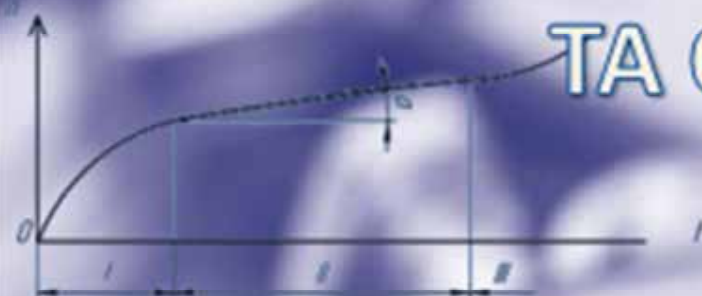
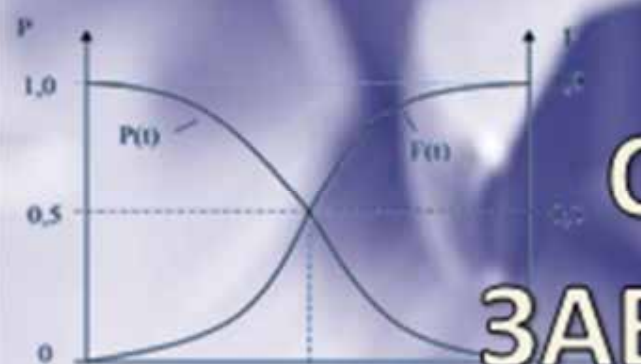




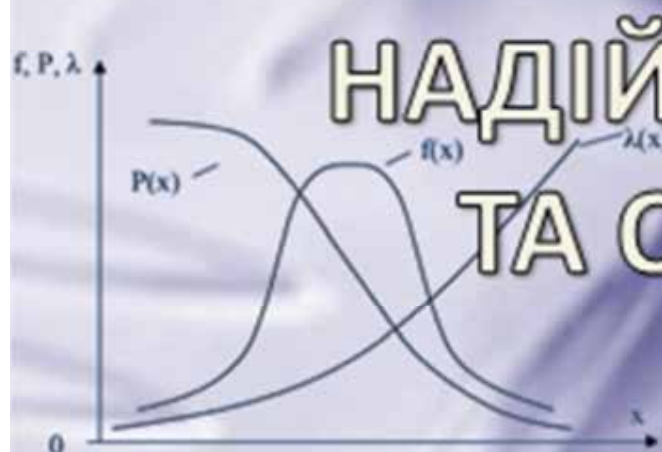
# НАДІЙНІСТЬ МАШИН ТА ОБЛАДНАННЯ



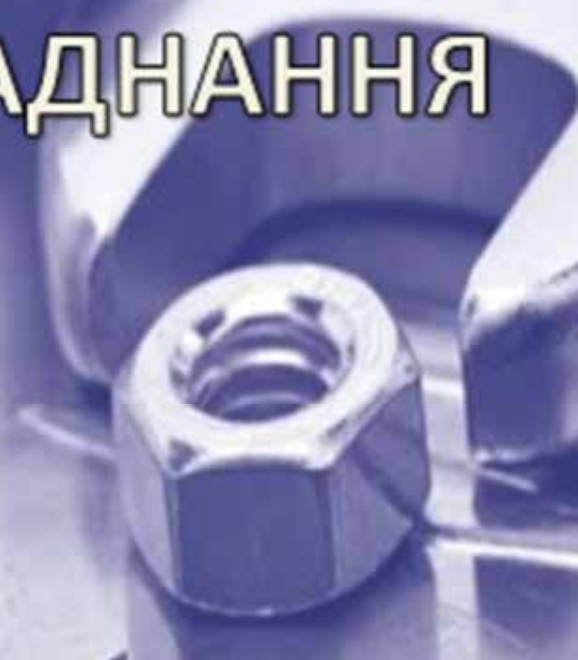
Частина 1



# ОЦІНКА ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ



# НАДІЙНОСТІ МАШИН ТА ОБЛАДНАННЯ





**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

**Новицький А. В., Ружи́ло З. В.,  
Банний О. О., Бистрий О. М., Сиволапов В. А.**

**НАДІЙНІСТЬ МАШИН ТА ОБЛАДНАННЯ**

**Частина 1.**

**ОЦІНКА ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ  
МАШИН ТА ОБЛАДНАННЯ  
НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК**

**Київ  
2023**

УДК 62-192:62-2:629.083(072)

Авторський знак Н 17

*Рекомендовано до видання рішенням вченої ради Національного університету біоресурсів і природокористування України (Протокол № 5 від 22 листопада 2023 року)*

**Рецензенти:**

- Борак К. В.** – доктор технічних наук, доцент, заступник директора Житомирського агротехнічного фахового коледжу;
- Барановський В. М.** – доктор технічних наук, професор кафедри технології і обладнання зварювального виробництва Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя;
- Несвідомін В. М.** – доктор технічних наук, професор кафедри нарисної геометрії, комп'ютерної графіки та дизайну НУБіП України.

ISBN 978-617-8102-68-5

Новицький А.В., Ружило З.В., Банний О.О., Бистрий О.М., Сиволапов В.А. **Надійність машин та обладнання. Частина 1. Оцінка та забезпечення надійності машин та обладнання.** К.: НУБіПУ, 2023. 209 с.

Рекомендовано до видання Вченою радою НУБіП України, протокол №5 від «22» листопада 2023 року.

В навчальному посібнику представлено основні поняття та показники теорії надійності машин та обладнання сільськогосподарського виробництва. Проаналізовані основні види пошкоджень деталей машин. Викладено математичні основи теорії надійності та основи розрахунку одиничних та комплексних показників надійності. Наведено основи випробування машин на надійність, представлено заходи, що направлені на підвищення надійності сільськогосподарської техніки.

Навчальний посібник призначений для студентів денної, заочної та дистанційної форм навчання спеціальностей 133-«Галузеве машинобудування». Матеріали базуються на узагальненні досліджень, літературних джерел та оригінальних робіт авторів.

Навчальний посібник призначений для студентів освітнього ступеню «Магістр», які вивчають дисципліни «Надійність сільськогосподарської техніки», «Надійність обладнання технічного сервісу», «Надійність обладнання лісового комплексу» за спеціальністю «Галузеве машинобудування».

Також може бути корисним для спеціалістів, які займаються оцінкою технічного стану, ремонтом та відновленням деталей для забезпечення працездатності машин та обладнання.

Ілюстрацій, бібліографічних назв 15.

УДК 006.91(072)

ББК 30.10

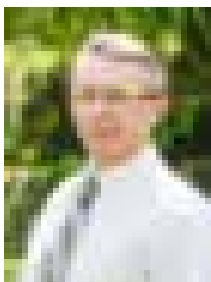
© Новицький А.В., Ружило З.В., Банний О.О.,  
Бистрий О.М., Сиволапов В.А. 2023

© НУБіП України, 2023

ISBN 978-617-8102-68-5

**ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ**

### **Новицький Андрій Валентинович**



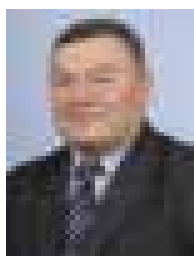
Кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри надійності техніки Національного університету біоресурсів і природокористування України.

Викладає основні навчальні дисципліни: «Надійність сільськогосподарської техніки», «Надійність обладнання лісового комплексу», «Надійність технічних систем», «Проектування підприємств технічного сервісу». Автор 2 монографій, 3 навчальних посібників, понад 50 наукових

статей, 30 друкованих методичних розробок, 25 патентів на винаходи та корисні моделі України.

Електронна адреса: [novytskyi@nubip.edu.ua](mailto:novytskyi@nubip.edu.ua)

### **Ружи́ло Зіно́вій Володи́мирович**



Кандидат технічних наук, доцент кафедри надійності техніки Національного університету біоресурсів і природокористування України. Викладає дисципліни «Ремонт машин та обладнання», «Надійність сільськогосподарської техніки», «Проектування підприємств технічного сервісу». Наукові інтереси пов'язані із забезпеченням надійності сільськогосподарської техніки, відновленням деталей машин.

Автор понад 350 наукових праць, з яких 2 підручники, 4 навчальних посібники, 2 монографії, 37 патентів.

Електронна адреса: [ruzhylo@nubip.edu.ua](mailto:ruzhylo@nubip.edu.ua)

### **Банний Олександр Олександрович**

Кандидат технічних наук, доцент кафедри надійності техніки

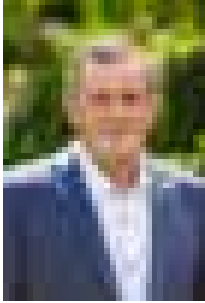


Національного університету біоресурсів і природокористування України. Викладає основні навчальні дисципліни: «Надійність сільськогосподарської техніки», «Проектування підприємств технічного сервісу», «Надійність технічних систем техніки». Автор 3 монографій, понад 40 наукових статей, вітчизняних фахових і зарубіжних виданнях, що входять до

наукометричних баз Scopus та Web of Science, 15 патентів на корисну модель України. Стипендіат Кабінету Міністрів України

Електронна адреса: [alexsandrbannyi@gmail.com](mailto:alexsandrbannyi@gmail.com)

### **Бистрий Олександр Миколайович**



Старший виклада кафедри надійності техніки Національного університету біоресурсів і природокористування України. Викладає основні навчальні дисципліни: «Взаємозамінність, стандартизація і технічні вимірювання», «Надійність сільськогосподарської техніки». Автор понад 60 наукових статей, вітчизняних фахових і зарубіжних виданнях, 10 патентів на корисну модель України.

Електронна адреса: [anbystry@ukr.net](mailto:anbystry@ukr.net)

### **Сиволапов Володимир Анатолійович**



Старший виклада кафедри надійності техніки Національного університету біоресурсів і природокористування України. Викладає основні навчальні дисципліни: «Надійність сільськогосподарської техніки», «Ремонт машин та обладнання», «Надійність технічних систем ». Автор понад 50 наукових статей, вітчизняних фахових і зарубіжних виданнях, 5 патентів на корисну модель України.

Електронна адреса: [0507425963@ukr.net](mailto:0507425963@ukr.net)

## ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ	8
1.1. Поняття про якість продукції. Надійність як складова якість сільськогосподарської техніки	8
1.2. Узагальнені об'єкти дослідження надійності	11
1.3. Історія розвитку науки про надійність техніки	16
1.3.1 З історії забезпечення надійності	16
1.3.2 Вклад представників наукової школи професорів В.С. Крамарова – А.І. Бойка в розвиток теорії забезпечення надійності	19
1.3.3. З історії забезпечення надійності: аналіз виникнення катастроф	24
1.3.4. З історії забезпечення надійності: застосування моделювання	27
1.4. Основні поняття і визначення	31
1.5. Питання для обговорення та самоперевірки	34
РОЗДІЛ 2. ПРОЦЕС ВТРАТИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ	36
2.1. Причини втрати машиною працездатності	36
2.2. Вплив динамічних навантажень на процеси втрати працездатності	42
2.3. Показники технічного стану машин та обладнання	46
2.4. Питання для обговорення та самоперевірки	48
РОЗДІЛ 3. ФІЗИКА ВІДМОВ	50
3.1. Процеси старіння, класифікація та характеристика	50
3.2. Класифікація та характеристики процесів тертя і зношування	53
3.3. Фактори та основні закономірності процесів зношування	69
3.4. Корозія, класифікація, загальна характеристика	78
3.5. Деформація та руйнування	81
3.6. Питання для обговорення та самоперевірки	83
РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНА ТЕОРІЯ НАДІЙНОСТІ	86
4.1 Показники надійності	86

4.2. Закони розподілу випадкових величин	101
4.3. Особливості машин та обладнання з позицій визначення показників надійності	106
4.4. Питання для обговорення та самоперевірки	109
РОЗДІЛ 5. ВИПРОБУВАННЯ МАШИН ТА ОБЛАДНАННЯ НА НАДІЙНІСТЬ	111
5.1. Класифікація випробувань	111
5.2. Планування випробувань	116
5.3. Показники технічного стану, що контролюються в процесі випробувань	120
5.4. Питання для обговорення та самоперевірки	158
Розділ 6. МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ МАШИН ТА ОБЛАДНАННЯ	159
6.1. Загальні питання забезпечення	159
6.2. Забезпечення надійності при розробці машин	161
6.3. Забезпечення надійності при виготовленні машин	165
6.4. Забезпечення надійності при експлуатації і ремонті	168
6.5. Методи підвищення зносостійкості вузлів тертя	174
6.6. Питання для обговорення та самоперевірки	179
Рекомендована література	181
ДОДАТКИ	183

## ВСТУП

Складність ситуації в агропромисловому комплексі України носить характер невідповідності попиту на техніку з можливостями вітчизняного сільськогосподарського машинобудування. Проведений аналіз літературних джерел показує, що основними машинами аграрний сектор забезпечений лише на 45 – 65 %, з яких понад 90 % відпрацювало свій ресурс. Поряд з цим, слід відмітити суттєве зростання придбання техніки імпортного виробництва.

Знижується, відповідно, і рівень їх оновлення, а значна кількість машин перевищила нормативний термін своєї експлуатації.

Все ширше аграрними підприємствами практикується придбання імпортої сільськогосподарської техніки повторного використання, яка потребує проведення діагностування, виконання технічного обслуговування та ремонтування, встановлення її залишкового ресурсу.

Якість технічного сервісу машин в агропромисловому комплексі залишається низьким, порушуються вимоги нормативно технічної документації з їх обслуговування, в першу чергу – терміни сервісного обслуговування. Все це негативно позначається на загальному технічному стані техніки, яка використовується в аграрній сфері.

Перераховані фактори вказують на необхідності підтримки в працездатному стані техніки, яка використовується та організації на належному рівні сервісного обслуговування. Запропонований Вашій увазі навчальний посібник містить загальні відомості, методики розрахунку та довідкові матеріали для оцінки та забезпечення надійності машин та обладнання.

Автори: к.т.н., доц. Новицький А.В. (вступ, розділи 2, 4, літературні джерела; к.т.н., доц. Ружило З.В. (розділ 1), Банний О.О. (розділ 6, зміст), Бистрий О.М. (5 розділ), Сиволапов В. А. (3 розділ).



## **РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ**

### **1.1. Поняття про якість продукції. Надійність як складова якості сільськогосподарської техніки**

Якістю називається сукупність характеристик продукції, які стосуються її здатності задовольняти встановлені і передбачені потреби споживачів. Згідно з ДСТУ ISO 9000:2015, термін «якість», означає ступінь, до якого сукупність власних характеристик об'єкта задовольняє вимоги. Під управлінням якістю розуміють дії, здійснювані при створенні та експлуатації або споживанні продукції, з метою встановлення, забезпечення і підтримки необхідного рівня її якості.

Історичний досвід США, Японії, Німеччини, Південної Кореї та ряду інших країн показує, що забезпечення прогресу в області якості шляхом використання ефективних систем управління, є однією з основних умов зміцнення на світовому ринку. В колишньому СРСР були розроблені ефективні системи управління якістю, які набули поширення у військово-промисловому комплексі, радіоелектроніці та автомобілебудуванні. Серед систем управління якістю продукції зазначеного періоду найбільшу популярність отримали наступні.

Система бездефектного виготовлення продукції (БВП), запропонована в 1955 році, в м. Саратов, на Саратовському авіаційному заводі. Основа системи – суворе виконання технологічних операцій. Система бездефектної праці, яка була задекларована в 1961 році, на підприємствах Львівської області. Основа системи – високий рівень виконання операцій всіма працівниками.

Система якості, надійності, ресурсу з перших виробів («Якість, надійність, ресурс з перших виробів» (КАНАРСПИ)), розглянута в 1968 році, на підприємствах м. Горький та області. Основою системи був високий рівень конструкції та технологічної підготовки виробництва, а показниками управління – рівень надійності першого виробу. Система наукової організація праці («Наукова організація робіт по збільшенню моторесурсу» – (НОРМ)),

запропонована в 1964 році, в м. Ярославль, на Ярославському моторному заводі. Основою системи було – підвищення технічного рівня якості виробів, об'єктом управління – якість деталей і складальних одиниць продукції, показником управління – значення моторесурсу дизельного двигуна внутрішнього згорання. Комплексна система управління якістю продукції була задекларована в 1975 році, в м. Львів. Основа системи – управління якістю на базі стандартизації. Саме Комплексна система управління якістю продукції стала основою для двох наступних систем УЯП, які були запропоновані в Дніпропетровську та Краснодарі у 1980 році. Комплексна система управління якістю та ефективністю виробництва була запропонована в 1980 році, м. Дніпропетровськ. Основною ідеології системи є управління якістю та ефективністю виробництва, метою управління – поліпшення господарської діяльності підприємства, об'єктом управління – рівень якості продукції й ефективність використання ресурсів. Комплексна система підвищення ефективності виробництва також була задекларована в 1980 році, м. Краснодар. Основа системи – управління якістю продукції та ефективністю виробництва, що охоплює весь життєвий цикл продукції. Однак, відсутність конкуренції, що була обумовлена захищеністю внутрішнього ринку, не стимулювала підприємства підвищувати якість продукції. Аналіз показує, що в управлінні якістю продукції застосували наступні методи:

- економічні, що забезпечують створення економічних умов, які спонукають співробітників підприємств покращувати продукцію;
- матеріального стимулювання, які передбачають мотивацію працівників;
- організаційно-розпорядчі, що реалізуються за допомогою обов'язкового виконання наказів, розпоряджень, норм і правил;
- виховні, які передбачають моральне заохочення.

В останні роки сформувалась нова стратегія управлінні якістю, яку характеризують наступні відмінні риси: забезпечення якості не як технічну функцію, а реалізовану певним підрозділом, а як систематичний процес, що охоплює всю організаційну структуру фірми; питання якості охоплюють не

тільки рамки виробничого циклу, але й процес розробки, конструювання, маркетингу, післяпродажного обслуговування; якість повинна бути орієнтована на задоволення потреб споживача, а не виробника; підвищення якості продукції вимагає застосування нової технології виробництва, починаючи з автоматизації проектування і закінчуючи автоматизованим виміром в процесі контролю якості; підвищення якості продукції досягається тільки зацікавленою участю всіх працівників підприємства. Система управління якістю «Загальне керівництво якістю» ("TQM" - Total Quality Management) передбачає наявність трьох умов:

- визначення вищим керівництвом фірм питання якості як основної стратегічної мети діяльності, встановлення конкретних завдань і виділення коштів для їх вирішення;
- розробка заходів щодо підвищення якості усіх підрозділів фірми;
- забезпечення постійного процесу навчання та підвищення мотивації персоналу.

Комплексна система УЯП – це цільова підсистема системи управління підприємством, об'єктом якої є якість продукції машинобудування, а також фактори і умови, що на неї впливають. Слід відмітити, що провідну роль у забезпеченні якості продукції машинобудівних підприємств відіграє обладнання на якому зазначена продукція випускається. Тобто, рівень якості продукції машинобудування об'єднує в собі рівні якості продукції видобувних галузей, впливає на рівень якості продукції переробних галузей, включаючи галузі харчового виробництва. Реалізація методичних основ управління якістю продукції проходила паралельно з передовим світовим досвідом та досвідом вітчизняних машинобудівних і ремонтних підприємств, в окремих випадках випереджаючи його, або ж відстаючи, якщо мати на увазі положення, що реалізовані у стандартах ISO 9000. Представлені системи завоювали міжнародне визнання як засіб забезпечення високої якості продукції машинобудування, що дозволяє скорочувати собівартість виробництва і конкурувати з іншими виробниками.

## **1.2. Узагальнені об'єкти дослідження надійності**

Відповідно до державних стандартів України поняття «надійність» визначається стосовно до технічних об'єктів. Під об'єктом розуміється предмет певного цільового призначення, що розглядається в період проектування, виробництва, експлуатації, досліджень і випробувань на надійність. При вивченні надійності техніки розглядаються різноманітні об'єкти – машини, обладнання, пристосування, апаратуру та інші пристрої. Залежно від поставленого завдання об'єктом може бути окрема деталь, кінематична пара, вузол, агрегат, машина в цілому або система машин, комплекс машин та обладнання. Більшість машин і обладнання сільськогосподарського виробництва є складними системами, що складаються з окремих підсистем, агрегатів, вузлів, деталей і т. і.

Під складною технічною системою слід розуміти об'єкт, призначений для виконання заданих функцій, який може бути представлений у вигляді підсистем та окремих елементів, кожен з яких також виконує певні функції і знаходиться у взаємодії з іншими підсистемами та елементами. Поняття складної технічної системи умовно може застосовуватися до окремих агрегатів, вузлів і механізмів (двигун, коробка передач, система подачі палива до двигуна, шпindelний вузол, станина станку для розбирально-складальних робіт), до машин (деревообробний верстат, навантажувач) і до системи машин (посівний комплекс, слюсарно-механічна дільниця, технологічна лінія відновлення деталі, площадка для зберігання техніки). Велику складністю мають, як правило, автоматизовані системи. Наскільки складна технічна система – настільки зростають вимоги до її функціонування, настільки більшу кількість вихідних параметрів встановлюють нормативи. Слід також враховувати, що складна технічна система працює в широкому діапазоні умов експлуатації та за різних режимів.

Сучасна машина складається з сотень, тисяч і десятків тисяч окремих деталей, кожна деталь має дві і більше технологічних поверхонь і всі вони повинні надійно функціонувати протягом заданого терміну служби, або ж

календарної тривалості часу. Оцінка надійності машин становить серйозну проблему, оскільки складні системи мають специфічні властивості. З позицій надійності складна система може характеризуватися як негативними, так і позитивними властивостями.

До факторів, що негативно впливають на надійність складних систем, можна віднести велику кількість елементів, відмова кожного з яких є причиною відмови всієї системи. Складні технічні системи часто є унікальними або є поширені в великих кількостях. В цьому випадку статистичні дані не можуть забезпечити достовірної оцінки рівня надійності машин з необхідною точністю. При цьому потрібно враховувати, що навіть однакові системи працюють в різних умовах експлуатації, на різних режимах і виконують неоднакові функції, оскільки їх технічні можливості досить широкі. Складні системи машин, навіть однакового конструктивного виконання, розрізняються між собою, маючи індивідуальні характеристики. Незначні зміни властивостей окремих елементів позначаються на вихідних параметрах системи. Чим складніша система, тим більш складними індивідуальними особливостями вона характеризується.

Складні системи мають і такі властивості, які позитивно впливають на їх надійність. Складним системам властиві в тій чи іншій мірі самоорганізація, саморегулювання або самоприспособлення, коли система здатна знайти найбільш стійкий для свого функціонування стан. Для складної системи часто можливе відновлення працездатності по частинах, в постійному режимі її функціонування. Наприклад, в складному технологічному обладнанні допускається тимчасове вимкнення окремих ділянок для їх ремонту та підналагодження. Не всі елементи та підсистеми однаково впливають на надійність складної системи, значна частина з них лише забезпечує ефективність її роботи.

Аналіз надійності складної системи пов'язаний з вивченням її структури. Важливу роль при цьому відіграють виділення елементів даної системи. При аналізі надійності складних систем їх розбивають на елементи з тим, щоб спочатку розглянути їх параметри і характеристики, а потім оцінити

працездатність всієї системи.

Під елементом слід розуміти складову частину складної системи, яка може характеризуватися самостійними вхідними та вихідними параметрами. Теоретично будь-яку машину можна умовно розділити на відповідну кількість елементів, розуміючи під елементом вузол або агрегат, деталь або технологічну поверхню деталі.

Елемент має наступні особливості:

- він виділяється в залежності від поставленого завдання, може бути досить складним і складатися з окремих деталей і вузлів;
- при дослідженні надійності системи елемент не розкладається на складові частини, показники надійності відносяться до елемента в цілому;
- можливе відновлення працездатності елемента незалежно від інших частин і елементів системи.

Розподілення складної системи на окремі елементи умовне. Так, наприклад, при розгляді надійності технологічної лінії ремонту агрегатів (відновлення деталей), елементами можуть бути окремі верстати, транспортні та завантажувальні механізми, системи управління та інші складні об'єкти. Однак, кожен верстат чи обладнання являють собою досить складну систему, і при необхідності оцінки їх надійності можуть бути представленими окремими елементами: станина; шпиндельний вузол; привід поперечної подачі; пристосування базування та ін. В той же час надійність станини залежить від жорсткості її конструкції, зносостійкості технологічних і базових поверхонь і ін. Таким чином, кожен елемент системи можна розглядати як сукупність більш простих елементів.

При аналізі надійності складної системи всі елементи можливо розподілити на наступні групи:

- елементи, відмова яких практично не впливає на працездатність машини (деформація кожуха огороження, зміна забарвлення та ін.);
- елементи, працездатність яких за розглянутий проміжок часу практично не змінюється (елементи високої надійності: станина, несуча рама, корпусні

деталі, малонавантажени елементи та ін.);

- елементи, регулювання або ремонт яких можливі при роботі машини або під час регламентованих зупинок (регулювання гідравлічної системи, налагодження інструменту, перевірка параметрів та ін.);

- елементи, відмова яких призводить до втрати працездатності машини.

Розглянемо лише елементи останньої групи, які є причиною втрати справності або ж працездатності системи.

Якщо розглянути вихідні параметри кожного елемента (їх може бути один або кілька), вони можуть по-різному впливати на формування вихідного параметра всієї системи. На підставі зазначеного, можна виділити три основні типи параметрів.

Зміна параметра першого типу впливає на працездатність лише самого елемента. Відмова даного елемента призводить, як правило, до часткової чи повної відмови всієї системи.

Параметр другого типу впливає на формування одного або декількох вихідних параметрів всієї системи. Його зміни повинні враховуватися в сукупності зі зміною параметрів даної категорії для інших елементів. За відхилом від номінального значення даного параметра не можна робити висновок про відмову елемента.

Параметр третього типу впливає на працездатність інших елементів. Його вплив на стан інших елементів системи можна порівняти зі зміною дії зовнішніх факторів на умови роботи.

Слід зазначити, що кожен параметр може мати одну або декілька з перерахованих властивостей.

Якщо уявити собі систему, у якій всі елементи мають вплив параметрів тільки першого типу, то надійність кожного такого елемента може бути визначена незалежно від інших складових частин системи. В цьому випадку отримаємо систему, що складається з окремих частин, надійність яких задана або може бути визначена. Елементи працюють як незалежні, і для забезпечення надійності системи необхідно і достатньо забезпечити надійну роботу кожного

елемента окремо. Заміною або відновленням елемента, що відмовив відновлюється працездатність системи. До даного виду систем можна віднести окремі типи технологічних ліній, що складаються з окремих одиниць обладнання, що виконують різні технологічні операції.

Для окремих машин та обладнання, що розглядаються як складні системи, більш характерним є наявність таких вихідних параметрів окремих елементів, які формують вихідні параметри всього об'єкта (параметри 2-го типу). В цьому випадку елементи не можна вважати незалежними. Наприклад, надійність роботи механічної системи верстата, що призначена для точного переміщення супорта з ріжучим інструментом, залежить від зносостійкості всіх ланок, які передають рух (ланцюгів, зубчастих передач, ходових гвинтів та ін.). При цьому знос кожного елемента не може бути нормований незалежно від зносу інших елементів. Аналогічно, можна розглядати одночасну роботу всіх елементів механізмів газорозподілу, запалювання та інших механізмів автотракторних двигунів, та на підставі зазначеного давати оцінку надійності системи.

Таким чином, з позицій надійності можуть мати місце наступні структури систем:

- розподілені, у яких надійність окремих елементів може бути заздалегідь визначена, оскільки відмова елемента може розглядатись як незалежна подія;
- пов'язані, у яких відмова елементів є залежною подією, та залежать від зміни вихідних параметрів всієї системи;
- комбіновані, що складаються із підсистем з пов'язаною структурою та з незалежним формуванням показників надійності для кожної з підсистем.

### **1.3. Історія розвитку науки про надійність техніки**

#### **1.3.1 З історії забезпечення надійності**



У порівнянні з фундаментальними науками, які розвивалися тисячоліттями і століттями, можна сказати, що теорія надійності – наука ще досить молода. Надійністю як наукою, що істотно пов'язана з часом та складовою якості, займалися багато відомих вчених: філософи, математики, фізики, фізико-хіміки. Імена багатьох з них відносяться до золотого фонду людства.

Найбільш далекоглядні вчені вже в той період передбачали значення вирішення проблем надійності машин. Так, основоположником вчення про якість поверхні деталі, професором В. Л. Чебишевим ще в 1880 році була встановлена залежність якості поверхні деталі від методу обробки.

У 1934 році за ініціативи видатного вченого, академіка С. А. Чаплигіна була створена комісія при Академії наук країни з вивчення надійності і довговічності машин. Але технічний рівень розвитку промисловості країни в той час і її оснащеність машинами були такі, що наука про надійність і довговічність не отримала підтримки, а комісія Академії наук припинила своє існування в 1939 році. Однак, комісія при Академії наук країни з вивчення надійності і довговічності машин встигла провести кілька конференцій і нарад у 1934 і 1939 рр., що привернуло до цієї проблеми увагу багатьох вчених світу.

В середині 30-х років шведський інженер і математик В. Вейбулл, аналізуючи відмови, які були пов'язані зі зносом кулькових підшипників, запропонував просту і зручну математичну модель для їх опису, яка відома тепер як розподіл Вейбулла.

Незабаром видатний вчений, математик, академік АН УРСР Б.В. Гнеденко знайшов три класи граничних розподілів, один з яких збігався з розподілом Вейбулла. Отримані фундаментальні результати академіка Б.В. Гнеденко спрочатку були простою здогадкою, але з часом стали науково обґрунтованим результатом. В ті роки панувала думка, що дослідження надійності і довговічності не можуть переформатуватись в форму конкретної теорії і служити для прогнозування надійності. Вже згодом науковці зможуть ефективно використовувати досягнення двох всесвітньо відомих вчених в галузі надійності В. Вейбулла та Б.В. Гнеденко – закон Вейбулла–Гнеденко.

Київська школа надійності техніки історією свого створення та основою існування пов'язана з ім'ям саме академіка Б. В. Гнеденко. Саме в період наукової діяльності в Україні Гнеденко Б. В. очолював Інститут математики АН УРСР та розпочав організовувати створення обчислювального центру при АН УРСР. Під час роботи директором інституту математики АН УССР, разом із І. М. Коваленко вони читали лекції по теорії надійності у військовому училищі ПВО (КВІРТУ). Семінар по надійності очолив М. О. Шишонок. Саме в цей період академік Гнеденко Б.В. розпочав розробку одного з нових напрямів прикладних наукових досліджень – теорію масового обслуговування. Першими київськими учнями академіка Б. В. Гнеденко були В. С. Королюк та В. С. Михалевич, які згодом стали відомими вченими в Україні та світі.

Суттєвий результат в теорію надійності вніс академік АН України Володимир Семенович Королюк.

Королюк В. С. – відомий радянський та український математик, Національної академії наук України.

Михалевич Володимир Сергійович український учений у галузі економічної кібернетики, академік Академії наук СРСР (1984) і Національної академії наук України. Михалевич В. С. був Директором Інституту кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України в період 1982-1994 рр.

Але з 50-х років знову в багатьох науковців посилюється інтерес до питань надійності і з'явився ряд робіт в цій галузі.

Не дивлячись на те, що розвиток теорії надійності розпочався набагато раніше, перша хвиля сучасної теорії надійності пройшла за кордоном, в Сполучених Штатах Америки в кінці 50-х років. Вперше фахівці з теорії і практики надійності почали збиратися на Конференціях з надійності, які були організовані Інститутом радіоінженерів (IRE). Зазначені Конференції відразу ж стали щорічними, а вже перший збірник доповідей конференції зіграв революційну роль в інформаційному обміні між експертами в галузі оцінка та забезпечення надійності.

Із невеликою затримкою подібні конференції стали проводитись в багатьох містах колишнього Союзу, включаючи Україну. Але слід сказати, що зазначені конференції були закритими, тому їх вплив на широкі інженерні кола був досить обмеженим. Разом з тим, повне своє визнання наука про надійність отримала в кінці 50-х початку 60-х років.

Стосовно забезпечення надійності механічних систем з урахуванням особливостей формування їх відмов слід згадати наукові роботи В. Я. Аніловича, О. С. Гринченко. Веніамін Якович Анілович – професор, заслужений діяч науки і техніки України; доктор технічних наук, професор Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. З 1971 року В. Я. Анілович працював в Харківському інституті механізації та електрифікації сільського господарства, де організував та очолив кафедру «Надійності, довговічності і опір матеріалів» – перша кафедра такого профілю серед сільськогосподарських вузів колишнього Союзу. Професором Аніловичем В. Я. була організована галузева науково-дослідна лабораторія підвищення надійності тракторів для обслуговування заводів тракторного та сільськогосподарського машинобудування, яка розробляла і впроваджувала результати дослідів професора та його учнів. Зазначена діяльність сприяла подальшому розвитку наукової школи та галузевого центру з проблем надійності.

У світовій практиці науки про надійність також відомі прізвища Капура К., Ламберсона Л., Барлоу Р., Прошана Ф.І., Райкше К. та багатьох інших визначних вчених, що внесли свій вклад в розвиток даної науки.

За цей період часу надійність стала потужною прикладною математичною дисципліною з розвиненими теоретичною та прикладною складовими. Неможливо уявити науково-дослідний інститут або виробниче підприємство без лабораторії або відділу надійності. Багато хто із авторів та науковців у даній галузі виділяли кілька напрямків в сучасній теорії надійності, основними з яких є: «чистий» аналіз надійності; аналіз ефективності; аналіз живучості; аналіз безпеки; аналіз захищеності; аналіз надійності математичного забезпечення.

Минуле століття було дуже продуктивним для теорії надійності: велика кількість нових ідей; багато корисних результатів; цікаві практичні додатки; нові галузі для реалізації та впровадження наукових досліджень. Але є цілий ряд важливих проблем, які ще чекають свого вирішення: надійність програмного забезпечення; людський фактор в надійності складних систем; аналіз і забезпечення надійності унікальних виробів; глобальні територіальні системи і комплекси; надійність систем, що розвиваються; використання теорії надійності для оптимізації управління запасними частинами; формування та використання неперервних моделей надійності; накопичення бази даних про надійність.

### **1.3.2 Вклад представників наукової школи професорів**

#### **В.С. Крамарова – А.І. Бойка в розвиток теорії забезпечення надійності**

Роком заснування наукової школи Крамарова В. С. вважають 1949 р., коли Володимиру Савовичу було присвоєно вчену ступінь доктора технічних наук та вчене звання професора. В цей час його було призначено старшим науковим співробітником Всесоюзного інституту механізації сільського господарства, де він очолив розробку та видання типової технології ремонту тракторів КД-35, технологічних карт розбирання та складання тракторів, теоретичних основ технологічних процесів ремонтного виробництва та інженерної методики їх проєктування.

Подальші сходи до наукового олімпу були пов'язані також з підготовкою інженерних спеціалістів, коли науковець у 1950 р. повернувся до викладацької діяльності, але тепер уже на посаді професора, завідувача кафедри ремонту тракторів, автомобілів і сільськогосподарських машин рідного КСПІ (1951 р.), потім – на посаді заступника директора з навчальної роботи, з навчальної та наукової роботи (1953 р.), з навчальної роботи (1954-1956 рр.). У 1956 році Крамаров В. С. обирається ректором цього ВНЗу, перейменованого в Українську ордену Трудового Червоного Прапора сільськогосподарську академію (УСГА). У 1956 р. професора Крамарова В. С. обрано членом-

кореспондентом ВАСГНІЛ. Подальший шлях пов'язав науковця з Українською академією сільськогосподарських наук (УАСГН), академіком (1956 р.) і віцепрезидентом якої його було обрано (1957-1959 рр.).

Свою викладацьку діяльність видатний вчений завжди підсилював науковою роботою. Так у 1959-1971 рр. Крамарова В. С. було призначено директором Українського науково-дослідного інституту механізації і електрифікації сільського господарства, де Володимир Савович очолив технологічний напрям науково-дослідних робіт інституту в галузі механізації сільськогосподарського виробництва. Його праці у області теорії і розрахунку виробничих процесів лягли в основу методики проведення аналізу та інженерних розрахунків технологічних процесів механізованого вирощування сільськогосподарських культур: технологічний процес поточного комбайнового збирання урожаю зернових культур, процеси вирощування кукурудзи, цукрового буряка, картоплі та ін. Заслуговує на увагу його праця по визначенню складу МТП з використанням математичного програмування.

Загалом за участі і підтримки науковця-педагога було захищено близько 30 кандидатських і 3 докторські дисертаційні роботи, автори яких і до нині провадять дослідження у багатьох країнах світу (Україна, Білорусь, Латвія, Молдова, Росія, Узбекистан, Киргизстан, Польща, Болгарія, Угорщина, Чехія, Словачія, Єгипет, Сирія, Ізраїль, США, Німеччина). Започаткована вченим у Києві науково-дослідна робота з розробки і удосконалення технології і організації сільськогосподарського ремонтного виробництва поширилась і на інші міста України: Хмельницький, Одесу, Львів, Харків, Запоріжжя, Миколаїв та ін.

Виховані школою Крамарова В. С. науковці зайняли своє почесне місце у аграрній науці і освіті України. Слід відмітити значний вклад в розвиток наукової школи професора Крамарова В. С. випускника факультету механізації, доцента Малахова В. С. Валентин Сергійович знаний в Україні та за її межами, як провідний вчений у галузі надійності і ремонту машин. Він є автором цілої низки підручників, посібників, методичних матеріалів, довідкової технічної літератури

з ремонту тракторів. Його праці з питань проектування і розрахунку технологічних процесів ремонту знайшли подальший розвиток і використовуються на виробництві. Необхідно відмітити значний вклад канд. техн. наук Малахова В. С. в розробку технологічних процесів ремонту та участі у формуванні ремонтної бази тракторів Т-150К і Т-150 на посаді завідувача лабораторією колишнього Українського філіалу ДержНДТІ. У 1986 році доцента Малахова В. С. було нагороджено золотою та бронзовою медалями ВДНГ.

Яскравою і багатогранною постаттю на кафедрі надійності техніки був колишній завідувач кафедри, канд. техн. наук, доцент Колісник В. С.. Василь Семенович, після закінчення Дніпропетровського сільськогосподарського інституту, працював на підприємствах сільгосптехніки, став одним із перших аспірантів Українського філіалу ДержНДТІ. Після захисту кандидатської дисертації Колісник В. С. працював науковим співробітником та завідувачем лабораторією, займався питаннями ремонту тракторів Т-25, Т-16 та відновленням зношених деталей. Працюючи на посаді доцента, а згодом завідувача кафедри «Ремонту машин» (1989- 1998 рр.), Василь Семенович сформував прекрасний колектив. Доцент Колісник В. С. був співавтором підручника «Взаємозамінність, стандартизація і технічні вимірювання», автором багатьох наукових статей і методичних матеріалів, довідкової технічної літератури в галузі ремонтного виробництва.

На кафедрі «Ремонту машин» тривалий час працював випускник факультету механізації сільського господарства УСГА, канд. техн. наук, доцент Черненко П. О. Після закінчення УСГА Петро Олександрович працював в Українському філіалі ДержНДТІ, де захистив кандидатську дисертацію, працював науковим співробітником, завідувачем лабораторії. Його діяльність в ДержНДТІ була пов'язана з розробкою та впровадженням у виробництво технологічних процесів ремонту та забезпечення надійності бурякозбиральних комбайнів КС-6 та кукурудзозбиральних комбайнів «Херсонєць-7». Наукові інтереси доцента Черненка П. О., в період роботи на кафедрі «Ремонту машин»,

були присвячені питанням організації ремонтного виробництва в сільському господарстві.

Одним із учнів і послідовників професора Крамарова В. С. є його аспірант, а згодом старший викладач кафедри «Ремонту машин» Гулай О. Г. Наукові дослідження Омеляна Григоровича присвячені питанням забезпечення працездатності деталей двигунів внутрішнього згорання, організації роботи спеціалізованих ремонтних майстерень. Старший викладач Гулай О.Г. є співавтором підручника «Ремонт машин», посібників, автором багатьох наукових статей і методичних матеріалів, довідкової технічної літератури в галузі ремонтного виробництва.

Продовжувачами школи Крамарова В. С. став завідувач кафедри, доктор техн. наук, професор Бойко А. І., який займався розробкою нових конструктивних рішень високонадійних вузлів і агрегатів сучасної сільськогосподарської техніки на основі застосування системного підходу з урахуванням їх будови за різних видів резервувань. Під керівництвом професора Бойка А. І. проводились дослідження форм природного зношування поверхонь тертя як конструктивних напрямів в підвищенні довговічності деталей. Своїми дослідженнями в цій галузі він продовжив і поглибив напрям надійності, що знайшло відображення у розширенні навчальних дисциплін «Надійність технічних систем», «Надійність технологічних систем». Під його керівництвом захищено 8 докторських і 12 кандидатських дисертаційних робіт.

