність необхідності в механічному скануванні, недоліки - низька ефективність контролю конструкцій з пластиків, важка і громіздка апаратура. Міцність з'єднання визначається його фізико-механічними властивостями, характером навантаження і іншими факторами.

Імпедансний метод відноситься до низькочастотних акустичних методів і заснований на використанні залежності повного механічного імпедансу (опору) контрольованого виробу від якості з'єднання його елементів між собою. Зміна вхідного імпедансу виробу може бути виявлено по зміні амплітуди або фази сили реакції, що надається на датчик або по зміні частоти датчика. Найчастіше використовується для контролю клейових, паяних, клепаних з'єднань. У приладах імпедансного типу датчик являє собою стрижень, на різних кінцях якого розташовані випромінювач і приймач. Випромінювач збуджує в стрижні коливання, а приймач фіксує їх. Такий датчик наводиться в акустичний контакт з виробом, в результаті якого змінюється або частота коливань стержня, або амплітуда і фаза сигналів з приймача. При використанні стоячих хвиль порушуються вільні або вимушені коливання якого об'єкта контролю в цілому (інтегральні методи), або його частини (локальні методи). Вільні коливання найчастіше порушуються шляхом механічного удару, а вимушені - шляхом впливу гармонійної сили зі змінною частотою. Стан об'єкта аналізується по частоті вільних коливань. Іноді використовують амплітуду коливань [148].

Велосіметрічеській метод, як і імпедансної, використовує пружні коливання звукових частот і заснований на зміні швидкості пружних хвиль при наявності дефекту. Наприклад, якщо в тонкому виробі поширюється изгибная хвиля, то поява розшарування викличе зменшення її швидкості, яка зазвичай вимірюється щодо зрушення фази минулої хвилі. У методах відображення використовують як один, так і два перетворювача; застосовується як правило імпульсне випромінювання. Ультразвукові

коливання з допомогою похилого випромінювача вводяться в виріб і поширюються в ньому вздовж виробу. Перший датчик сканує поверхню виробу. У місці розташування дефекту УЗК будуть відображатися в різних напрямках. Частина з них відбитися в напрямку до поверхні і буде зареєстрована другим датчиком. Цей метод дозволяє отримати візуальне розподіл дефектів в плані.

До пасивних методів акустичного контролю відносяться:

- Вібраційно-діагностичний;
- Шумо-діагностичний;
- Акустико-емісійний метод;
- Метод інтерференційних і поверхневих хвиль.

Вібраційно-діагностичний метод полягає в тому, що аналізуються параметри вібрації якої-небудь деталі або вузла, що знаходиться в робочому режимі за допомогою приймачів контактного типу.

Шумо-діагностичний метод передбачає вивчення спектру шумів працюючого виробу за допомогою мікрофонних приймачів. І щодо змін в спектрі шумів цілого виробу судять про якість складових його елементів. За частотному ознакою всі розглянуті методи можна розділити на низькочастотні (до 20 КГц) і високочастотні або ультразвукові (понад 20 КГц).

Акустико-емісійний метод заснований на реєстрації пружних хвиль, що виникають в процесі перебудови внутрішньої структури твердих тіл. Акустична емісія з'являється при пластичної деформації, при виникненні і розвитку дефектів, наприклад при утворенні тріщин, при фазових перетвореннях, пов'язаних зі зміною кристалічної решітки, при різанні металів. Фізичним механізмом акустичної емісії є рух в речовині дислокацій і їх скупчень. Нерівномірність, уривчастість дислокаційних процесів, пов'язаних з відривом дислокацій від точок закріплення, гальмуванням їх у перешкод, виникненням і знищенням окремих дислокацій, є причиною, яка зумовлює вивчення хвиль напруги. Тому акустична емісія має вибуховий характер, являє собою потік імпульсів; тривалість імпульсу може становити 10^{-8} до 10^{-4} с, енергія окремого імпульсу від 10^{-9} до 10^{-5} Дж. Це відповідає коливанням поверхні зразка в межах 10^{-11} - 10^{-4} мм. Іноді ці сигнали досить сильні і можуть сприйматися на слух (наприклад -2 - «крик олова» при його деформації). Сигнали акустичної емісії, поширюючись до поверхні зразка, зазнають суттєвих змін внаслідок дисперсії швидкості звуку, трансформації типів хвиль при відображенні, переломленні, загасання і т.д. Якщо інтервал між окремими актами випромінювання менше часу загасання акустичної емісії має характер безперервного випромінювання, як правило