Перед вченими, що працюють в галузі надійності складних систем постають нові завдання як наукового, так і економічного характеру.

Останні десятиліття – роки соціальних, економічних і політичних проблем не були сприятливими для розвитку науки в Україні, а особливо такого напрямку як надійність складної техніки. Ця наука потребує певного математичного рівня при проведенні моделювання, а також знань самої техніки, умов її експлуатації, організації і виконання регламентних робіт при обслуговуванні. Реалії економіки призвели до нових викликів для науки про надійність. Увійшла у використання закордонна техніка, яка вже працювала певний термін попередньо, тобто

«техніка повторного використання». Звідси необхідність системного підходу до розгляду та вивчення самої техніки з залишковим ресурсом, підсистем діагностування її стану і технічного обслуговування на різних стадіях експлуатації.

Зазначені нові наукові завдання оцінки і забезпечення надійності вирішуються з використанням системного підходу шляхом дослідження поведінки окремих підсистем і систем в цілому.

Актуальними на сьогодні стали питання розробки техніки з наперед заданим обмеженим ресурсом. Якщо обмеження ресурсу продиктовані економічними інтересами фірм, що примушують споживачів нести додаткові непередбачені затрати на оновлення працездатності виробів або їх заміни, то такі проблеми вже не представляють прямого науково-технічного інтересу.

У зв'язку з постійним ускладненням техніки міняються умови праці персоналу, що керує машинами. Розгляд системи «людина-машина» з метою підвищення готовності техніки до виконання заданих функцій, формує ще один науковий напрям, реалізація якого суттєво впливає на надійність сучасних машин і комплексів.

Цікавим і перспективним напрямком в забезпеченні надійності сучасної складної техніки слід вважати створення самоорганізуючих систем. Тобто таких систем, які за рахунок власних внутрішніх резервів могли б виправляти ті помилки в роботі, які самі ж допускають.

Як видно з представленого матеріалу перспективні дослідження по надійності носять різноманітний характер, використовують сучасний математичний апарат і направлені на отримання насамперед динамічних характеристик надійності складних технічних систем. Такий підхід відкриває перспективи створення самоорганізуючих систем, а також систем, що самі налаштовуються на знаходження або усунення відмов. Потребують розширення також дослідження з системами, для яких характерні прояви кількох видів відмов.



Вирішенню окремих із вказаних проблем присвячені дослідження, що проводяться співробітниками кафедри надійності техніки Національного університету біоресурсів і природокористування України (НУБіП України).

### **1.3.3. З історії забезпечення надійності: аналіз виникнення катастроф**

Забезпечення надійності є однією з ключових вимог під час проектування виробництва та експлуатації складних технічних систем. У зв'язку з цим в інженерній практиці виникає завдання оцінки характеристик надійності системи або її окремих компонентів, яке є одним з актуальних і до сьогодні значною мірою невирішених проблем. Як підтверджено багатьма дослідженнями, минуле століття було дуже продуктивним для розвитку теорії надійності. Адже в цей період зафіксована значна кількість нових ідей, корисних практичних результатів та цікавих додатків в галузі надійності. Але є цілий ряд важливих проблем, які ще чекають свого рішення: аналіз і забезпечення надійності територіальних систем і комплексів; формування безпечних умов праці на промислових підприємствах; дослідження впливу людського фактору на надійність складних соціотехнічних систем і комплексів; вивчення надійності систем, що розвиваються; надійність програмного забезпечення.

Історія розвитку науки про надійність показує, що незважаючи на давнє походження цієї науки, вивчення надійності складних систем отримало інтенсивний розвиток лише після Другої світової війни. Це пов'язано, насамперед, із суттєвим ускладненням технічних рішень виробів в радіоелектроніці, автоматиці, обчислювальній техніці тощо. Про підвищення надійності соціотехнічних систем і комплексів говорять зараз не лише інженери та вчені, а й державні діячі. У вступі до своєї книги «Надійність» американські автори Д. Ллойд та М. Липів зазначають, що ненадійність, матеріально позначається на вартості, на додаткових витратах, психологічно у вигляді незручностей, а в певних випадках загрожує також безпеці людей і нації.

Класичним прикладом психологічного ефекту низької надійності виробів є сумнозвісні супутники «Авангард». Був період, коли США, гостро переживаючи успіхи колишнього Союзу, який запустив Супутник-1, спробували вступити в змагання. З цією метою США використали майже невипробовану ракету, якій довелося працювати на межі своїх можливостей. Невдачі, конструктивно-технологічні недоліки призвели до зневіри і втрати престижу ракетобудівних компаній. В 1971 році командування військово-повітряних сил Німеччини направили на утилізацію 30 реактивних літаків типу «Старфайтер» американського виробництва. До цього моменту бундесвер в результаті катастроф втратив вже 139 «Старфайтерів» і понад 60 пілотів, що на них літали. «Катастрофою століття» назвали події, які відбулися 9 листопада 1965 року на території США і Канади. У той день за 11 хвилин на території в 200 тисяч квадратних кілометрів, на якій розташовані такі гігантські міста, як Нью-Йорк, Бостон, Монреаль та багато інших, повністю вимкнулось електропостачання, зупинилися електропоїзди, тролейбуси. Тисячі людей перебували в електропоїздах метро. На занурених в морок вулицях і дорогах ходили десятки тисяч стурбованих людей, а навколо панувала автомобільна метушня, викликана тим, що згасли світлофори. Хірурги в операційних закінчували операції при світлі свічок. Літаки не могли звершити посадку на занурені в темряву аеродроми. Зупинилися всі фабрики і заводи, захолов метал в електропечах. Мешканці тих міст згадують, що видовище згаслих вікон гігантських Нью-Йорка і Монреалю були нестерпно похмурими. Подача електроенергії була відновлена тільки о 7 годині ранку 10 листопада. Збитки, викликані цією катастрофою, виявилися колосальними орієнтовно близько 100 мільйонів доларів. І це не рахуючи людських жертв. Кореспонденти звернулися до висновків спеціальної комісії, яка розглядала причини «катастрофи століття». Північний схід США і південь Канади обслуговуються енергосистемою «Канада - США східна». Загальна встановлена потужність цієї системи складала близько 48 мільйонів кіловат, 73% яких виробляється тепловими електростанціями, 26% – гідроелектростанціями, і лише 1% електроенергії вироблялась на дизельних,

газотурбінних та атомних станціях. Електростанції, що входили до системи, були з'єднані лініями електропередач, окремі з них працювали на напрузі 345 тисяч вольт, інші лінії – 30 і 115 тисяч вольт. Того вечора система працювала нормально, із загальним навантаженням 43,6 мільйона кіловат, що було цілком допустимо. О 17 годин 18 хвилин інженер ГЕС Ніагарського каскаду помітив на щиті управління сигнал про відключення однієї з п'яти ліній електропередач, що відходять в напрямку Канади. Як наслідок, було з'ясовано, що відключення сталося через невірне спрацьовування одного реле в системі захисту цієї електростанції. Вся потужність станції припала на інші чотири лінії, які не витримали перевантаження і відразу ж були відключені захисною автоматикою. Подальші події розвивалися швидко, перевантаження виявилось фатальним. Вісім штатів залишилися без постачання електроенергії.

Про надійність не варто забувати ніколи, про надійність слід пам'ятати завжди. Поняття надійності більш відкрито розкривається сукупністю чотирьох основних властивостей: безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності та збереженості. Але це все в загальному вигляді. Якщо спробувати ввести кількісні показники надійності, то неминуче прийдемо до необхідності використання зазначених показників для забезпечення безвідмовності та довговічності складних технічних систем в різних галузях. Створення нових технологій дозволяє розраховувати на те, що у найближчому майбутньому нас здивують своєю появою на світ суперсучасні та високонадійні зразки в машинобудуванні, транспорті і капітальному будівництві. На сьогодні перспективними є кілька напрямків в сучасній теорії надійності: аналіз ефективності та надійності; аналіз живучості; аналіз залишкового ресурсу; аналіз самоорганізуючих систем.

#### **1.3.4. З історії забезпечення надійності: застосування моделювання**

Вся історія матеріальної культури людства – це історія створення все більш надійних і міцних виробів і машин, будинків і споруд, мостів і доріг, автомобілів і кораблів. Лише інтуїція та досвід були основою для інженерів.

Техніка ускладнювалась, а люди розуміли: що для забезпечення її надійності мало звичайних інженерних розрахунків, стало зрозуміло, що головна мета полягає в прогнозуванні майбутнього, передбаченні випадкового.

В середині XIX століття відбулося поєднання в одній науці «абстрактних» методів математики та інженерних методів техніки. Використовуючи зацікавленість до азартних ігор, теорія ймовірностей стала фундаментом науки про надійність нових зразків зброї, що дозволило людині уникнути багатьох серйозних катастроф. Хрестоматійним в цьому сенсі є випадок, що стався у 1870 році в Англії. Адміралтейство збиралося випробувати в морі броненосець нового типу «Каптен». Англійський вчений-кораблебудівник В. Рід, який побудував фізичну модель цього корабля, встановив його крайню нестійкість. Судну загрожувало перекидання навіть при невеликих хвилях у відкритому морі. Однак, адмірала не взяли до уваги висновки, які були отримані за допомогою фізичних моделей кораблів. Броненосець «Каптен» вийшов у відкрите море і при першому ж штормі перекинувся. Під час аварії загинули 523 моряки і сам бойовий корабель.

В наші дні вчені користуючись фізичними моделями, прогнозують їхнє майбутнє, і тому все рідше й рідше відбуваються катастрофи, які пов'язані з невивченістю явищ. Але все ж «випадкова закономірність», незначна неточність в розрахунках або певний збіг обставин призводили і, на жаль, призводять до трагедій, що забирають тисячі й тисячі людських життів.

У травні 1937 року, після трьохдобового трансатлантичного перельоту, над Нью-Йорком завис велетенський дирижабль «Гінденбург». Саме з «Гінденбурга» повинні були розпочатись регулярні рейси з Германії до США. Його гігантська конструкція довжиною близько 250 метрів і об'ємом майже 200 тис. кубічних метрів, заповнене воднем, приводилась в рух чотирма дизельними двигунами, кожен з яких потужністю 1100 кінських сил. Учасники першого польоту через Атлантику, а це близько ста пасажирів, перебували на борту дирижабля в небувалій розкоші. Спортивні майданчики, оранжереї, ресторани,

комфортабельні каюти, прогулянкові палуби це все було на цьому красені-дирижаблі, гордості гітлерівського рейху.

Великий дирижабль описував кола на невеликій висоті над Нью-Йорком, і перехожі на вулицях могли добре розгледіти срібну сигару з чорною свастикою на корпусі. В аеропорту панувало пошвавлення: репортери і кінооператори з нетерпінням очікували приземлення дирижабля. Однак, командир «Гінденбурга» капітан Макс Прус не поспішав. Тільки близько чотирьох годин дня, коли почали збиратися грозові хмари, командир дирижаблю віддав наказ на приземлення, що відбувалося дуже повільно й урочисто. Причальні команди готувалися вже прийняти корабель, а радіокоментатори повідомити про вдалий фініш, коли зустрічаючі помітили спалах на кормі. В один момент дирижабль охопило полум'я. Майже ніхто з пасажирів та членів екіпажу не врятувався. Одні загинули у вогні, інші розбилися об землю, коли намагалися вистрибнути через ілюмінатори пасажирської кабіни. Це був крах «Гінденбурга» і кінець спроб застосувати дирижаблі в якості пасажирського транспорту.

Підготовлені до будівництва ще більш могутні кораблі були законсервовані, а в повітрі почали панувати літаки. Причиною катастрофи «Гінденбурга» виявилась електрична іскра. Як встановили експерти, поки дирижабль кружляв в передгрозовому небі Нью-Йорка, його корпус зарядився атмосферною електрикою, випадково з'явилася іскра, водень в суміші з повітрям вибухнув, як динаміт. Інженерам-проектувальникам здавалося, що вони врахували все, але вони не змогли передбачити можливість явища, яке не вкладалось в первинну систему розрахунків.

Інші приклади, здавалося б, зовсім з іншої галузі, але вони також яскраво відображують рівень надійності виробів. В 70-і роки супертанкер «Морпесса» йшов між берегів Сенегалу. Команда, не витрачаючи часу, промивала пусті баки потужними струменями теплої морської води. Раптовий вибух фактично розломив навіл величезне судно і воно миттєво потонуло. Двома тижнями пізніше в Мозамбікській протоці вибухнув супертанкер «Мактра», через день та ж доля спіткала ліберійський танкер «Конг Хаакон». Кожного разу вибуху

передувало промивання баків морською водою. Експерти та проектувальники довго вивчали можливі причини аварій, і лише канадський фізик Едвард Пієріс висловив припущення, що струмені теплої морської води, що направляються під великим тиском на стіни баків, можуть активно генерувати статичну електрику. А довести це вчений зміг у власній ванній. І якщо навіть у ванній виникали крихітні електричні потенціали, то в гігантських нафтових баках могли виникнути потенціали порядку тисяч вольт, а викликані ними іскри призводили до вибуху суміші повітря і нафтових парів.

Електрична іскра, викликана замиканням провідників під сидінням американського космонавта Гріссом, призвела 22 січня 1967 року ще до однієї трагедії на космічному кораблі «Аполлон», який був підготовлений до випробування ракети «Сатурн-1». Три космонавти – Віджил Гус Гріссом, Едвард Уайт та Роджер Чаффі, та й всі випробувальники ніяк не могли очікувати, що звичайна перевірка може обернутися катастрофою. Як виявилось, іскра виникла між двома мідними пластинами в пошкодженому електричному провіднику. Збагачена киснем атмосфера та горючі матеріали обшивки корабля, здавалось, тільки її і чекали – кабіна в одну мить перетворилася в палаюче пекло. За 20 секунд космічний корабель згорів, загинули космонавти. Порятунком був неможливий, оскільки для відкриття люка потрібно не менше двох хвилин в спокійній обстановці. А цих двох хвилин ні у астронавтів, ні у рятувальників не було.

Для конструкторів кабіни космічного корабля з цього випадку був гіркий урок: довелося замінити матеріали конструктивних елементів; зробити їх менш вразливими до горіння; розробити швидкодіючу систему аварійного виходу космонавтів; більш ефективно контролювати надійність всієї електричної схеми космічного корабля.

Як показує аналіз, все ж головною дійовою особою у всіх трагедіях була людина. І таке поняття, як людський фактор рід дуже важлива. Адже передбачити поведінку та вчинки людей куди складніше, ніж врахувати несподівані фізичні або технічні чинники.

Досить часто інженери звертають основну увагу на розробку або ж удосконалення головних вузлів виробів, але при цьому не беруть до уваги, що причиною аварії можуть стати конструкторські вузли, що носять, допоміжний характер. Як правило, на високий рівень надійності розраховують саме основні вузли та обладнання. Так, наприклад, в надзвуковому пасажирському літаку англо-французького виробництва «Конкорд», надійність основних бортових систем обрана таким чином, щоб ймовірність їх відмови з безпечними наслідками становила не більше  $10^{-5}$ , а ймовірність небезпечних відмов – понад  $10^{-7}$ , а катастрофічні руйнування обчислюються ймовірністю меншою  $10^{-9}$ .

Таким чином, основне обладнання таких літаків, як правило, розраховане на високу надійність. Реактивний пасажирський літак «Комета» в 60-х роках, під час випробування розвалився в повітрі, а причиною катастрофи виявилися прямокутні ілюмінатори, в куточках яких утворювалися значні концентратори напружень. Коли ілюмінатори виконали круглими – літаки стали більш надійними.

Це були одні із перших кроків, що сприяли розвитку теорії надійності. Порівняно невеликі моделі машин, кораблів, літаків, мостів та гребель врятували багато життів, позбавили людство від трагічного досвіду, дозволили уникнути зайвих затрат коштів і праці. І навпаки, нехтування результатами, які були отримані на фізичних моделях, призводило до непередбачуваних наслідків.

#### **1.4. Основні поняття і визначення**

Кожен об'єкт характеризується певними вихідними параметрами. Величина вихідних параметрів формує визначальні показники якості даного об'єкта. Вихідні параметри можуть характеризувати самі різні властивості в залежності від його призначення даного об'єкту та вимог, які до нього пред'являються. Це можуть бути показники точності функціонування, енергетичні, механічні та міцності, кінематичні і динамічні параметри, економічні та інші. Зазвичай, кожен об'єкт характеризується певними вихідними параметрами та їх допустимими значеннями (відхилами), що обмовляється

відповідними нормативними документами (стандартами, технічними умовами).

Основні поняття та визначення надійності регламентуються стандартами. Терміни стандартів розрізняють справний або працездатний стан об'єкта. При *справному* стані об'єкт відповідає всім вимогам, встановленим нормативно-технічною документацією. В практиці прийнято оцінювати функціонування машин та обладнання не по справному, а по працездатному стану.

*Працездатність* – це стан об'єкта, при якому він здатний виконувати задані функції, зберігати значення відповідних параметрів в межах, що встановлені нормативно-технічною документацією.

Технічна документація визначає допустимий рівень зовнішніх впливів, методи технічного обслуговування і ремонту, норми і допустимі відхилення від встановлених параметрів. Працездатність об'єкта пов'язана не тільки зі «здатністю працювати», тобто виконувати необхідні функції, але за умови, щоб вихідні параметри об'єкта перебували в допустимих межах.

*Відмова* – подія, що полягає в порушенні працездатного стану об'єкта.

*Пошкодження* – подія, що полягає в порушенні справного стану об'єкта при збереженні працездатності.

Навіть високі початкові характеристики та параметри об'єкта – необхідна, але ще не достатня умова його високої якості. Вони лише показують його технічні можливості. Очевидно, що високу якість машини і обладнання, їх ефективність можна отримати, якщо вони будуть володіти не лише високими показниками таких властивостей, як точність, вантажопідйомність, потужність, енерговитрати, вібростійкість, витрати палива і ін., але і високою надійністю, тобто збереженням початкових значень цих технічних характеристик в процесі експлуатації.

*Надійність* – властивість об'єкта зберігати в часі в встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують можливості виконувати необхідні функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, ремонту, зберігання і транспортування. Іншими словами, надійність – це властивість об'єкта зберігати в часі свою справність або ж працездатність.



Будь-яка відмова виникає, або може виникнути, через деякий період часу, який є випадковою величиною. Під категорією часу в теорії надійності може розумітися календарна тривалість роботи об'єкта, напрацювання об'єкта (зазвичай в годинах) або відповідний обсяг виконаної роботи (кількість циклів, кілометраж, кубічні метри і ті).

Параметри об'єкта вибираються в залежності від типу машин і обладнання, що повинні характеризувати їх продуктивність та ефективність. Окремо взята надійність ще не визначає високу якість об'єкта. Об'єкт може бути виключно надійним, але володіти, наприклад, низькою точністю і продуктивністю. З іншого боку, якими б високими якісними характеристиками об'єкт не володів, без надійності він не забезпечить високої ефективності роботи. Таким чином, надійність – є одна з обов'язкових складових якості та найбільш загальною комплексною властивістю якості будь-якого технічного об'єкта.

Надійність – складна властивість, яке в залежності від призначення об'єкта і умов його використання складається з поєднання властивостей: безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності і збереженості.

*Безвідмовність* – властивість об'єкта безперервно зберігати працездатний стан протягом певного часу роботи або напрацювання.

*Довговічність* – властивість об'єкта зберігати працездатний стан до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту.

*Довговічність і безвідмовність* – не взаємовиключаючі одна одну, а доповнюючі одна одну і пов'язані між собою властивості. В залежності від характеру виробництва і виду об'єкта на перший план, при оцінці його надійності, може висуватися безвідмовність або довговічність. Наприклад, для токарного верстата або трактора, відсутність відмов протягом зміни швидше бажана, ніж необхідна умова, оскільки після поточного ремонту вони знову придатні до використання. Для складної і високопродуктивної автоматичної лінії, робота якої, значною мірою, визначає техніко-економічні показники підприємства, властивість безвідмовності висувається на перший план.

Всі об'єкти розподіляються на ремонтовані і неремонтовані. Ремонтованим називається об'єкт, для якого проведення ремонтів передбачено нормативно-технічною і (або) конструкторською документацією. Машини та обладнання відносяться до категорії ремонтованих, отже, для них важливу роль відіграє така властивість надійності, як ремонтпридатність.

*Ремонтпридатність* – властивість об'єкта, що полягає в пристосованості до попередження та виявлення причин виникнення відмов і пошкоджень, до підтримання та відновлення працездатного стану шляхом проведення технічного обслуговування і (або) ремонту.

Досконалість конструкції машини, можливість швидкого виявлення і усунення будь-якої відмови, легкий доступ до всіх вузлів визначають витрати часу на ремонт. Чим складніше стають сучасні машини, чим більш відповідальні функції вони виконують, тим більшого значення набуває властивість їх ремонтпридатності. Це пояснюється тим, що кожна година їх простою призводить до значних збитків, також витрат часу та коштів на знаходження та усунення причин відмов.

*Збереженість* – властивість об'єкта зберігати працездатність протягом і після встановленого терміну зберігання та (або) транспортування.

Властивість зберігання має особливе значення для машин і обладнання, що мають в своєму складі системи програмного управління, мікропроцесорну техніку, складні пневматичні та гідравлічні пристрої, для яких повинні забезпечуватись особливі умови і правила транспортування та зберігання.

### **1.5. Питання для обговорення та самоперевірки**

1. Дайте визначення якості продукції.
2. Назвати основні властивості якості продукції.
3. Назвати головні завдання, які вирішує наука про надійність машин.
4. Охарактеризувати зв'язок надійності з працездатністю виробів.

5. Назвати основні фактори, що впливають на надійність машин та обладнання.
6. Назвати основні властивості надійності машин та обладнання.
7. Дати визначення основним властивостям надійності.
8. Охарактеризувати різновиди технічних станів машин та обладнання, виробів машинобудування.
9. Що слід розуміти під складною технічною системою?
10. Що слід розуміти під елементом складної технічної системи?
11. Назвати основні властивості, що визначають елемент складної системи.
12. На скільки характерних груп можна розподілити елементи при аналізі надійності складних систем?
13. Назвати основні структури систем при аналізі їх надійності.
14. Назвати відомих вчених в галузі надійності техніки.
15. Назвати відомих українських вчених в галузі надійності техніки.
16. Які важливі проблеми надійності потребують вирішення для забезпечення працездатності машин та обладнання.
17. Назвати сучасні проблеми надійності.
18. Описати вплив людського фактору на забезпечення надійності складних систем.
19. Навести визначення та описати справний та працездатний стан машин та обладнання.
20. Навести визначення та приклади несправностей машин та обладнання.
21. Наведіть визначення та приклади відмов машин та обладнання.

## **РОЗДІЛ 2. ПРОЦЕС ВТРАТИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ**

### **2.1. Причини втрати машиною працездатності**

В процесі експлуатації машини та обладнання закономірно втрачають свою початкову якість. Це відбувається під дією зовнішніх і внутрішніх впливів механічної, теплової та хімічної енергії.

Механічна енергія не лише передається за всіма ланками машин в процесі роботи, а й впливає на них у вигляді статичних і динамічних навантажень від взаємодії із зовнішнім середовищем (наприклад, дорожніх умов). Сили, що виникають в машині, визначаються характером робочого процесу, інерцією переміщення, тертям в кінематичних парах.

Механічна енергія в машині може виникнути і як наслідок тих витрат енергії, які мали місце при виготовленні елементів машини і збереглися в них в потенційній формі. Сюди можна віднести деформацію деталей при перерозподілі внутрішніх напружень, що призводить до зміна розмірів, форми і об'єму деталі після її термічної обробки та ін.

Теплова енергія діє на машину і її елементи при зміні температури навколишнього середовища, при здійсненні робочого процесу (робота двигуна внутрішнього згоряння, гідравлічного преса), при роботі приводних механізмів, електричних, гідравлічних і пневматичних пристроїв.

Процеси різного характеру, швидкості, інтенсивності, що протікають в машинах та обладнанні, поступово знижують їх початкову якість.



Рис 2. 1. Схема взаємодії факторів в процесі функціонування машини в системі «людина-машина-середовище»

Хімічна енергія також впливає на роботу машини. Навіть повітря, яке містить вологу і агресивні складові (особливо це характерно для оздоблювальних цехів), може викликати корозію окремих елементів і вузлів машини. Ще більший хімічний вплив роблять на елементи конструкції продукти згорання палива в двигунах внутрішнього згорання. Якщо машина працює в умовах агресивного середовища, то хімічний вплив може призвести до руйнування окремих деталей. Таким чином, всі види енергії діють на машину та її механізми, викликають в ній цілий ряд незворотних процесів, створюють негативні умови для зниження технічних характеристик та параметрів.

У машині, що розглядається як зношувана, пружна, термодинамічна і старіюча система, одночасно можуть відбуватись процеси різної інтенсивності, що призводять до оборотних і незворотних змін. Зворотні процеси виникають в машині під час робочого циклу, вносять певні зміни в нормальне виконання нею призначених функцій і зникають після закінчення технологічної операції, наприклад, пружна деформація, вібрація, нагрів. Незворотні зміни (знос, пластичне деформування, накопичення втомних пошкоджень, корозія) зберігаються в машині після виконання призначених функцій.

Вплив зовнішніх факторів, формування технічного стану та експлуатаційної якості машин і обладнання розглядають в системі «людина - машина - середовище» (рис 2. 1.).

При формуванні технічного стану машини і оцінці її якості враховується роль людини, що виконує функції оператора або ремонтника. Інтерес представляють, в основному, два аспекти цієї проблеми – роль людини в процесах управління, як управляючої ланки і можливості ефективного управління станом самої людини.

Вплив людини на машину залежить перш за все від організації управління і ступеня автоматизації машини. Чим менший ступінь автоматизації, тим більша

роль відводиться людині-оператору. Від рівня кваліфікації і правильних оператора залежить якість роботи і надійність машини: регламентовані ввімкнення і вимкнення; вибір режиму роботи; налаштування параметрів; своєчасна заміна зношеного інструменту. Це неповний перелік факторів, які залежать від людини-оператора, перебувають під впливом середовища та системно формують якість роботи і управління технічним станом машини.

Не менш важливий вплив людини-ремонтника на формування надійності комплексів, машин та обладнання. Реалізація цього питання залежить від прийнятої на підприємстві системи планово-попереджувального ремонту і стану виробничо-технічної бази. Раціональна організація виробництва дисциплінує працівників і вчить їх правильним прийомам роботи. Але навіть в рамках найдосконалішої системи технічного обслуговування та ремонту особливе значення мають кваліфікація, мотивація ремонтного персоналу, який безпосередньо формує технічний стан машин.

У групі чинників, що відносяться до робочої машини, вирішальне значення мають робочі процеси. Їх параметри залежать від характеристик оброблюваного об'єкта, робочого органу (в процесах різання – різального інструменту) і режиму роботи. Рівень навантажень на машину залежить від розмірів і маси заготовок, твердості оброблюваного матеріалу, ступеню затуплення різального інструменту, його розмірів, маси, режимів обробки (глибина різання, товщина наплавленого шару, швидкість різання), швидкості переміщення робочих органів, зусиль притискання і захоплення, а також інших параметрів. Інтенсифікація роботи машини створює підвищений, напружений стан, а робота на «м'яких» режимах призводить до зниження продуктивності. Рішення проблеми слід шукати в оптимізації режимів та параметрів, що дозволяють забезпечувати найбільшу ефективність роботи машини при обґрунтованих, з економічної точки зору, протіканнях процесів старіння. Крім енергії робочих процесів, на машину діє внутрішня енергія, як прояв потенційної енергії конструкції.

Під терміном «середовище» розуміють, перш за все, фізичне середовище, що безпосередньо оточує машину, а також тип, організацію та інтенсивність виробництва, в якому дана машина експлуатується. У першому випадку – це мікроклімат на місці використання машини, клімат і погодні умови в яких вона експлуатується, наявність агресивних середовищ, запиленість, дорожні умови і т.і. У другому – тип виробництва, інтенсивність експлуатації машини, якість монтажу на фундаменті, прийнята система технічного обслуговування і ремонту та ін.

Сумарно вхідний вплив розглянутих вище чинників викликає в машині зворотні і незворотні процеси різної інтенсивності, основні з яких наведені на рис. 2.1.

Розрізняють процеси що швидко протікають, середньої швидкості і повільні.

Процеси, що швидко протікають мають тривалість, виміряну секундами або частками секунди. Це: вібрації вузлів, зміна сил тертя в рухомих з'єднаннях, коливання робочих навантажень, інші процеси, що впливають на взаємне положення елементів і вузлів машини в кожен момент часу і змінюють цикли її роботи.

Процеси середньої швидкості пов'язані з періодом безперервної роботи машини. Їх тривалість вимірюється зазвичай в хвилинах і годинах. До цієї категорії відносяться як зворотні процеси (зміна температури самої машини, її вузлів і механізмів, температури навколишнього середовища, вологості), так і незворотні (знос ріжучого інструмента, розрегулювання і ін.)

Повільні процеси характерні для тривалих періодів роботи машини, тривалість яких вимірюється місяцями і роками. Переважна більшість незворотних змін відбувається під впливом повільно протікаючих процесів. До них відносяться: знос рухомих з'єднань; корозія; зміни характеру взаємного розташування вузлів, деталей; погіршення динамічної якості; накопичення втомних пошкоджень; перерозподіл внутрішніх напружень в деталях; повзучість і старіння матеріалів. Перераховані процеси за своїм впливом на якість машини



не рівнозначні. Швидкозмінні і середньої швидкості процеси обумовлюють, в основному, зворотні зміни в машині, які відразу ж після зупинки машини (наприклад, вібрація) або поступово (температурні деформації) зникають. Їх неоднозначність, частота повторення впливу можуть призвести до незворотних змін в машині. Так, вібрація викликає втомні пошкодження металів, зміна сил тертя може призвести до заїдання вузла при переміщенні.

Деякі процеси середньої швидкості і всі повільно протікаючі процеси викликають в машині незворотні зміни та знижують її якість.

Конструктивні елементи схильні до зносу, корозії, накопиченню втомних пошкоджень, перерозподілу внутрішніх навантажень. Внаслідок зносу змінюються розміри, форма деталей, їх взаємне розташування. В результаті прояву вказаних факторів можуть відбутися різні порушення функціонування машини, включаючи руйнування через зниження міцності деталей, втрату точності переміщення вузла по зношеним направляючим, порушення рівномірності ходу і т.і.

Ряд деталей в машині працює в умовах циклічних навантажень, в результаті чого в них накопичуються втомні пошкодження, що можуть призвести до руйнування.

У машині відбувається також старіння не металевих елементів (наприклад гуми, полімерних матеріалів), що призводить до руйнування або втрати фізико-механічних властивостей. При підвищенні навантажень та циклічній зміні температури відбувається старіння і розпад мастил та олів.

Корозія характерна для деталей машин, що працюють при підвищеній вологості або в хімічно активному середовищі.

Під впливом зовнішніх навантажень і вібрації може виникати розрегулювання машини, як наслідок, порушуються характери з'єднань, взаємодія елементів і вузлів. Внаслідок зазначених причин, а також в результаті розбирання-складання вузлів під час технічного обслуговування і ремонту машин, порушуються початкові характеристики взаємозв'язку елементів (посадка, величини зазорів, натягів і ін.). Нерівномірний знос призводить до

зміни динамічної якості машини, який визначається стійкістю системи та її реакцією на зовнішні впливи.

Процеси різної швидкості впливають один на одного. Наприклад, підвищення величина зносу, накопичення пошкоджень та інші фактори погіршують її динамічну якість. Значне збільшення вібрацій і навантажень прискорюють процеси втомних пошкоджень і зносу. Таким чином, швидкість повільно протікаючих процесів з часом зростає.

Для оцінки технічного стану машини використовують показники її технічного стану. Це, перш за все, технічні показники такі, як вантажопідйомність, потужність, швидкість, геометрична точність, економічність за витратою електроенергії (палива), технологічна точність, рівень шуму, жорсткість, ступінь розрегулювання, рівень вібрацій. Зазначені показники впливають на швидкість процесів, що протікають та формують факторами вхідного впливу на машину.

Три інші групи показників якості визначають споживчу характеристику машини, параметри роботи, які в залежності від виду робочого процесу можна оцінювати за допомогою таких показників, як вантажопідйомність, потужність, точність, швидкість, жорсткість, якість обробки і ін. Техніко-економічні показники – це продуктивність, економічність, собівартість, термін окупності, прибуток і ін. До ергономічних і естетичних показників відносяться антропометричні, психофізіологічні і гігієнічні, а також дизайн і функціональне забарвлення машини.

## **2.2. Вплив динамічних навантажень на процеси втрати працездатності**

Серед процесів, що викликають зниження працездатності машини, є такі, які відносяться до неконструктивних елементів (характер взаємозв'язку з'єднань, прилягання, дотичності, динамічні характеристики, середовище роботи з'єднань і т.і.). До процесів, що призводять до зміни динамічної якості, можна віднести розрегулювання, зміну умов контакту та ін.

Як приклад, при взаємодії двох технологічних поверхонь, можуть змінитися умови контакту: площа контакту; висота мікровиступів; товщина плівки оливи (наприклад, розрив) і т.і., що зможе змінити вихідні параметри з'єднання – коефіцієнт тертя, контактну жорсткість та ін. Для кріпильних елементів динамічні коливання або зменшення сил тертя можуть призвести до послаблення початкового затягування, що призведе до порушення нормальної роботи вузла машини. Підвищення коефіцієнта тертя в прицевійних з'єднаннях може стати причиною їх відмови.

Для машин і обладнання, що працюють в умовах підвищеного впливу високого рівня динамічних навантажень, динамічна якість визначається стійкістю системи та її реакцією на зовнішні впливи. Таким чином, стійкість системи розглядається як динамічна якість єдиної системи, що включає в себе гнучку систему машини в взаємодії з робочими процесами. Зміна відгуку гнучкої системи машини на зовнішні впливи, в процесі експлуатації, визначає зміну динамічної якості.

Динамічні навантаження визначають вхідні параметри гнучкої системи машини, яка характеризується інерційними, демпфівальними і гнучкими параметрами, та перетворюють вхідну величину  $X_{вх}$  в вихідну  $X_{вих}$  (реакція гнучкої системи):

$$X_{вих}/X_{вх} = W(P) \quad (2.1)$$

Відношення являє собою передавальну функцію системи, яку знаходять рішенням системи диференціальних рівнянь. Опис руху задається системою лінійних диференціальних рівнянь другого порядку. При їх складанні використані співвідношення між діючими на гнучку систему силами і переміщеннями її точок, що застосовуються в динамічному аналізі.



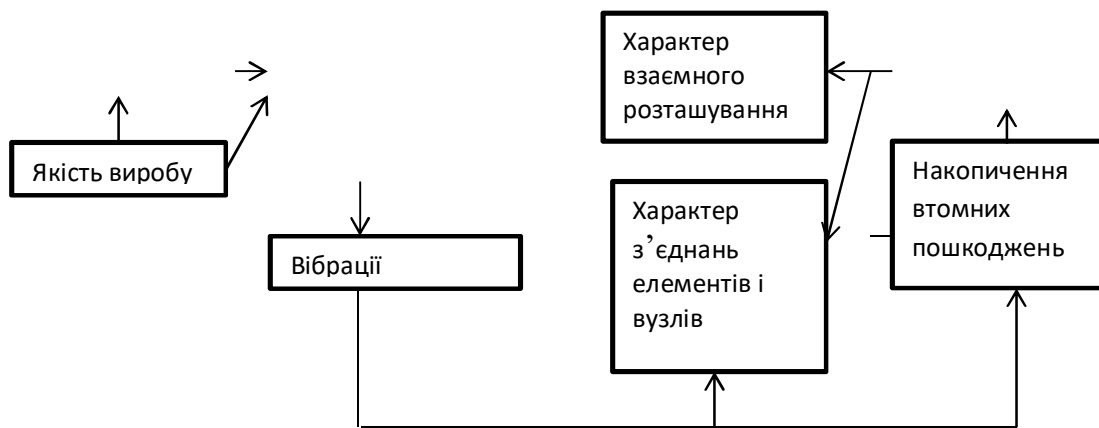


Рис 2. 2. Схема взаємодії поступових процесів втрати працездатності

Рівняння в прямій формі має вигляд:

$$m_i q_i + h_j q_i = \sum_{j=1}^n K_{ij} q_t = f_i(t) \quad (2.2)$$

де  $m_i$  – маса;

$h_j$  - коефіцієнт демпфірування;

$K_{ij}$  - коефіцієнт жорсткості;

$f_i(t)$  - зовнішні фактори;

$q_i$  – переміщення.

Коефіцієнти в лівій частині рівняння встановлюють розрахунковим шляхом або при відсутності необхідних даних – дослідним. В правій частині рівняння руху визначаються залежностями динамічних навантажень у функції часу.

Джерелами зовнішніх навантажень в машинах і обладнанні є: відцентрові сили інерції неврівноважених обертаючих мас; коливання робочих навантажень, сили різання; кінематичні навантаження, що пов'язані з похибками геометрії рухомих з'єднань; сили інерції мас, що здійснюють зворотно-поступальний або обертальний рух.

Дослідження показали, що в процесах старіння машин відіграють домінуючу роль тільки ті навантаження, при яких гнучкі системи коливається з найбільшими амплітудами. Це дозволяє, з достатньою для практичних цілей

точністю, представити зовнішній вплив у вигляді гармонійних навантажень, не враховуючи високочастотні з малими амплітудами.

Для багатьох процесів, що призводять до втрати працездатності машин, є суттєвим взаємозв'язок динамічних навантажень і зносу (рис 2.2). Вібрації що виникають при динамічному навантаженні визначають інтенсивність протікання процесів зношування, перерозподіл внутрішніх напружень і накопичення втомних напруг в елементах машин. Це, в свою чергу, визначає характер взаємного розташування елементів між собою і величину контактної жорсткості в рухомих з'єднаннях. Зміни характеру контакту в рухомих з'єднаннях є причинами втрати стійкості гнучкої системи машини. Рівень навантажень і вібрацій змінюється, що знову призводить до зміни інтенсивностей протікання процесів.

Зв'язок динамічних навантажень і зносу призводить до багаторівневого впливу на працездатність. По-перше, нерівномірний знос в рухомих з'єднаннях порушує геометрію взаємного розташування контактуючих поверхонь, що в кінцевому результаті зменшує жорсткість, як за рахунок зменшення фактичної поверхні контакту, так і за рахунок зменшення величини попереднього зазору чи натягу, що лімітують геометричну точність. Це позначається на пружних і демпфуючих характеристиках машини в цілому, тобто на динамічній якості: збільшується модуль передавальної функції; зменшується запас стійкості. По-друге, нерівності в рухомих з'єднаннях, при відносному русі контактуючих поверхонь, створюють кінематичні навантаження, та збільшують рівень вібрацій. Зазначені фактори багаторівневого впливу призводить до збільшення рівня реакцій гнучких систем та підвищують інтенсивність процес зносу.

Якщо знос протікає рівномірно по всій поверхні контакту, він легко компенсується регулюванням механізмів машин та обладнання. Зазначені побічні ефекти зумовлені не абсолютною величиною зносу, а його нерівномірністю.

Оскільки в машинах та обладнанні вимоги до точності роботи окремих вузлів відносно невисокі, зноси в рухомих з'єднаннях не призводять до

швидкого зниження якості їх роботи. Машини та обладнання продовжують працювати зі зниженою, але допустимою для виробництва ефективністю. Величина накопиченого зносу може досягати значень десятих часток і навіть цілих міліметрів. В зв'язку із зазначеним, процес втрати машиною якісних характеристик, у міру накопичення зносу, супроводжується значною зміною контактної жорсткості, а також виникненням додаткових динамічних навантажень. Тому для машин та обладнання, особливо при визначенні їх довговічності, визначальне значення має взаємозв'язок розглянутих процесів.

### **2.3. Показники технічного стану машин та обладнання**

Технічний стан і якість машин та обладнання характеризуються сукупністю основних техніко-економічних параметрів і показників, що визначають ступінь досконалості даного об'єкта в порівнянні з кращими вітчизняними і зарубіжними аналогами.

Номенклатура обраних для оцінки показників повинна найбільш точно характеризувати функціональне призначення, корисний ефект, витрати матеріальних, енергетичних і трудових ресурсів, технологічність, безпеку, екологічність, ергономічність і ін.

В стандартах обґрунтована наступна номенклатура основних груп показників якості за якими характеризуються властивості об'єктів: показники призначення; показники стандартизації і уніфікації; показники надійності; показники технологічності; ергономічні; естетичні; показники транспортабельності; патентно-правові показники; екологічні показники; показники безпеки.

Всі показники можна умовно розділити на дві групи. До першої увійдуть показники, що залишаються незмінними протягом всього терміну експлуатації

машини, наприклад, показники рівня автоматизації, стандартизації або матеріаломісткості. Вони лише дозволяють оцінити відповідність машини сучасним вимогам. До другої групи належать показники, які безпосередньо характеризують технічний стан машин та обладнання в даний момент. Вони можуть мати необхідні нормативні значення на момент атестації технічного рівня, але в процесі експлуатації ці значення можуть знижуватися. Тому необхідна періодична оцінка значень цих змінних показників з метою встановлення відповідності технічного стану машини до її технічного рівня.

Під технічним станом машин та обладнання слід розуміти сукупність дійсних значень показників експлуатаційних властивостей, що визначають ступінь придатності об'єктів для використання за призначенням в даний момент часу.

Основним документом при виборі значень показників технічного стану є карти технічного рівня і якості, що узгоджуються зі споживачами.

Можливість об'єктивної оцінки технічного стану машин, динаміки трансформації показників технічного стану в часі, а також аналіз причин їх зміни є найважливішими умовами для створення науково обґрунтованої, ефективною і оптимальної системи технічного обслуговування і ремонту техніки та забезпечення її надійності.

Для оцінки технічного стану машин та обладнання застосовують наступні групи показників: призначення, надійності, екологічні, безпеки і деякі інші.

Показники призначення характеризують властивості об'єкта, які визначають основні функції згідно з його призначенням та обумовлюють область його застосування. До них відносяться: класифікаційні показники; показники функціональної і технічної ефективності; показники складу і структури.

Для машин та обладнання найбільш важливими показниками представленої групи є: продуктивність; технологічна точність; шорсткість технологічних поверхонь; геометрична точність; жорсткість; вібростійкість.

Для мобільних енергетичних засобів і вантажопідйомних машин технічний стан характеризується показниками, що визначають стан машини в цілому та її

окремих функціональних вузлів. Так, наприклад, для автомобіля до показників технічного стану можна віднести: час розгону в заданому інтервалі швидкості; час або шлях пробігу; контрольна витрата пального; потужність або тягова сила на привідних колесах. Для систем двигунів внутрішнього згорання це: ефективна потужність на колінчастому валу; тиск в кінці такту стискання в циліндрах; тиск оливи в головній магістралі, вміст СО у відпрацьованих газах; розрідження у впускному трубопроводі. Технічний стан трансмісії характеризується наступними показниками: потужністю, що витрачається на її привід; кутовим зазором в карданній передачі; биттям карданного валу; робочою температурою в агрегатах і ін.

Екологічні показники характеризують рівень впливу шкідливих факторів на навколишнє середовище, що виникають при експлуатації машин та обладнання. Для обґрунтування обліку цих показників проводиться аналіз процесів експлуатації об'єктів з метою виявлення можливих механічних, біологічних, хімічних, вібраційних та інших впливів на навколишнє природне середовище. До екологічних показників відносяться: вміст шкідливих домішок; концентрація пару або пилу; ймовірність шкідливих випромінювань і т. і. Показники безпеки характеризують особливості машин, що забезпечують безпеку обслуговуючого персоналу при їх використанні.

В свою чергу показники безпеки повинні відображати вимоги, що зумовлюють заходи і засоби захисту персоналу в умовах аварійних ситуацій, що не передбачені правилами експлуатації в зоні можливої небезпеки. Прикладами показників безпеки можуть бути: вірогідність безпечної роботи протягом технологічного часу; період спрацювання захисних пристроїв, електрична міцність ізоляції провідників та ін.

## **2.4. Питання для обговорення та самоперевірки**

1. Під дією зовнішніх і внутрішніх впливів та яких видів енергії погіршується якість виробу?



2. Як механічна енергія діє на машину в процесі експлуатації?
3. Як теплова енергія діє на машину в процесі експлуатації?
4. Як хімічна енергія діє на машину в процесі експлуатації?
5. Які зовнішні фактори формують технічний стан та експлуатаційну якість машин і обладнання.
  6. Назвати незворотні процеси, що повільно призводять до зміни їх технічного стану.
  7. Назвати незворотні процеси, що призводять до зміни їх технічного стану з середньою швидкістю.
  8. Як при формуванні технічного стану машини і оцінці її якості враховується роль людини?
  9. Як при формуванні технічного стану машини і оцінці її якості враховується роль середовища?
  10. Які процеси призводять до зміни динамічної якості машин?
  11. Чи дія динамічних навантажень і зносу призводить до багаторівневого впливу на працездатність?
  12. Назвати показники технічного стану деталей.
  13. Охарактеризувати показники призначення при оцінці технічного стану виробів машинобудування.
  14. Охарактеризувати екологічні показники при оцінці технічного стану виробів машинобудування.
  15. Охарактеризувати показники безпеки при оцінці технічного стану виробів машинобудування.

## **РОЗДІЛ 3. ФІЗИКА ВІДМОВ**

### **3.1. Процеси старіння, класифікація та характеристика**

Як було відзначено в попередньому розділі, переважна більшість незворотних змін в машинах та обладнанні проявляється в результаті дії параметричних процесів відмов. Під впливом цих процесів відбувається зміна початкових властивостей і стану матеріалів, з яких виготовлені елементи машини. Параметричні процеси відмов є основною причиною втрати справності чи працездатності. Зазначені зміни можуть призвести до пошкодження деталей і вузлів, переходу їх до граничного стану та стати причиною виникнення відмови машини. Досконале вивчення закономірностей, що описують процеси зміни властивостей і стану матеріалів, дають можливість з більшою вірогідністю прогнозувати технічний стан машини при використанні.

Процесами старіння називаються закономірності, що описують незворотні процеси втрати працездатності, дозволяють оцінити зміни початкових властивостей матеріалів, що відбуваються або можуть відбутися в процесі експлуатації об'єкта. Закономірності старіння слід відрізнити від закономірностей зміни стану об'єкта, що описують взаємозв'язок зворотніх процесів. Закономірності старіння, що оцінюють ступінь пошкодження матеріалу в функції часу, дозволяють прогнозувати хід процесу старіння, визначати можливі його реалізації та виявляти найбільш значимі чинники, які

впливають на інтенсивність процесу. Характерним прикладом служать закономірності зносу матеріалів, які на основі розкриття фізичних особливостей взаємодії поверхонь тертя, формують методи для розрахунку інтенсивності процесу зношування або величини зносу в функції часу та можливість оцінювати параметри, що впливають на хід процесу.

Закономірності, що описують хід процесу старіння в функцію часу, можуть бути використані для інших видів пошкоджень. Вони можуть бути використані: для визначення швидкості розвитку втомних тріщин, що отримані для оцінки втрати працездатності при повзучості; для дослідження змiну коефіцієнта тертя при роботі з'єднань; для дослідження залишкових напруг в деталях складної конфігурації; зміни в часі властивостей полімерних матеріалів і ін.

Будь-який процес старіння виникає і розвивається під впливом і визначенні зовнішніх умов. Для оцінки характерних видів пошкодження матеріалів деталей машин необхідно встановити область проходження процесів старіння, в першу чергу умови їх виникнення. Для реалізації того чи іншого процесу старіння повинен бути визначений певний рівень навантажень, швидкостей, температур або інших параметрів.

Класифікацію процесів старіння слід проводити в залежності від встановленого зовнішнього впливу (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

### Класифікація процесів старіння

Об'єкт	Зовнішній прояв процесу	Різновиди процесів
Тіло деталі (об'ємні явища)	Руйнування	Крихке руйнування, в'язке руйнування
	Деформація	Пластична деформація, повзучість, зміна форми
	Зміна властивостей матеріалу	Зміна: структури механічних властивостей; хімічного складу; магнітних властивостей; забруднення рідин
Поверхня (поверхневі явища)	Зміна умов контакту	Зміна площі контакту, висоти мікровиступів, суцільності шару оливи

	Роз'їдання	Корозія, кавітація, ерозія, прогар, тріщиноутворення
	Наріст	Налипання, адгезія, когезія, адсорбція, дифузія, нагар, накип
	Зміна властивостей поверхневого шару	Зміна шорсткості, твердості, напруженого стану, відбивної здатності
	Знос	Зношування, втома поверхневих шарів, зминання, перенесення матеріалу

Закономірності процесів старіння оцінюють швидкістю  $\gamma$  протікання процесу пошкодження  $U$  деталі в часі  $t$ :

$$\gamma = \frac{dU}{dt} \quad (3.1.)$$

Володіючи інформацією про тимчасову характеристику  $\gamma(t)$ , можна визначити ступінь пошкодження як функцію часу:

$$U(t) = \int_0^t \gamma(z) dz \quad (3.2)$$

Всі процеси старіння є випадковими, і розглядаються у ймовірнісному аспекті. Це пов'язано з двома основними причинами. По-перше, початкові властивості матеріалу і геометричні параметри об'єкта мають розсіювання, оскільки є об'єктом певного технологічного процесу, що характеризується відповідною точністю і стабільністю. По-друге, ймовірнісна природа процесів старіння пов'язана з широкою варіацією режимів роботи та умов експлуатації машин. В результаті залежності, що описують процеси старіння, стають функціями випадкових аргументів - навантажень, швидкостей, температур та ін.

Спостереження за процесами зношування та руйнування деталей машин в процесі експлуатації дозволяють виділити три основних види пошкоджень деталей:

- 1) зношування (механічне, корозійно-механічне, при дії електричного

струму);

2) корозійні пошкодження (хімічна корозія, електрохімічна корозія);

3) деформація та руйнування (крихкий злом, в'язкий злом, залишкова деформація, втомний злом, контактні втомні пошкодження; руйнування при повзучості).

### 3.2. Класифікація та характеристики процесів тертя і зношування

Питаннями тертя і зношування займається спеціальна наука – триботехніка. Це наука про контактну взаємодію твердих тіл при їх відносному переміщенні, що охоплює весь комплекс питань тертя, зношування та мащення з'єднань машин та обладнання. В останні роки в триботехніці отримали розвиток нові розділи – трибохімія, трибофізика і трибомеханіка. У деяких країнах замість терміну триботехніка вживають терміни трибологія і трибоніка.

Основні терміни, що відносяться до триботехніки, регламентовані стандартами та класифіковані за видами тертя, зносу, мащення та мастильними матеріалами.

Розрізняють внутрішнє тертя – в самому середовищі, рідині або газі, і зовнішнє, що пов'язане з контактом твердих тіл при їх відносному переміщенні. Зовнішнє тертя – це явище опору відносному переміщенню, що виникає між двома тілами в точках дотику поверхонь по дотичних до них.

Під силою тертя  $F_T$  розуміють силу опору відносному переміщенню, що виникає при переміщенні двох тіл при терті і направлену протилежно цьому переміщенню. В залежності від того, чи являється відносно переміщення контактуючих пар макро- або мікрозміщенням, розрізняють силу тертя руху, неповну силу тертя спокою, найбільшу силу тертя спокою.

Неповна сила тертя спокою – це є сила опору руху при малих частково зворотніх тангенціальних переміщеннях, які викликаються попередніми зміщеннями. Ця сила реалізується в парах тертя, в яких не виникає їх неперервне

ковзання.

Найбільша сила тертя спокою – це сила граничного опору відносному переміщенню контактуючих тіл без порушення зв'язків між ними і при відсутності зміщення в контакті.

Сила тертя руху – це є опір тангенціальному переміщенню контактуючих тіл, що не залежать від величини переміщення. За характером відносно руху, розрізняють тертя ковзання і тертя кочення. Тертя ковзання – це тертя руху, при якому швидкості дотичних тіл в точках контакту різні за величиною і напрямком або лише за величиною або лише за напрямком. Тертя кочення – це тертя руху двох дотичних твердих тіл, при якому їх швидкості в точках контакту однакові за величиною і напрямком. На практиці, в чистому вигляді, тертя кочення практично не реалізується. В підшипниках, зубчатих колесах, напрямних кочення має місце тертя кочення з ковзанням.

Руйнування будови підповерхневих шарів матеріалу з'являється також при механічній обробці поверхонь деталей та в процесі тертя під впливом деформування цих шарів та зміни температури.

Компоненти навколишнього середовища адсорбуються на поверхнях твердих тіл і внаслідок хемосорбції утворюють плівки хімічних з'єднань з твердим тілом. У найпростішому випадку це плівки оксидів.

Таким чином, підповерхневі шари мають спотворену будову, містять плівки оксидів, поверхнево-активні речовини (органічні кислоти, спирти, смоли) і один моношар адсорбованих парів вологи або газів. Дуже часто для зменшення силової взаємодії тіл, що взаємодіють в умовах тертя, застосовують мастило. Отже, при зовнішньому терті взаємодія відбувається не між твердими тілами, а між плівками, які їх покривають.

Залежно від стану поверхонь твердих тіл прийнято розрізняти тертя без мащення, граничне тертя і рідинне тертя.

Тертям без мащення називається тертя двох твердих тіл при відсутності на поверхнях тертя мастильного матеріалу. При роботі з'єднання деталей у вакуумі коефіцієнт тертя становить 0,7...0,8. У реальних умовах експлуатації на

поверхневих шарах контактуючих тіл з'являється адсорбований шар, що знижує коефіцієнт тертя до 0,15. . 0,2. Слід зазначити, що адсорбований шар зявляється вже через 1 сек після взаємодії контактуючих поверхонь.

При терті без мащення взаємодія поверхонь має молекулярно-механічну природу: об'ємне деформування матеріалу та руйнування міжмолекулярних зв'язків. Молекулярний вплив обумовлено взаємодією двох тіл, їх адгезією; механічне – взаємним проникненням елементів контактуючих поверхонь і витратами енергії на пружнопластичне деформування та передеформування поверхонь контакту при відносному їх переміщенні.

Таким чином, сила тертя  $F_T$  обумовлена (*a*) механічною і (*b*) молекулярною взаємодіями:

$$F_T = aS_\phi + bF_d \quad (3.3)$$

де *a* – середня інтенсивність молекулярної складової сили тертя;

$S_\phi$  – фактична площа контакту;

*b* – коефіцієнт, який характеризує механічну складову сили тертя;

$F_T$  – сила тиску.

Під коефіцієнтом тиску розуміють відношення сили тертя руху до нормальної складової зовнішніх сил, що діють на поверхнях тертя. На основі формули 3.3 маємо:

$$f = \frac{aS_\phi}{F_d} + b \quad (3.4)$$

Вирази вигляду (3.3) і (3.4), що складаються з двох складових, для сили тертя і коефіцієнта тертя, дійсні також для тертя із мастильним матеріалом.

Тертя без мастильного матеріалу супроводжується стрибкоподібним ковзанням поверхні, з чим пов'язані вібрації мобільних енергетичних засобів при ввімкненні зчеплення, «писк» гальм, нерівномірність руху при гальмуванні, вібрація різця при механічній обробці деталей.

Граничним тертям називається тертя двох твердих тіл при наявності на поверхнях тертя шару оливи, що характеризується властивостями, які відрізняються від об'ємних. В цьому випадку між поверхнями, що контактують знаходиться дуже тонкий (до 0,1 мкм) шар оливи, який значно зменшує інтенсивність зносу, але повністю його не усуває. Через наявність розривів шару оливи, тертя проходить по контактах мікроступів поверхонь деталей. Безпосередній контакт в місцях розриву шару оливи, дія значних зусиль призводять до зносу поверхонь внаслідок втоми і пластичного деформування мікронерівностей. Молекулярне зчеплення і розклинююча дія оливи, що потрапляє в мікротріщини, також сприяють руйнуванню поверхневих шарів матеріалу. Коефіцієнт тертя при граничному терті може знаходитись в межах 0,01...0,15.

Рідким тертям називається явище опору відносному переміщенню, що виникає між двома тілами, розділеними шаром оливи, в якому проявляються їх об'ємні властивості. Для даного випадку шар оливи настільки великий, що усуває контакт поверхонь, що працюють в умовах рідинного тертя. Олива в місцях тертя знаходиться під тиском, який врівноважує зовнішнє навантаження, яке діє на з'єднання. Зазначений режим тертя характеризується досить малими коефіцієнтами внутрішнього тертя (0,001...0,01) і являється оптимальним як з точки зору витрати енергії, так і підвищення довговічності та зносостійкості. Механізм зносу можна представити як процеси кавітаційного зношування і абразивного, при попаданні твердих частинок в оливу, зношування та руйнування оксидної плівки на поверхнях тертя.

Зношування – це процес поступової зміни форми, розмірів та маси тіла при терті, який відокремлює матеріал від поверхонь тертя і (або) є проявом залишкової деформації.

Основною характеристикою процесу зношування є знос  $\eta$ , який визначається як результат зношування і вимірюється в напрямку, що перпендикулярний поверхні тертя.



Відношення величини зносу до часу, протягом якого він відбувається, називається швидкістю зношування  $\xi$ :

$$\xi = d\eta/dt \quad (3.5)$$

Відношення величини зносу до шляху, на якому відбувся знос, або до обсягу виконаної роботи називається інтенсивністю зношування  $I$ :

$$I = d\eta/dS \quad (3.6)$$

Зносостійкістю називається властивість матеріалу чинити опір зношуванню при певних умовах тертя. Зносостійкість оцінюється величиною, що є зворотною швидкості або ж інтенсивності зношування.

Якщо відкласти по осі абсцис час  $t$  роботи пари тертя (рис. 3.1), а по осі ординат знос  $\eta$ , то отримаємо криву залежності зношування поверхні деталі від часу. Тангенс кута нахилу  $\alpha$ , утвореного віссю абсцис і дотичною до кривої в довільній точці, визначає швидкість зношування в даний момент часу.

На кривій залежності зношування від часу, в загальному випадку можна виділити три характерні ділянки, що відповідають трьом стадіям зношування: I – ділянка початкового зношування (припрацювання); II – врівноваженого зношування при нормальній експлуатації з'єднання ( $\text{tg } \alpha = \text{const}$ ); III – граничний знос (процес інтенсивного зростання швидкості зношування).

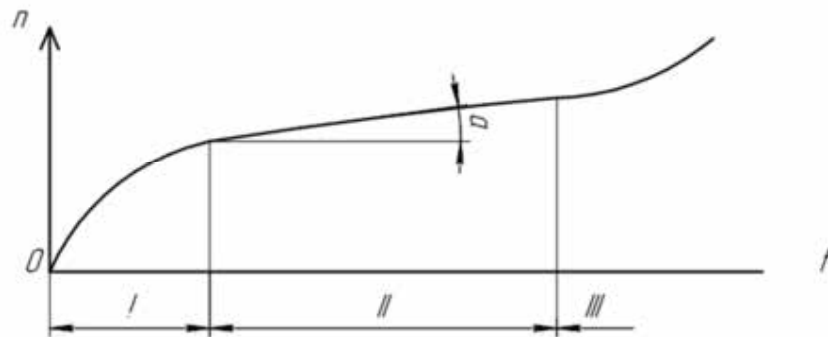


Рис 3.1. Періоди протікання процесу зношування від часу

У період припрацювання мають місце наступні руйнівні процеси: інтенсивне пластичне деформування; часткове зминання; руйнування нерівностей на поверхнях тертя. Зношування мікронерівностей, згладжування макронерівностей і хвилястості поверхонь супроводжується збільшенням площі контактуючої поверхні та зниженням інтенсивності зношування поверхонь деталей з'єднання. Залежно від виду машини та обладнання, умов їх експлуатації період припрацювання може проходити протягом перших 50...200 год. роботи. Якісний період припрацювання повинен мінімізувати можливість виникнення відмов в процесі нормальної експлуатації машини.

Врівноважене зношування, за нормальних умов експлуатації з'єднання, може супроводжуватись процесами деформування, руйнування або безперервного відтворення вихідних властивостей на окремих ділянках поверхневих шарів матеріалу. Поступове накопичення зносу може проходити за лінійною залежністю  $\eta(t)=at+b$  або близької до неї. Цей етап відповідає періоду нормальної експлуатації машини, коли виникає поступове погіршення початкових параметрів.

У зоні граничного зносу відбувається різке збільшення інтенсивності зношування  $\zeta$ . При певних величинах накопиченого зносу можуть значно змінюватися властивості з'єднання. Збільшення зазорів в з'єднаннях погіршує умови мащення, підвищує динамічні навантаження, призводить до зношування зміцненого шару поверхні тертя та зиження зносостійкості.

Зазвичай вважають, що I і III етапи знаходяться за межами нормальної експлуатації деталей. Припрацювання проходить під час обкатки машини, і за нормальних умов експлуатації з'єднання пряцюють до граничного стану. Для з'єднань зі змінними елементами, в певний момент часу одна з деталей більше зношується, переходить в граничний і замінюється новою. В окремих з'єднаннях протягом певного періоду роботи відбувається рівномірне припрацювання обох

деталей за підвищеної інтенсивності зношування. Після завершення періоду припрацювання розпочинається період врівноваженого зношування.

Залежно від зовнішніх впливів, середовища і властивостей матеріалів деталей, які працюють в умовах тертя, можуть виникати механічні, хімічні та теплохімічні процеси.

Один з них завжди є переважаючим, що визначає характер процесу зношування. Згідно з цим положенням, дослідження ряду складних явищ в деталях машин можливо звести, в кожному конкретному випадку, тільки одного, переважаючого виду зносу. Той або інший вид руйнування залежить як від властивостей матеріалів деталей пари тертя, так і від великої кількості зовнішніх факторів і їх поєднань. Однак в певному діапазоні зміни зовнішніх факторів вид руйнування залишається незмінним, типовим для даних умов контактування.

У зв'язку із зазначеним на рис. 3.2 представлена класифікація основних видів зношування деталей. Всі види зношування можна розподілити на механічні, молекулярно-механічні та при дії електричного струму.

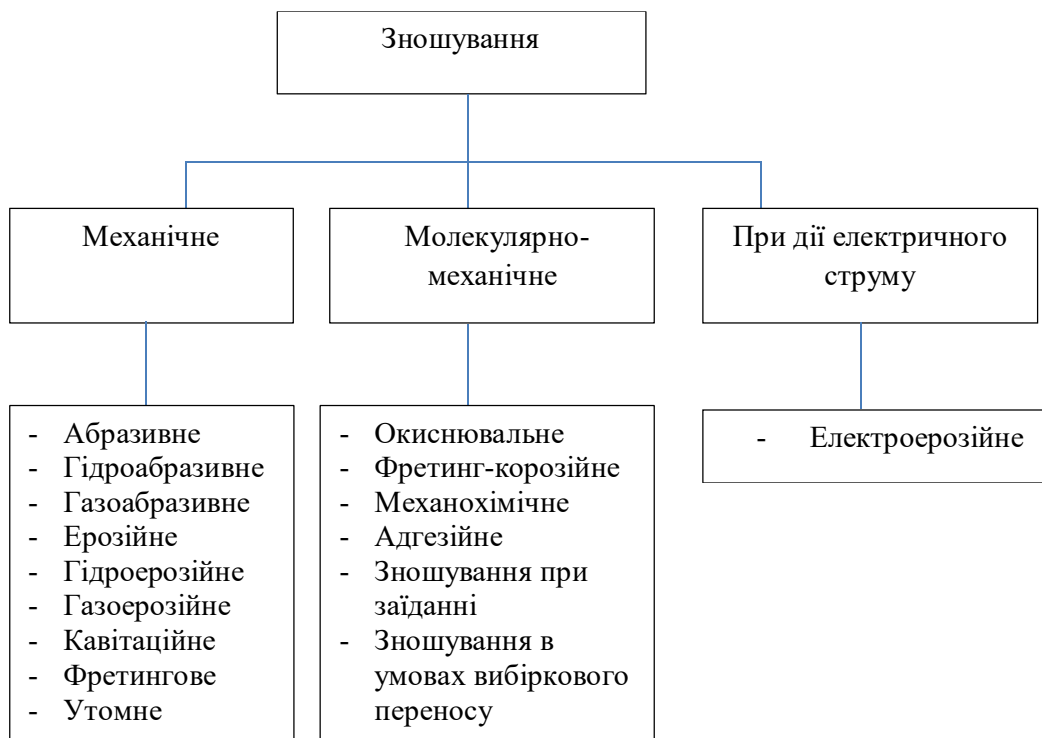


Рис. 3 2. Класифікація видів зношування деталей

Механічне зношування – це зношування, що відбувається внаслідок механічних впливів під час тертя. В залежності від характеру впливів розрізняють наступні види механічного зношування.

Абразивне зношування – це механічне зношування матеріалу внаслідок дії твердих тіл або частинок, які ріжуть чи дряпають поверхню матеріалу. Зазначений вид механічного зношування має місце при терті ковзанні або кочення з ковзанням. Абразивні частинки потрапляють на контактуючі поверхні з'єднання ззовні (відходи обробки, забруднення) або є продуктами самого зносу, причому кожна частинка є мікрорізьцем, який в залежності від розмірів, форми, кутових параметрів може пластично деформувати, дряпати або навіть зрізати мікростружку з поверхонь тертя. Механізм абразивного зношування визначається, головним чином, з порівнянням твердості матеріалів деталей пар тертя  $H_m$  і твердості абразивних частинок  $H_a$ .

В процесі абразивного зношування утворюється пилю, відходи обробки (стружка, тирса), оксидні плівки (закріплені на поверхні тертя або зруйновані), продукти нагару і накипу, частинки твердих структур, що утворюються при викришуванні матеріалу контактуючих тіл. Для більшості металів твердість оксидних плівок більша, ніж твердість самих металів. Як приклад, поршні з магнієвих сплавів менше дряпають і утворюють задири на стінках циліндрів, ніж поршні з алюмінієвих сплавів. Окремі елементи конструкцій агрегатів працюють в умовах підвищених температур, при яких можливе погіршення механічних властивостей матеріалів деталей.

Агресивні середовища, що викликають електрохімічні процеси на поверхнях деталей, інтенсифікують процеси зношування та частково перетворюють їх в корозійно-механічні.

Процес руйнування деталі при ударній взаємодії між деталлю і абразивом називають ударно-абразивним зношуванням.

Таким руйнаціям піддаються, наприклад, деталі гусеничних ходових систем. Ударно-абразивне зношування поверхонь деталей відбувається при їх

взаємодії з монолітним або вільним абразивом, що є в ґрунті. Також, для ударно-абразивного зношування характерне утворення на поверхнях деталей каверн в результаті локальної пластичної деформації. При абразивному зношуванні, без ударної взаємодії, поверхні тертя покриваються подряпинами, що розташовуються в напрямку руху абразивних частинок.

Абразивні частинки, що потрапили в зазори пар тертя, під дією навантаження можуть вмитися в поверхні деталей, дробитися на дрібніші фракції, ковзати або перекочуватись вздовж поверхонь зношування, пружно або пластично деформувати їх. Також абразивні частинки можуть потрапляти в робочі порожнини вузлів та агрегатів разом з повітрям, паливом, олівами і мастильними матеріалами. Найбільший вплив на інтенсивність зношування задають частинки кварцу, що мають твердість близько 12 ГПа. Очистна здатність фільтрів, як правило, не перевищує 98-99%, таким чином, 1 або 2% пилу може потрапити, наприклад, в циліндри двигуна внутрішнього згорання. Враховуючи середню запиленість повітря при експлуатації тракторів, комбайнів, автомобілів, з кожним кубічним метром повітря в системі двигуна може потрапити понад 5000 мг пилу. Найбільшому абразивному зношуванню піддаються циліндри та поршневі кільця. Так, двигун автомобіля що експлуатується в запиленому середовищі, потребує капітального ремонту після пробігу 30 ... 50 тис. км, тоді як в нормальних умовах експлуатації його доремонтний ресурс може становити 150 тис. км і більше. Слід враховувати, що абразивний знос в двигунах внутрішнього згорання також може бути обумовлений і нагаром, тобто накопиченням на поверхнях деталей камери згорання забруднень, що складаються з карбонів.

Гідро- і газоабразивне зношування відбувається під дією рухомих твердих частинок пилу, стружки, продуктів згорання та зносу, що переносяться потоками рідин або газів. Значений вид зносу залежить від швидкості удару частинок і кута нахилу вектора швидкості до поверхні деталі (кут атаки), що зношується. Крім того, на гідро- і газоабразивний знос мають вплив концентрація абразивних частинок, їх форма, твердість, динамічна міцність, а також фізико-механічні

властивості матеріалів деталей.

Інтенсивність зношування за масою (втрата маси, що відповідає 1 кг абразиву, що може потрапити на поверхні деталей) пов'язана зі швидкістю частинок:

$$I = kv^m \quad (3.7)$$

де  $k$  – коефіцієнт, що залежить від властивостей зношуваного і абразивного матеріалів, а також від кута атаки;

$v$  – швидкість потоку рідини або газу;

$m$  – коефіцієнт, що враховує швидкість потоку.

Зі збільшенням концентрації абразивного струменю інтенсивність зношування може сповільнюватись в зв'язку з інтенсифікацією ефекту екранування при відбиванні частинок. Зі збільшенням розмірів абразивних частинок до 150 мкм спостерігається монотонне зростання швидкості зношування. Негативний вплив на швидкість проходження газоабразивного процесу зношування створює вміст вологи в повітряному середовищі.

Гідро- і газоабразивне зношування досить часто зустрічаються в агрегатах і вузлах машин та обладнання. Зазначені види зношування характерні: для деталей гідравлічних систем тракторів і комбайнів, автомобілів і обладнання; газорозподільні механізми двигунів внутрішнього згорання; пневматичні системи машин та обладнання.

Швидкість процесу зношування можна істотно зменшити шляхом застосування високотвердих металевих сплавів, нанесення зносостійких матеріалів та матеріалів спеціальної структури.

Утомне зношування – це зношування поверхонь тертя або окремих їх ділянок в результаті багаторазового деформування мікрооб'ємів поверхневого шару матеріалу, що призводить до виникнення утомних тріщин і відокремлення частинок. Механізм утомного зношування визначається напруженим станом активних об'ємів матеріалу поверхонь тертя і особливими явищами утоми при дії багаторазових циклічних навантажень. Слід розрізняти контактну утому

поверхневих шарів при терті коченні і утомний знос при терті ковзанні. Циклічні напруження стиснення і зсуву, що виникають під дією прикладених зусиль при коченні, а також залишкових напружень, що обумовлені механічною обробкою і пластичним деформуванням матеріалу поверхневих шарів під навантаженням та призводять до появи мікро- і макро- тріщин. Мікро- і макро- тріщин можуть розвиватися до появи віспоподібних поглиблень, впадин і каверн. Таке явище на практиці називають терміном «пітінг». Процес вищерблення, що проявляється може припинитися, а поглиблення, впадини і каверни, що утворилися, можуть загладитись. Для даного випадку має місце обмежене або початкове викришування, що не призводить до інтенсивного зносу. При підвищенні інтенсивності викрашування спотворюється профіль контактуючих поверхонь деталей, підвищуються контактні, виникають додаткові динамічні навантаження та вібрації.

При терті ковзанні кожен виступ поверхні тертя формує перед собою хвилю деформованого матеріалу на поверхні контртіла. Виступи стискають перед собою матеріал контртіла, незначно розтягують його на гребені хвилі і допустимо на певній відстані за собою. Значна робота витрачається на утворення і виглажування малих нерівностей на поверхні хвилі. Матеріал, що зміщений в сторону, може бути наступним виступом, що відсунутий назад. Таким чином, кожен перетин поверхні тертя деталі знаходиться під впливом послідовно діючих напружень розтягу та стискання. Повторно діюче на поверхню деталі навіть незначне навантаження може призвести до виникнення утомних тріщин з подальшим руйнуванням поверхневих шарів.

Утомне зношування в машинах та обладнанні проявляється на робочих поверхнях подшипників кочення, зубчастих і фрикційних передачах, напрямних кочення та ковзання, кулачкових механізмах та ін.

Ерозійне зношування – це руйнування поверхонь матеріалів внаслідок механічної взаємодії з високошвидкісними потоками рідини, газу або пару. Цей вид зношування складається з механічної взаємодії між суцільними та змінними ударними потоками та поверхнями деталей. В результаті тертя відбувається

відшарування та вимивання певних об'ємів матеріалу. Залежно від властивостей матеріалу можливі відокремлення окремих об'ємів або відшарування ділянок в залежності від прикладених сил. У пластичних матеріалах спочатку накопичуються мікропластичні деформації на окремих ділянках, а при наближенні до межі міцності ці ділянки руйнуються, вимиваються. Рідини (паливо, олива) при ударах в місця утворених мікротріщин, проявляються у вигляді клину, розсувають та руйнують стінки тріщин. Інтенсивність пошкоджень в процесі ерозії може бути значною, якщо потік газу або рідини буде мати велику кінетичну енергію та може створювати значні напруження в поверхневому шарі

Руйнуванню від дії ерозії піддаються робочі крайки розподільників гідравлічних агрегатів високого тиску, поршневі кільця двигунів внутрішнього згоряння. Плив гарячої газової ерозії на теплозахисні покриття деталей проявляється під дією відпрацьованих газів, що рухаються з великою швидкістю.

Кавітаційне зношування – це механічне зношування поверхні за умови відносного руху твердого тіла в потоці рідини при кавітації. При цьому в потоці рідини створюються бульбашки пару і газу, які при переході в зону високої температури та тиску, конденсуються і створюють умови для місцевого гідравлічного удару. Дослідженнями встановлено, що кавітаційна бульбашка може вирости за 0,002 с до 5 мм в діаметрі і повністю зруйнуватися за 0,001 с. При інтенсивній кавітації на площі 1 см<sup>2</sup> протягом 1 с можуть утворитись і зруйнуватись понад 30 млн. кавітаційних бульбашок. Вплив на поверхню може бути таким значним, що з'являються глибокі каверни, впадини внаслідок перенаклепу матеріалу з утворенням місць руйнування у вигляді мікротріщин.

Вібраційна кавітація проявляється на зовнішніх поверхнях гільз циліндрів двигунів внутрішнього згоряння внаслідок вібрації. При цьому знос зовнішньої поверхні гільзи в охолоджувальній рідині може бути в 3-4 рази більшим, ніж знос її внутрішньої поверхні від дії поршневих кілець. Значну небезпеку являє кавітаційне руйнування опорних буртів гільз і блоку циліндрів, що призводить до проникнення охолоджувальної рідини в в циліндри і картер двигуна.



Молекулярно-механічне зношування.

Молекулярно-механічне зношування має місце при одночасному механічному впливі і дії молекулярних або атомарних сил. До даної групи видів зношування відносяться: зношування при заїданні; окислювальне; механохімічне; адгезійне; фретинг-корозійне; зношування в умовах вибіркового переносу частинок матеріалу;

Зношування при заїданні – зношування в результаті схоплювання, глибинного виривання матеріалу, перенесення його з однієї поверхні тертя на іншу та впливу утворених нерівностей на поверхні деталей з'єднання. Сутність процесу полягає в місцевому контакті поверхонь двох твердих тіл під дією молекулярних сил та створення міцних металевих зв'язків. Необхідною передумовою для створення умов схоплення на поверхнях тертя є руйнування мастильної плівки. Схоплення також може відбутися під дією високих температур при пружній деформації поверхневих шарів, при дії пластичних деформацій поверхневих шарів або ж при спільній дії двох зазначених факторів.

Процеси схоплення і глибинного виривання спостерігаються при терті ковзання з малими швидкостями відносного переміщення поверхонь і при питомих тисках, що перевищують межу текучості на ділянках фактичного контакту. Зазначені руйнівні процеси можуть проходити при відсутності шару оливи (або її руйнуванні) та захисного окисного шару в місцях контакту деталей з однорідних матеріалів. Одночасно ці процеси можуть виникати при терті ковзанні з великими швидкостями відносного переміщення поверхонь тертя, що обумовлює високе інтенсивне підвищення температури в поверхневих шарах матеріалів та створює стан «термічної пластичності». Такі процеси схоплення і глибинного виривання матеріалу з поверхонь супроводжується утворенням місцевих зв'язків «містків зварювання».

Зношування при заїданні спостерігаються: в важко навантажених підшипниках ковзання; зубчастих передачах при передачі значних крутних

моментів; рідше в підшипниках кочення; в золотникових парах; шарнірних з'єднаннях; в деталях циліндро-поршневої групи; в напрямних верстатів; та ін.

Вибірковий перенос – це вид фрикційної взаємодії, що виникає в результаті проходження на поверхнях тертя хімічних і фізико-хімічних процесів, що призводять до утворення систем компенсації зносу та зниження інтенсивності тертя. Робота пари тертя в умовах вибіркового перенесення вимагає введення до складу оливи спеціальних присадок, що містять мікрочастинки бронзи, міді та інших м'яких металів. На початковому етапі функціонування пари тертя відбувається окислення мастильного матеріалу. Утворені кислоти розчиняють мікрочастинки міді та доповнюють оливу іонами міді. Іони міді осідають на поверхнях деталей тільки в зоні тертя. В результаті утворюється тонка плівка міді, що покриває поверхні тертя. При цьому пара тертя «сталь-сталь» переходить в пару «мідь-мідь», що призводить до зниження інтенсивності окислення оливи з частинками міді.

У разі порушення цілісності мідної плівки режим роботи з'єднання стає важчим; Це стає причиною підсилення окислювальних процесів в мастильному матеріалі, прискорює процес розчинення частинок міді і «заліковування» пошкоджених ділянок поверхонь деталей. При сталому режимі тертя мідна плівка не руйнується, але може переходити з однієї поверхні тертя на іншу в з'єднанні двох делей. Продукти зносу утримуються в зазорі з'єднання електричними силами.

Тертя в умовах вибіркового переносу позитивно позначається на довговічності деталей редукторів та коробок переміни передач, важко навантажених опор кочення та шарнірних з'єднань, та ін.

Досвід застосування вибіркового переносу в галузі машинобудування та ремонтного виробництва показав, що успішний перехід на використання принципово нових мастильних матеріалів для вузлів тертя, нових технологічних процесів і конструкцій вузлів тертя досягається тільки в тих випадках, коли проводяться системні дослідження конкретних вузлів тертя машин відповідної марки.

Окислювальне зношування – це зношування при наявності на поверхнях тертя захисних плівок, що утворюються та руйнуються в результаті взаємодії матеріалу з киснем. Окислювальне зношування проявляється в складному поєднанні явищ адсорбції кисню на поверхнях тертя, дифузії кисню в поверхневих шарах матеріалів, пластичної деформації з утворенням адсорбованих плівок, плівок твердих розчинів і хімічних з'єднань матеріалів з киснем та наступним відділенням їх з поверхонь тертя. Процесу дифузії кисню в матеріалах сприяє пластичне деформування. У свою чергу пластична деформація різко посилюється при одночасній дифузії. При зношуванні спостерігається руйнування окисних плівок, але в атмосфері повітря переважає зворотний процес – окислення частинок матеріалу поверхонь.

В протилежних випадках, при перевазі швидкості руйнування плівок над їх утворенням, призводить до зношування при заїданні.

Слід мати на увазі, що наявність окисних плівок не виключає можливості утомного руйнування, а лише створює передумови для руйнування більш крихких матеріалів при зношуванні.

Окислювальне зношування є характерним, практично, для всіх елементів машин, проте інтенсивність цього процесу відносно невисока.

Фреттинг-корозія – це процес механохімічного зношування тіл, що перебувають у контакті, в умовах малих коливальних відносних переміщень. Зазначений процес зношування призводить до руйнування та утворення на контактуючих поверхнях дрібних каверн, продуктів корозії у вигляді нальоту, плям та порошку. Внаслідок малої амплітуди переміщення контактуючих поверхонь пошкодження зосереджуються на невеликих ділянках взаємодії.

Продукти зношування не можуть вийти із зони контакту, в результаті чого виникає високий тиск і збільшується їх абразивна дія на основний метал. Результатом прояву фреттинг-корозії є наявність глибоких каверн і продуктів корозії на поверхнях валів і напресованих на них зубчатих коліс, дисків, муфт, кілець підшипників кочення, на шліцьових, шпоночних і заклепочних з'єднаннях і т. і. Пошкодження поверхонь внаслідок фреттинг-корозії створюють концентратори напружень та суттєво знижують межу втоми.

Водневе зношування – це процес руйнування поверхневих шарів в результаті дифузії водню в деформовані шари матеріалу з утворенням мікротріщин. Водневе зношування залежить від концентрації водню в поверхневих шарах матеріалів деталей пари тертя. Водень, як основний компонент зношування виділяється з матеріалів пари тертя або з навколишнього середовища (води, палива, мастильного матеріалу та ін.) та прискорює процес. Водень може утворюватись при трибодеструкції полімеру (наприклад, при терті деревини по базуючим сталевим поверхням машин), також в процесі виплавки чавуну, сталі, їх хіміко-термічної обробки (гартування, азотування тощо) та нанесенні на поверхні матеріалів гальванічних покриттів.