нестационарного. Така акустична емісія називається безперервної або суцільний. Якщо час загасання сигналу і час перехідних процесів в зразку менше проміжку часу між випромінюваними імпульсами, акустична емісія сприймається у вигляді послідовності імпульсів і називається дискретною або імпульсною. Дискретна акустична емісія має місце при утворенні тріщин. Безперервна - процесі різання металу. Частотний спектр сигналів акустичної емісії широкий від чутних частот до десятків і сотень МГц. Сигнали акустичної емісії приймають на поверхні зразка за допомогою контактних датчиків або безконтактними оптичними віброметр. більшості методів до зразка прикладають механічне напруження. Сигнали акустичної емісії реєструються в процесі зростання або зменшення прикладеного до зразка зовнішнього механічного напруги. При цьому концентрації напружень поблизу дефектів викликають локальне пластичне деформування і поява симптомів акустичної емісії. Обсяг області пластичної деформації залежить від розмірів дефекту і величини прикладеної напруги.

Основними параметрами сигналів акустичної емісії є:

- Загальне число імпульсів дискретної акустичної емісії за досліджуваний проміжок часу;
- Число перевищень сигналом акустичної емісії встановленого рівня за винятком проміжку часу;
- Інтенсивність акустичної емісії або число перевищень сигналом акустичної емісії встановленого рівня за одиницю часу;
- Амплітуда акустичної емісії або максимальне значення сигналу акустичної емісії протягом заданого проміжку часу;
- Рівень сигналів акустичної емісії або середнє квадратичне сигналу за розглянутий проміжок часу.

Методи акустичної емісії використовуються для раннього розпізнавання тріщин при випробуваннях матеріалів на міцність, для виявлення дефектів в стадії їх зародження, для локації дефектів і вивчення кінетики розвитку тріщин в зварних швах і др. Прі повторному напрузі емісія не виникає аж до досягнення максимальної напруги попереднього циклу.

Метод інтерференційних і поверхневих хвиль застосовується для шаруватих матеріалів і заснований на зв'язку амплітуд поверхневої ультразвукової хвилі, і пройшла з одного контрольованого шару в інший через контактну зону. Зниження міцності контакту в результаті втомного руйнування відзначається по зменшенню амплітуди прийнятої хвилі [30, 33, 125].