Водневе зношування зумовлюється наступними процесами:

- інтенсивне виділення водню при терті в результаті трибодеструкції матеріалів зі вмістом водню;

- адсорбція і дифузія водню при деформуванні поверхневих шарів сталі (чавуну) з ефектом накопичення вмісту водню;

- руйнування поверхонь, що пов'язане з одночасним розвитком великої кількості тріщин в місцях деформування, з утворенням дрібнодисперсного порошку матеріалу. Водневий знос має місце при зношуванні столів і направляючих деревообробних верстатів, по яких переміщуються заготовки з деревини в процесі їх обробки. Зазначений процес зношування дозволяє пояснити і знос гальмівних барабанів тракторів та автомобілів в контакті з накладкою або колодкою, що виготовлені фрикційного матеріалу.

Зношування при дії електричного струму – це зношування, яке відбувається в матеріалах внаслідок дії на поверхнях тертя електричних розрядів. Даний вид зношування характерний для контактів, кілець колекторів, щіток генераторів та стартерів. Окислення зазначених деталей викликає підвищене іскріння та інтенсивний знос.

### **3.3. Фактори та основні закономірності процесів зношування**

Закон зношування матеріалів в загальному вигляді повинен виражати в аналітичній формі залежність лінійного зносу  $\eta$  або швидкості зношування  $\zeta$  від наступних чинників:

- властивостей поверхневого шару контактуючих матеріалів - його шорсткості, напруженого стану, жорсткості та ін.;
- параметрів, що характеризують склад, структуру і механічні властивості матеріалів пари тертя;
- силових і кінематичних параметрів, в першу чергу від тиску поверхневого тертя і швидкості відносного переміщення;
- видів тертя, кількості та властивостей мастила;
- зовнішніх умов, які впливають на процес зношування (температура, вологість, рівень вібрацій та ін.).

З огляду на складність отримання таких узагальнених залежностей, особливо в функції фізико-хімічних параметрів, на практиці часто використовують розрахункові співвідношення, в основі яких використані емпіричні дані для відповідного виду зношування. Такі залежності дозволяють вирішити багато питань, включаючи розрахунок надійності, прогнозування ресурсу деталей вузлів і агрегатів машин. Істотний вплив на вид та інтенсивність процесу зношування мають: чистота обробки поверхонь; фізико-механічні властивості матеріалів; фізико-хімічні характеристики плівок на поверхнях тертя.

Поверхні деталей можуть характеризуватись мікро- і макрогеометрією, структурою матеріалу, видом зміцнення і залишковими напруженнями. Поверхневий шар характеризується наявністю адсорбованих плівок газів, вологи, мастильної чи охолоджувальної рідини, зонами деформацій, дії високих температур. Глибина поверхневого шару може складати до 2 мм при точінні, 75 мкм – шліфуванні, 0,2 мкм - поліруванні. Залишкові напруги в поверхневому шарі від механічної обробки можуть досягати 1000 МПа та бути як розтягуючими, так стискаючими.

Поверхневий шар металу має велику активність, оскільки поверхневі атоми внаслідок вільних зв'язків володіють більшою енергією, ніж у середині твердого тіла. Поверхнево - активне середовище значно знижує опір деформації та руйнуванню, а система дефектів, слабких місць поверхонь деталей – є основою, на якій розвиваються мікротріщини. Практично всі поверхні деталей, що працюють в умовах тертя підлягають окисленню. При цьому оксидна плівка знаходиться в напруженому стані, створює додаткові напруження розтягу або стискання, в залежності від співвідношення обсягів основного металу і утвореного оксиду. При певній товщині оксидної плівки може відбутися втрата її стійкості, і плівка може набути пористу будову.

Контакт двох реальних тіл дискретний і відбувається по точках контакту. При статичному навантаженні поверхня сприймає тиск по вершинах виступів нерівностей, які розрізняються по висоті. При цьому можлива пружна і пружнопластична деформація виступів. Площа фактичного контакту поверхонь складається з великої кількості дискретних малих площ. Площа фактичного контакту складає від 0,0001 до 0,1 номінальної площі контакту та зростає при збільшенні навантаження, зменшенні шорсткості і зростанні радіусів заокруглень вершин нерівностей. При роботі з'єднань необхідно враховувати і взаємодію поверхонь, що обумовлюється неоднорідністю деформації.

Таблиця 3.2

## Показники зносу матеріалів пар тертя ковзання

№ пари	Поєднання матеріалів	1-а деталь		2-а деталь		$P_k$ , МПа	Олива
		$r_1$	$m_1$	$r_2$	$m_2$		
1	а - б	$3,1 \cdot 10^{-13}$	1,97	$3 \cdot 10^{-13}$	1,66	2	А
2	б - г	$3,1 \cdot 10^{-14}$	1,85	$2,7 \cdot 10^{-13}$	1,52	4	А
3	в - б'	$1,1 \cdot 10^{-15}$	2,38	$3,6 \cdot 10^{-15}$	2,26	4	А
4	в - б	$2,3 \cdot 10^{-13}$	1,58	$2,6 \cdot 10^{-12}$	1,23	4	А
5	а - г	$1,0 \cdot 10^{-13}$	1,76	$9,5 \cdot 10^{-12}$	1,00	4	А
6	а - д	$2,2 \cdot 10^{-14}$	3,15	$1,6 \cdot 10^{-13}$	2,71	0,5	А
7	г - д	$3,3 \cdot 10^{-12}$	1,50	$2,1 \cdot 10^{-11}$	1,42	0,7	А
8	б - е	$4,6 \cdot 10^{-12}$	1,58	$1,3 \cdot 10^{-13}$	1,77	1,5	А
9	б - ж	$2,9 \cdot 10^{-13}$	1,26	$5,5 \cdot 10^{-11}$	1,26	0,7	А
10	а - б	$5,3 \cdot 10^{-15}$	2,29	$2,0 \cdot 10^{-13}$	1,50	4	Б
11	а - б	$8,3 \cdot 10^{-16}$	3,02	$3,6 \cdot 10^{-16}$	3,10	2	В
12	б - г	$5,2 \cdot 10^{-16}$	2,50	$8,3 \cdot 10^{-15}$	2,14	4	В

Позначення матеріалів:

а - сталь 45, HRC 38-43; б - сталь 20Х, (цементована або нітроцементована\*), HRC 60-62; в - сталь ШХ15, HRC 60-62; г - сталь 38ХМЮА (азотова), HRC 60; д - чавун СЧ21-40; ж - бронза БрАЖ9-4. Вид мащення: А - солідол; Б - солідол і 10% міді; В - ЦІАТІМ-201.

Це пояснюється тим, що більшість сплавів характеризується неоднорідністю різних структурних складових по твердості і має різне орієнтування кристалічних зерен, що виходять на поверхню. У результаті на окремих ділянках фактичного контакту під навантаженням відбувається взаємне впровадження твердих складових і кристалів в менш тверді структурні складові контртіла. Глибина взаємного впровадження залежить від фізико-механічних властивостей матеріалів, шорсткості поверхонь та навантаження.

Для нормальної роботи з'єднань зношування повинно проходити в умовах рідинного тертя. При терті без мащення має місце найбільша інтенсивність зношування, створюються умови для виникнення молекулярної взаємодії, підвищується температура, відбувається концентрація тиску на окремих ділянках. З точки зору зменшення зносу найбільш сприяє рідинне тертя, але і воно має ряд недоліків. Перш за все, це істотне ускладнення конструкції

вузла і системи мащення. Крім того, наявність шару оливи знижує жорсткість з'єднання і може викликати похибки в переміщенні пар тертя. Тому найбільш характерним для більшості пар тертя є граничне тертя, коли шар оливи не перевищує 0,1 - 0,2 мкм. В умовах граничного тертя шар оливи повинен забезпечити, по-перше, створення міцної поверхневої плівки, що пов'язано з явищем змочування і налипання, по-друге, здатність взаємодіяти з поверхневими шарами матеріалу деталей, змінювати їх структуру та властивості. Наявність шару оливи істотно знижує сили тертя і силові навантаження на мікроступи, запобігає заїданню в парах тертя та істотно зменшує інтенсивність процесу зношування. Процеси тертя пов'язані з відносними переміщеннями і можуть мати місце при ковзанні, коченні- ковзанні, але при цьому необхідно враховувати, що механізм зношування і його закономірності при різних видах тертя будуть відрізнятися.

Аналіз великої кількості досліджень процесів зношування різних матеріалів в умовах граничного тертя ковзання і тертя без змащення показує, що в загальному випадку швидкість зношування може бути виражена залежністю:

$$\xi = k p^m v^n \quad (3.8)$$

де  $p$  - тиск на поверхні тертя;

$k$  - коефіцієнт зносу, який характеризує матеріали пари тертя і умови зношування;

$v$  - швидкість відносного ковзання;

$m = 0,5 - 3,0$ ;

$n = 1$  для більшості пар тертя.

Для абразивного і ряду інших видів зношування  $m = n = 1$ , і тоді:

$$\xi = k p v \quad (3.9)$$



Швидкість зношування пропорційна швидкості відносного ковзання і тиску  $p$  і не залежить від часу.

Величина лінійного зносу визначається за формулою:

$$\eta = \xi t = kpv t = kpS \quad (3.10)$$

де  $S = v t$  - шлях тертя.

На значення коефіцієнтів  $k$ ,  $m$ ,  $n$  впливають характеристики застосованих матеріалів пари тертя, режим роботи та умови тертя в зоні контакту (в першу чергу мащення поверхонь). Для прикладу, в табл. 3.2 наведені середні значення коефіцієнтів  $k$  і  $m$  для різних поєднань матеріалів при тисках в контакті  $p_k$  для певних видів олив.

З механічних характеристик матеріалу зі зносостійкістю, в першу чергу, пов'язані його твердість  $H$ , межа текучості  $\sigma_T$ , межа міцності  $\sigma_n$  та межа пружності  $E$  та ін.

Дослідженнями встановлено, що основною характеристикою зносостійкості в умовах абразивного зношування є твердість матеріалів і сплавів. Для чистих металів і термічно необроблених сталей є лінійна залежність між їх твердістю і зносостійкістю:

$$\varepsilon = bH \quad (3.11)$$

де  $\varepsilon$  - відносна зносостійкість при абразивному зношуванні,

$H$  - твердість по Віккерсу;

$b$  - коефіцієнт пропорційності,  $b = 7,3$ .

Для термічно оброблених сталей зносостійкість також зростає зі збільшенням твердості, але з меншою інтенсивністю.

При терті коченні можна виділити три можливі різновиди зношування: утомне, окислювальне, абразивне. Причому, утомне зношування є

переважаючим, а два останніх – супутними. На практиці набув поширення спосіб оцінки утомної міцності контактуючих поверхонь при коченні за максимальним значенням контактного тиску  $P_0$  і величиною максимального дотичного напруження на поверхнях контакту  $\tau_{0п}$  або на деякій глибині під поверхнею  $\tau_{0z}$ . Значення нормального контактного тиску  $P_0$  і дотичні напруження  $\tau$  визначаються за формулами теорії пружності із врахуванням або без врахування сил тертя першого і другого роду в контакті.

В машинах та обладнанні досить поширеними є механізми подачі, в яких має місце фрикційне кочення ролика за прямолінійною направляючою (каретки і супорти з направляючими кочення). У реальному процесі опори кочення здійснюють коливання щодо направляючої.

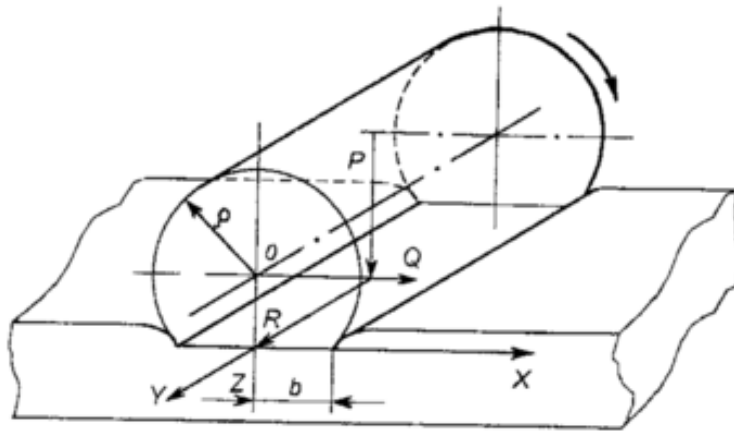


Рис. 3.3 Схема контакту циліндричного ролика з плоскою направляючою в умовах навантаження.

При цьому складова коливання, в напрямку кочення (подачі), складається з робочого переміщення, яке направлено по нормалі до контактної ділянки та призводить до пульсації нормальне навантаження. Складова, яка спрямована вздовж твірної ролика, створює динамічне ковзання. Швидкість відносного переміщення змінюється за гармонійним законом, та при наближенні до нульового значення швидкості тертя, ковзання переривається, та починається пружний процес попереднього зміщення. Сила тертя  $Q$  в напрямку подачі,

нормальне навантаження  $P$  і дотична сила тертя  $R$  пов'язані між собою наступними залежностями (рис. 3.3):

$$Q = \mu P; R = \gamma P, \quad (3.12)$$

де  $\mu$  - приведений коефіцієнт тертя кочення;

$\gamma$  - коефіцієнт тертя попереднього зміщення вздовж тіла кочення.

Тертя кочення в цих умовах викликає руйнування поверхневих шарів матеріалів пари тертя, що носить утомний характер.

Інтенсивність процесу зношування визначається характеристиками об'ємного напруженого стану при одночасній дії нормального і дотичного навантажень в рухомому стикі. Граничний стан, з енергетичної теорії міцності, пов'язаний з дотичними напруженнями в поверхневих шарах. Тому швидкість зносу може бути прийнята пропорційною розрахунковому дотичному напруженню  $\tau_0$  і обернено пропорційною твердості  $H$ :

$$\xi = f\left(\frac{\tau_0}{H}\right) \quad (3.13)$$

$$\text{де } \tau_0 = \sqrt{2(\tau_{yz}^2 + \tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2)} \quad (3.14)$$

При розрахунку зносу при терті-коченні, з динамічним ковзанням, вихідним і основним розрахунковим напруженням приймають значення максимального дотичного напруження. Це пояснюється тим, що перші тріщини виникають на деякій глибині, що відповідає глибині розташування максимальних дотичних напружень, які є найбільшими з усіх напружень, що діють в контакті. Значення величин дотичних напружень, при об'ємному напруженому стані, визначаються за наступними рівняннями:

$$\begin{aligned}\tau_{xz} = \tau_{zx} &= P_0 \left[ \mu \sqrt{\sin^2 \beta + Z^2/b^2} - \frac{Z}{b} - \frac{\cos \beta \sin^2 \beta}{\sin^4 \beta + Z^2/b^2} \right] \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= P_0 \gamma \operatorname{ctg} \beta \left( \sqrt{\sin^2 \beta + Z^2/b^2} - \frac{Z}{b} \right) \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} &= P_0 \gamma \left( \sqrt{\sin^2 \beta + Z^2/b^2} - \frac{Z}{b} \right)\end{aligned}\quad (3.15)$$

$P_0$  - максимальне нормальне навантаження;  
 $\mu$  - поточна координата по осі  $Z$ ,  
 $\gamma$  - кутова координата, відповідна координаті контактної ділянки по осі  $X$ ,  
 $b$  – напівширина контактної ділянки, величина  $b$  визначається за формулою:

$$b = 1,128\rho \sqrt{\frac{P}{L} \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}, \quad (3.16)$$

$\nu_1, \nu_2$  - коефіцієнти Пуассона матеріалів контактуючих тіл;  
 $E_1, E_2$ - модулі пружності;  
 $L$  - довжина контактної ділянки;  
 $\rho$  - радіус тіла кочення.

Значення максимального нормального напруження, через величину напівширини контактної ділянки  $b$ , визначається за формулою:

$$P_0 = \frac{2P}{\pi b L} \quad (3.17)$$

Розглядаючи процес зношування як руйнування матеріалу під дією максимального розрахункового дотичного напруження  $\tau_0$  (3.14), на деякій глибині  $Z$  ( $\tau_{0z}$ ), під дією напружень по поверхні контакту  $Z = 0$  ( $\tau_{0п}$ ), швидкість зносу можна представити наступною формулою:

$$\xi = \frac{1}{H} (\alpha_1 \tau_{0z} + \alpha_2 \tau_{0п}) \quad (3.18)$$

де  $\alpha_1, \alpha_2$  - коефіцієнти пропорційності.

Величина коефіцієнта попереднього зміщення  $\gamma$ , що є складовою дотичного напруження  $\tau_0$ , визначається експериментально в залежності від амплітуди  $A_{max}$  відносних коливань по осі ординат (рис 3.4). Величини коефіцієнта отримані за умови фіксованих значень частоти коливань і нормального контактного навантаження.

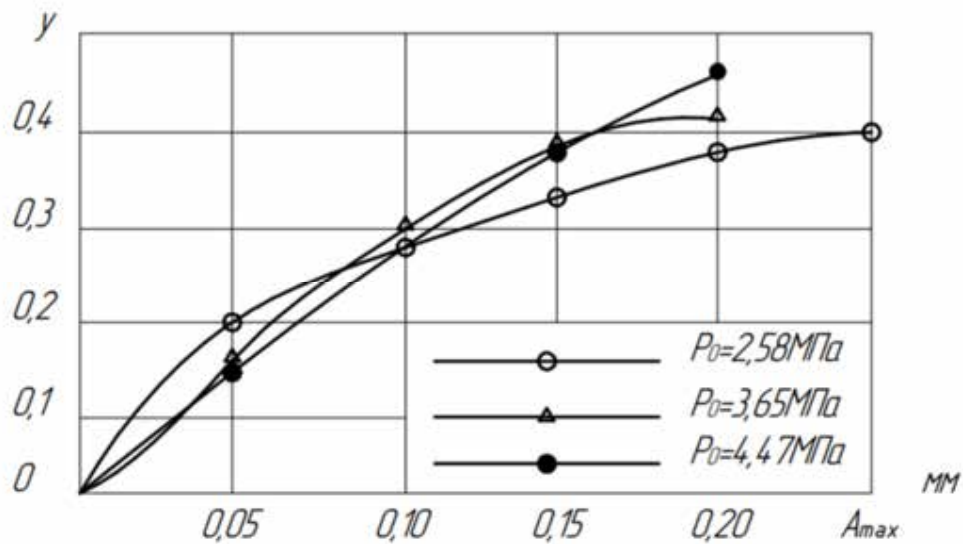


Рис 3.4. Залежність коефіцієнта  $\gamma$  від амплітуди  $A_{max}$  відносних коливань в контакті (напрямна - сталь 45, HRC 24, ролик - сталь ШХ 15, HRC 61, мащення відсутнє).

Якщо залежність  $\gamma = f(A_{max})$  апроксимувати рівнянням другого порядку для робочого діапазону амплітуд відносних вібрацій, то в першому наближенні, її можливо представити у вигляді пропорційної залежності:

$$\gamma = k_{\gamma} A_{max} \quad (3.19)$$

Для зручності розрахунків швидкості зносу (формула 3.13) побудовані епюри розподілу розрахункового значення приведенного дотичного напруження

$\bar{\tau}_0 = \tau_0/P_0$ , в залежності від співвідношення  $Z/b$ . При цьому значення коефіцієнта  $\nu$  змінювалось в інтервалі 0 - 0,5, а співвідношення  $Z/b$  - в інтервалі 0 - 1 при приведеному коефіцієнті фрикційного тертя кочення  $\mu = 0,02$ . Епюри, що представлені на рис. 3.5, дозволяють за величиною  $\gamma$  (3.19) визначити  $\tau_{0z}$  і  $\tau_{0n}$ .

Для розрахунку накопиченої величини лінійного зносу тертя кочення пропонується наступна залежність:

$$\eta = k_1 \frac{\tau_{0z}}{H} N + k_2 \frac{\tau_{0n}}{H} 2A_{max} f \frac{N}{S} \quad (3.20)$$

де  $k_1, k_2$  - коефіцієнти пропорційності ( $k_1 = 3,28 \cdot 10^{-6}$ ,  $k_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ );  
 $N$  - число циклів навантаження при повторних перекачуваннях ролика;  
 $S$  - швидкість подачі;  
 $f$  - частота відносних коливань уздовж твірної опори.

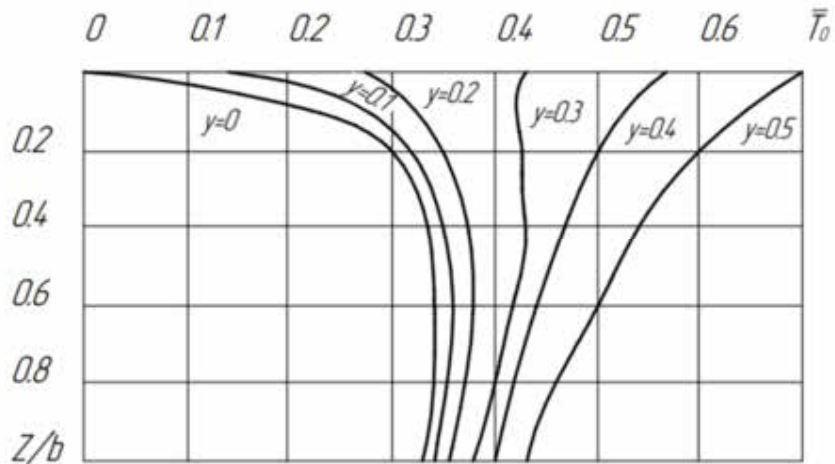


Рис 3.5. Епюри розподілу приведенного розрахункового дотичного напруження в зоні контакту.

### 3.4. Корозія, класифікація, загальна характеристика

Корозія – це процес руйнування металів внаслідок хімічної або електрохімічної їх взаємодії з корозійним середовищем.

Чиста металева поверхня знаходиться під хімічним впливом навколишнього середовища. Корозійні пошкодження мають наступні особливості: руйнування металів завжди починається з поверхні, зовнішній вигляд деталі, як правило, змінюється; метал зазвичай перетворюється в оксиди або гідрати оксидів. За характером зовнішнього середовища розрізняють корозію хімічну і електрохімічну.

Хімічна корозія протікає при взаємодії металів з сухими газами, парами та рідкими неелектролітами. Від впливу газової корозії втрачають працездатність циліндри двигунів внутрішнього згорання, випускні клапани, камери згорання газових турбін, елементи парових котлів і пароперегрівачів, арматура печей та ін. Газова корозія найбільш часто проходить внаслідок окислення металу при високих температурах за рахунок кисню повітря або  $\text{CO}_2$  і  $\text{O}_2$  в продуктах згорання палива. На поверхні металу утворюється шар оксидів (окалина), який стає добре помітним при температурах понад  $300^\circ \text{C}$ . При нагріванні вуглецевої сталі понад  $570^\circ \text{C}$  інтенсивність окислення інтенсивно зростає. Такі елементи, як хром, алюміній і кремній при взаємодії з киснем утворюють щільні та міцні оксидні плівки, за рахунок цього характеризуються високим опором окисленню при підвищених температурах. Так, як приклад, збільшення вмісту хрому в сталі з 12 до 22% підвищує її стійкість до окислення при температурах від  $800$  до  $1000^\circ \text{C}$ .

Як різновид хімічної корозії в рідких середовищах необхідно зазначити корозію металу в неелектролітах. Таке середовище різні органічні речовини, які слабо проводять електричний струм, включаючи бензин, гас, спирти та ін. Інтенсивність цього виду корозії залежить, перш за все, від хімічної природи і температури середовища.

Електрохімічна корозія пояснюється дією мікрогальванічних елементів. В якості анода і катода можуть служити: структурні складові сплаву; межа і серцевина зерна; напружена і ненапружена ділянки металу; чистий метал і його оксиди. При цьому анодні ділянки завжди мають більш високий електронний

потенціал і піддаються розчиненню з утворенням, в контакті з водою, оксидів металу у вигляді щільної або пористої плівки продуктів корозії.

Атмосферна корозія розвивається при нормальному тиску і температурі, що не перевищує 80°C. Деталі машин та обладнання, в цьому випадку, знаходяться в контакті з атмосферним повітрям, яке завжди містить певну кількість вологи. Найдрібніші частинки води, що є електролітом, в зв'язку зі вмістом солей, лугів і кислот, осідають на поверхні металу та утворюють з ним мікрогальванічні пари.

Найбільш інтенсивно електрохімічна корозія впливає на метал в розчинах електролітів (наприклад, морської води) з підвищеним вмістом солей, кислот і лугів. Процес корозії може розвиватися досить інтенсивно та досягати понад 0,5 мм в місяць. При проектуванні вузлів машини та обладнання, які працюють в середовищі електроліту, слід враховувати, що виготовлення деталей з неднорідних матеріалів може призвести до утворення мікрогальванічних елементів.

У деяких вузла та агрегатах спостерігається щілинна корозія, при якій корозійні пошкодження зосереджені в зазорах між поверхнями деталей. Це можуть бути щілини між листами металу, зазори в з'єднаннях, тріщини в металі та ін. Це пов'язано з тим, що малодоступні для кисню або електроліту ділянки поверхні деталі стають анодом по відношенню до решти поверхні. В багатьох випадках корозія протікає паралельно з різними видами зношування в з'єднаннях деталей, що підвищує інтенсивність зносу робочих поверхонь.

Навіть незначна корозія технологічних поверхонь підшипників кочення значно знижує їх контактну витривалість. Продукти корозії при цьому діють як абразивні частинки.

При атмосферній корозії відбувається поступове наводнення сталевих деталей, що є причиною зниження опору механічним навантаженням.



### 3.5. Деформація та руйнування

В результаті дії навантаження відбувається деформація матеріалу, що супроводжується зміною форми та розмірів деталі. Розрізняють пружні та пластичні деформації. Пружні – це такі, що зникають після зняття навантаження, пластичні – залишаються після зняття навантаження.

Зломом називають повне руйнування матеріалу деталі, що призводить до її розшарування при розтягуванні, стисненні, вигині, крученні чи складному напруженому стані. За характером навантаження злами розрізняють – статичні та утомні, за структурою будови – крихкі та в'язкі.

Характер прикладеного навантаження та механізми руйнування можуть бути найрізноманітнішими. При короткочасному навантаженні виникають статичні злами. Під в'язким розуміють злам, що відбувається при наявності макропластичної деформації. Виникнення пластичного зламу свідчить про те, що матеріал не витримав розрахункового навантаження. Крихкий злам, на відміну від пластичного, виникає при відсутності або незначних навантаженнях макропластичної деформації. Причиною крихкого злому можуть миттєві навантаження та наявність концентраторів напружень в небезпечних перерізах деталі.

Деформації та зломи можуть виникати при надмірному збільшенні напружень в матеріалі деталі, що перевершують межу текучості або межу міцності. Зломи, при одноразовому або при постійно діючому навантаженні, на практиці спостерігаються порівняно рідко. Найчастіше зустрічаються так звані утомні зломи.

Явище руйнування матеріалу під дією змінних напружень, протягом певного напрацювання називається утомним. Здатність матеріалу чинити опір утомному руйнуванню називають витривалістю, або циклічною міцністю. При циклічно змінних напруженнях, найбільше за абсолютною величиною напруження циклу, при якому матеріал не руйнується при заданому числі циклів, називається межею витривалості.

До числа деталей, що піддаються впливу утомного руйнування, відносяться вали та осі тракторів, автомобілів, ресори, шпинделі верстатів і ін. Утомні зломи виникають при напружених нижче межах текучості. Зародженню утомної тріщини сприяє наявність мікрodefektів і концентраторів напружень в небезпечних перерізах деталі. Типовий утомний злом характеризується наявністю місця зародження руйнування, зони утомної тріщини і доруйнівної зони. Особливістю утомного злому є те, що незалежно від в'язкості матеріалу злом має крихкий характер. Процес зародження утомної тріщини починається в точці в результаті наявності на поверхні мікрodefекту.

Утомна тріщина, яка виникає в мікрооб'ємі матеріалу, під впливом змінного навантаження, поступово проникає в глибину тіла деталі. При ослабленні критичних перерізів швидкість розвитку тріщини підвищується, і при певному залишковому перерізі, відбувається повне руйнування деталі.

Межа витривалості, встановлена в межах  $10^6$  і  $10^7$  симетричних знакозмінних циклів, становить, як правило, 30 - 60% від межі міцності. Тому утома матеріалу часто є фактором, який лімітує довговічність деталей.

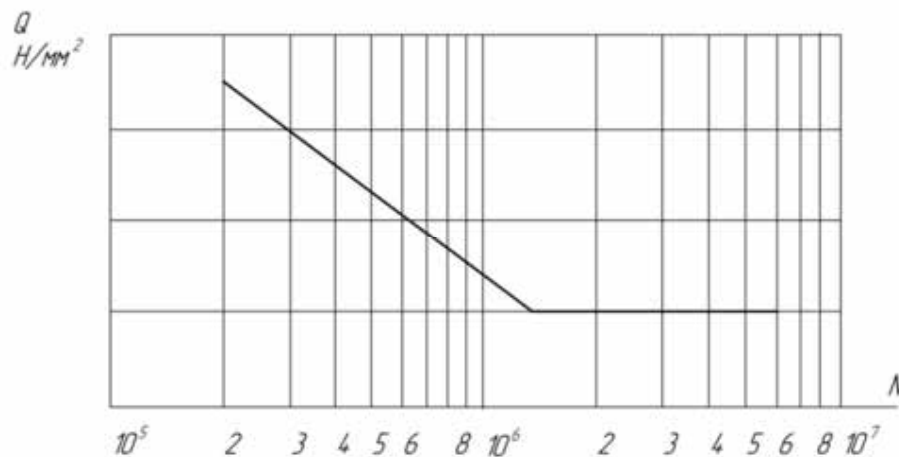


Рис 3.6. Діаграма витривалості у півлогарифмічних координатах

Результати випробувань на міцність від втоми представляють графічно у вигляді діаграми витривалості, що виражає залежність напружень від кількості циклів навантаження. Діаграму витривалості можливо представити в

напівлогарифмічних координатах (рис. 3.6). В цьому випадку по осі абсцис відкладають логарифми чисел циклів  $lgN$ , а по осі ординат – напруження  $\sigma$  в лінійному масштабі. При використанні півлогарифмічних координат критерієм для виявлення меж витривалості є перелом кривої. На злами деталей істотно впливає корозія. Найбільш типовими видами корозійно-механічних пошкоджень можуть бути корозійне руйнування від утома або корозійне розтріскування.

Утома від дії корозії представляє собою процес руйнування металів і сплавів при одночасній дії корозійного середовища і циклічних напружень. Виникнення утомної тріщини відбувається при додатковій дії корозійного факторів. Процес розвитку тріщини проходить більш інтенсивно, оскільки стінки тріщини піддаються впливу корозійного середовища.

Корозійне розтріскування виникає під дією статичних напружень та впливу агресивного корозійного середовища. Розтріскування виникає внаслідок зниженої корозійної стійкості оболонок зерен, наявності в сплаві структурної складової, схильної до корозії, що призводить до зменшення міжкристалічної міцності.

### **3.6. Питання для обговорення та самоперевірки**

1. Описати класифікацію процесів старіння виробів машинобудування.
2. Описати залежність для визначення швидкості старіння.
3. Обґрунтувати ймовірнісний характер протікання старіння.
4. Які три основні види пошкоджень машин та обладнання?
5. Описати основні види тертя
6. Описати сили тертя кочення.
7. Чи сила тертя обумовлена механічною і молекулярною взаємодіями?
8. Яке тертя називається рідинним?
9. Яке тертя називається граничним?
10. Яке тертя називається без мащення?
11. За якими формулами можна розрахувати швидкість зношування та

зносостійкість?

12. Охарактеризувати графік залежності зносу від часу роботи.
13. Описати три основних види зношування.
14. Описати основні види механічного зношування.
15. Описати основні види молекулярно-механічного зношування.
16. Описати особливості зношування при дії електричного струму.
17. Описати механізм процесу утомного зношування.
18. Назвати деталі, які втрачають працездатність в результаті втомного зношування.
19. Описати природу та особливості протікання абразивного зношування.
20. Описати механізм процесу зношування при фретингу.
21. Описати особливості процесу гідро- і газоабразивного зношування.
22. Описати особливості процесу ерозійного зношування.
23. Описати особливості процесу кавітаційного зношування.
24. Описати механізм процесу зношування при заїданні.
25. Описати механізм процесу зношування при фретинг-корозії.
26. Описати механізм проходження процесу зношування при вибіркового переносі.
27. Надати опис досвіду застосування вибіркового переносу в галузі машинобудування та ремонтного виробництва.
28. Описати механізм проходження процесу окислювального зношування та назвіть деталі, що при цьому втрачають працездатність.
29. Описати механізм проходження процесу зношування при дії електричного струму.
30. Назвати основні чинники, що впливають на зносостійкість при абразивному зношуванні.
31. Описати механізм протікання процесу корозії деталей.
32. Описати формування процесів деформації та руйнування деталей.
33. Перерахувати деталі, що піддаються впливу утомного руйнування.

34. Охарактеризувати діаграму витривалості у півлогарифмічних координатах.
35. Описати явище руйнування матеріалу під дією змінних напружень.

## **РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНА ТЕОРІЯ НАДІЙНОСТІ**

### **4.1 Показники надійності**

Кількісна характеристика однієї або декількох властивостей, складових надійності об'єкта, здійснюється за допомогою одиничних або комплексних показників надійності. Одиничні відносяться до одного, а комплексні – до кількох властивостей надійності.

Вибір показників надійності залежить від виду об'єкта і характеру його функціонування. Показники надійності регламентовані державними і галузевими стандартами, а для їх вибору існують методології та методичні вказівки, які дозволяють встановити підхід до визначення їх показників і норм. Для розрахунку чисельних значень показників надійності необхідна вихідна інформація, яка може бути отримана в процесі проведення лабораторних, стендових або експлуатаційних випробувань відповідної вибірки об'єктів даного виду. Спостереження за роботою об'єктів дають можливість отримати по кожному  $j$ -му об'єкту «ланцюжка» інтервалів напрацювання  $T$ , тривалості відновлення  $T_v$ , технічного обслуговування  $T_{то}$  і ремонту  $T_{рем}$  із зазначенням затрат праці на відновлення  $S_v$ , технічне обслуговування  $S_{то}$ , ремонт  $S_{рем}$  в наступному вигляді:

$$T_1 - T_{v1} - T_2 - T_{v2} - \dots - T_{то1} - \dots - T_{рем1} - T_i - T_{vi} - T_{тоm} - \dots - T_{ремk}$$

$$S_{v1} \quad S_{v2} \quad S_{то1} \quad S_{рем1} \quad S_{vi} \quad S_{тоm} \quad S_{ремk}$$

де  $n$  - число інтервалів напрацювань на відмову;

$i$  - кількість відновлень працездатного стану;

$m$  - кількість технічних обслуговувань;

$k$  - кількість ремонтів.

Показники безвідмовності. Показники безвідмовності диференціюються в залежності від можливості відновлення або технічного обслуговування об'єкта досліджень.

Середнє напрацювання на відмову  $T_0$  – це відношення напрацювання об'єкта, який відновлюється при втраті працездатності до математичного

очікування кількості його відмов протягом зазначеного напрацювання. Для сукупності партії об'єктів можна записати:

$$T_0 = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n T_{ij} / \sum_{j=1}^N n_j \quad (4.1)$$

Показник визначає напрацювання об'єкта, що припадає на одну відмову.

Встановлене безвідмовне напрацювання  $T_\gamma$  - це мінімальне значення напрацювання, протягом якої виробник гарантує безвідмовну роботу об'єкта при дотриманні регламентованої системи технічного обслуговування і ремонту. Враховуючи, що напрацювання на відмову є величиною випадковою, встановлене безвідмовне напрацювання  $T_\gamma$  визначається з певною ймовірністю  $\gamma$ , та є близькою до одиниці. Для виробів крупносерійного виробництва  $\gamma = 0,95$ .

Для експоненціального закону розподілу напрацювань  $T_i$  встановлене безвідмовне напрацювання  $T_\gamma$  розраховується за формулою:

$$T_\gamma = (1 - \gamma)T_0 = 0,05T_0, \quad (4.2)$$

Для закону нормального розподілу,  $T_i$  може мати вигляд:

$$T_\gamma = T_0 - K_\gamma S \approx T_0 - 1,6S, \quad (4.3)$$

де  $K_\gamma$  - квантиль нормального розподілу ( $K_\gamma = 1,6$  при  $\gamma = 0,95$ );

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - T_0)^2}{(n-1)}}, \quad (4.4)$$

де  $S$  - середньоквадратичне відхилення напрацювання на відмову.

Для закону розподілу Вейбулла-Гнеденко:

$$T_\gamma = a^b \sqrt[0,0513]{}, \quad (4.5)$$

де  $a$  – параметр масштабу розподілу;

$b$  – параметр форми.

Середнє напрацювання до відмови – це математичне очікування напрацювання до відмови об'єкта, що не відновлюється і не обслуговується:

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i, \quad (4.6)$$

де  $T_i$  – напрацювання  $i$ -го об'єкта до відмови;

$n$  – кількість об'єктів досліджень.

Ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$  – це ймовірність того, що в межах заданого напрацювання відмова об'єкта не виникне:

$$P(t) = n(t) / n_0 = 1 - n/n_0, \quad (4.7)$$

де  $n_0$  – кількість об'єктів, що знаходяться на випробуванні;

$n(t)$  – кількість об'єктів досліджень, що залишилися працездатними на момент часу  $t$ ;

$n$  – кількість об'єктів, що відмовили.

Значення ймовірності безвідмовної роботи  $P(t)$  в функції щільності розподілу  $f(t)$  визначається наступною залежністю:

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(z) dz \quad (4.8)$$

Показниками надійності виробів, що не відновлюються при втраті працездатності є:

- ймовірність безвідмовної роботи;
- ймовірність відмов;
- інтенсивність відмов;
- середній наробіток до відмови (середній час безвідмовної роботи).



Одним із важливих показників надійності виробів, що не відновлюються є ймовірність безвідмовної роботи за проміжок часу  $t$ . Це ймовірність того, що за певних умов експлуатації, в межах заданого проміжку часу роботи відмова не виникне.

Ймовірність безвідмовної роботи виробу  $p(t)$ , за проміжок часу  $t$ , можна розрахувати на основі показників надійності елементів, що є складовими даного виробу, або на основі статистичної обробки результатів випробувань великої кількості виробів даного типу. Для даного випадку ймовірність безвідмовної роботи можна визначити за формулою:

$$p(t) \approx \frac{N(t)}{N_0} = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = 1 - \frac{n(t)}{N_0}, \quad (4.9)$$

де  $N_0$  – кількість виробів, що випробовувалися на протязі часу  $t$ ;

$N(t)$  – кількість працездатних виробів, за час випробування;

$n(t)$  – кількість виробів, що відмовили за час  $t$ .

Похибка розрахунків за формулою (4.1) тим менша, чим більша кількість виробів, що випробовуються.

Ймовірність безвідмовної роботи виробу  $p(t)$  за проміжок часу  $t$  пов'язана з імовірністю відмов  $q(t)$  за той же проміжок часу наступним співвідношенням:

$$p(t) + q(t) = 1. \quad (4.10)$$

Ймовірність того, що за час  $t$  відбудеться відмова виробу, за результатами статистичних випробувань, можна визначити за формулою:

$$q(t) \approx \frac{n(t)}{N_3}, \quad (4.11)$$

де  $n(t)$  – кількість виробів, що відмовили за час  $t$ ;

$N_3$  - кількість виробів, що випробовувались на протязі часу  $t$ .

В якості показника надійності виробів, що не відновлюються використовується щільність розподілу наробітку до відмови  $f(t)$ .

Похідна ймовірності відмови  $q(t)$  за час  $t$  характеризує щільність розподілу наробітку  $f(t)$  до відмови (часу безвідмовної роботи виробу), або швидкість «спадання» безвідмовності виробу:

$$f(t) = \frac{dq(t)}{dt} = -\frac{dp(t)}{d(t)}. \quad (4.12)$$

З урахуванням виразу (4.11) маємо:

$$f(t) = \frac{dn(t)}{dt \cdot N_0} \approx \frac{\Delta n(t)}{\Delta t \cdot N_0}. \quad (4.13)$$

Вираз (4.13) застосовується в тому випадку, коли всі вироби однотипні і випробовуються в однаковому режимі.