ВИСНОВКИ

Представлений в монографії матеріал відображає, по своїй структурі, зміст лісціпліни «Діагностика технологіческіз процесів і систем» і, поряд з довідковою інформацією, представлені результати досліджень авторів монографії, виконані або ними особисто або при їхній особистій участі. Особливу увагу приділено методології застосування засобів штучного інтелекту в дослідницькій роботі, а саме в інтелектуальному управлінні технологічними процесами і системами. Представлені результати дають можливість планувати нові напрямки досліджень і вести проектування нових технологічних процесів і систем, що володіють новими властивостями. Зокрема, показано, що акустична діагностика в поєднанні із засобами штучного інтелекту, є більш ємним поняттям, ніж простий акустичний контроль. Поряд з функціями акустичного контролю, акустична діагностика дозволяє, зокрема, визначати такі інтегральні оцінки, як ідентичність властивостей виробів, що мають особливе значення для технологічних інструментів, об'єктів, регламентованих по довговічності. У поєднанні з математичним апаратом нейронних мереж акустична діагностика набуває ряд нових властивостей. Перш за все, це можливість використовувати все різноманіття порушених акустичними коливаннями відображених усіма поверхнями деталей машин сигналів у вигляді їх акустичного спектру. Подальша обробка цього спектра дозволяє виявити безліч індивідуальних властивостей об'єкта акустичної діагностики. Ще одним комплексом експериментів підтверджується раніше висунута нами гіпотеза, яку можна сформулювати так: чим складніше вплив на досліджуваний об'єкт, тим більше його індивідуальних властивостей і характеристик несе відгук об'єкта на цей складний кризовий вплив. Це твердження стосується не тільки акустичних сигналів, але і багатьох інших, які фіксуються як відгук на складний вплив. Резонансні коливання, які породжують пакети гармонік при багаторазовому відбитті в деталях машин є досить хорошим аналогом таких складних впливів на об'єкт діагностики. Представляє теоретичний і практичний інтерес роботи авторів в Проблемною лабораторії мобільних інтелектуальних технологічних машин. У подальших публікаціях авторів будуть представлені нові розробки лабораторії стосовно прикладів практичного їх використання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Alers O. Ultrasonic Techniques for Measuring the Strength of Adhesive Bonds / Alers O., Flynn R., Bukkly M. // *Materials Evaluation*. – 1977. – V. 35, N 4. – P. 77–84.
2. Beaman, J. J. Solid Freeform Fabrication: / J. J Beaman,-An Historical Perspective. The University of Texas. Austin,-Texas.-2007.-30-35p.
3. Beyer E. New Industrial Systems & Concepts for Highest Laser Cladding Efficiency. Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik. MAY 6, 2011.-№25.-27p.
4. Cambol, J. 3 -D Printing Manufacturing Process is Here// Independent global forum for the Unmanned Aircraft Systems community,-UAS Vision №3.-1997.-18-22p.
5. Cielo P. Thermographic Nondestructive Evaluation of Industrial Material and Structures / Cielo P., Maldague X., Diom A.// *Materials Evaluation*. – 1987. – V. 45, N 4. – P. 452–460.
6. Collins R. M. NDT Chronology of Advanced Composites of Grumman Aerospace / Collins R. M. // *Materials Evaluation*. – 1981. – V. 29, N 12. – P. 1126–1129.
7. Couchman I.C. Adhesive Bond Strength Classifier / Couchman I. C., Yee B. G. W., Chang R. H. // *Materials Evaluation*. 1979. – V. 37, N 5. – P. 48–50.
8. Curtis G. J. Acoustic Emission Energy Relates to Bond Strength / Curtis G. J. // *Nondestructive Testing*. – 1975. – V. 8, N 5. – P. 249–257.
9. Daniel L. M. Fatigue Damage Monitoring in Composites by Ultrasonic Mapping / Daniel L. M., Schramm S. W., Leber T. // *Materials Evaluation*. – 1981. – V. 39, N 9. – P. 834–839.
10. David, L. A Brief History of Additive / L .David Bourella, J. Joseph Beaman, Jr.a, Ming C. Leub and W. David Rosenc.-Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead. RapidTech.-2009.-328p.
11. Dukes W. A. Nondestructive Testing of Bonded Joints. An Adhesive Science Viewpoint / Dukes W. A., Kinloch A. J. // *Nondestructive Testing*. – 1974. – V. 7, N 6. – P. 324–326.
12. Dutta B. et. al. Additive Manufacturing by Direct Metal Deposition *ADVANCED MATERIALS & PROCESSES* • MAY.-2011.-33-36 p.
13. Fngelo, H. C. Powder Metalurge: Science, technology and application. H. C. Fngelo, R. Subramanian– New Dehli,-2009.-128p.
14. Hagmaier D. J. Bonded Joints and Nondestructive Testing. Bonded Honeycomb Structures. I / Hagmaier D. J. // *Nondestructive Testing*. – 1971. – V. 4, N 6. – P. 401–406.
15. Hagmaier D. NDT of DC-10 Graphite-Epoxy Rudder / Hagmaier D. // *Materials Evaluation*. – 1978. – V. 36, N 6. – P. 57–61.
16. Hill R. The Use of Acoustic Emission for Characterising Adhesive Joint Failure / Hill R. // *NDT International*. – 1977. – V. 10, N 2. – P. 62–72.
17. Hohmann, M. Production methods and applications for high-quality metal powders and sprayformed products. / M. Hohmann, G. Brooks, C. Spiegelhauer Produktionsmethoden und Anwendungen für qualitativ hochwertige Metallpulver und spruhkompaktierte Halbzeuge. *Stahl und Eisen*. – 2005.-258p.
18. Holownia B. P. NDT of Adhesive Joints Affected by Water Ingression / Holownia B. P. // *Int. J. Adhesion and Adhesives*. – 1987. – N 1. – P. 25–29.

19. <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/2450>.