Найбільш поширеним кількісним показником надійності є інтенсивність відмов, що являє собою відношення щільності розподілу наробітку до відмови до ймовірності безвідмовної роботи виробу, встановлені для одного і того ж моменту часу:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)}. \quad (4.14)$$

Підставивши в (4.14) вирази (4.9) і (4.13), отримаємо:

$$\lambda(t) = \frac{dn(t)}{dt \cdot N(t)}. \quad (4.15)$$

Інтенсивність відмов може бути отримана за результатами статистичних випробувань. Інтенсивність визначається як відношення кількості виробів, що відмовили на протязі прийнятого проміжку часу, до добутку кількості виробів, які працездатні до початку цього проміжку– і його тривалості:

$$\lambda(t) \approx \frac{\Delta n(t)}{N(t) \cdot \Delta t} = \frac{\Delta n(t)}{(N_0 - n(t)) \cdot \Delta t}, \quad (4.16)$$

де  $\Delta t$  – розглянутий проміжок часу;

$\Delta n(t)$  – кількість виробів, що відмовили за проміжок часу  $\Delta t$ ;

$N(t)$  – кількість виробів, що залишилися працездатними за проміжок часу  $\Delta t$ ;

$n(t)$  – кількість виробів, що відмовили з початку випробувань до прийнятого проміжку часу  $\Delta t$ ;

$N_0$  – кількість виробів, що випробовувалися.

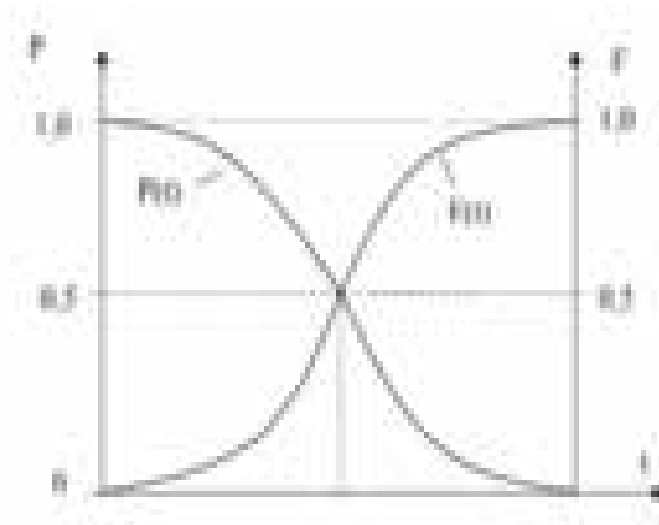


Рис. 4.1. Залежності ймовірності безвідмовної роботи та ймовірності відмови від наробітку:  $P(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи;  $F(t)$  – ймовірність відмови.

Залежність інтенсивності відмов від часу представлена на рис. 4.2.

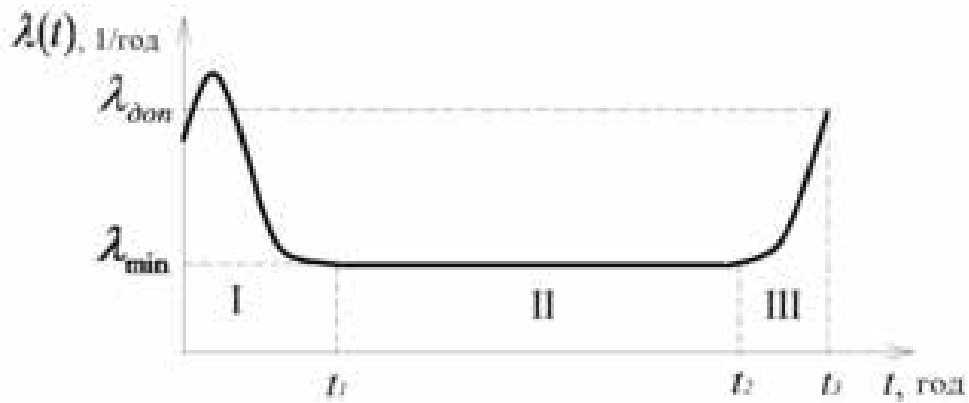


Рис. 4.2. Залежність інтенсивності відмов від часу.

Залежність інтенсивності відмов характеризується трьома періодами: I період – період припрацювання ( $0-t_1$ ); II період – період нормальної роботи ( $t_1-t_2$ ); III період – період зносу та старіння ( $t_2-t_3$ ).

Перший період ( $0-t_1$ ), характеризується високою інтенсивністю відмов, що обумовлено виходом з ладу виробів, які мають приховані дефекти, що не були виявлені при їх виготовленні. Тривалість періоду припрацювання складає певну частку (у відсотках) від часу нормальної роботи виробу. Період припрацювання вважається завершеним, коли інтенсивність відмов наближується до  $\lambda_{\min}$ . Відмови в період припрацювання можуть бути наслідком конструкторських, технологічних та експлуатаційних помилок.

Другий період ( $t_1-t_2$ ) – це період нормальної роботи. Цей характеризується мінімальною і постійно діючою інтенсивністю відмов. Величина  $\lambda_{\min}$  тим менша, а інтервал тим більший, чим досконаліша конструкція виробу, вища якість його виготовлення та дотримані режими експлуатації. Зазначений період роботи виробу може складати значну кількість годин, згідно з його призначенням.

Третій період ( $t_2-t_3$ ) – це період аварійного зношування та старіння. Цей період характеризується значним зростанням інтенсивності відмов через появу зносу та руйнування матеріалів. Із завершенням третього періоду інтенсивність

відмов наближається до максимально допустимого значення  $\lambda_{дон}$ , експлуатація виробу припиняється.

Взаємозв'язок ймовірності безвідмовної роботи та інтенсивності відмов можна представити наступним співвідношенням:

$$p(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} . \quad (4.17)$$

Для другого періоду – нормальної роботи виробу, коли  $\lambda(t) = \lambda_0 = const$  отримаємо:

$$p(t) = e^{-\lambda t} . \quad (4.18)$$

Представлена залежність має назву експоненціального закону розподілу.

Ще одним показником надійності виробів, що не відновлюються при втраті працездатності, є середній час безвідмовної роботи або середній наробіток до відмови  $t_{сер}$ , що визначається за виразом:

$$t_{сер} = \int_0^{\infty} p(t) dt . \quad (4.19)$$

За умови, що  $p(t) = e^{-\lambda t}$ , вираз (4.19) матиме наступний вигляд:

$$t_{сер} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = 1/\lambda . \quad (4.20)$$

В результаті отримаємо:

$$p(t) = e^{-t/t_{сер}} \quad (4.21)$$

Статистично, за результатами випробувань,  $t_{сер}$  визначається як відношення суми часу безперервної роботи кожного виробу до загальної кількості виробів, що випробовуються:

$$t_{\text{сеп}} = \sum_{i=1}^{N_0} \frac{t_i}{N_0}, \quad (4.22)$$

де  $t_i$  – час безперервної роботи  $i$ -го виробу.

Усі розглянуті показники надійності для виробів, які не відновлюються, є рівноправними. Проте на практиці перевага віддається інтенсивності відмов, оскільки ця функція легко визначається експериментально.

Значення  $P(t)$ , як будь-якої ймовірності, може перебувати в межах  $0 \leq P(t) \leq 1$ . Наприклад, якщо ймовірність безвідмовної роботи об'єкта протягом часу  $t = 1000$  год., дорівнює 0,9, то це означає, що із загальної кількості об'єктів даного типу, в середньому близько 10% об'єктів втратить свою працездатність раніше ніж через 1000 год. роботи. Стосовно до одного об'єкту, ймовірність безвідмовної роботи визначає можливість об'єкта працювати без відмов на протязі заданого періоду часу. Слід зазначити, що застосування показника надійності  $P(t)$  для аналізу роботи об'єкта, без визначення періоду часу, протягом якого спостерігається його робота, не є ефективним.

Величиною, зворотною  $P(t)$ , є ймовірність виникнення відмови  $F(t)$ . Разом вони формують повну групу подій, тому:

$$P(t) + F(t) = 1.$$

Інтенсивність відмов  $\lambda(t)$  – це показник надійності об'єктів, що не відновлюються при втраті працездатності. Значення інтенсивності визначається відношенням середнього числа об'єктів  $\Delta n$ , до кількості об'єктів  $n(t)$ , що втратили працездатність в межах інтервалу часу  $\Delta t$ :

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{n(t) \cdot \Delta t}. \quad (4.23)$$

Значення інтенсивності відмов більш точно підтверджує рівень надійності

об'єктів, ніж ймовірність безвідмовної роботи, особливо для виробів високої надійності.

Параметр потоку відмов  $w(t)$  – показник надійності відновлення об'єктів, що дорівнює відношенню середнього числа відмов  $\Delta n$  об'єктів, що відновлюється, до значення напрацювання за відносно малий проміжок часу  $\Delta t$ :

$$w(t) = \frac{\Delta n}{\Delta t} \quad (4.24)$$

Цей показник застосовується для оцінки надійності складних машин та обладнання, у яких досить часто виникають відмови, що легко усуваються та не призводять до значних негативних наслідків при втраті працездатності.

Показники довговічності оцінюють втрату працездатності об'єкта за весь період його експлуатації. Всі показники даної властивості надійності поділяються на дві групи: показники технічного ресурсу та терміну служби.

Технічний ресурс (ресурс) – це сумарне напрацювання об'єкта від початку його експлуатації або відновлення після ремонту до переходу в граничний стан. Ресурс оцінюється в одиницях часу роботи (години, мото-години), кілометри пробігу та в одиницях випуску продукції. Для об'єктів, що не відновлюються, показники ресурсу та напрацювання до відмови співпадають.

Термін служби – це календарна тривалість експлуатації об'єкта від початку чи її поновлення після ремонту до переходу в граничний стан. Як правило, термін служби оцінюється в роках.

З огляду на те, що машини та обладнання як складні системи, а також їх елементи відносяться до нестаріючих і змінюють свої властивості тільки під дією навантажень, обумовлених функціонуванням, для них в якості критерію довговічності правомірно використовувати показники технічного ресурсу.

Середній ресурс  $T_p$  – це математичне очікування ресурсу:

$$T_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{pi} , \quad (4.25)$$

де  $T_p$  – ресурс і-го об'єкта даного виду;

$n$  – число об'єктів даного виду.

Ресурс визначається напрацюванням об'єкта. При визначенні середнього ресурсу, слід вказувати вид дій при досягненні граничного стану об'єкта. Наприклад, середній ресурс; до капітального ремонту  $T_{ркр}$ ; середнього ремонту  $T_{рср}$ ; поточного ремонту  $T_{рпр}$ ; середнього ресурсу елемента складної системи  $T_{рс}$ . В окремих випадках доцільно визначати доремонтний, міжремонтний, післяремонтний ресурс, що дає можливість оцінити ступінь відновлення ресурсу об'єкта при виконанні ремонтних робіт та їх ефективність.

Призначений ресурс  $T_{pn}$  – це сумарний наробіток, при досягненні якого експлуатацію об'єкт необхідно припинити незалежно від його технічного стану. Дотримання призначеного ресурсу обумовлює необхідність проведення відповідних відновлювальних робіт: капітального ремонту  $T_{рпкр}$ ; середнього  $T_{рпс}$ ; поточного ремонту  $T_{рппр}$ ; технічних обслуговувань  $T_{рпто}$ . Або в окремих випадках, дотримання призначеного ресурсу зумовлює зняття об'єкта з експлуатації. Показник  $T_{pn}$  є доповнюючим  $T_p$ , оскільки дозволяє оцінити величину поля розсіювання ресурсу об'єктів даного виду. При нормальному законі розподілу ресурсів однотипних об'єктів та  $\gamma = 0,95$  за аналогією з (4.3) отримуємо:

$$T_{pn} \approx T_p - 1,6S \quad (4.26)$$

Середній ресурс за точністю  $T_{pm}$  визначається середнім наробітком об'єкта від початку експлуатації до виходу за межі визначених норм точності, що регламентуються стандартами і технічними умовами. Ресурс об'єкта за точністю вважається вичерпаним, якщо для відновлення визначеної точності необхідно поновлювати координацію вузлів та задані траєкторії їх взаємного переміщення під час роботи об'єкта в обсязі, що регламентується середнім ремонтом. Середній ресурс за точністю визначається як математичне очікування наробітку:



$$T_{pm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{pmi} \quad (4.27)$$

де  $T_{pmi}$  – ресурс  $i$ -го об'єкта з початку експлуатації до виходу за межі визначених норм точності;

$n$  – кількість відмов об'єктів.

Ресурс за точністю є важливим показником довговічності машин та обладнання. Він вважається вичерпаним, коли поле розсіювання розмірів обробки перевищує значення допуску на обробку за заданим квалітетом, а для відновлення точності необхідно виконати роботи в обсязі середнього ремонту. Крім того, ресурс з точності є важливим показником для таких механізмів, як маніпулятори, гідравлічні та пневматичні системи і ін.

Ремонтопридатність – це властивість об'єкта бути пристосованим до підтримання та відновлення стану, в якому він здатний виконувати потрібні функції за допомогою технічного обслуговування та ремонту. Показники ремонтпридатності визначають пристосованість об'єкта до оперативного проведення ремонтних робіт.

Середній час відновлення працездатного стану  $T_e$  – це математичне очікування часу відновлення працездатного стану:

$$T_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{vi}, \quad (4.28)$$

$T_{vi}$  – середній час відновлення працездатного стану при  $i$ -ій відмові;

$n$  – загальне число відмов за час випробувань.

Питома трудомісткість технічних обслуговувань та ремонтів  $\bar{S}$  – це відношення сумарної трудомісткості операцій технічного обслуговування, непланових відновлень працездатного стану та планових ремонтів за певний період експлуатації до величини напрацювання об'єкта за вказаний період експлуатації:

$$\bar{S} = (\sum_1^m S_{TO} + \sum_1^l S_B + \sum_1^k S_{\text{рем}}) / \sum_{t=1}^N T_i, \quad (4.29)$$

де  $\sum_1^m S_{TO}$  – сумарна трудомісткість  $m$  технічних обслуговувань об'єктів;

$\sum_1^l S_B$  – сумарна трудомісткість  $l$  відновлень об'єктів;

$\sum_1^k S_{\text{рем}}$  – сумарна трудомісткість  $k$  планових ремонтів об'єктів;

$\sum_{t=1}^N T_i$  – сумарне напрацювання  $N$  об'єктів.

Комплексні показники надійності. Надійність об'єкта повинна характеризувати його здатність виконувати робочі функції згідно призначенню з мінімальними витратами на введення в експлуатацію, технічне обслуговування та ремонт. Чим менші сумарні витрати часу і коштів, що витрачаються на відновлення працездатності об'єкта протягом усього періоду експлуатації, тим він ефективніший.

Коефіцієнт технічного використання  $K_{ТВ}$  – ймовірність того, що в довільно взятий момент часу об'єкт працює, а не ремонтується. Значення коефіцієнта технічного використання знаходиться як відношення математичного очікування сумарного часу перебування об'єкта в робочому стані, за певний період експлуатації до математичного очікування сумарного часу перебування об'єкта в робочому стані та простоїв, що обумовлені технічним обслуговуванням та ремонтом за той же період:

$$K_{ТВ} = \frac{T_c}{T_c + T_{\text{то}} + T_{\text{рем}}} \quad (4.30)$$

Крім планових зупинок для виконання ремонтних робіт можливі непередбачені простої машин та обладнання, наявність яких свідчить про те, що планові ремонти та заходи з технічного обслуговування в повному обсязі виконують свою роль. Для оцінки зазначеного факту вводиться коефіцієнт готовності. Коефіцієнт готовності  $K_G$  – це ймовірність того, що об'єкт виявиться в працездатному стані в довільний момент часу, крім планованих періодів,

протягом яких застосування об'єкта за призначенням не передбачається:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^{N_3} t_i}{\sum_{i=1}^{N_3} t_i + \sum_{i=1}^{N_3} t_{bi}} \quad (4.31)$$

де  $t_i$  – сумарний наробіток  $i$ -го об'єкту в заданому інтервалі періоду експлуатації;

$t_{bi}$  – сумарна тривалість відновлення працездатності  $i$ -го об'єкту в тому ж інтервалі експлуатації;

$N_3$  – загальне число об'єктів, що досліджуються.

Коефіцієнт оперативної готовності – це ймовірність того, що об'єкт знаходиться у працездатному стані у довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких використання об'єкта за призначенням не передбачається. Починаючи з цього моменту об'єкт працюватиме безвідмовно протягом заданого інтервалу часу ( $t_0 ; t_1$ ) з відповідною ймовірністю  $P(t_i)$ :

$$K_{0\Gamma} = K_{\Gamma} \cdot P(t_0 ; t_1) \quad (4.32)$$

де  $t_0$  – момент часу, з якого починається використання об'єкта за призначенням, год.;

$t_1$  – момент часу, з якого використання об'єкта за призначенням припиняється, год.;

$P(t_i)$  – ймовірність події.

Технічний рівень і якість машин та обладнання, їх агрегатів, вузлів і деталей характеризуються сукупністю основних техніко-економічних параметрів і показників, виявлення ступеня їх досконалості в порівнянні з відповідними аналогами, як зарубіжними, так і вітчизняними. При цьому технічний рівень об'єкта значною мірою визначається показниками його надійності.

Номенклатура показників надійності встановлюється з метою найбільш повного представлення споживчих властивостей машин та обладнання відповідно до вимог стандартів. Розглянутий вище перелік не виключає введення інших показників надійності для більш повної характеристики об'єктів та умов їх експлуатації.

Показники надійності машин та обладнання визначаються з метою:

- порівняння з показниками надійності аналогів при оцінці технічного рівня;
- оптимізації періодичності робіт з технічного обслуговування та ремонту;
- розрахунку та оптимізації ремонтних комплектів;
- розробки раціональної організації експлуатації, технічного обслуговування та ремонту;
- нормування показників надійності;
- перевірки та коригування норм надійності, що встановлені в конструкторській документації;
- виявлення агрегатів, механізмів, вузлів та деталей, що лімітують надійність виробу;
- визначення та розробка ефективних заходів для підвищення надійності машин та обладнання.

Розрахунок та оцінка показників надійності проводяться за статистичними даними, що отримані в процесі експлуатаційних або стендових випробувань протягом певного періоду часу, що включає за можливості, всі види планових і позапланових робіт з підтримки та відновлення працездатного стану об'єкта. Показники надійності елементів і складних системи машин вибираються і оцінюються окремо, що дозволяє охарактеризувати як технічний рівень окремих елементів, так і складних систем в цілому, та вирішувати конкретні практичні завдання.

Розглянемо приклади вибору показників надійності елементів і складних систем машин та обладнання. У разі відмови, підшипник замінюється новим.

При цьому основними показниками надійності є: середній  $T_{рсп}$  і призначений  $T_{рпр}$  ресурси; ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$ , середній  $T_{рсп}$  та призначений  $T_{рпр}$  ресурси до технічного обслуговування.

Котушка реле як елемент електронних схем машини. Типова відмова – пробій ізоляції та коротке замикання. Елемент нестаріючої системи, що не обслуговується, не ремонтується. У разі відмови катушка замінюється новою. Показники надійності: середній наробіток до відмови  $T_p$ , ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$ .

Трактор гусеничний як складна система. Об'єкт який обслуговується, ремонтується. У разі відмови об'єкт відновлюється. Показники надійності: середнє  $T_p$  та призначене  $T_{pn}$  напрацювання на відмову, параметр потоку відмов, середній  $T_p$  і призначений  $T_{pn}$  ресурс до капітального ремонту, середній час відновлення працездатного стану  $T_e$ , об'єднана питома оперативна трудомісткість технічних обслуговувань, ремонтів і відновлення  $\bar{S}$ , коефіцієнт технічного використання  $K_{ТВ}$  та готовності  $K_G$ .

#### 4.2. Закони розподілу випадкових величин

В теорії надійності найбільше поширення та використання отримали наступні теоретичні закони розподілу випадкових величин: експоненціальний закон; закон Вейбулла-Гнеденко; нормальний закон (закон Гаусса); логарифмічний нормальний закон. Представлені теоретичні закони розподілу справедливі для неперервних випадкових величин.

Експоненціальний закон розподілу наробітку до відмови широко використовується в інженерній практиці. Для цього закону щільність розподілу наробітку до відмови має наступний вид:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (4.33)$$

де  $\lambda = \lambda(t) = const$ .

Ймовірність безвідмовної роботи визначається виразом:

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (4.34)$$

Середній наробіток до відмови, пов'язаний з інтенсивністю відмов, визначається наступним співвідношенням:

$$t_{cp} = 1/\lambda. \quad (4.35)$$

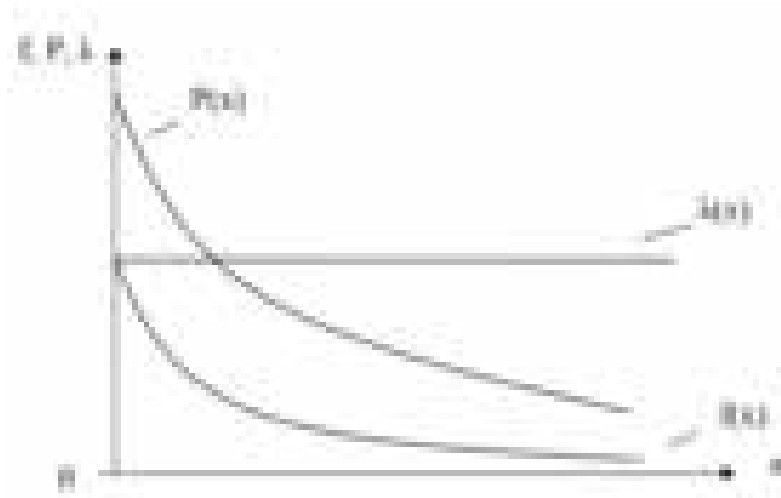


Рис. 4.3. Характеристика надійності машин за експоненціальним законом

На практиці цей закон логічно застосовувати в тому випадку, коли процеси старіння і зносу протікають достатньо повільно, тобто для періоду нормальної роботи виробу. Цей закон можна використовувати і в тих випадках, коли у виробках мають місце приховані дефекти, що призводять до раптових відмов.

Закон розподілу Вейбулла-Гнеденко використовується для оцінки надійності виробів в період їх припрацювання, а також при зносі і старінні.

Для цього закону щільність розподілу наробітку до відмови визначається виразом:

$$f(t) = \frac{m}{t_0} t^{m-1} e^{-\frac{t^m}{t_0}}, \quad (4.36)$$

де  $m$  і  $t_0$  – параметри розподілу закону Вейбулла-Гнеденко сталі величини, для кожного класу виробів мають певні значення.

Ймовірність безвідмовної роботи виробу визначається виразом:

$$P(t) = e^{-\frac{t^m}{t_0}}. \quad (4.37)$$

Інтенсивність відмов може визначатись за наступною залежністю:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{m}{t_0} t^{m-1}. \quad (4.38)$$

Наробіток на відмову визначається за формулою:

$$t_{cp} = \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) t_0^{1/m}, \quad (4.39)$$

де  $\Gamma$  – гамма-функція.

При  $m=1$  розподіл Вейбулла-Гнеденко перетворюється в експоненціальний.

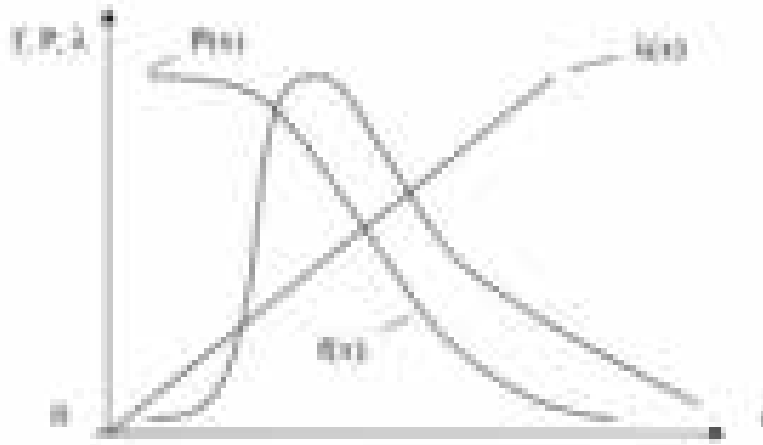


Рис. 4.4. Характеристика надійності машин за законом розподілу Вейбулла-Гнеденко ( $\lambda=1$ ;  $\alpha=2$ ).

Нормальний закон розподілу (розподіл Гаусса) найчастіше зустрічається на практиці. Його використовують в тих випадках, коли випадкова величина залежить від великої кількості факторів, які є однорідними за своїм впливом. При цьому вплив кожного з факторів, у порівнянні з усією їх сукупністю, незначний.

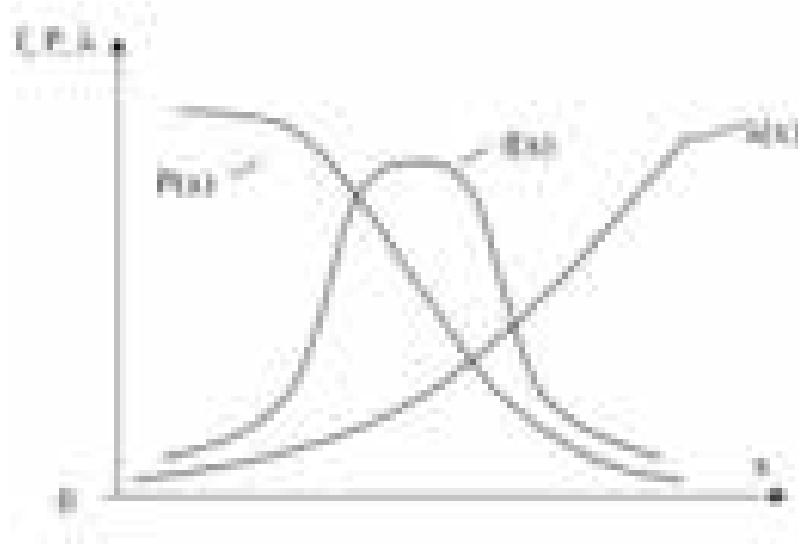


Рис. 4.5. Характеристика надійності машин за нормальним законом розподілу

Нормальним законом розподілу добре описуються результати незалежних вимірювань фізичних величин, а також може використовуватись при оцінці надійності виробів в процесі їх зносу та старіння. Його використовують для визначення часу наробітку до відмови.

Щільність розподілу наробітку до відмови можна визначити за виразом:

$$f(t) = ce^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}}, \quad (4.40)$$

де  $t_0$  і  $\sigma^2$  - середнє значення і дисперсія випадкових величин, відповідно;  
 $c$  – стала нормального розподілу, її значення визначається за формулою:



$$c = \frac{\sqrt{2/\pi}}{\sigma \left\{ 1 + \phi \left[ t_0 / \sigma \sqrt{2} \right] \right\}}, \quad (4.41)$$

за умови, що:  $\int_0^{\infty} f(t) dt = 1$ ;

$F(t_0 / \sigma \sqrt{2})$  – нормована функція Лапласа:

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (4.42)$$

Функція Лапласа протабульована для різних значень  $t$  (Дивись додатки)

Ймовірність безвідмовної роботи виробу визначається за виразом:

$$P(t) = \frac{1 - F \left[ (t - t_0) / \sigma \sqrt{2} \right]}{1 + F \left[ t_0 / \sigma \sqrt{2} \right]}. \quad (4.43)$$

Інтенсивність відмов виробу визначається як співвідношення щільності розподілу до ймовірності безвідмовної роботи:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{\sqrt{2/\pi} e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}}}{\sigma \left\{ 1 - F \left[ (t - t_0) / \sigma \sqrt{2} \right] \right\}}. \quad (4.44)$$

Логарифмічний нормальний закон розподілу використовується при оцінці відмов в результаті зношування, деформацій та руйнування. Показники надійності виробу при логарифмічному нормальному законі розподілу мають наступний вигляд:

- функція розподілу:

$$f(t) = \frac{0.4343}{t\sigma} F \left( \frac{\lg t - \lg t_0}{\sigma} \right); \quad (4.45)$$

- ймовірність безвідмовної роботи:

$$P(t) = \int_{-\infty}^t F \left( \frac{\lg t - \lg t_0}{\sigma} \right) dt; \quad (4.46)$$

- інтенсивність відмов:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} \quad (4.47)$$

- логарифм середнього часу безвідмовної роботи:

$$\lg t_{cp} = l \lg t_0 + 1.151\sigma^2. \quad (4.48)$$

### **4.3. Особливості машин та обладнання з позицій визначення показників надійності**

При проектуванні машин, механізмів, вузлів і окремих деталей виконують розрахунки, в яких враховують умови роботи, включаючи силові навантаження та їх інтенсивність, швидкості та властивості конструкційних матеріалів. Від того, наскільки правильно враховані перелічені фактори, а також рівень їх впливу і та відповідність реальним умовам експлуатації, в значній мірі будуть залежати показники надійності та ефективності роботи машин.

Режим роботи – узагальнююча характеристика умов роботи різних машин та обладнання за такими показниками, як: силові навантаження в механічних з'єднаннях; швидкості переміщення деталей; частота та амплітуда коливань; геометричної точності; температурний режим і ін. Фактори режиму роботи проявляють свій вплив в сукупності з іншими. Наприклад, для металорізальних верстатів велике значення мають точність розмірного налаштування, якість регулювання, рівень кваліфікації оператора. Для транспортних машин визначальними факторами є дорожньо-польові та атмосферно-кліматичні умови, якість палива, кваліфікація оператора.

Конструкції машин та обладнання, які використовуються в агропромисловому виробництві, дозволяють виділити окремі функціональні вузли, механізми та агрегати. При цьому в залежності від виду робочого процесу і режиму роботи вони мають різний характер навантаження: статичний (пресове і складальне обладнання), динамічний (двигун, трансмісія, механізм різання).

У більшій кількості конструкцій машин та обладнання проявляється виражений динамічний характер навантаження. Основними джерелами зовнішнього впливу в машинах є сили різання та сили інерції мас, що здійснюють обертальний та зворотно-поступальний рух.

Істотний вплив на надійність вузлів тертя має забруднення робочих поверхонь технологічними відходами обробки. Відходи обробки можуть налипати на поверхні тертя, вносити спотворення в траєкторії руху, адсорбувати оливи, погіршувати характеристики тертя та збільшувати швидкість зношування.

Особливість проблеми надійності транспортних машин полягає, перш за все, в специфічних режимах роботи, навантаженнях і дорожньо-польових умовах. Вплив силових, вібраційних та ударних навантажень на надійність автомобілів, тракторів та комбайнів проявляється в підвищеній інтенсивності відмов конструктивних елементів і окремих агрегатів, а також у високій швидкості протікання процесів зношування.

При русі по ґрунтових дорогах значно зростають динамічні і вібраційні навантаження, які перевищують значення навантажень в нормальних умовах експлуатації. Коливальні навантаження та вібраційні процеси створюють значний вплив на надійність кріплень, механізмів управління, навісного обладнання. Під впливом значних навантажень зростає інтенсивність зносу деталей підвіски мобільних енергетичних засобів, що призводить доводиться виконувати ремонти приблизно в 3 рази частіше, ніж на дорогах з твердим покриттям. Питома вага ремонту підвіски, відносно загальної кількості поточних ремонтів мобільних енергетичних засобів, зростає в 3-6 разів. Від якості дорожнього покриття в широких межах залежить запиленість, яка в свою чергу значно впливає на надійність більшості механізмів ходових систем транспортних машин.

Ґрунтообробна та посівна техніка працює в абразивному середовищі, тому одним з основних критеріїв її працездатності є зносостійкість. Ударні навантаження створюють умови для необхідності вбудови до приводів та

робочих органів машини запобіжних механізмів, які захищають їх від перенавантажень (механічних, фрикційних, гідравлічних).

Перевантаженість рам комбайнів та сільськогосподарських машин в значній мірі визначається вертикальними динамічними навантаженнями від нерівності рельєфу поля та доріг. При русі по покращених дорогах переважають симетричні навантаження, а при русі по полю та бездоріжжю переважають знакозмінні навантаження, які призводять до згину та скручування рамних конструкцій.

Істотний вплив на надійність мають корозійні процеси незахищених поверхонь сталевих деталей, які можуть досягати граничних значень в процесі експлуатації або ж при зберіганні на відкритих майданчиках. Ступінь впливу об'єктивних і суб'єктивних факторів, що призводять до зміни технічного стану, надійності та ефективності роботи машин та обладнання, повинен враховуватись в нормативних документах на технічне обслуговування та ремонт, витрати часу та праці.

#### **4.4. Питання для обговорення та самоперевірки**

1. Описати порядок визначення показників безвідмовності не відновлювальних виробів за результатами випробувань.
2. Особливості визначення показників безвідмовності відновлювальних виробів.
3. Описати основні показники ремонтпридатності об'єктів і способи їх визначення.
4. Описати основні показники довговічності об'єктів і способи їх визначення.
5. Якими показниками можна охарактеризувати збережаність технічного об'єкта?

6. Охарактеризувати зв'язок надійності і довговічності з працездатністю виробів.
7. Написати формулу для розрахунку середнього напрацювання на відмову.
8. Написати формулу для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи.
9. Написати формулу для розрахунку інтенсивності відмов.
10. Написати формулу для розрахунку інтенсивності відмов як функції розподілу.
11. Написати формулу для розрахунку інтенсивності відмов за результатами статистичних випробувань.
12. Описати графічні залежності ймовірності безвідмовної роботи та ймовірності відмови від наробітку.
13. Описати графічну залежність інтенсивності відмов від часу.
14. Описати три характерні періоди графічної залежності інтенсивності відмов від часу.
15. Описати взаємов'язок ймовірності безвідмовної роботи та інтенсивності відмов.
16. Написати формулу для розрахунку параметру потоку відмов.
17. Написати формулу для розрахунку терміну служби об'єкту дослідження.
18. Написати формулу для розрахунку часу відновлення об'єкту дослідження.
19. Написати формулу для розрахунку об'єднаної питомої оперативної трудомісткості технічних обслуговувань і ремонтів.
20. Чим відрізняються між собою коефіцієнти готовності та оперативної готовності?
21. Охарактеризувати комплексні показники надійності.
22. Охарактеризувати формулу для розрахунку коефіцієнту готовності.
23. Охарактеризувати формулу для розрахунку коефіцієнту оперативної готовності.

24. Охарактеризувати формулу для розрахунку коефіцієнту технічного використання.
25. Назвати теоретичні закони розподілу випадкових величин при оцінці надійності.
26. Описати експоненціальний закон розподілу.
27. Описати закон нормального розподілу.
28. Описати закон розподілу Вейбулла-Гнеденко.
29. Описати логарифмічно нормальний закон розподілу.

## **РОЗДІЛ 5. ВИПРОБУВАННЯ МАШИН ТА ОБЛАДНАННЯ НА НАДІЙНІСТЬ**

### **5.1. Класифікація випробувань**

Розглянемо види, цілі та завдання випробувань машин та обладнання на надійність. За рівнями проведення, випробування машин та обладнання розрізняють: державні; міжвідомчі; відомчі.

В основу експериментальних методів визначення показників надійності покладені випробування машин, які в залежності від поставлених цілей поділяються на визначальні, контрольні та дослідні. Визначальні випробування на надійність дослідних зразків машин та обладнання проводять, як правило, в складі попередніх і (або) приймальних випробувань. Мета визначальних випробувань полягає у визначенні значень показників надійності із заданими

характеристиками точності та достовірності (довірчої ймовірності). Крім того, за результатами випробувань виявляється найбільш раціональна конструкція машини, визначаються її технічні можливості, перевіряється працездатність вузлів та механізмів, досліджується динаміка процесів втрати працездатності. При цьому також виявляються елементи, вузли та агрегати, які лімітують надійність, визначається період припрацювання, критерії граничного стану та інші властивості. Слід зазначити, що визначальні випробування необхідно наблизити до стадії розробки машини та обладнання.

Контрольні випробування на надійність на етапах встановлення машин та обладнання на виробництво і серійного випуску проводять самостійно або ж у складі кваліфікаційних, атестаційних, інспекційних (в тому числі періодичних) випробувань. Мета контрольних випробувань – контроль відповідності продукції вимогам на надійність, що наводяться в керівних технічних матеріалах, з урахуванням результатів визначальних випробувань. Крім того, за результатами випробувань контролюється стабільність якості виготовлення машин та обладнання, перевіряється можливість постачання споживачам.

Дослідницькі випробування на надійність проводяться з метою визначення межі витривалості деталей, виявлення закону розподілу ресурсу деталей і елементів, вивчення закономірностей процесів. У загальному випадку, в залежності від місця проведення та прийнятої методики, випробування на надійність розподіляються на лабораторні, стендові, полігонні та експлуатаційні.

При цьому необхідно відзначити, що полігонні випробування не характерні для ремонтно-технологічного обладнання. Найбільший ефект за точністю оцінки рівня надійності ремонтно-технологічного обладнання можливо отримати при проведенні комплексних випробувань, які базуються на поєднанні стендових і експлуатаційних випробувань.

Стендові випробування – це випробування машини, що проводяться на випробувальному обладнанні, під яким розуміється технічний пристрій для відтворення програм, режимів і умов випробувань. Вони, як правило, проводяться на експериментальних ділянках базових випробувальних

підрозділів та в лабораторіях НДІ, СКБ і дозволяють отримати дані про показники надійності у відносно короткий термін. Стендові випробування дають можливість гнучко змінювати і контролювати характер і рівень навантажень, застосовувати вимірювальні прилади для багатофакторного контролю параметрів технічного стану об'єкту досліджень. До недоліків стендових випробувань слід віднести складність відтворення всього спектру режимів навантаження та умов експлуатації, а також обмеження по кількості об'єктів, що одночасно можуть випробовуватись.

Експлуатаційні випробування – це випробування машини, що проводять в процесі експлуатації на аграрних та сервісних підприємствах. Випробування в процесі експлуатації, при правильній методиці збору та обробки великих обсягів інформації, дозволяють отримати достовірні дані про надійність машин, режими та умови їх роботи, характерні відмови та причини їх виникнення.

Однак, багаторазові і одноразові випробування на надійність в умовах експлуатації пов'язані із значними організаційними складнощами і вимагають тривалого часу, з огляду на порівняно значні терміни служби сучасних машин та обладнання. При проведенні експлуатаційних випробувань, особливо при обмеженому обсязі вибірки, складно забезпечити статистичну однорідність партії об'єктів випробувань. Машини та обладнання, що проходять випробування, як правило, мають значне розсіювання початкових параметрів технічного стану. Вони експлуатуються в різних умовах, при змінних режимах роботи та навантажень, що значно ускладнює можливість забезпечити якість і ефективність робіт з технічного обслуговування і ремонту машин. Зазанчені фактори мають вплив на точність визначення вихідних даних для розрахунку показників надійності.

Зазвичай рекомендується проведення комплексних випробувань з раціональним поєднанням стендових і експлуатаційних досліджень технічного стану машин та обладнання, які взаємно доповнюють один одного і дозволяють підвищити точність оцінки показників надійності.



В якості об'єктів випробувань на надійність можуть бути вибрані зразки, з'єднання і кінематичні пари, функціональні вузли обладнання, машина в цілому, системи і комплекси машин. Одночасно це повинні бути однотипні об'єкти, які не мають конструктивних та інших відмінностей, виготовлені за єдиною технологією і випробовуються в ідентичних умовах.

Завдання вибору об'єкта випробувань повинно вирішуватися в кожному конкретному випадку виходячи з реальних можливостей виробництва, необхідної точності відтворення характеру і рівня навантаження, необхідності дослідження впливу процесів різної швидкості на вихідні параметри машини, наприклад, технологічну точність і т.і.

На зразках, як правило, проводяться випробування властивостей матеріалів деталей та елементів, що визначають надійність машини. Можуть досліджуватися показники корозійної стійкості, утомної міцності, зносостійкості та інші характеристики.

З'єднання і кінематичні пари (напрямні кочення і ковзання, шарніри, підшипники, зубчасті, ланцюгові та пасові передачі) встановлюються на випробування при необхідності виявлення впливу конструктивних і технологічних чинників, режимів і умов роботи на ресурс даних пар і з'єднань. Вузли технологічного обладнання підлягають випробуванням в разі необхідності врахування впливу окремих деталей і елементів конструкції на показники надійності. Об'єктами випробувань вузлів можуть бути: шпинделі верстатів; коробки перемини передач; механізми різання, подачі, базування, фіксації; та ін.

Повнокомплектні машини та обладнання випробовуються, коли необхідно отримати інформацію про взаємодію механізмів, вузлів, агрегатів та систем (електричної, пневматичної, гідравлічної та ін.) В процесі випробувань досліджується вплив режимів та умов експлуатації на показники надійності. Системи машин та обладнання встановлюються на випробування за необхідності визначення показників надійності з урахуванням взаємодії окремих об'єктів, що пов'язані в єдиному технологічному комплексі.