20. Jackson G. The Nondestructive Testing of Adhesive Bonded Structural Assemblies for Aircraft / Jackson G. // *The British Journal of NDT*. – 1972. – V. 14, N 5. – P. 145–146.

21. Kline R. A. Ultrasonic Guided-Wave Monitoring of Fatigue Damage Development in Bonded Joints / Kline R. A., Hashemi D. // *Materials Evaluation*. – 1967. – V. 45, N 4. – P. 1076–1082.

22. Pat. US 6,680,456 B2 ION FUSION FORMATION / Robbie Adams.-Jan. 20, 2004.

23. Pat. US № 5707419 Method of production of metal and ceramic powders by plasma atomization / Tsantrizos P. G. et. al.,-1998.

24. Pilarski A. Ultrasonic Evaluation of the Adhesion Degree in Laminated Joints / Pilarski A. // *Materials Evaluation*. – 1985. – V. 43, N 6. – P. 765–770.

25. Principles of Application of Ultrasonic Spectroscopy In NDE of Adhesive Bonds / F. H. Chang, P. L. Flynn, D. E. Cordon, J. R. Bell // *IEEE Transactions*. – 1976. – V. SU-23, N. 5. – P. 334–338.

26. Rose J. Feasibility Study on the Nondestructive Evaluation of an Adhesively Bonded Metal to Metal Bond: an Ultrasonic Pulse Echo Approach / Rose J., Avioli Jr. M. J., Bilgram R. A. // *The British Journal of NDT*. – 1983. – V. 25, N 2. – P. 67–71.

27. Roze J. The Fisher Linear Discriminant Function for Adhesive Bond Strength Prediction / Roze J., Thomas G. // *The British Journal of NDT*. – 1979. – V. 21, N 3. – P. 135–139.

28. Schliekelmann R. Nondestructive Testing of Bonded Joints. Recent Developments in Testing Systems / Schliekelmann R. // *Nondestructive Testing*. – 1975. – V. 8, N 2. – P. 100–103.

29. Scott L. A Review of Nondestructive Testing of Composite Materials / Scott L., Scala C. M. // *NDT International*. – 1982. – N 2. – P. 75–86.

30. Techel, A. et al. Laser Additive Manufacturing of Turbine Components // Precisely and Repeatable. Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology (IWS):- 1998.-50-55p.

31. Tyurin Yu. N. Electric heating using a liquid electrode / Y. N. Tyurin, A. D. Pogrebnjak // *Surface and Coatings Technology* 142–144 (2001). – P. 293–299.

32. Vibration Sound Processing in an Elastic Environment and a Device for its Implementation / S. Kovalevskyy, S. Matvienko, I. Starodubcev, O. Lukichov // 13th International conference "Research and Development in Mechanical Industry". – RaDMI 2013, 12–15 September. – Kopaonik, Serbia, 2013. – P. 205–211.

33. Wahrmann H. Zerstorungsfreie Prufung von geklebten PVCU hart-Rohr-Verbindungen / Wahrmann H. // *Das Echo*. – 1981. – N 30. – S. 12–13.

34. www.pramet.com

35. Yang Y.-S. Effect of transformation plasticity on residual stress fields in laser surface hardening treatment / Y.-S. Yang, S.-J. Na // *J. Heat Treating*, 1991. – V. 9. – P. 49–56.

36. Yasa, E. Application of laser re-melting on Selective laser melting parts. Catholic University of Leuven, Dept. of Mech. Eng, Heverlee, Belgium. *Advances in Production Engineering* / E. Yasa, J. Kruth *Management* 6.-2011.- 259-270 p.

37. Yasa, E. et. al. The investigation of the influence of laser re-melting on density,

surface quality and microstructure of selective laser melting parts // *Rapid Prototyping Journal*. – 2011. – Vol. 17. – Iss: 5. – 312-327 P.

38. Агрегатно-модульне технологічне обладнання: навч. посібник для ВНЗ. У 3-х част. / Під ред. Ю.М. Кузнєцова. — Кіровоград, 2003. — С. 56–77.

39. Афанасьєва, О.В. Деякі властивості руху багатомасових систем: Праці 7-ї міжнародній конференції KDS - 98, Польща: Щецін. Т.1, 1998. - с. 165 - 174.

40. Бикова В.Г. Оцінка та планування фінансово-економічного потенціалу підприємств загальнодержавного значення: дис... канд. екон. наук: 08.04.01 / В.Г. Бикова. — К., 2006. — 220 с.

41. Бугір М.К. Посібник з теорії ймовірностей та математичної статистики. — Тернопіль: Підручники і посібники, 1998. — 176 с.

42. Буханець В.В. Економічний механізм формування технічного потенціалу залізородних підприємств: автореф. дис. ... канд. екон. наук: 08.06.01 / В.В. Буханець. — Кривий Ріг, 2005. — 18 с.

43. Воронін, В.В. Діагностичні моделі технічних об'єктів / В. В. Воронін // Системи та процеси .- 2002 .- № 1 .- с. 20-30

44. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення [Текст] : Затв.: Наказ Держстандарту України № 333 від 28.12.1994 р. — К.: Держстандарт України, 1995. - 91 с.

45. ДСТУ 2861-94 Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення [Текст] : Затв.: Наказ Держстандарту України № 310 від 08.12.1994 р. — К.: Держстандарт України, 1995. - 33 с.

46. Жалдак М.І., Кузьміна Н.М., Берлінська С.Ю. Теорія ймовірностей і математична статистика з елементами інформаційної технології. — К.: Вища школа, 1995. — 351 с.

47. Железняк В.В. Структурна характеристика економічного потенціалу підприємства / В.В. Железняк // Схід, серія: "Економіка, історія, філософія". — 2010. — №5 (105). — С. 22—26.

48. інтернет ресурс: www.ewi.org/additive-manufacturing-consortium/

49. інтернет ресурс: www.makrum.fi/blog/matsuura-uudistanut-mam72-35v-pustykaraisentyostokeskuksen/

50. інтернет ресурс: www.raymor.com.

51. Лукінюк М.В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації / М. В. Лукінюк. — Київ : НТУУ «КПІ», 2008. — 236 с.

52. Патент 78854 Україна МПК (2006), G01N 29/04 (2006.01). Спосіб визначення залишкового ресурсу шліфувальних кругів / С. В. Ковалевський, О. В. Бугайова, Л. П. Колот ; власник Донбас. держ. машинобуд. акад. — № u201207178 ; заявл. 13.06.2012 ; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 7/2013. — 3 с.

53. Патент 80043 Україна МПК (2006), B23C 3/00 (2013.01). Спосіб комплектації ріжучих пластин при селективному складанні фрез / С. В. Ковалевський, Л. О. Тютюнник, Л. П. Колот ; власник Донбас. держ. машинобуд. акад. — № u201213568 ; заявл. 27.11.2012 ; опубл. 13.05.2013, Бюл. № 9/2013. — 4 с.

54. Патент 88572 Україна МПК (2014.01), В23Q 15/00, В23Q 17/00. Спосіб діагностики якості технологічної системи / С. В. Ковалевський, К. В. Носков, І. М. Стародубцев ; власник Донбас. держ. машинобуд. акад. – № u201310795 ; заявл. 09.09.2013 ; опубл. 25.03.2014, Бюл. № 6. – 4 с.

55. Руденко О. Г., Бодянський Є. В. Штучні нейронні сеті: Навчальний посібник. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404 с.

56. Самойленко М.І., Кузнецов А.І., Костенко О.Б. Теорія ймовірностей. – Харків: ХНАМГ, 2008. – 194 с.

57. Семенова, І. І. Спосіб формування моделей складних технічних систем // Нове в науці і техніці .- 2009 .- № 2 .- с. 18-24.

Наукове видання

КОВАЛЕВСЬКИЙ Сергій Вадимович,
КОВАЛЕВСЬКА Олена Сергіївна,
КОРЖОВ Євген Олександрович,
КОШЕВОЙ Андрій Олегович

**Діагностика технологічних систем
і виробів машинобудування**
(з використанням нейросітьового підходу)

Монографія

За авторським редагуванням

1/2016. Формат 60 × 84/16. Ум. друк. арк. 10,64.
Обл.-вид. арк. 10,35. Тираж 300 пр. Зам. № 21.

Видавець і виготівник
Донбаська державна машинобудівна академія
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК №1633 від 24.12.2003