Випробування полягають у виявленні працездатності певної групи найменш надійних вузлів та деталей, номенклатура яких формується з досвіду експлуатації аналогів. Якщо випробування на надійність проводити тільки для елементів з низькими показниками, то буде досягнута певна економія часу та коштів. Поелементна схема випробувань забезпечує послідовність результатів випробувань при використанні в новій конструкції елементів та деталей з наперед відомими ресурсами. Зазначена схема випробувань найбільш ефективна на стадії реалізації ресурсу окремих вузлів конструкції машини та дозволяє отримати реальні дані для конструкторського та технологічного доведення. При випробуваннях робочих органів, деталей та інших елементів є можливість збільшити обсяг вибірки, отримати більш реальний статистичний матеріал та підвищити достовірність результатів. Недоліком поелементної схеми випробувань є складність відтворення їх взаємного впливу при випробуванні елементів, обмеженість встановлення фізичної сутності виникнення відмов та впливу якості складання вузлів і агрегатів на надійність об'єкту.

З огляду на те, що в значній мірі надійність машин та обладнання визначається процесами зношування, найбільш ефективними можуть бути стендові випробування окремих вузлів та механізмів. Це дозволяє досить просто відтворити характер і рівень навантажень за допомогою нескладних навантажувальних пристроїв, врахувати взаємний вплив конструктивних елементів в роботі вузла. При таких випробуваннях значно менше спотворюється загальна картина дії зовнішніх сил, але незмінною залишається природа процесу руйнування елементів. Випробування вузлів більш виправдані економічно, а результати випробувань можуть бути поширені на аналогічні вузли інших машин та обладнання, також враховані при їх модернізації та вдосконаленні.

Комплексні випробування машин дозволяють перевірити, як працюють вузли та деталі в загальній конструкції та отримати дані про показники об'єкту в цілому, які необхідні при проведенні досліджень параметричної надійності. Тільки в комплексі можна оцінити вплив динамічних і зношувальних процесів,

їх зміну в часі, вплив на показники технічного стану машини, та якісні характеристики.

На практиці, при відборі дослідних зразків машин та обладнання являється доцільним проведення одночасно паралельних стендових випробувань кількох зразків (наприклад, при вибірці найбільш ефективних пар тертя на зносостійкість), кількох конструктивних варіантів функціональних вузлів. Це скорочує загальну тривалість випробувань, надає можливість для зразків і функціональних вузлів використовувати прискорені режими випробувань, в короткі терміни отримати порівняльні дані про надійність різних конструктивних варіантів. Також, зазначені результати можуть бути використані при модернізації машини з подальшим продовженням випробувань на надійність.

## **5.2. Планування випробувань**

Планування випробувань передбачає вибір типу випробувань, визначення числа об'єктів та умов їх проведення. Позначення планів випробувань наведені в табл. 5.1.

При визначенні показників надійності можливі два варіанти, які відрізняються наявністю або відсутністю інформації про вид закону розподілу напрацювання (ресурсу). У першому випадку застосовують параметричні методи оцінки, при яких спочатку оцінюють параметри закону розподілу, а потім визначають показник надійності як функцію від оцінених параметрів. У другому випадку застосовують непараметричні методи, при яких показники надійності оцінюють безпосередньо за експериментальними даними. Технічна сторона питання статистичного визначення закону розподілу напрацювання (ресурсу, ймовірності безвідмовної роботи та ін.) описана в розділі 4.3.

Чисельними значеннями показників надійності є випадкові величини. Тому під оцінкою показників надійності розуміють точкову або інтервальну оцінки (межі довірчих інтервалів, які із заданою ймовірністю перекривають дійсне значення показника). Характеристикою точності оцінки показника надійності являється гранична відносна помилка:

$$\varepsilon = \max \left\{ \frac{\hat{R} - R}{\hat{R}}, \frac{\bar{R} - \hat{R}}{\hat{R}} \right\} \quad (5.1)$$

де  $\hat{R}$  - точкова оцінка показника надійності  $R$ ;

$\bar{R}$  і  $\underline{R}$  - відповідно верхня і нижня межі одностороннього довірчого інтервалу при заданій довірчій ймовірності  $q$ .

Під обсягом випробувань розуміють число об'єктів випробувань  $N$  для плану [NUN]; число об'єктів випробувань  $N$  і число відмов  $r$  - для планів [NUr], [NMGr]; число об'єктів випробування  $N$  і тривалість випробувань  $T$  - для планів [NUT], [NMT].

Вихідними даними для розрахунку обсягу випробувань є: план випробувань; об'єм сукупності  $N$ ; гранична відносна похибка  $\varepsilon$ ; довірна ймовірність  $q$ . Результатами випробувань та обробки інформації є: коефіцієнт варіації  $V$ ; вид закону розподілу випадкової величини.

Планування контрольних випробувань. Контроль надійності має на меті перевірити гіпотезу про те, що отримані при випробуваннях показники не нижче встановленого рівня порівняльних зразків. При цьому приймається одне з двох рішень: прийняти партію, вважаючи надійність виробів задовільною, або відхилити партію виробів, що контролюється як ненадійну. Контрольні випробування проводять одноступінчастим і послідовними методами. При одноступінчастому контролі організовується  $n$  незалежних циклів випробувань. Під циклом випробувань розуміють напрацювання  $t$  одного виробу.

Таблиця 5.1

Номенклатура показників надійності, що використовуються при реалізації планів випробувань елементів та складних систем, машин та обладнання

Вид об'єкта випробувань	Показник надійності	Позначення	План випробувань
Елемент невідновлюємий	Середній наробіток до відмови	$T_{cp}$	$[NUN]$
	Гамма-процентний наробіток до відмови	$T_{\gamma}$	$[NUR]$
	Вірогідність безвідмовної роботи	$P(t)$	$[NUN]$
Елемент, що відновлюється	Середній ресурс	$T_p$	$[NUN] [NUR]$
	Гамма-процентний ресурс	$T_{p\gamma}$	$[NUT]$
	Вірогідність безвідмовної роботи	$P(t)$	$[NUT]$
	Середня тривалість відновлення	$T_{\epsilon}$	$[NUN]$
Складна система обладнання (машина в цілому)	Середній наробіток на відмову	$T_c$	$[NMr] [NMT]$
	Вірогідність безвідмовної роботи	$P(t)$	$[NUT]$
	Середній ресурс по точності, до середнього (капітального) ремонту та ін.	$T_{pr}$	$[NUN] [NUR]$
	Гамма-процентний ресурс по точності, до середнього (капітального) ремонту та ін.	$T_{p\gamma}$	$[NUT]$
	Середня тривалість відновлення	$T_{\epsilon}$	$[NUN]$
	Коефіцієнт готовності	$K_r$	$[NMr]$
	Питома сумарна трудомісткість технічних обслуговувань	$S_{\tau o}$	$[NMr]$
	Питома сумарна трудомісткість ремонтів	$S_p$	$[NMT]$
	Середній термін зберігання	$T_{збер c}$	$[NUR]$
	Гамма-процентний термін зберігання	$T_{збер \gamma}$	$[NUT]$
	Коефіцієнт технічного використання	$K_{mv}$	$[NMr]$

Для виробів, що не відновлюються, обсяг вибірки  $N$  може бути довільним, але таким, що забезпечує  $n$  циклів випробувань. Для об'єктів, що невідновлюються, кількість виробів  $N$  може бути кратною кількості циклів  $n$ . У

кожному циклі фіксується короткотривалий або тривалий результат. При короткотривалому результаті очікують настання відмови (граничного стану, втрати працездатності за час  $t$ ).

Послідовний метод контролю не передбачає попереднього визначення обсягу вибірки. Інформація про надійність об'єктів випробувань накопичується при послідовно зростаючому обсязі. Графіком послідовних випробувань являється ступінчаста лінія, яка побудована за координатами  $t_{\Sigma}/T_{\alpha}$ ,  $r$  точок, де  $t_{\Sigma}$  - сумарне напрацювання зразків виробів в момент настання  $r$ -ої відмови (граничного стану) (рис. 5.1).

Результати випробувань об'єктів позитивні, якщо графік послідовних випробувань (рис. 5.1) досягає однієї з ліній відповідності 2, і негативні, якщо графік досягає однієї з ліній невідповідності 1.

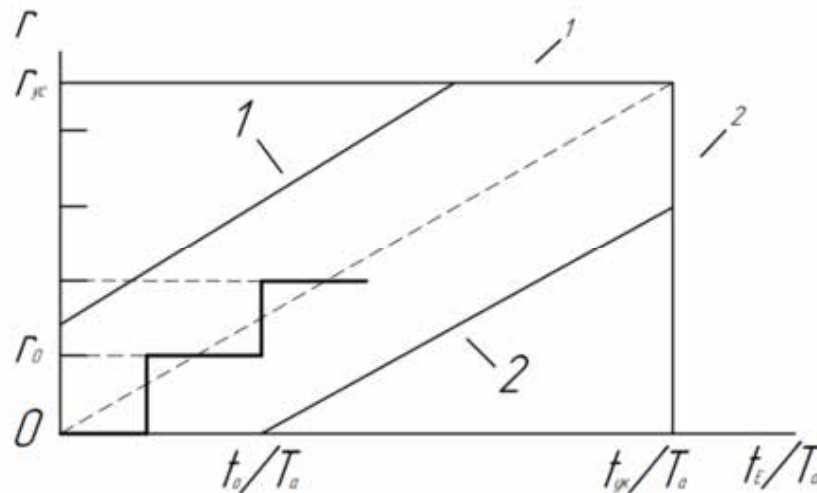


Рис. 5.1. Графік послідовних випробувань:  
1 – лінії невідповідності, 2 – лінії відповідності

Вихідними даними для планування контрольних випробувань є: ризик споживача; ризик постачальника; вибракувальне значення контрольованого показника; приймальне значення контрольованого показника; закон і параметри розподілу контрольованого показника надійності.

Показники надійності як кількісні характеристики однієї або кількох властивостей, складових надійності машин та обладнання регламентуються ДСТУ 2860-94.

При виборі номенклатури показників надійності машин та обладнання рекомендується посилатись на положення, що прийняті з урахуванням специфіки об'єкта дослідження. Номенклатура показників надійності повинна бути мінімальною, але достатньою для характеристики властивостей надійності (безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності, збереженості) та вирішення конкретних практичних завдань. Номенклатура показників розглядається для виробів, що нестаріють, властивості яких змінюються тільки під дією навантажень, що обумовлені їх функціонуванням. Показники надійності визначаються окремо для елементів і складної системи машин в цілому. Машини, обладнання та їх елементи поділяються на ті, що обслуговуються, для яких проведення технічних обслуговувань передбачено нормативно-технічною документацією (привідні паси, ланцюги, робочі органи і т.і.), та ті, що не обслуговуються (вали, корпуси і т.і.). Техніка аграрного виробництва, як складні системи, відноситься до виробів, що обслуговуються, відновлюються і ремонтуються. Для них представлені види робіт регламентовані нормативно-технічною документацією.

Номенклатура показників надійності, які визначаються при реалізації планів випробувань елементів і складних систем, надана в табл. 5.1.

### **5.3. Показники технічного стану, що контролюються в процесі випробувань**

Номенклатура показників якості машин та обладнання розподіляється на показники призначення, надійності, стандартизації та уніфікації, безпеки та ін. Особливе значення мають показники, які пов'язані з функціональним призначенням машин, оскільки вони безпосередньо впливають на їх працездатність. Відповідно до класифікації, що наведена в розділі 1.2, машини

та обладнання вразливі, як до відмов елементів, так і до параметричних відмов. Причому останні поділяються на відмови за технологічними і функціональними параметрами.

Ознаки відмов і граничних станів за технологічними параметрами визначають вихід одного з показників якості продукції за допустимі межі, які передбачені конструкторською та технологічною документацією. Також ознаками відмов може бути зниження параметрів виготовлення. Для технологічного обладнання, при визначенні властивостей якості та надійності, визначальне значення мають показники, які пов'язані з точністю обробки, стабільністю фізико-механічних властивостей матеріалів, шорсткістю оброблених технологічних поверхонь, функціональними властивостями кінцевої продукції та ін. Значення зазначених показників необхідно визначити при оцінці початкової якості обладнання, та в подальшому, періодично контролювати в процесі проведення випробувань. При цьому необхідно враховувати, що точність і якість обробки безпосередньо пов'язані з технологічними процесами виготовлення. Чим вищий запас верстата за точністю та якістю обробки, тим вищі режими роботи можуть бути застосовані, що позитивно позначається на продуктивності. У ряді випадків, при виготовленні виробів високої точності та якості, можна допустити незначне зниження продуктивності, в той час як зниження регламентованих показників якості недопустиме. Тому в процесі випробувань необхідно визначити, використовуючи відповідну нормативно-технічну документацію, значення точності, якості, продуктивності та контролювати їх співвідношення періодично за наробітком.

Одним із завдань випробувань на надійність є встановлення, крім самого факту відмови за технологічними параметрами, причини відмови з подальшою розробкою рекомендацій щодо підвищення надійності за даним параметром. Як правило, появі технологічної відмови передують погіршення одного або кількох параметрів технічного стану обладнання під дією процесів різної інтенсивності. В процесі експлуатації (випробувань) змінюються такі показники технічного стану обладнання, як: геометрична точність; жорсткість; рівень шуму; рівень



вібрацій; ступінь зносу рухомих з'єднань та ін. Граничні значення перерахованих показників також регламентуються ДСТУ та технічними умовами, а вихід показника за встановлені норми класифікується як функціональна відмова. Вказані вимоги визначають необхідність проведення контролю та оцінки зміни рівня функціональних параметрів обладнання в процесі випробувань з метою встановлення закономірностей їх накопичення та впливу на якісні характеристики.

Розглянемо особливості контролю показників технологічної точності. Технологічною називають точність, за якою деталі обробляються на даному обладнанні. Технологічна точність характеризується величиною дійсної похибки розмірів та форми в порівнянні із заданими номінальними значеннями. Технологічна точність повинна забезпечувати встановлений рівень геометричної взаємозамінності виробу, вимоги до комплектування та складання, техніко-економічну ефективність процесу.

При оцінці технологічної точності деталі слід розрізняти точність забезпечення розмірів, точність форми та взаємне розташування поверхонь. Точність забезпечення розмірів регламентується ДСТУ 2400-94, згідно з яким мірою точності розміру прийнятий квалітет. Числові значення допусків, як різниць між найбільшим і найменшим граничними розмірами, для технологічних квалітетів точності наведені в додатку до стандарту.

Точність кожного параметра деталі є результатом дії ряду різних факторів: верстату; інструменту; заготовки; робочих режимів; засобів контролю та вимірювань. Розмір деталі можна розглядати як випадкову величину  $X$ , яка залежить від систематичних і випадкових похибок обробки.

До систематичних відносяться похибки, величина яких непостійна та змінюється за певним законом. Слід розрізняти систематичні похибки за короткий і тривалий періоди використання обладнання. В процесі обробки партії заготовок якість залежить, головним чином, від конструктивно-технологічної похибки верстата, зносу ріжучого інструменту, похибки базування.

До випадкових належать похибки, виникнення яких не підлягає обґрунтуванню певної встановленої закономірності, тому не можна заздалегідь визначити їх характерні критерії. Вони обумовлюються неоднорідністю матеріалу заготовки, нестабільністю режиму обробки, деформаціями та вібраціями самого верстата.

Визначення параметрів точності технологічних систем, процесів, операцій проводиться на основі статистичної обробки результатів вимірювань партії (вибірки) оброблених деталей. Вибірка обсягом 50...200 деталей носить назву вибірки з випадково відібраних деталей, яка виготовлена при одному або декількох налаштуваннях на одному верстаті. Результати вимірювань такої вибірки дають впевненість в тому, що отримані значення точності дійсно відображають технічний стан верстата. Результати зазначених вимірювань можуть бути використані для виявлення вибірки меншого обсягу, якої достатньо для визначення точності із заданим рівнем достовірності.

Вибірка обсягом 5... 20 деталей відібраних в послідовності їх обробки на одному верстаті, називається миттєвою.

Вибірка, що складається з 10 або більше миттєвих вибірок, взятих послідовно з одного верстату, з урахуванням налаштування або встановлення нового нового інструменту називається загальною. Метод миттєвих вибірок дозволяє оцінити зміни точності обладнання в часі.

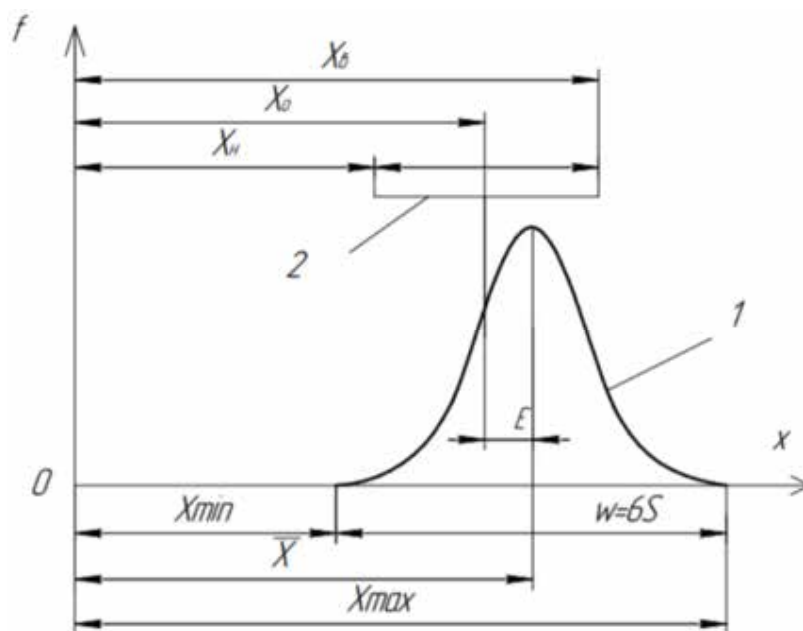


Рис. 5.2. Схема формування технологічної точності обробки:

1 – крива нормального розподілу; 2 – поле допуску

Розсіювання розмірів деталей при їх обробці, як показують експериментальні дослідження, з достатньою точністю описується нормальним законом розподілу, який характеризується симетричною формою з асимптотичним наближенням обох гілок до осі абсцис (рис. 5.2).

Крива нормального розподілу описується наступним рівнянням:

$$\gamma = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \exp[-(X - \bar{X})^2 / 2S^2] \quad (5.2)$$

де  $X$  – змінна випадкова величина (дійсний розмір деталей), мм;

$\bar{X}$  – середнє арифметичне значеннє випадкових величин, мм;

$S$  – середньоквадратичне відхилення (розсіювання) випадкових величин), мм.

Показники технологічної точності, для будь-якого момент часу, незалежно від обсягу вибірки визначаються наступним чином. За результатами

вимірювання деталей складають статистичний ряд з полем розсіювання  $\omega_{\phi}$ , який розбивається на  $k = 6 \dots 9$  інтервалів  $(X_{\max} - X_{\min})/k$ . Розрахунок проводиться за табличною формою.

№ Інтервалу	Межі інтервалу, $k$ , мм	Середнє значення інтервалу, $X_u$ мм	Кількість деталей в інтервалі, $n_k$	$\bar{X}_k n_k$	$\bar{X}_k - \bar{X}$	$(\bar{X}_k - \bar{X})^2$	$(\bar{X}_k - \bar{X})^2 n_k$
1	$x_{i1} \dots x_{i1}$	$\frac{x_{i1} + x_{i1}}{2}$					
2	$x_{i2} \dots x_{i3}$	$\frac{x_{i2} + x_{i3}}{2}$					
3	$x_{i3} \dots x_{i4}$	$\frac{x_{i3} + x_{i4}}{2}$					
			$n = \sum n_k$	$\sum \bar{X}_{n_k}$			$\sum (\bar{X}_k - \bar{X})^2 n_k$

Середнє значення або центр розсіювання вибірки визначають за наступною формулою:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum \bar{X} n_k \quad (5.3)$$

де  $X_k$  – середнє значення в  $k$ -му інтервалі (класі);

$n_k$  – кількість розмірів в  $k$ -му інтервалі.

Середнє квадратичне відхилення визначають за формулою:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (\bar{X}_k - \bar{X})^2 n_k}{\sum n_k - 1}} \quad (5.4)$$

За результатами вимірів декількох миттєвих вибірок середнє значення розраховують за формулою:

$$\bar{X} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \bar{X}_j \quad (5.5)$$

де  $\bar{X}_j$  – середнє значення  $j$ -ї миттєвої вибірки;

$m$  – число миттєвих вибірок.

Середнє квадратичне відхилення за кількома миттєвими вибірками однакового обсягу розраховується за формулою:

$$S = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m S_j^2 + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\bar{X}_j - \bar{X})^2} \quad (5.6.)$$

де  $S_j^2$  – середнє квадратичне відхилення для  $j$ -ї миттєвої вибірки.

Оцінку достовірності отриманих значень параметрів точності слід проводити методом довірчих інтервалів, виходячи із загального обсягу вибірки  $N$ . Довірчий інтервал для величини  $\bar{X}$  можна розрахувати за наступною формулою:

$$I_{\bar{X}} = (\bar{X} - \varepsilon \dots \bar{X} + \varepsilon) \quad (5.7)$$

В представленій аналітичній залежності  $\varepsilon$  визначають за формулою:

$$\varepsilon = t_{\alpha} S / \sqrt{n} \quad (5.8)$$

де  $t_{\alpha}$  – квантиль розподілу Стьюдента, який визначається для заданої довірчої ймовірності в залежності від рівня значимості  $\alpha = 1 - \gamma$ ; числа ступенів свободи  $r = n - 1$ :

$$I_S = \left( S \sqrt{(n-1)/\chi_1^2} \dots S \sqrt{(n-1)/\chi_2^2} \right) \quad (5.9)$$

де  $\chi_1^2$  і  $\chi_2^2$  – величини (значення критерію згоди Пірсона) визначають в залежності від числа до  $r = n - 1$  і ймовірності  $P$ :

$$P = \begin{cases} \frac{1-\gamma}{2} & \text{– для } \chi_1^2 \\ 1 - \frac{1-\gamma}{2} & \text{– для } \chi_2^2 \end{cases} \quad (5.10)$$

Довірча ймовірність  $\gamma$ , як правило, приймається досить великою і дорівнює 0,90; 0,95; 0,99 в залежності від рівня потреб, що пред'являються до якості продукції, що виготовляється.

Площа, розміщена між кривою нормального розподілу і віссю абсцис (див. рис. 5.2), дорівнює одиниці. Це означає, що крива охоплює всі можливі розміри деталей партії:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \gamma dX = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-X^2/2S^2) \frac{dX}{S} = 1 \quad (5.11)$$

Замінивши відношення  $X/S$  через  $Z$ , отримуємо функцію від  $Z$  для любого приватної ділянки від 0 до  $Z$ :

$$\Phi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-X^2/2S^2) dz \quad (5.12)$$

Значення функції (5.12) можуть бути використані для визначення в процентах часткою деталей з розмірами, відповідними будь-яким ділянкам абсциси. Так, наприклад, в інтервалі розмірів, відповідному  $X \pm 3S$ , знаходиться 99,73% всіх можливих обсягів деталей партії; в інтервалі  $X \pm 2S$  – 95,45%; в інтервалі  $X \pm S$  – 68,27%.

Одним з основних показників технологічної точності металообробних верстатів як технологічних систем є коефіцієнт точності (за контрольованим параметром):

$$K_T = \frac{\omega}{\delta} \quad (5.13)$$

де  $\delta$ - допуск на контрольований розмір деталі для заданого квалітету. Технологічна точність роботи верстата за заданим квалітетом забезпечується при виконанні умови  $K_T \leq 1$ .

Точність технологічного процесу обробки деталей на верстаті в фіксований момент часу залежить від співвідношення величин, що характеризують середнє значення вибірки  $X$ , середнє квадратичне відхилення  $S$ , нижню  $X_n$  і верхню  $X_v$  межу поля допуску. Відсоток деталей, що задовольняють вимогам, що пред'являються по точності виготовлення, розраховується за формулою:

$$\begin{aligned} \Pi &= \left[ \Phi \left( \frac{\bar{X} - X_n}{S} \right) - \Phi \left( \frac{X_v - \bar{X}}{S} \right) \right] \cdot 100\% = \\ &= [\Phi(Z_1) - \Phi(Z_2)] \cdot 100\% \end{aligned} \quad (5.14)$$

При цьому необхідно враховувати, що  $\Phi(-Z) = 1 - \Phi(Z)$ .

Контроль показників технологічної стабільності. В експлуатації та випробуваннях технологічна система машини неминує втрачає свою початкову якість під впливом перерахованих вище дій та факторів. Для прогнозування роботи обладнання та управління технологічним процесом необхідно знати, як змінюються якісні показники продукції, що випускається в часі. Властивість технологічного процесу зберігати якісні показники обробки в заданих межах протягом деякого часу називається стабільністю технологічного процесу.

Як показник стабільності доцільно використовувати ймовірність виконання технологічною системою завдання за одним з параметрів продукції, що виготовляється  $P_i(t)$ , яка визначається як ймовірність виконання вимог нормативно-технічної документації за цим параметром для одиниці продукції, виготовленої в момент часу:

$$P_i(t) = P\{X_{ni} \leq X_i(t) \leq X_{vi}\} \quad (5.15)$$

де  $X_i(t)$ ,  $X_{vi}$ ,  $X_{ni}$  – відповідно фактичне, верхнє і нижнє граничні значення контрольованого параметра.

Вибір цього показника пояснюється тим, що він дозволяє за єдиною методикою співвіднести фактичне та граничне значення параметра та оцінити стабільність системи на ділянці з різними робочими процесами і критеріями якості.

Стосовно до процесу механічної обробки стабільність оцінюється ймовірністю виконання заданих вимог до технологічної точності деталей:

а – зміна параметрів  $X$  і  $S$  з напрацювання  $t$ ;

б – зміна функції ймовірності виконання завдання з напрацювання  $t$ .

Аналіз технологічної стабільності деревообробного верстата проводять методом миттєвих вибірок. Обсяг миттєвих вибірок залежить від величини партії оброблюваних заготовок і від допустимої граничної ймовірності  $q$  визнання придатними дефектних деталей в контрольованій партії. Практично, для отримання вихідних даних доцільно відбирати періодично в фіксовані моменти часу  $t_1, t_2 \dots t_m$ . Для контролю  $m = 5 - 10$  миттєвих вибірок по 5 - 10 деталей в кожній.

Для кожної  $j$ -й миттєвої вибірки визначається значення середнього квадратичного відхилення  $S_j$  і середнього значення контролюючого розміру  $X_j$ . Функції зміщення центру групування розмірів  $X(t)$  і зміни миттєвої похибки, що визначається через середньоквадратичне відхилення  $S(t)$  за напрацюваннями  $t_1, t_2 \dots t_m$ , визначаються методом найменших квадратів. В найпростішому випадку, приймаючи гіпотезу про лінійну зміну параметрів  $X$  і  $S$  з напрацювання  $t$ , отримаємо:

$$\bar{X}(t) = \bar{X}_0 + \gamma_X t \quad (5.16)$$

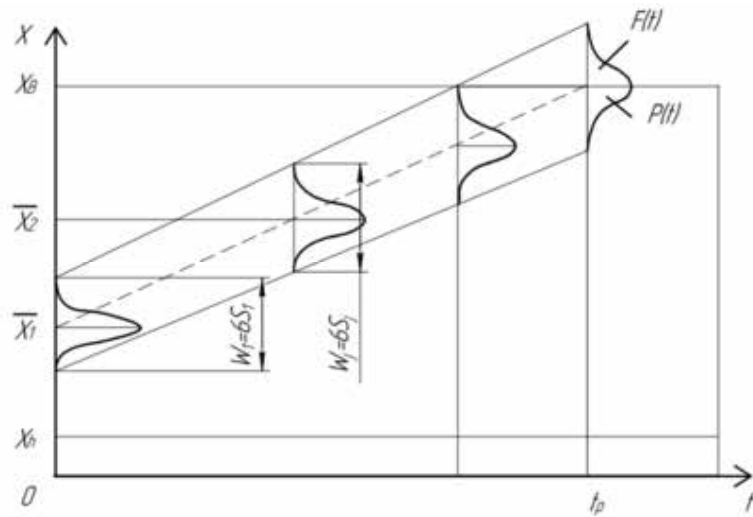
$$S(t) = S_0 + \gamma_S t \quad (5.17)$$

де  $\bar{X}_0$  і  $S_0$  – початкові значення параметрів  $X$  і  $S$  в момент часу  $t_1 = 0$ ;

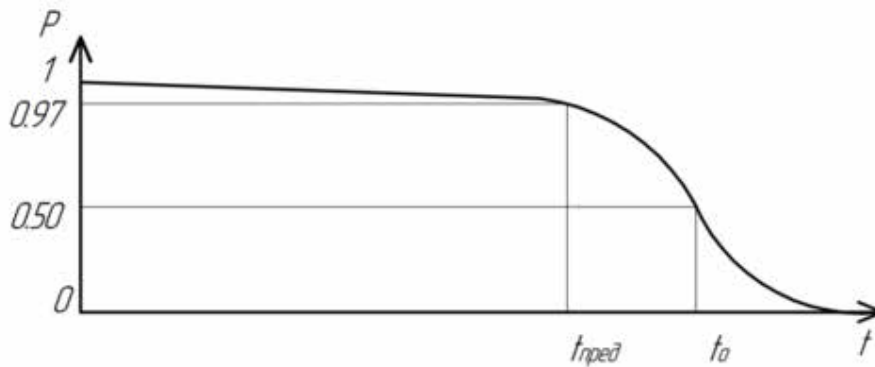
$\gamma_X, \gamma_S$  – швидкості зміни параметрів  $X$  і  $S$ .

Графічно одна з можливих реалізацій моделі зміни параметрів  $X$  і  $S$  з напрацюванням  $t$  представлена на рис 5.3, а.





а



б

Рис. 5.3. Графічне представлення моделі технологічної стабільності

Ймовірність виконання завдання технологічною системою визначають за виразом:

$$P(t) = \Phi\left(\frac{X_B - \bar{X}_0 - \gamma_X t}{S_0 + \gamma_S t}\right) - \Phi\left(\frac{X_H - \bar{X}_0 - \gamma_X t}{S_0 + \gamma_S t}\right) \quad (5.18)$$

Результати розрахунку за формулою (5.18) можуть бути представлені у вигляді графіка залежності  $P = f(t)$ . Допустимий рівень зниження  $P(t)$  вибирається залежно від значення відсотка  $q$ . За графіком на рис 5.3, б для значення  $P = 0,97$  визначається граничне значення часу  $t_{пред}$ , що визначає необхідність проведення управлінських впливів (заточування ріжучого інструменту, регулювання механізму, технічне обслуговування підсистеми та

ін.). При контролі показників технологічної точності та стабільності контрольовані розміри деталей вимірюються штангенциркулями, мікрометрами, індикаторами годинникового типу безпосередньо або з використанням спеціальних пристосувань. Відхилення поверхонь деталей від площинності та похибки взаємного розміщення оброблених поверхонь контролюються повірочними лінійками, косинцями і щупами.

Перелік необхідних засобів вимірювань, вимоги до їх точності, а також методики виконання вимірювань наводяться в інструкціях на експлуатацію обладнання.

Розглянемо особливості контролю показників шорсткості оброблених поверхонь деталей. Шорсткість оброблених поверхонь деталей з металу і деревини характеризується числовими значеннями параметрів нерівностей (нерівності руйнування, нерівності гнучкого відновлення, хвилястість, а також структурні нерівності поверхні плит, спресованих з деревних частинок) і наявністю або відсутністю ворсистості на оброблених поверхнях (рис. 5.4.).

Стандарти встановлюють наступні параметри шорсткості:

$R_{max}$  – середнє арифметичне з найбільших по висоті нерівностей, що знайдені вибірково на всій контрольованій поверхні;

$R_m$  – глибина максимальних нерівностей,

$R_z$  – середнє арифметичне значення висоти п'яти найбільших нерівностей, що розташовані в межах базової довжини профілю поверхні;

$R_a$  – середнє арифметичне значення абсолютних відхилень профілю від його середньої лінії  $m$  в межах базової довжини;

$S_z$  – середнє арифметичне значення кроку нерівностей в межах базової довжини, що визначені по западинах профілю.

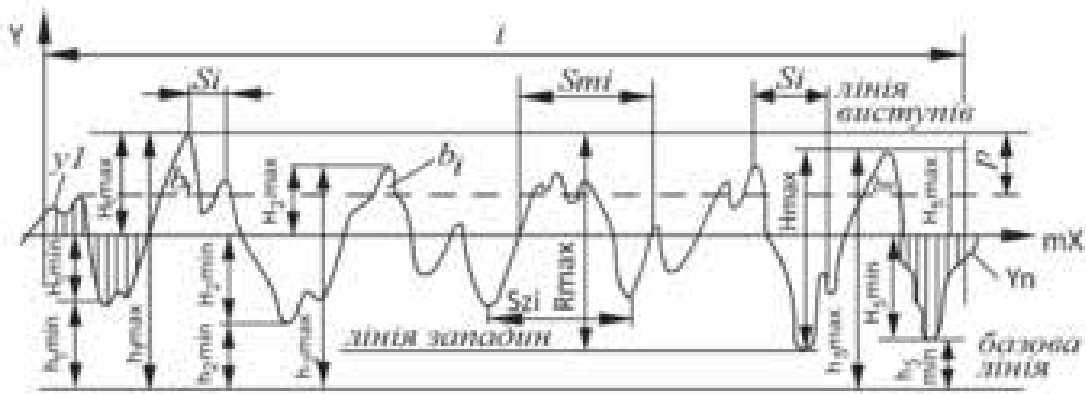


Рис 5.4 Схема визначення шорсткості обробленої поверхні

Параметри  $R_{tmax}$ ,  $R_m$ ,  $R_z$ ,  $R_a$  рівноправні і стандарт допускає користуватися не тільки будь-яким з них, але і їх поєднанням, а також додатковим параметром.

Параметр  $R_{tmax}$  рекомендується використовувати для нормування шорсткості і контролю поверхонь, на яких є нерівності руйнування. Глибина (висота) максимальних нерівностей  $R_m$  має значення для багатьох процесів обробки металу та деревини. З глибиною нерівностей пов'язані міцність склеювання і величина втягування облицювальних матеріалів. Чисельне значення прямо вказує на товщину шару, який повинен бути знятий з заготовки для усунення на ній нерівностей. Використовуючи параметри і 5%, можна задавати вимоги до шорсткості поверхні підкладки для забезпечення необхідної якості облицюваної поверхні, наприклад, деревиностружкової плити після ламінування або обклеювання плівками.

Методи визначення шорсткості виробів регламентовані стандартом. На практиці найбільшого поширення набули профільні методи, в основу яких покладені способи отримання профілю перетину контрольованої поверхні та оцінки її шорсткості за цим профілем. Найчастіше з цією метою використовуються способи світлового перетину або ж оцінки стану поверхні.

Залежно від граничних значень параметрів шорсткості поверхні рекомендується застосовувати наступні прилади: індикаторний глибиномір для

вимірювання шорсткості за параметром  $R_{max}$  в межах 500...1600 мкм; ТСП-4С для  $R_{mmax}$  – в межах 60 ... 1600 мкм; МИС-11 для  $R_{mmax}$  – в межах 1,5 ..63 мкм.

Значно більшого поширення набули профілографи і профілометри, в яких твердий щуп (найчастіше ним служить алмазна голка) ковзає по контрольованій поверхні, нерівності якої викликають відповідні локальні коливальні переміщення щупа. Переміщення щупа з допомогою механізмів і електронних пристроїв перетворюються, підсилюються і з багаторазовим збільшенням записуються на фотоплівці, папері, а також можуть бути отримані зі шкали, що показує прилад. Прилади послідовного перетворення профілю з допомогою профілографів моделей 201, 252 для вимірювань  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_m$  від 0,02 до 100 мкм, профілометрів моделей 253 і 283 для вимірювання в межах від 0,04 до 25 мкм.

Техніка вимірювання та обробки отриманої інформації детально викладається в документації на прилади.

Геометрична точність верстатів характеризується похибками його окремих елементів (деталей) і помилками їх взаємного переміщення і розташування. Дослідження показали, що похибки обробки в результаті геометричних помилок верстату в загальному балансі не є домінуючими і складають 20-25%, тому вихід верстату за норми геометричної точності не завжди призводять до втрати ним якісних характеристик обробки. Проте зниження геометричної точності, що обумовлена зношуванням та іншими процесами з низькою інтенсивністю, призводять до зміни траєкторій руху виконуючих робочих органів обладнання (або заготовок при рухомому базуванні) від розрахункових законів руху і є джерелом додаткових динамічних навантажень, що не може не позначитися на точності отриманих показників. Таким чином, контроль за показниками геометричної точності в процесі експлуатації або ж випробувань може об'єктивно свідчити про погіршення якості верстата, і крім того, дає можливість отримати інформацію про можливі причини вказаного погіршення.

Геометричні похибки проявляються у формі нерівності по поверхні або непрямолінійності траєкторій переміщення, непаралельності відносного положення частин машини або їх переміщень, неперпендикулярності відносного

положення частин або напряму їх переміщення, неспіввісності, лінійного зміщення рівнів частини, що переміщуються, биття (радіального і торцевого), зміщення частин при радіальних, осьових і поперечних зазорах в направляючих.

До основних показників геометричної точності обладнання відносяться: геометрична точність баз для встановлення заготовки та інструменту; геометрична точність траєкторій переміщень робочих органів верстата, що несуть заготовку та інструмент; точність розподілу осей обертання і напрямків прямолінійних переміщень робочих органів, що несуть заготовку і інструмент відносно один одного і щодо баз; точність взаємопов'язаних переміщень робочих органів машини і точність установочних переміщень робочих органів, що несуть заготовку та інструмент; точність координатних переміщень (позиціонування) робочих органів верстату, що несуть заготовку і інструмент.

Геометрична точність регламентується нормами точності, які для більшості машин та обладнання є стандартизовані. Загальні вимоги до випробувань на геометричну точність, методи перевірок точності, номенклатура перевірок, схеми, засоби та способи вимірювання визначаються стандартами та нормативно-технічною документацією на конкретні типи обладнання (рис. 5.5).

При проведенні вимірювань показників геометричної точності використовуються універсальні вимірювальні прилади та інструменти: індикатори зі стійками, щупи, повірочні лінійки і кутики. Крім того, застосовують контрольні оправки з конусним хвостовиком для встановлення в шпindel та ін. В зв'язку з інтенсивним розвитком вимірювальної техніки все ширше застосовують високоточні прилади, що забезпечують автоматизований запис інформації, а в окремих випадках і для її обробки. До числа таких приладів відносяться лазерні інтерферометри для оцінки переміщень і точності позиціонування, прилади з різного типу первинними перетвореннями для вимірювання точності обертання шпindelів та ін.

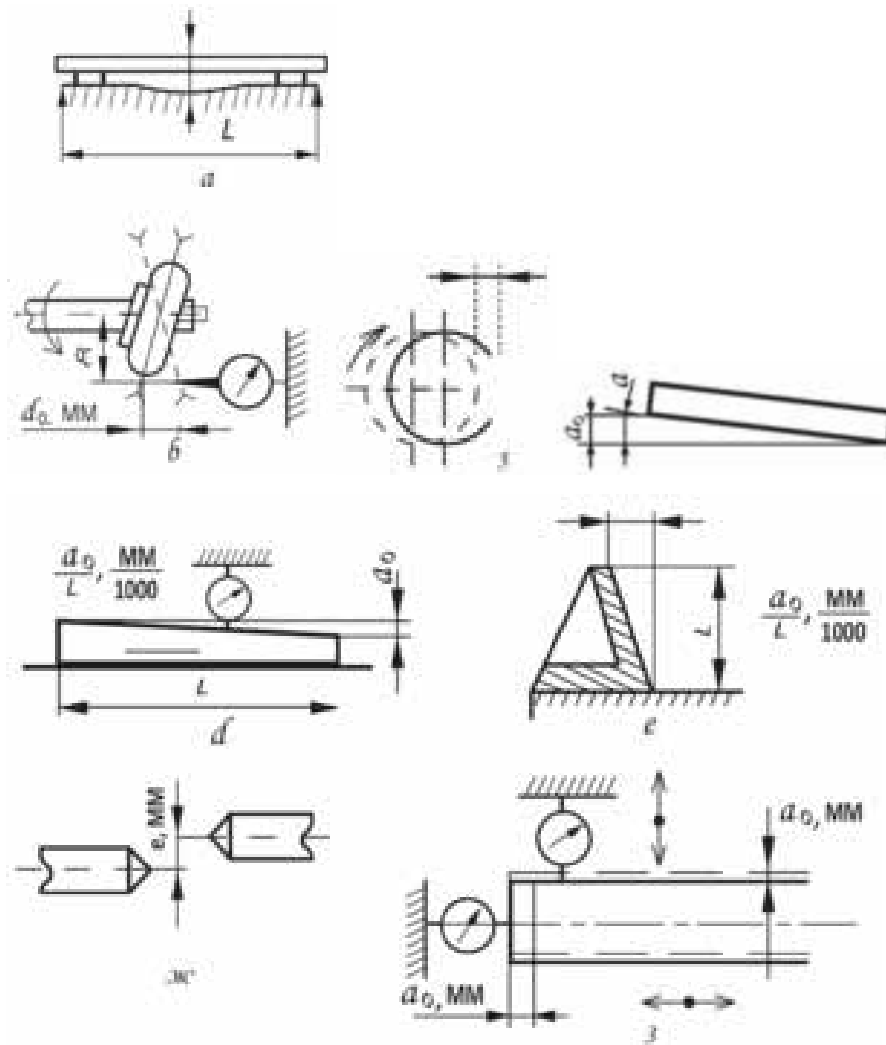


Рис 5.5. Схеми перевірок елементів на геометричну точність

Вимірювання показників геометричної точності проводяться при оцінці початкової якості обладнання після його обкатки на холостому ході. В процесі випробувань на надійність визначаються швидкість і характер зміни похибок геометрії обладнання шляхом періодичних вимірювань параметрів напрацювання.

Контроль жорсткості пружної системи верстату. Жорсткість – здатність машини, її функціональних вузлів і елементів, заготовки (деталі) чинити опір деформуючій дії зовнішніх сил. Жорсткість – один з важливих показників технічного рівня і технічного стану верстату.

Технологічна система верстат - пристосування - інструмент - деталь являє собою пружну систему, деформації якої під дією зовнішніх сил, що виникають при фіксації, базуванні та обробці, впливають на точність розмірів, форму і якість оброблених поверхонь деталей. Крім того, жорсткість являється одним з визначальних параметрів динамічної системи машини. Тому надання механізмам верстату достатньої жорсткості і збереження її в процесі експлуатації служать гарантією забезпечення заданого рівня якості обробки.

Жорсткість оцінюється відношенням зовнішньої сили  $F$ , що направлена по нормалі до цієї точки елемента конструкції, до зміщення  $Y$  цього елемента, виміряним у напрямку дії сили, Н/мм:

$$C = F/Y \quad (5.19)$$

Залежно від виду і характеру прикладення зовнішніх сил, а також від стану, в якому перебуває об'єкт дослідження, розрізняють статичну і динамічну жорсткості. При визначенні статичної жорсткості передбачається навантаження непрацюючого верстата (механізму, вузла, деталі) статичною силою і вимірювання переміщення елемента конструкції машини в напрямку дії вектора сили.

Динамічна жорсткість визначається на працюючій машині і в значно більшій мірі відображає реальну здатність механізму (вузла, деталі) чинити опір деформуючій дії зовнішніх сил, що виникають в процесі обробки. Причому, сили можуть мати як статичний, так і динамічний характер, який обумовлений процесом різання, інерційними навантаженнями від незрівноважених обертових мас та ін.

Розрізняють жорсткість верстата  $C_v$ , пристосування  $C_n$ , інструменту  $C_i$ , деталі  $C_d$ . Оскільки деформуюче зусилля, в загальному випадку, є однаковим для всіх компонентів пружної системи, то рівність (5.19) є справедливою як для всієї системи, так і для кожного окремого елемента. Знаючи жорсткість кожного компонента, можна визначити жорсткість всієї системи за формулою:

$$\frac{1}{C_{\text{сист}}} = \frac{1}{C_c} + \frac{1}{C_{\text{п}}} + \frac{1}{C_i} + \frac{1}{C_d} \quad (5.20)$$

Величина, зворотна жорсткості, називається податливістю:

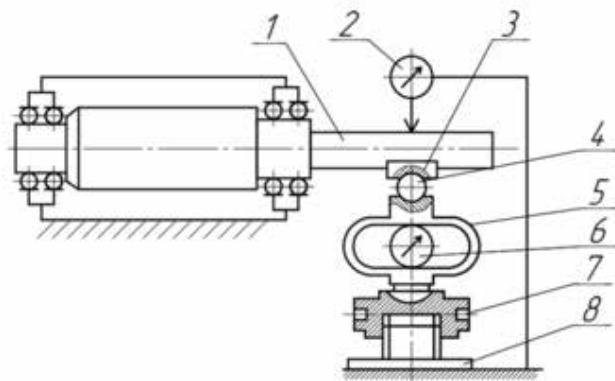
$$q = \frac{1}{C} = \frac{Y}{F} \quad (5.21)$$

Податливість системи виражається через її компоненти:

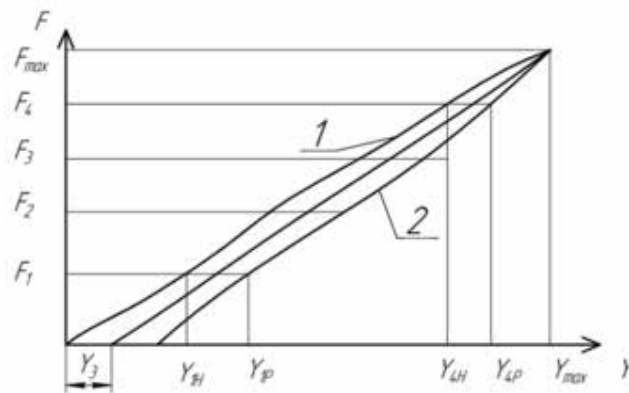
$$q_{\text{сист}} = q_c + q_{\text{п}} + q_i + q_d \quad (5.22)$$

При випробуваннях обладнання на статичну жорсткість для отримання достовірної та об'єктивної інформації необхідно, за можливості, виконати ряд умов. Верстат повинен бути підготовлений до випробування відповідно до керівних матеріалів на експлуатацію. Напряв навантажуючої сили повинен відповідати напрямку сумарної сили різання. Величина навантажувальної сили повинна бути достатньою для того, щоб викликати переміщення, які можна точно зафіксувати звичайним індикатором навантаження, гранично допустимого для верстата, який випробовується. Вузли, що переміщуються на верстаті повинні випробовуватись в певній послідовності. Як приклад, розглянемо методику експериментального визначення статичної жорсткості фрезерного вузла шпинделя дереворіжучого верстата. Для визначення статичної жорсткості необхідно навантажити консольну частину шпинделя певною силою і проконтролювати його переміщення під дією цієї сили. Навантаження і вимірювання деформації шпинделя здійснюється за схемою (рис. 5.6. а)





а



б

Рис 5.6. Вимірювання статичної жорсткості шпиндельного вузла:  
а – схема навантаження, б – графік залежності «навантаження-деформація»

Сила навантаження  $P$  шпинделя 1 створюється парою гвинт 8 - гайка 7, контролюється за індикатором 6 динамометра ДОСМ-3 5 і передається через кульку 4 і призму 3. Кулька дозволяє найбільш точно витримати координату вимірюють індикатором годинникового типу ІЧ 10, з ціною поділки 0,01 мм. Індикатор встановлюється на корпусі шпиндельного вузла на стійці. Сила навантаження вибирається за найбільш типовим випадом обробки і характеризується величиною, напрямом і точкою докладання. Для поздовжньо-фрезерних верстатів точка докладання сили відповідає середині найбільшої ширини (або товщини) деталі, величина сили  $F$ ,  $H$ , встановлюється з виразу:

$$F = 5B, \quad (5.23)$$

де  $B$  - максимальна ширина фрезерування, мм,

Так, при  $B = 200$  мм,  $F = 1000$  Н і коефіцієнті жорсткості діаметра ДОСМ-3  $C = 2500$  Н/мм індикатор динамометра повинен показати величину деформації  $Z = F / C = 0,40$  мм

Вимірювання проводяться при декількох (4-5) ступенях навантаження для того, щоб виходячи із залежності між переміщенням і навантаження близькими до лінійних, виявити і усунути можливі грубі помилки. Величини ступенів навантаження залежать від обраної величини максимального навантаження. У даному випадку шпиндель навантажується силами 200, 400, 600; 800 і 1000 Н.

Після встановлення навантажувального пристрою та індикатора для вимірювання переміщення, шпиндель 2-3 рази навантажується силою максимальної величини і без запису значень розвантажується; після розвантаження індикатори виставляються на нуль. Потім створюється перший ступінь навантажування і записуються значення показників індикатора деформації; потім дається другий ступінь навантаження і знову записуються значення показника індикатора і т.д. Після запису показників при максимальному навантаженні шпиндель поступово розвантажується із записом показань індикатора на кожному ступені. Весь цикл вимірювань виконується два рази, а при великому розсіюванні значень (більше 10%) тричі.

На кожному ступені для навантаження і розвантаження обчислюють середнє арифметичне переміщень (деформацій) і за цими даними в координатах  $Y - F$  будують характеристику переміщення вузла (рис. 5.6, б) Здатність навантаження і розвантажувальна лінії утворюють петлю гістерезису, яка визначає роботу, яка витрачається на тертя в стиках. По кривих навантаження і розвантаження можна побудувати усереднену лінію, пересічення якої з віссю  $Y$  показує величину зазору  $Y_3$ . Тоді пружне переміщення вузла  $Y - Y_{\max} - Y_3$ , а жорсткість шпиндельного вузла розраховується за формулою:

$$C_{\text{шу}} = \frac{F}{Y_{\text{max}} - Y_3} \quad (5.24)$$

Періодичний контроль рівня статичної жорсткості в процесі експлуатації (випробувань) обладнання дозволяє встановити характер і швидкість трансформації цього показника якості машини в часі. Вихід машини за норми жорсткості, які регламентовані ДСТУ і технічними умовами, класифікується як параметрична відмова за функціональними параметрам.

При дослідженнях динамічної жорсткості необхідно враховувати, що вона залежить не тільки від величини, характеру і частоти зовнішнього збурення, а й значною мірою визначається динамічними параметрами пружної системи об'єкта випробувань: маси, жорсткості, демпфірування. Як джерело зовнішніх впливів динамічного характеру можуть бути використані інерційні, електромагнітні, гідравлічні та інші вібратори, технічні характеристики яких дозволяють відтворювати навантаження, які близькі до реальних, що виникають в процесі обробки.

Як приклад досліджень динамічної жорсткості розглянемо основні методичні положення такого дослідження для фрезерного шпиндельного вузла. В режимі фрезерування на шпиндель діють зовнішні сили, основними з яких є нормальна до напрямку подачі складової сили різання і сила інерції від дисбалансу ріжучого інструменту. Вказані сили враховуються у вигляді векторної суми:

$$F_{\text{дин}} = F_y + F_i \quad (5.25)$$

При обертанні в шпинделя вузла крім зовнішніх навантажень виникає гіроскопічний момент  $M_r$ , який може стабілізувати або дестабілізувати систему:

$$M_r = (A - B)\sin\theta\omega^2 \quad (5.26)$$

де  $A$  – поперечний момент інерції шпиндельного вузла щодо центра ваги системи;

$B$  – осьовий момент інерції щодо осі обертання шпинделя;

$\theta$  – кут відхилення дійсної осі обертання від геометричної.

Для інструменту типу плоского диска (круглі пилки, диски і т. п.) виконується нерівність  $A < B$ . В цьому випадку гіроскопічний момент стабілізує систему, і динамічна жорсткість шпинделя може виявитися значно вищою статичної жорсткості при однакових за величиною зовнішніх виникаючих силах. Для консольного шпиндельного вузла, що несе на консолі інструмент типу довгого циліндра (ножова головка), може виконуватися нерівність  $A > B$ . Це означає, що гіроскопічний момент дестабілізує систему та викликає додаткове пружне переміщення шпинделя за рахунок перерозподілу мас в результаті повороту осі власного обертання дестабілізуючий вплив гіроскопічного ефекту викликає падіння жорсткості і зменшення власної частоти коливань в динамічному режимі.

У разі, коли основним джерелом зовнішнього впливу на працюючий шпиндель є сили інерції від незрівноваженої маси ріжучого інструменту, що обертається і шпинделя, експериментальні дослідження динамічної жорсткості виконуються наступним чином. На шпиндель 1 (рис. 5.7) над інструментом 5 встановлюється диск 2 з дисбалансною масою 3, при обертанні шпинделя з частотою  $n$ ,  $\text{хв}^{-1}$ , маса  $m$ , кг, розташована на відстані  $l$ , м, від осі шпинделя, створює силу інерції  $F_i$ , Н, яка і є силою навантаження (зовнішній вплив) шпиндельного вузла і яку можна змінювати при встановленні на диск різних за величиною мас  $m$ :

$$F_i = ml \left( \frac{\pi n}{30} \right)^2 \quad (5.27)$$

Вимірювання вібропереміщень шпинделя здійснюється безконтактним способом за допомогою індуктивного датчика 4 типу ДДУ-20. Коливання, що виникають при обертанні шпинделя, викликають зміни величини зазору між котушками датчика і циліндричною поверхнею вимірювального диска 2. В

результаті змінюється магнітний опір зазору, і відбувається розбалансування вхідного моста перетворювача ВД-2И. Сигнал посилюється і надходить на електронно-променевий осцилограф для візуального спостереження і реєстрації.

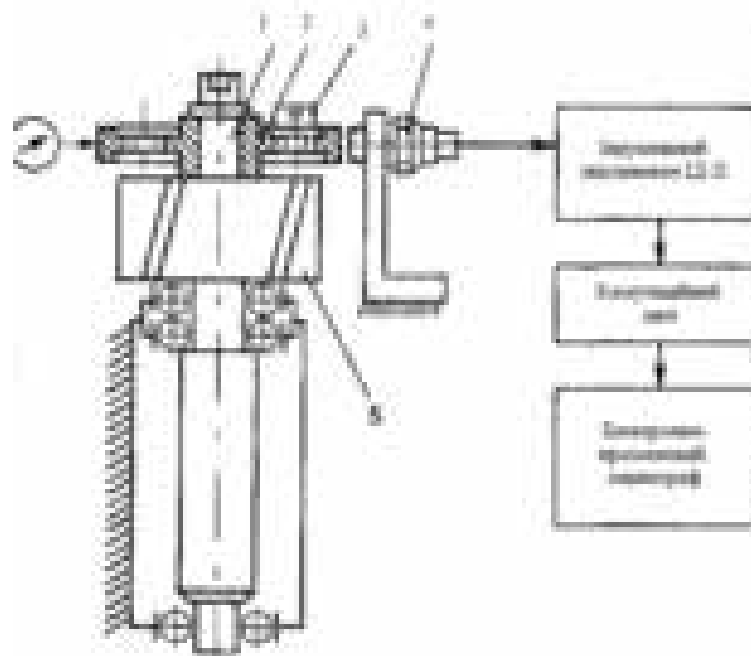


Рис. 5.7. Схема вимірювання динамічної жорсткості фрезерного вузла шпинделя

При проведенні вимірювань необхідно враховувати, що зміна зазору може бути обумовлено не тільки деформацією шпинделя під дією сили інерції  $F_i$ , а й похибками виготовлення та встановлення вимірювального диска, наявністю дисбалансу вала та інструмента. Реально значення величини вібропереміщення  $Y$  під впливом  $F_i$ , може бути розраховане за наступною формулою:

$$Y = |A_i - A_0| \cdot K_T \quad (5.28)$$

де  $A_i$  – амплітуда вібропереміщення по екрану осцилографа при  $i$ -му значенні величини дисбалансної маси  $m$ , мм;

$A_0$  – амплітуда вібропереміщення при  $m=0$ , мм;

$K_T$  – тарувальний коефіцієнт.

Розрахунок зовнішнього збурення  $F_{il}$  і експериментальне визначення величини вібропереміщення  $Y_l$  здійснюється для 4-5 значень дисбалансних мас  $m_i, m_l, m_n$  та середнє значення динамічної жорсткості шпиндельного вузла розраховується за формулою:

$$C_{\text{дип}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_{ni}/Y_i). \quad (5.29)$$

Розглянутий метод визначення динамічної жорсткості може бути рекомендований у тих випадках, коли частота зовнішнього впливу чисельно дорівнює частоті обертання шпинделя.

Ширші можливості відкриваються при використанні в дослідженнях статичної та динамічної жорсткості електромагнітних вібраторів. Наявність обмоток підмагнічування і збудження дозволяють відтворювати як постійні зусилля навантаження, так і пульсуючі. При цьому рівень і частота зовнішнього впливу регулюються напругою живлення і частотою струму живлення. Зусилля  $F$  від електромагнітного вібратора передається на елемент конструкції верстата, що досліджується через попередньо протарований тензометричний динамометр. Випробувальник має можливість контролювати рівень навантаження. Переміщення (вібропереміщення) може фіксуватися різного типу первинними перетворювачами, в тому числі і розглянутими в даному розділі індуктивними ДДУ-20.

Розглянемо послідовність контролю рівня вібрацій і шуму. Контроль вібрацій дозволяє оцінювати технічний стан за непрямими ознаками – амплітудами і частотами пружних коливань окремих елементів машини. При цьому забезпечується можливість діагностування складної машини обмеженим числом датчиків в широкому діапазоні частот безпосередньо в процесі роботи.

За допомогою експериментальних досліджень коливань вирішуються наступні завдання: визначаються параметри вимушених коливань вузлів і агрегатів з метою їх оцінки; виявляються основні закономірності вимушених коливань джерел і причини їх; встановлюються параметри, форми, спектральний

склад коливань вузлів; динамічні характеристики вузлів (в першу чергу частоти їх власних коливань і декременти загасання); досліджуються кількісні і якісні залежності параметрів коливань від режимів роботи машин, їх конструктивні особливості та параметри з метою розробки шляхів вдосконалення їх конструкцій і методів боротьби з коливаннями; досліджуються якісні залежності параметрів коливань вузлів і агрегатів їх технічного стану, ступеня зносу з метою розробки системи вібраційного діагностики.

Побудовані за отриманими експериментальними даними амплітудно-фазово-частотні характеристики (АФЧХ), які встановлюють зв'язок частоти коливань з фазою і амплітудою, дозволяють оцінити запас стійкості і виявити вплив конструктивних чинників на динамічні характеристики пружної системи верстату або ж машини, що випробовується.

Необхідність контролю динамічних характеристик пружної системи обладнання в процесі випробувань на надійність пов'язана з погіршенням показників його динамічної якості. Це проявляється в зростанні рівня зовнішніх збурень в рухомих з'єднаннях, зниженні жорсткості стиків, зростанні амплітуд коливань та інших негативних явищах, що в кінцевому підсумку позначається на якісних характеристиках обробки. Крім того, можлива значна зміна амплітудно-фазово-частотних характеристик та інших динамічних характеристик, яка може привести до погіршення працездатності, коли з метою зниження рівня коливань доводиться штучно зменшувати швидкість подачі, величину припуску, що знімається, частоти обертання робочих органів та інші режимні фактори, що визначають, в значній мірі, продуктивність обробки.

До основних параметрів різних вібраційних процесів, що вимірюються для визначення стану машини методами вібродіагностики, відносяться наступні:

1. Монографічна вібрація:

– вібропереміщення, що характеризується амплітудою,  $u_0$ ,

$$X(t) = X_0 \sin(\omega t + \varphi)$$

– віброшвидкість,  $v(t)$

$$v(t) = v_0 \cos(\omega t + \varphi), v_0 = \omega X_0$$

– віброприскорення  $\alpha(t)$

$\alpha(t) = A_0 \sin(\omega t + \varphi)$ ,  $A_0 = \omega^2 X_0$ , де  $\omega, \varphi$  - кругова частота і фаза коливання відповідно.

2. Полігармонічні вібрації:

– розмах коливання:

$$X(t) = \frac{X_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} X_n (n\omega t + \varphi_n), X_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, n = 1, 2, 3$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T X(t) \cos n\omega t dt, b_n = \frac{2}{T} \int_0^T X(t) \sin n\omega t dt,$$

$$\varphi_n = \arctg$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T X(t) \cos n\omega t dt, b_n = \frac{2}{T} \int_0^T X(t) \sin 2n\omega t dt,$$

$$\varphi_n = \arctg(b_n/a_n)$$

3. Широколінійна випадкова вібрація:

– дисперсія:

$$D_X = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [X(t) - M_X(t)]^2 dt,$$

$$D_X = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [X(t) - M_X(t)]^2 dt,$$

де  $M_X(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt$  – середнє значення,

– середньо квадратичне відхилення  $\sigma_X = \sqrt{D_X}$ .

Вибір діагностичних параметрів вібрації залежить від типів дослідних механізмів, амплітудного і частотного діапазонів коливань, що вимірюються. У низькочастотному діапазоні частіше заміряють параметри вібропереміщення, в середньочастотному віброшвидкість, а в високочастотному – віброприскорення вібропереміщень, що представляє інтерес в тих випадках, коли необхідно знати відповідність зміщення об'єкта або деформацію, потрібно визначити імпульс сили і кінематичну енергію, то вивчають швидкість вібрації. При оцінці надійності машин основним вимірюваним параметром є віброприскорення. Для вібродіагностики механізмів використовують, в основному, перетворювачі п'єзоелектричні і електродинамічні, а також індуктивні і ємнісні.



П'єзоелектричні перетворювачі застосовують для вимірювання параметрів абсолютних коливань перетворюючих частин механізмів. Вони характеризуються високими метрологічними параметрами, широкими амплітудним і частотним діапазонами, простотою конструкції, високою надійністю і порівняно низькою вартістю. Їх основним недоліком є високий вихідний опір і низька захищеність.

Електродинамічні перетворювачі застосовують для вимірювання параметрів вібрації в частотному діапазоні 1 Гц ... 2 кГц. Вони містять магнітну систему, в зазорі якої розташована котушка з дротом, жорстко з'єднана з масою, що змінюється. До електродинамічних вібродатчиків слід віднести амплітудний діапазон, низький вихідний опір і можливість передачі сигналів по довгій лінії зв'язку. Дія більшості параметричних перетворювачів (ПП) засновані на зміні комплексних опорів або провідності електричних ланцюгів. Найбільшого поширення набули наступні види ПП: індуктивні, трансформаторні, вихореструмні, магнітопружні, ємнісні.

Електричні сигнали, які отримують від параметричних перетворювачів, можуть характеризуватися напругою, струмом, зарядом, частотою або спектром частот. Перераховані параметри визначають склад пристроїв для вимірювання або нормалізації сигналу. До цієї групи приладів відносяться нормалізаційні, попередні і вимірювальні підсилювачі, електронні вольтметри, електричні фільтри, вимірювачі різниці фаз та ін. Для спектрального аналізу параметрів коливань використовуються аналізатори спектра частот, які побудовані на принципі фільтрації або реалізують процеси Фур'є.

Параметричні перетворювачі можуть входити в комплект приладів для вимірювання параметрів вібрацій. В даний час промисловість випускає чотири типи приладів, які призначені для оцінки окремих параметрів (вібропереміщення, віброшвидкості, віброприскорення), і комбіновані, що дозволяють визначати одночасно кілька параметрів.

Реєстрація параметрів коливань може здійснюватися за шкалами приладів або реєструватися пристроями оперативного подання інформації – електронно-

променевими і світлопроменевими осцилографами, швидкодіючими самописними приладами. Електронно-променеві осцилографи дають можливість візуально спостерігати періодичні і одноразові сигнали, вимірювати їх параметри і реєструвати за допомогою фотоприставки і фотоапарата. Останнім часом набули поширення осцилографи з елементами пам'яті, які дозволяють записувати сигнали (в пам'ять) і встановлювати значення в будь-який момент часу в межах зазначеного в інструкції по експлуатації. За кількістю одночасно реєстрованих процесів осцилографи підрозділяються на одно-, дво- і п'ятипроменеві.

Швидкодіючі самописні прилади призначені для запису сигналів, що перетворюються в електричні. Способи запису: чорнильний, копіювальний, електротермічний, тепловий та ін. Запис здійснюється на стрічках, що поступально рухаються з регульованою швидкістю. У світлопроменевих осцилографах фіксована електрична величина (напруга або струм) перетворюється у відхилення світлової плями на чутливому до світла папері. Світлопроменеві осцилографи розрізняються числом каналів (6 ... 20), видом носія, шириною носія, запасом носія, швидкістю протягування, діапазоном реєстрованих частот сигналів, частотами міток часу.

При випробуваннях обладнання найзручніше застосовувати мікропроцесорну техніку, що забезпечує автоматизовану обробку результатів, розрахунок АЧХ, АФЧХ та інших динамічних характеристик з поданням отриманих результатів на дисплеї комп'ютера.

Рівень шуму, як і динамічні характеристики обладнання, є одним з параметрів технічного стану (діагностичною ознакою), за якими можна характеризувати об'єкт, за параметрами які контролюється в процесі випробувань на надійність. При цьому віброакустичні характеристики враховуються при визначенні непрямих ознак, функціонально або стохастично пов'язані з вихідними параметрами роботи обладнання. Використовуючи віброакустичне діагностичне обладнання при оцінці початкової якості і в процесі випробувань із застосуванням спектрального аналізу частоти діагностичного

сигналу, є можливість давати роздільну оцінку впливу окремих елементів (деталей) машини на формування її характеристики та виявлення слабких місць конструкції. Крім того, зміна рівня шуму та його спектрального складу свідчить про виникнення порушень в роботі машини і може використовуватись з метою прогнозування виникнення функціональних і параметричних відмов.

Більшість металорізальних та деревообробних верстатів створюють постійний шум, оскільки ступенева зміна рівня звуку для них рідко перевищує 5 дБА. Для обладнання з постійним рівнем шуму в якості шумової характеристики встановлюється рівень звукового тиску в контрольних точках і в октавних смугах з середньо геометричними частотами в діапазоні 63 ... 800 Гц, що визначається за формулою:

$$L_A = 20 \lg(P_A/P_0) \quad (5.30)$$

де  $P_0$  – пороговий звуковий тиск;

$P_A$  – середньоквадратичне значення звукового тиску з урахуванням корекції А шумоміра.

В якості первинних перетворювачів для вимірювання параметрів шуму використовуються вимірювальні мікрофони, які перетворюють акустичні коливання в газовому середовищі в електричні. Вимірювальні мікрофони за принципом дії поділяються на конденсаторні, п'єзоелектричні і електродинамічні. Акустичний шум представляє собою випадковий коливальний процес і тому при його вимірюванні використовують такі ж енергетичні величини і прилади, як при вимірюванні вібрацій.

Найпростіші прилади для вимірювання одночасно вібрацій і шуму типу ИШВ-1, ВШВ-003 складаються з вимірювального мікрофона, підсилювача, коригувальних ланцюгів, детектора і стрілочного індикатора, шкала якого проградуєрована в децибелах.

Вібраційні і шумові характеристики верстатів нормуються у відповідності зі стандартами, і вихід цих параметрів за допустимі межі в процесі випробувань на надійність класифікується як параметричні відмови.

Методики виконання вимірювань параметрів вібрацій і шуму, дані з обробки та аналізу отриманої інформації, а також рекомендації по забезпеченню випробувань відповідним обладнанням, наведені в спеціальній літературі та в керівництві на експлуатацію засобів вимірювання.

Проаналізуємо особливості контролю параметрів зношування. Вимірювання величини зносу поверхонь рухомих з'єднань, що працюють в умовах тертя необхідні: для отримання даних про їх зносостійкість; для дослідження динаміки зношування в процесі випробувань на надійність; для встановлення функціональних залежностей якісних характеристик роботи машини від ступеня зносу її основних поверхонь.

Величину зносу можна вимірювати трьома основними методами: інтегральним; диференціальним; вимірюванням вихідних параметрів з'єднання. Інтегральний метод дає можливість визначити лише сумарний знос по поверхні тертя, але не встановлює величину зносу в кожній точці поверхні, наприклад, зважуванням деталі або зразка, визначенням вмісту продуктів зношування в оливі.

Диференціальні методи найбільш широко застосовуються для вимірювання зносу деталей машин. Метод мікрометражу передбачає вимірювання деталі. Даний метод передбачає вимірювання деталі до і після певного періоду її роботи. За зміною лінійних розмірів деталі можна робити висновок про середню величину поверхневого зносу.

Знос визначають за наступною формулою:

$$\eta = h_1 - h_2 \quad (5.31)$$

де  $h_1$ ,  $h_2$  – розміри до і після випробувань відповідно.

Вимірювальним інструментом може використовуватись мікрометр, нутромір або ж інший вимірювальний інструмент.

Метод штучних баз передбачає нанесення на зношену поверхню поглиблень (рис. 5.8, а) чітко визначеної форми у вигляді конуса, піраміди, сфери, лунки і по зменшенню розміру заглиблення в плані можна зробити висновок про величину лінійного зносу. Метод вирізаних лунок має на увазі лунки 2, що наносять поперек руху подачі в різних точках поверхні тертя (див. рис. 5.2, а) для отримання загальної картини розподілу зносу. Їх розміри дуже малі: довжина до 3 мм, глибина до 15 мкм. Дном лунки є та штучна база, щодо якої вимірюють лінійний знос. Лунки не роблять ніякого впливу на службові властивості і міцність деталі. Для нанесення лунок і їх вимірювання в процесі зносу використовують наступні прилади: прилад моделі 966 – для вимірювання зносу на плоских поверхнях тертя; прилад моделі 965 – для вимірювання зносу на циліндричних увігнутих поверхнях тертя; прилад моделі 967 – для вимірювання зносу на циліндричних опуклих поверхнях тертя.

Розглянемо більш детально прилад для вимірювання зносу на плоских поверхнях тертя (рис. 5.8, б). Прилад кріплять до направляючих (зразком) двома магнітами 4. Обертання різця 3 здійснюється за допомогою маховичка 5, а подача – за допомогою маховичка 10. За вирізанням лунки можна спостерігати в мікроскоп через окуляр 8. Фокусування здійснюється гайкою 6, більш точно – гайкою 7. Для вимірювання довжини лунки в мікроскопі є шкала, для суміщення її з віссю лунки – механізм установки шкали 9.

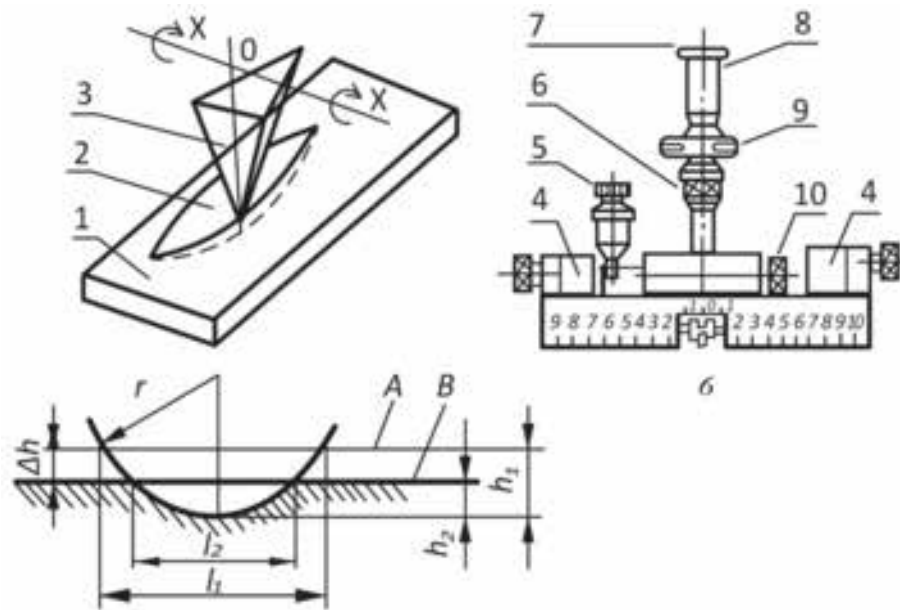


Рис 5.8. Вимірювання зносу методом штучних баз:

а - схема методу, б - прилад для нанесення і вимірювання лунки.

Довжина лунки вимірюється за допомогою мікроскопа, позначка шкали якого дорівнює 0,03 мм (лінійне поле зору 5 мм, збільшення мікроскопа x25). Довжину лунки визначають за формулою  $l = Ak$  мм, де  $A$  - ціна поділки (0,05 мм);  $k$  - число поділок на шкалі приладу.

Знос плоских, а також циліндричних поверхонь по лунці, яка розташована по контуру циліндра, обчислюють за формулою:

$$\Delta\eta = h_1 - h_2 = 0,25(t_1^2 - t_2^2) \cdot \frac{1}{r} \quad (5.32)$$

де  $\Delta\eta$  – лінійний знос в місці нанесення лунки, мм,

$h_1, h_2$  – глибина лунки до і після певного етапу зношення, мм;

$l_1, l_2$  – довжина лунки до і після певного етапу зношення, мм,

$r$  – радіус обертання вершини різця, мм.

Знос циліндричної поверхні по лунці, що розташована перпендикулярно твірної циліндра, обчислюють за формулою (5.32) з поправкою на радіус

кривизни поверхні деталі (зразка) в місці нанесення лунки. При цьому для випуклих поверхонь поправку підсумовують зі знайденим значенням глибини лунки, а для увігнутих поверхонь віднімають:

$$\Delta\eta = h_1 - h_2 = 0,25(t_1^2 - t_2^2) \cdot \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R}\right) \quad (5.33)$$

де  $R$  – радіус кривизни поверхні тертя в місці нанесення лунки, мм.

Метод негативних відбитків принципово не відрізняється від описаних, але менш точний. Однак він має ту перевагу, що дозволяє визначити знос в важкодоступних ділянках деталей

На поверхню, що зношується різцем (рис 5.9, а) наносять дві риски під кутом  $90^\circ$  один до одного (рис. 5.9, б). Риска 1 довжиною 6 ... 10 мм - основна; риску 2, довжиною 4...5 мм - допоміжна. Основна риска розташовується по напрямку вектора відносного переміщення третьових поверхонь. Потім на риску накладають калібровану свинцеву пластинку 3 товщиною 0,5 ... 0,8 мм і вдавлюють ручним пуансоном (рис. 5.9, е). Отриманий негативний відбиток перевертають і кладуть на предметний столик подвійного мікроскопа МИС-11 так, щоб допоміжна риска проходила вздовж зображення світлової щілини мікроскопа (рис. 5. 9, г). Висоту перерізу відбитка основної ризики вимірюють на відстані 1 мм від допоміжної, для чого мікрогвинт предметного столика повертають на один оберт.

Метод поверхневої активації (МПА) мітки на глибину 0,05...0,40 мм передбачає, що в досліджуваній зоні тертя наводиться радіоактивність шляхом бомбардування прискореними зарядженими частинками на циклотроні. Потім в результаті зносу поверхні тертя відбувається падіння відносної активності мітки, яке реєструється. Отримані дані порівнюють з протарованою функцією і визначають величину лінійного зносу на кожен фіксований момент часу спостережень. Основний реєстрований ізотоп для матеріалів на основі заліза -

$^{56}\text{Co}$  з періодом напіврозпаду 77,3 доби, що цілком достатньо для проведення прискорених випробувань.

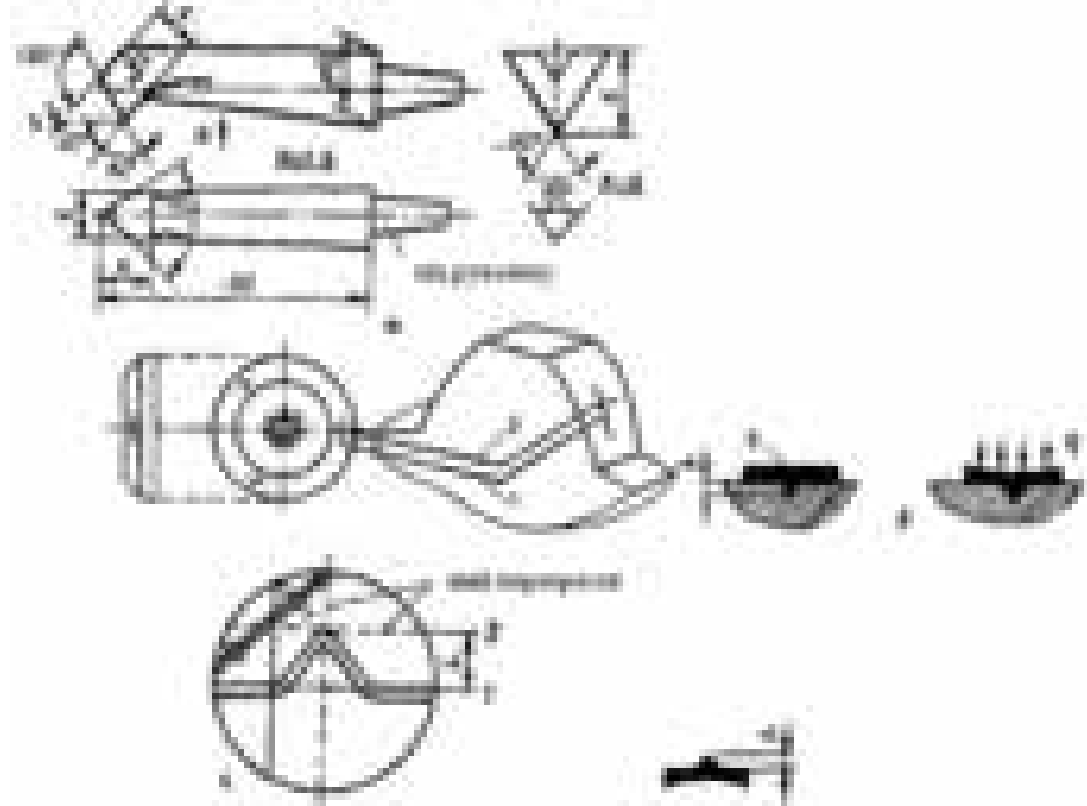


Рис. 5.9. Метод вимірювання зносу за допомогою відбитків:  
а – пристосування для нанесення рисок, б – схема нанесення рисок,  
в – схема зняття відбитка, г – схема вимірювання відбитка

Достовірність визначення факту закінчення підробітки сполучення для оцінки швидкості процесу зношування в сталому режимі тертя дає можливість для екстраполяції даного процесу, що значно прискорює подібні випробування, при цьому відпадає необхідність наробітку сполучення до граничного стану.

Друга перевага МПА – можливість реєстрації лінійної величини зносу без розбирання і зупинки пари тертя, що також дає значний коефіцієнт прискорення випробувань. Необхідні умови для отримання достатньої точності результатів вимірювання наступні: вибір частинок для активації деталі з точки зору зменшення виходу побічних ізотопів в радіоактивної суміші; видалення продуктів зношування із зони тертя її періодичним промиванням.



Крім того, резерви підвищення чутливості вимірювання зносу МПА полягають у виборі оптимальної глибини активації, геометрії вимірювання, виборі оптимального режиму вимірювання для конкретних умов випробувань або в інтегральному (за сумою активності всіх ізотопів суміші, яка визначається порогом дискримінації), або в диференціальному (за одним із ізотопів) і експозиції виміру  $\gamma$ -квантів.

Застосування малих доз активності дає можливість проводити дані випробування в лабораторних або виробничих умовах без спеціальних заходів захисту.

При вимірюванні зносу великогабаритних деталей використовують спеціальні вставки, які проходять поверхневу активацію, а потім їх встановлюють на поверхню, що зношується. Застосування вставок зі спеціальних сплавів, наприклад, кобальту і міді, дає можливість довести загальну тривалість дії радіоактивності, достатню для точного вимірювання зносу в протягом 2 - 2,5 років, що важливо при натурних випробуваннях.

Методи вимірювання вихідних параметрів з'єднання полягає в оцінці зносу за зміною вихідних параметрів, що дає лише непряме уявлення про величину зносу. Перевага зазначеного методу полягає в тому, що він є одним із можливим способів оцінки зносу деяких елементів машини без розбирання вузла.

Проаналізуємо особливості контролю сил різання в робочих процесах. Необхідність контролю сил різання в робочих процесах механічної обробки виробів з металу та деревини виникає при розробці методів їх імітації. Навантаження імітують пристроями та визначають рівень зовнішніх сил, що діють в процесі функціонування обладнання. Вимірювання сил в експериментальних дослідженнях може виконуватися механічними, резистивним, п'єзоелектричними, індуктивними і іншими перетворювачами. Найбільше поширення та використання отримали тензорезистивні перетворювачі, які наклеюються на гнучкий елемент (або елементи), що сприймають навантаження. В основу функціонування тензорезисторів покладена

зміна їх омичного опору при пружних деформаціях. З огляду на специфічний для даного обладнання рівень і динамічний характер сил, можна рекомендувати використання при проведенні експериментальних досліджень комплекту приладів типу СУР 100.

Пристрій СУР 100 призначений для вимірювання сил різання при різних видах складного різання деревини та матеріалів з деревини (пиляння, фрезерування, свердління та ін.) За допомогою приладу можна одночасно вимірювати три взаємно перпендикулярні складові сили  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  і крутний момент  $M_{кр}$ . За допомогою пристрою вимірюються як середні значення сил що показує прилад, так і миттєві, зареєстровані осцилографом. У комплект пристрою входять: універсальний динамометр УДМ- 100; державка різців, які використовуються при точінні; столик для встановлення заготовки (зразка) при фрезеруванні і свердлінні; тензометричний підсилювач УТ4-1; розподільний щиток; світлопроменевий осцилограф Н117/1; кабельні пристрої. В залежності від технологічного процесу, що досліджується, в затискачі динамометра може встановлюватися зразок або ріжучий інструмент.

Важливу інформацію про технічний стан окремих елементів, вузлів тертя і систем обладнання надає температурний режим його роботи і його зміна з напрацювання в процесі випробувань на надійність. Температура є одним з непрямих діагностичних ознак, за якою оцінюється ресурс пар тертя, комплектуючих виробів, функціональних вузлів, умови мащення та ефективність роботи систем мащення обладнання. Крім того, в нормативних документах температурний режим роботи окремих конструктивних елементів (підшипники шпindelних вузлів, електродвигуни приводу та ін.) формує певні обмеження, перевищення яких може класифікуватись як відмова в процесі випробувань на надійність. Для вимірювання температури використовуються механічні, електричні та радіаційні перетворювачі. Дія механічних ПП заснована на використанні теплового розширення твердих тіл, рідин, газів. Дія електричних ПП базується на використанні термопар і термометрів опору. Вимірювання температури термопарами засновано на виникненні в різнорідних провідниках

електрорушійної сили за наявності різниці температур між точками їх з'єднання. Для аналізу всього теплового поля машини і динаміки його вимірювання найбільш повну інформацію можуть дати тепловізори, які використовують залежність інтенсивності і спектрального складу випромінювання від температури випромінюючого тіла.

Контроль кінематичних параметрів дає можливість виявляти неузгодженість (кутову або лінійну) вхідних і вихідних ланок кінематичного ланцюга, яка в багатьох випадках безпосередньо характеризує працездатність верстат. За результатами спектрального аналізу кінематичної похибки без розбирання можна визначати ступінь розвитку дефектів окремих ланок ланцюга. Зазвичай кінематографія використовується для періодичного контролю ланцюгів з внутрішніми кінематичними зв'язками, а також ланцюгів із зовнішніми кінематичними зв'язками, для яких основними параметрами, які лімітують якість роботи, є точність (наприклад, приводів переміщень за координатам у верстатах з числовим програмним управлінням). До переваг зазначеного методу можна віднести можливість вимірювань низькочастотних складових похибок, високу чутливість і захищеність від похибок, порівняно простоту апаратурної реалізації. До кінематичних параметрів відносяться: частота обертання; величина переміщення вузлів; лінійні швидкості; передаточні відношення. Вимірювання прискорень для оцінки динамічної навантаженості окремих механізмів машини можна здійснювати за допомогою акселерометрів, які функціонують на інерційному принципі. Часто використовуються п'єзоелектричні акселерометри, в яких інерційна маса впливає на п'єзоелемент. Для вимірювання точних кутових переміщень (повороту) при оцінці кінематичної точності формують механізмів верстата застосовують спеціальні прилади – кінематометри. В якості датчиків використовують, наприклад, фотоелектричні перетворювачі з дисками, що мають точні штрихи, при обертанні яких виникає сигнал, пропорційний частоті обертання. Для вимірювання зазору і невеликих переміщень, в тому числі і низькочастотних вібропереміщень, використовують тензорезисторні, індуктивні і ємнісні

перетворювачі. Для вимірювання частоти обертання робочих органів верстатів можуть бути використані механічні або ж електричні перетворювач, стробоскопічні прилади.

До механічних пристроїв відносяться тахометри відцентрові типу Ю-10, Ю-30. Вони служать для короткочасного (4-5 с) вимірювання частоти обертання валів і дисків з діапазонами, що відповідають 25 - 10000 і 25 - 30000  $\text{хв}^{-1}$ .

Типовим приладом, що працює на стробоскопічному ефекті, є тахометр стробоскопічного типу ТСТ-100, призначений для безконтактного вимірювання частот обертання в діапазоні 500 - 100000  $\text{хв}^{-1}$ . При виконанні вимірювань об'єкт обертання освітлюється світловими імпульсами певної частоти, і при збігу частоти цих імпульсів з частотою обертання об'єкта візуально спостерігається зупинка об'єкта. При цьому показники цифрового частотоміра, що вимірює частоту світлових імпульсів, відповідають частоті обертання об'єкта в даний момент часу.

Вимірювання деформацій і оцінка жорсткості елементів машини служать для виявлення причин зниження технологічної точності і того значення, яке відіграють деформації в сумарній похибці. Крім того, вони дають можливість оцінити навантаженість елементів і розробити рекомендації щодо збільшення їх міцності. Для вимірювання деформацій в несучих елементах машини застосовують тензодатчики, які приклеюються в найбільш небезпечних місцях.

Вимірювання енергетичних показників включає вимірювання потужності приводу, ККД, контроль на тертя. Вони є досить інформативними показниками. Так, при випробуванні досить складної машини в цілому, коли складно оцінити її працездатність зміною якого-небудь одного параметра, найбільш зручно в якості інтегрального показника прийняти потужність. В ряді випадків енергетичні показники дозволяють отримати додаткові діагностичні дані, що характеризують стан верстата.

#### **5.4. Питання для обговорення та самоперевірки**

1. Вказати основні цілі та завдання випробувань машин та обладнання на надійність.
2. Вказати види випробувань машин та обладнання на надійність.
3. Описати контрольні випробування машин та обладнання на надійність.
4. Описати стендові випробування машин та обладнання на надійність.
5. Описати полігонні випробування машин та обладнання на надійність.
6. Описати експлуатаційні випробування машин та обладнання на надійність.
7. Особливості вибору об'єктів при випробування машин та обладнання на надійність.
8. Написати послідовність випробування машин та обладнання як складних систем.
9. Описати планування випробувань на безвідмовність.
10. Описати планування випробувань на довговічність
11. Описати планування випробувань на ремонтпридатність.
12. Описати планування випробувань на безвідмовність.
13. Описати планування випробувань на надійність машин та обладнання.
14. Описати планування контрольних випробувань на надійність.
15. Описати контроль показників технологічної точності.

## **Розділ 6. МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ МАШИН ТА ОБЛАДНАННЯ**

### **6.1. Загальні питання забезпечення**

Формування такого комплексного показника якості, як надійність, є складним багатоетапним процесом, хід якого залежить від багатьох технічних і

організаційних чинників на різних життєвих стадіях машин та обладнання, починаючи від його конструювання і закінчуючи ремонтування. Для забезпечення необхідних показників надійності необхідно управляти процесом їх формування, направлено впливати на його окремі етапи і контролювати хід процесу. При цьому питання управління початковою якістю і надійністю об'єкта досліджень як властивості зберігати початкові показники в часі, взаємопов'язані і утворюють єдину систему. Якість і надійність машин та обладнання, що випускається, а також їх експлуатація і ремонтування залежать від наступних чотирьох факторів.

1. Якість документації на виготовлення, експлуатацію та ремонтування виробів характеризують не тільки помилки в кресленнях, технічній документації або відхилення від стандартів і нормативів, а й такі показники, як рівень стандартизації і уніфікації, обґрунтованість технічних рішень, технологічність, ремонтпридатність конструкції та її металоємність, простота конструкції форм, обґрунтованість технічних умов на елементи і комплектуючі, на вихідні параметри та інші показники, які удосконалюють саму конструкцію виробу. Для технологічної документації показниками її якості являються також параметри обґрунтованого вибору структури технологічного процесу, ступінь автоматизації обладнання, режими обробки та інших показників досконалості прийнятого технологічного процесу.

2. Якість обладнання, пристосувань, інструменту, вимірювальних засобів включає оцінку їх рівня, технічних характеристик і технологічних можливостей, а також їх технологічну надійність. Складне обладнання і технологічні комплекси, характерні для сучасного виробництва, їх досконалість і надійність багато в чому визначають і можливості отримання якісної продукції.

3. Якість сировини, матеріалів, комплектуючих виробів, запасних частин і витратних матеріалів – це ті компоненти, на якість яких машинобудівне підприємство не надає прямої дії, а може забезпечити лише вхідний контроль властивостей. В сучасних умовах виробництва складних верстатів і технологічних комплексів, коли широко використовуються кооперація та

використання стандартних елементів, вузлів та деталей, якість комплектуючих виробів поряд з якістю конструкційних матеріалів, мастил, відіграють важливе значення в забезпеченні якості виробів машинобудування.

4. Якість праці виробників машин та обладнання, або осіб, які експлуатують та ремонтують, являються одним з визначальних факторів, що забезпечують відповідний рівень якості, в тому числі і надійності.

Конкретне значення у підвищенні якості і надійності обладнання відіграють стандарти – як загальнодержавні, галузеві, так і підприємства. Причому, роль останніх більш значніша, оскільки вони відображають специфіку підприємств і даного виду техніки, забезпечують конкретну реалізацію принципів, які закладені в загальнодержавних стандартах. Область стандартизації за проблемою надійності повинна охоплювати крім загальних положень, які пов'язані з термінологією і визначеннями, всі основні сторони, які визначають надійність виробу. Сюди відносять наступні напрямки: розрахунки та прогнозування надійності, коли розробляються типові положення з міцністними розрахунками; оцінка інтенсивності зносу; розрахунок і прогнозуванню надійності складних систем і т.і.

Контроль надійності, методи діагностування. До цієї групи відносяться стандарти, що регламентують методи, які пов'язані з експериментальною оцінкою рівня надійності, а також встановлюють порядок та послідовність проведення досліджень.

Нормування надійності. Встановлення нормативів на категорії безвідмовності і довговічності являються важливим напрямом в області стандартизації надійності.

Технологічні методи забезпечення надійності включають стандарти, що відображають широке коло питань, які пов'язані з отриманням у матеріалів, заготовок і виробів заданих властивостей. Це стандарти на хіміко-термічну обробку, антикорозійні і зносостійкі покриття, точність складання і т.і. Експлуатація та ремонт машин безпосередньо пов'язані з проблемою надійності, оскільки втрата верстатом працездатності вимагає відновлення показників його

якості. Прикладом стандартів за цією категорією служить ДСТУ 9050:2020

В

И

З

Н

а Інформаційне забезпечення включає стандарти, які пов'язані зі збором, обробкою та обліком інформації, що особливо важливо для створення банку даних систем по управлінню якістю та надійністю. Розробка стандартів по надійності базується на відповідності наукових положень теорії надійності та її розділів.

я

## 6.2. Забезпечення надійності при розробці машин

п

о Загальна послідовність розробки виробів машинобудування регламентується комплексом стандартів з розробки та встановлення їх на виробництво. Однак питання відпрацювання виробів машинобудування на надійність мають ряд особливостей, які специфічні для окремих видів техніки і виходять за межі цілей даної загальнотехнічної системи стандартів.

Для системи науживодослужуваннявідно-ремонтуютьсякаркбернаосаузви стандартівідпрацюваннябрикабікпеніфікуданоевалегоріі мабенисчуваписладі «Дисермажуваниньовідбудувувандясиремонту дєрєвообробностіусаркуван(м)» розробляється або що модернізується) нормативним вимогам. На цьому етапі виявляються слабкі елементи конструкції, встановлюються причини відмов. Запропоновані за вказаних умов заходи щодо підвищення надійності повинні враховувати і бути взаємопов'язаними як з технологією виготовлення деталей і вузлів, так і зі стратегією технічного обслуговування і ремонтування.

Розглянемо типову послідовність проведення заходів з відпрацювання обладнання на надійність на різних стадіях.

На передпроектній стадії етапи відпрацювання на надійність включають: аналіз технічних вимог і умов на верстат; аналіз інформації про рівень надійності



вітчизняних та зарубіжних аналогів; попередній вибір складу і визначення показників надійності складових частин; оцінку очікуваного рівня надійності дослідного зразка.

На стадії ескізного проєкту виконують: аналіз вимог до надійності верстата та його вузлів, що закладені в технічному завданні; вибір схемних конструктивних рішень, що забезпечують розробку математичних моделей розрахунку надійності; розподіл вимог до надійності складових частин; оцінку впливу зовнішніх діючих факторів на надійність; складання переліку можливих видів відмов і виявлення «слабких місць» об'єкту досліджень; складання переліку критеріїв відмов і граничних станів; розроблення заходів щодо попередження відмов і захисту від їх можливих наслідків; планування експериментального відпрацювання виробів; розробку програми і проведення випробувань основних вузлів верстата; попередній розрахунок надійності; попереднє встановлення стратегій технічного обслуговування і ремонтування.

На заданому етапі основну увагу приділяють конструктивним методам забезпечення надійності, значна частина з яких представлена на рис. 6.1.

1. Підвищення опору зовнішньому впливу. Так, для деталей, що працюють в умовах тертя і зношування характерним є застосування зносостійких покриттів, мастил, зниження питомого тиску і їх рівномірний розподіл по поверхні тертя. В інших випадках це підвищення міцності і жорсткості конструкції.

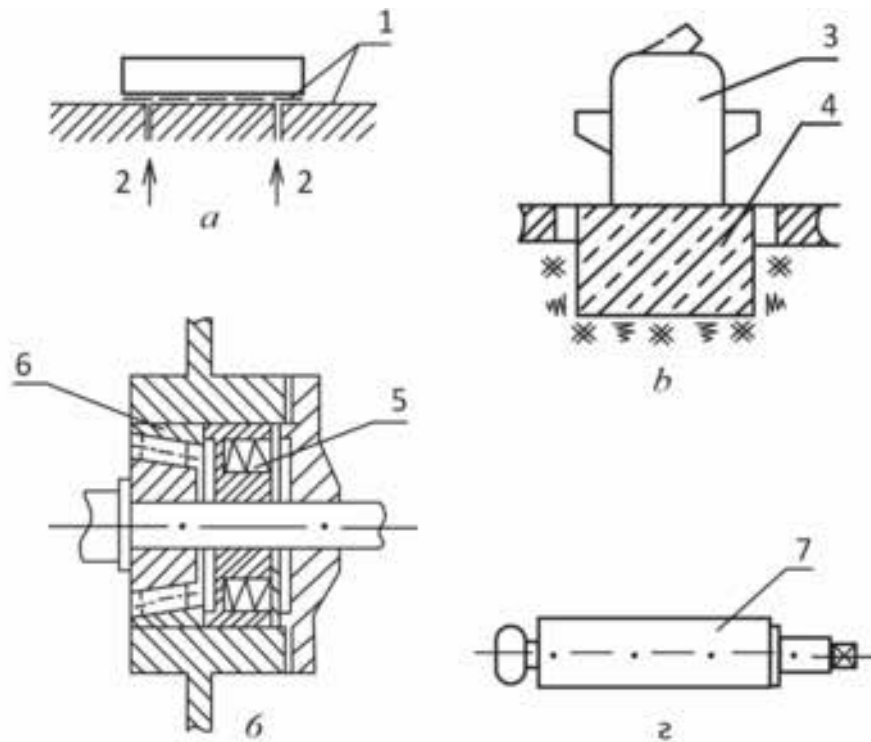


Рис. 6.1. Конструктивні методи підвищення надійності: *a* – примусова подача мастила по каналах 2 між поверхнями тертя 1; *б* – встановлення верстата 3 на віброізолюючий фундамент 4; *в* - використання пружинного вузла 5 компенсації натягу підшипників 6; *г* - виконання шпиндельного вузла у вигляді циліндричної гільзи 7 виконання заданих вимог з надійності.

2. Захист верстата від шкідливого впливу шляхом його вібро-і вологоізоляції, особливо верстатів високої точності від запилення і забруднення шляхом використання у з'єднаннях манжет та ущільнень, застосування антикорозійних покриттів і т. і.

3. Використання принципу саморегулювання, коли верстат або його вузол оснащений пристроєм для ручної або автоматичної компенсації зносу (наприклад, шляхом проведення регульовальних робіт).

4. Скорочення втрат на ремонтних застосування швидкозамінних вузлів і деталей. Так, виконання шпиндельних вузлів поздовжньо-фрезерних чотиристоронніх верстатів у вигляді циліндричної гільзи з посадкою по

зовнішній поверхні дозволяє скоротити час на виявлення відмов, розбирання та складання супорта для заміни шпindelного вузла при ремонті на несправний.

На стадії розробки технічного проекту проводять: уточнення схемної і конструктивної побудови верстата; уточнення математичних моделей надійності за результатами схемної конструктивної доробки верстата; розробка режимів експлуатації; розробка програм, проведення випробувань макета верстата з метою визначення впливу режимів та умов експлуатації; оцінка показників надійності; складання переліку комплектуючих виробів і матеріалів, що лімітують надійність верстата; оцінка відповідності розрахункових значень показників надійності вимогам технічного завдання; розробка системи технічного обслуговування і ремонтування.

На стадії розробки робочої документації виконують: аналіз технології виготовлення і технологічності дослідного зразка; уточнення переліку комплектуючих виробів матеріалів, що лімітують надійність верстата; забезпечення контролю повноти реалізації конструктивних методів забезпечення надійності; розробку програми і методики випробувань верстата на надійність; розробку випробувальних стендів і навантажувально-імітуючих пристроїв; створення метрологічного забезпечення випробувань; уточнення правил експлуатації; розробку ремонтної та експлуатаційної документації; аналіз результатів попередніх випробувань дослідного зразка (дослідної партії); оцінку відповідності надійності дослідного зразка верстата нормативним вимогам; оцінку надійності складових частин і комплектуючих; виявлення причин несправностей і відмов; коригування конструкторської документації за результатами випробувань дослідного зразка.

На першому етапі робіт по забезпеченню надійності для конкретного верстата повинна бути встановлена основна кінцева мета. Метою може бути забезпечення конкурентоспроможності виконання вимог споживача або отримання максимальної ефективності верстата з урахуванням витрат на виготовлення та експлуатацію.

Для машинобудівної продукції (верстатів, автоматизованих ліній, гнучких виробничих систем) за вихідні параметри приймають необхідне напрацювання за добу  $T_{ум}$  або за тиждень  $T_{ун}$  (якщо передбачені операції відновлення у вихідні дні). За кожним прийнятим конструктивним рішенням визначається ймовірність, з якою забезпечується плановий норматив по безвідмовності або довговічності. Такими показниками можуть бути ймовірність безвідмовної роботи за час  $T_{ум}$  або ж гамма-процентне значення показника  $T_{\gamma}$ . Наприклад, для поздовжньо-фрезерних верстатів значення встановленої безвідмовної роботи регламентовано відповідно: на добу  $T_{ум} = 21$  год; в тиждень  $T_{ун} = 105$  год. Виходячи із зазначених значень, проводиться відпрацювання конструкції верстата, технології виготовлення і складання, а також системи технічного обслуговування і ремонтування.

### **6.3. Забезпечення надійності при виготовленні машин**

Стадія виготовлення машин включає наступні етапи підготовки і реалізації. Послідовність робіт, що проводяться на стадії виготовлення для забезпечення надійності, включає: перевірку підготовленості до випуску машин з необхідним рівнем надійності; оцінку надійності технологічної системи; розробку системи промислового контролю в процесі виготовлення; виявлення технологічних параметрів, що впливають на надійність та організація їх контролю; оснащення випробувальним обладнанням та засобами контролю; розробку режимів обкатки і технологічного випробування; розробку нормативно-технічних та методичних документів із забезпечення надійності при виготовленні; випробування установчої серії виробів; коригування конструкторсько-технологічної документації за результатами випробувань установчої партії; навчання персоналу (працівників підприємства) передовому досвіду забезпечення надійності при виготовленні.

Крім того, в умовах сталого серійного виробництва до комплексу заходів додаються наступні:

- 1) контроль дотриманням конструкторської та технологічної документації, технологічної дисципліни;
- 2) уточнення допусків на розміри і розташування поверхонь;
- 3) проведення обкаток і технологічного припрацювання;
- 4) збір і аналіз інформації про надійність серійної продукції, вивчення рекламацій і причин відмов;
- 5) проведення заходів щодо усунення причин технологічних відмов;
- 6) аналіз результатів приймально-здавальних випробувань;
- 7) контроль надійності складових частин і комплектуючих виробів;
- 8) організація і проведення періодичних і типових випробувань;
- 9) розробка і реалізація заходів щодо усунення причин відмов, що виявлені в процесі випробувань.

До основи технологічних етапів, на яких базується надійність обладнання, відносяться: виробництво заготовок методами первинних формоутворень, литтям, обробкою тиском, зварюванням (станіни, корпусні деталі, супорти); попередня обробка (чорнова і напівчистова); механічна обробка поверхонь заготовок різанням; різні види термічної, термомеханічної та термохімічної обробки; фінішна або ж механічна обробка різанням; обробка поверхонь деталей, складання виробу.

Досконалість технологічного процесу багато в чому визначає досягнутий рівень надійності верстата, оскільки саме в процесі виготовлення реалізується закладена конструктором надійність. Технологічні методи забезпечення надійності мають таке ж вирішальне значення, як конструктивні та експлуатаційні.

Як правило, в більшості випадків, відмови верстатів пов'язані з технологією, оскільки вона визначає рівень якості і всі властивості, які отримані в процесі виготовлення і складання виробу. Частина відмов може бути недопустимою, залежати від характеру або швидкості протікання процесу пошкодження виробу. Такі відмови є наслідком недосконалості технологічного процесу та невідповідності необхідному рівню надійності.

Причини виникнення відмов в залежності від технології виготовлення можна розподілити на три групи.

Перша група пов'язана з необґрунтованістю технічних умов на параметри машини і допуски її елементів, з недосконалістю прийнятої технологічної документації, недоліками методів випробувань на надійність верстата в зборі та його механізмів. Технічні умови (ТУ) на верстат повинні відображати основні вимоги надійності. Дуже часто однакові вироби, які виконані відповідно до ТУ, можуть характеризуватись різними показниками надійності, якщо вони виконані за різними технологіями, оскільки ТУ не відображають всіх основних вимог до виробу, які визначають його надійність, і не враховують ті нові властивості, які набуває виріб в процесі виготовлення.

Так, наприклад, технологічний процес механічної обробки створює значний вплив на якість поверхневого шару деталей, оскільки він визначає геометричні та фізико-хімічні його параметри, шорсткість поверхні, твердість, залишкові напруги, структуру та інші показники, що визначають в свою чергу експлуатаційні властивості, зносостійкість і втомну міцність. В ТУ на деталь, зазвичай, обмежуються вказуванням шорсткості поверхні та її мікротвердості. Не завжди враховується також послідовність і структура операцій, режими і методи обробки, а орієнтація здійснюється на отримання високої продуктивності. Чим вищі вимоги до надійності, тим більше число параметрів повинно бути обумовлено в ТУ і тим вірогідніше повинні бути визначені основні взаємозв'язки між експлуатаційними та технологічними параметрами.

Друга група причин пов'язана з недостатньою надійністю безпосередньо самого технологічного процесу. Технологічний комплекс є складною динамічною системою з великою кількістю взаємозв'язків, він характеризується багатьма вихідними параметрами. Для забезпечення випуску якісної і надійної продукції, зазначена система сама повинна володіти високою надійністю, бути пов'язаною зі ступенем досконалості технологічного процесу, його стабільністю, методами контролю та іншими факторами.

Третя група причин виникнення недопустимих відмов пов'язана із залишковими і побічними явищами, які виникли в результаті технологічного процесу. Сучасні технологічні процеси виготовлення деталей, починаючи від обробки заготовок і закінчуючи фінішними операціями, супроводжується даються, як правило, значним силовим і температурним впливом на деталь при високих вимогах до точності та продуктивності. Витрати енергії, необхідні для проходження даного технологічного процесу, призводять до цілого ряду побічних явищ, які змінюють властивості виробів, створюють в них залишкові напруги, спотворюють структуру матеріалу, призводять до порушення нормальної роботи самого різноманітного характеру.

Основним напрямком забезпечення надійності в процесі виробництва є його автоматизація та управління за допомогою автоматизованого управління як окремими технологічними операціями (наприклад, на базі верстатів з числовим програмним забезпеченням), так і всім процесом підготовки виробництва і виготовлення деталей на базі гнучких виробничих систем повністю автоматизованих роботизованих виробництв, які функціонують практично без участі людини.

#### **6.4. Забезпечення надійності при експлуатації і ремонті**

На стадії експлуатації, коли проводиться використання верстата за призначенням, відбувається реалізація надійності виробів, які закладені і сформовані на попередніх стадіях. Тут проявляються і техніко-економічні показники низької надійності, що призводять до втрат від простою техніки, до витрат на усунення відмов і на придбання запасних частин. Комплекс заходів, що проводяться на даній стадії в галузі надійності, може бути поділено на дві наступні групи.

1. Заходи щодо дотримання правил і режимів експлуатації включають: навчання обслуговуючого персоналу правилам забезпечення надійності; дотримання вимог експлуатаційної документації, правил технічного

обслуговування і діагностування; контроль надійності запасних частин; здійснення постійного моніторингу в процесі експлуатації і т.і.

2. Заходи по відновленню працездатного стану виробу: розробка або корегування систем технічного обслуговування; періодичний контроль за станом виробу та визначення засобів технічного діагностування залишкового ресурсу і граничного стану; впровадження перспективних технологій ремонтування; аналіз причин відмов та організація зворотнього зв'язку зі стадіями проєктування та виготовлення.

При експлуатації технологічного обладнання відбувається зниження його функціональних параметрів, які обумовлені, в першу чергу зносом, корозією, розвитком тріщин та інших деградаційних процесів. Для підтримки параметрів в допустимих межах, згідно нормативно-технічної документації, необхідно управляти деградаційними процесами за допомогою керуючих впливів, тобто застосуванням тієї або іншої стратегії технічного обслуговування і ремонтування. При цьому під стратегією розуміють цілеспрямовані правила, які обумовлюють види, обсяг і періодичність керуючих впливів, основним призначенням яких є контроль і підтримання виробу, який експлуатується, в працездатному стані в міжремонтні періоди і відновлення значень показників надійності до регламентованих значень.

За способом планування термінів технічного обслуговування і ремонтування (ТОР) розрізняють три основні стратегії: за потреби; планово-попереджувальні; за технічним станом.

У разі виконання технічного обслуговування і ремонту за потреби відновлюють працездатність обладнання, що раптово вийшло з ладу, а планування ТОР відсутні. При експлуатації нових верстатів, коли їх працездатність висока, зазначена стратегія дає певний ефект, оскільки в цей період відмов мало, а простої обладнання для проведення профілактичних робіт відсутні. Однак в цьому випадку обладнання фізично швидше зношується, що в подальшому призводить до різкого зростання кількості відмов. Загальна ефективність використання обладнання знижується, і зазначену стратегію можна



використати лише для окремих видів верстатів і обладнання, простої яких не призводять до істотних втрат.

При планових ТОР (для примусової системи) ремонти проводять за заздалегідь розробленим планом з урахуванням фактичних ресурсів верстатів та їх окремих вузлів. Зазначена стратегія застосовується для попередження аварійного виходу обладнання з ладу, а ремонтування проводять примусово. Пов'язані з цим простоем обладнання, заміна ряду деталей з недовикористаним ресурсом, порівняно часті розбирання вузлів неминучі при такій стратегії і знижують її ефективність. Однак загальна ефективність зростає зі зменшенням аварійних ремонтів і втрат через простої обладнання, зі збільшенням його ресурсу, можливістю спланувати систему ТОР та обґрунтувати комплект запасних частин.

Періодичність ремонту обладнання  $T_0$ , в основному, визначає зміст ремонтних робіт, оскільки в залежності від терміну служби деталі або вузла вони будуть включатися до відповідного поточного ремонту. Однак рішення про включення даної деталі до того чи іншого ремонт ускладняється тим, що в процесі експлуатації має місце розсіювання термінів служби, що призводить до недовикористання потенційної довговічності деталі та зростання ймовірності відмови в міжремонтний період.

Фактичний ресурс  $T_f$  повинен бути кратним міжремонтному періоду  $T_0$ , тобто  $T_f = k T_0$  (призначений ресурс деталі або вузла), оскільки відновлення деталі планується при поточному ремонті.

В залежності від розсіювання термінів служби деталі при середньому терміні служби  $T_{\text{сер}}$  більшому, ніж період  $n$ -го планового ремонту (тобто при  $T_{\text{сер}} > nT_0$ ) можливі наступні різновидності реалізації цієї стратегії ТОР (рис. 6.2).

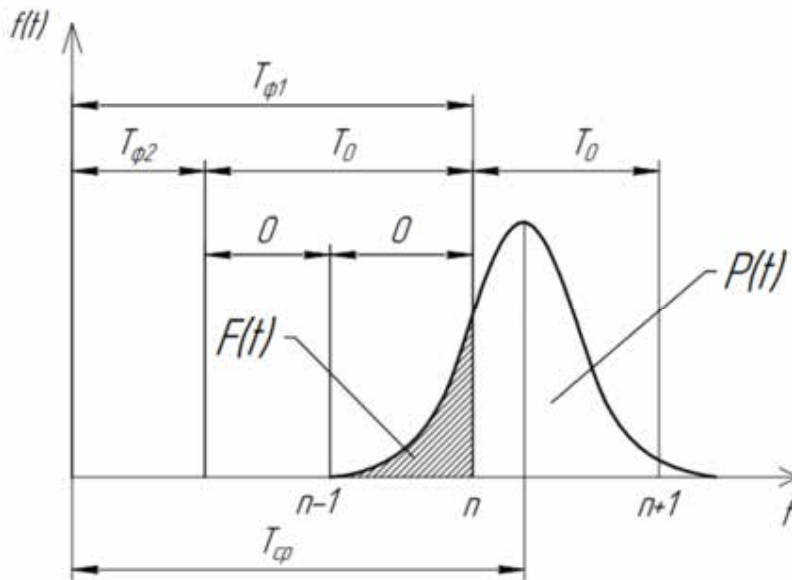


Рис 6.2. Вплив розсіювання термінів служби деталей на формування надійності

Планово-попереджувальний ремонт (ППР) з періодичністю  $T_0$  за усередненими даними широко застосовується в різних галузях. Основним його недоліком є непрямий облік розсіювання ресурсів деталей, вузлів економічних показників ефективності обладнання, а також те, що не передбачається оптимізація керуючих впливів.

У цьому випадку ремонт деталі, що відмовила здійснюється при  $n$ -му плановому ремонті, тобто призначається  $T_{\phi} = n \cdot T_0$ . Слід зазначити, що до того моменту є певна ймовірність  $F(t)$  відмови деталі до настання  $n$ -го ремонту. Якщо відмова настала до планового ремонту, то деталь ремонтується або замінюється при міжремонтному обслуговуванні. Якщо ймовірність відмови  $F(t)$  невелика, то є ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$  можна розрахувати в допустимих межах:

$$P(t) = 1 - F(t) \geq P_{\text{дод}}(t) \quad (6.1)$$

Планово-попереджувальна система з оптимізацією періодичності ТОР, так само як і ППР, складається з постійного числа регламентованих заходів ТО і

регламентованих ремонтів. Однак періодичність їх виконання, а отже, і ремонтний цикл визначають за даними про фактичну надійність обладнання фактичному ресурсу вузлів і деталей. А якщо є відомості про трудомісткості і вартості ремонтів, то визначають і оптимальну періодичність ТОР. Потім деталі і вузли об'єднують в групи за принципом кратності ресурсів, а також забезпечують стислість окремих груп деталей.

Ремонт деталі і вузла здійснюється при  $(n - 1)$  ремонтів, тобто  $T_{\phi 2} (n - 1) T_0$ . У цьому випадку забезпечується висока безвідмовність виробу, проте терміни служби його елементів часто недовикористовується, оскільки  $T_{\phi 2} < T_{сер}$ .

Така стратегія застосовується для складних видів технологічного обладнання, наприклад слюсарно-механічного. Хоча і для зазначеного обладнання також спостерігається деяке недовикористання ресурсу елементів, проте з'являється можливість планувати ремонти в неробочий час. Завдання формулюється як оптимізаційне, де критерієм оптимізації прийнято максимум ефекту, який підприємство отримує в ході реалізації цієї стратегії з урахуванням оптимальної періодичності регламентованих ремонтів.

У загальному вигляді цільова функція записується в такий спосіб:

$$E(T) = A(T) - B(T) - D(T) \rightarrow \max \quad (6.2)$$

де  $A(T)$  – ефект від збільшення випуску продукції за рахунок скорочення простоїв в непланових ремонтах;

$B(T)$  – втрати від недовикористання ресурсу елемента і збільшення витрат на придбання (виготовлення) нових елементів;

$D(T)$  – втрати, які пов'язані зі збільшенням трудових витрат на заміну елементів.

Після розшифровки складових цільова функція  $i$ -го елемента (деталі, комплекту, вузла) приймає остаточний вигляд:

$$(T) = C_{л} T_{вi} T_{pi} \left[ \frac{K_c}{T_{pi}} - \frac{F_i(T_i)}{T_i} \right] - C_i K_{ди} T_{pc} \left[ \frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{pi}} - \frac{1}{T_{pi} K_{ди}} \right] \rightarrow \max \quad (6.3)$$

де  $C_{л}$  – вартість однієї години простою обладнання, грн. ;

$T_{вi}$  – середній час відновлення працездатності стану обладнання при заміні  $i$ -ї деталі, год;

$T_{pc}$  – ресурс обладнання до списання, тис. год,

$T_{pi}$  – середній ресурс  $i$ -ї деталі, тис. год;

$K_c$  – коефіцієнт, що враховує ймовірність того, що на робочий час припадає лише частина загального часу відновлення;

$T_i$  – періодичність заміни  $i$ -ї деталі, тис. год;

$F_i(T_i)$  – функція кратності розподілу ресурсу  $i$ -ї деталі;

$C_i$  – вартість  $i$ -ї деталі, грн;

$K_{ди}$  – коефіцієнт, що відображає відношення потреби в  $i$ -ї деталі до кількості деталей, які поставляються (запасних частин) в централізованому порядку,  $K_{ди} < 7$ .

Складова  $D(T) \ll B(T)$  і  $A(T)$  приймається рівною нулю.

Щоб побудувати графік регламентованих ремонтів в цілому для об'єкта, проводиться угруповання деталей і визначається склад робіт. Графік регламентованих ремонтів є певною послідовністю ремонтних заходів різного складу і обсягу, що проводяться через один і той же фіксований інтервал, який визначається методом прямого послідовного перебору на ЕОМ виходячи з умов отримання максимального ефекту.

Стратегія ТОР за станом передбачає виконання заходів ТО і Р з урахуванням реального зносу обладнання і його фактичного стану. В цьому випадку при  $(n - 1)$  ремонті методи контрольних перевірок, діагностування, експлуатаційні спостереження визначають фактичний стан обладнання і порівнюють з еталоном (під час спеціально запланованих оглядів).

В разі необхідності при зниженні основних вихідних характеристик нижче допустимого рівня призначають необхідну управлінську дію при  $(n - 1)$  і  $n$  ремонтах. При такій стратегії відсутні непланові зупинки і простої в ремонті, з максимальною ймовірністю виробляється ресурс деталей, призначається оптимальний період між ремонтами, скорочується кількість монтажно-демонтажних робіт і т. д., що робить цю стратегію найбільш ефективною.

Однак для повної реалізації даної стратегії ТОР необхідне створення автоматизованих систем діагностування, розвинених методів прогнозування працездатності обладнання на базі засобів обчислювальної техніки для оперативного розрахунку оптимального ремонтного циклу.

Впровадження в теперішній час цієї стратегії ускладнене у зв'язку з недостатнім розвитком теоретичних і методичних питань прогнозування та діагностування, так і з відсутністю апаратури забезпечення.

## **6.5. Методи підвищення зносостійкості вузлів тертя**

Всі методи, що спрямовані на підвищення зносостійкості, а отже, і надійності вузлів тертя машин, можна розподілити на три групи: конструктивні, технологічні та експлуатаційні.

Конструктивні реалізуються на етапі проектування вузлів та машини в цілому і передбачають вирішення наступних завдань:

- 1) оцінка можливих варіантів і вибір конструктивної схеми вузлів тертя машин з позицій забезпечення зносостійкості і надійності;
- 2) вибір матеріалів з урахуванням типових поєднань в парах тертя;
- 3) призначення розмірів і форми деталей пар тертя з урахуванням міцності;
- 4) забезпечення нормальної роботи вузлів тертя шляхом створення ефективною системи мащення, захисту від забруднюючого і хімічного впливу середовища.

При виборі матеріалів для пар тертя крім їх високої зносостійкості до них пред'являються вимоги, які вкладаються в поняття антифрикційності матеріалу.

До таких вимог, перш перш за все, належать: легка переробка, висока зносостійкість при нормальних умовах роботи; низький коефіцієнт тертя, який мало змінюється в діапазоні роботи машини; рівномірність переміщення, висока жорсткість з'єднання. У ряді випадків від матеріалів також потрібна висока теплопровідність, низький коефіцієнт теплового розширення, хороша змочуваність оливою.

Для пластмас необхідно також забезпечити стійкість матеріалу при підвищених температурах, стійкість до дії слабких кислот і лугів, низьке водо-і вологопоглинання. Крім того, матеріали повинні володіти хорошими технологічними властивостями.

Якщо відомі закони зношування, то вибір матеріалів полягає в аналізі впливу різних чинників на швидкість зношування для отримання необхідної зносостійкості. Однак в даний час ще мало залежностей, які визначають безпосередній зв'язок між швидкістю зношування і властивостями матеріалів, що працюють в умовах тертя. Тому при виборі матеріалів використовуються результати спеціальних досліджень, а також правила, принципи і рекомендації, що забезпечують для визначених матеріалів, режимів і умов їх роботи хороші показники зносостійкості.

Окремі правила підбору матеріалів формулюються наступним чином. Слід поєднувати твердий матеріал з м'яким; необхідно, щоб їх твердість по Бринелю відрізнялася не менше ніж на 10 одиниць для запобігання молекулярного схоплювання в умовах недосконалого мащення. Слід поєднувати твердий матеріал з твердим (такі пари тертя мають високу зносостійкість внаслідок взаємного впровадження поверхонь). З цією метою можна застосовувати у важкодоступних для мащення конструкціях пористі, порошкові і антифрикційні матеріали. Застосування антифрикційних матеріалів пластмаси: вони підвищують надійність вузлів тертя, знижують масу конструкції і витрати кольорових металів, зменшують вібрацію і покращують акустичні властивості машин.

До конструктивних методів підвищення зносостійкості також відносяться збільшення податливості однієї з деталей, що труться у з'єднанні або, навпаки, підвищення жорсткості деталі, або вузла в цілому. Податливість деталі, загальна або місцева, властивість її робочої поверхні слідувати за деформацією деталі і пристосовуватись до неточності її геометричної форми. В результаті збільшується площа контакту при одночасному зниженні контактних напружень. Для інших деталей і вузлів технологічного обладнання можуть пред'являтися вимоги підвищеної жорсткості. Так, наприклад, здатність навантаження зубчастих передач тим вище, чим рівномірніше розподілені навантаження по довжині зуба. Нерівномірний розподіл навантаження, крім похибок виготовлення і складання, сприяють вигину і скручуванню валів, деформації опор та іншому впливу.

Вибір матеріалу, який би повністю відповідав умовам роботи деталі, є складним завданням. Так, сталева деталь, яка має вплив динамічного навантаження і піддається зношуванню, повинна мати високу міцність і твердість, значну пластичність і ударну в'язкість. Забезпечення таких різних властивостей в одній деталі реалізується виходячи з принципу взаємного доповнення якості в умовах макроскопічної неоднорідності. Способи реалізації цільової макроскопічної неоднорідності виробу наступні: термохімічна обробка, застосування зносостійких вставок, біметалізація.

Хороший ефект в підвищенні зносостійкості дає використання плаваючих деталей, що дозволяє в ряді випадків істотно зменшити вплив похибок виготовлення на працездатність вузла тертя. Одночасно наявність плаваючих деталей забезпечує компенсацію теплових деформацій.

Кінематичні пари з жорсткими ланками з невеликими лінійними, кутовими переміщеннями можуть бути замінені нерухомими з'єднаннями з проміжним елементом високої пружності, наприклад гумометалічним шарніром. Найбільш поширеним способом кріплення гуми є вулканізація суміші з латунювання поверхнею металевої арматури. Застосування гумових шарнірів дає наступні переваги: відсутнє зношування від зовнішнього тертя, відпадає необхідність у

встановленні захисних пристроїв, амортизуються удари, відбувається гасіння вібрацій, зменшується маса вузла.

Заміна тертя ковзання тертям кочення в багатьох випадках є доцільним для підвищення довговічності деталей, надійності їх роботи. Однак в кожному конкретному випадку питання про заміну необхідно вирішувати з урахуванням властивих для підшипників ковзання переваг і недоліків.

Поверхні тертя, що працюють в умовах значних контактних тисків, можуть бути розвантажені шляхом внесення в конструкцію змін. Найпростішим прикладом такого розвантаження є зубчаста шевронна передача, в якій осьові зусилля не передаються на вали і опори. Одним з методів розвантаження є перенесення зусиль з відповідальних поверхонь тертя на менш відповідальні. Так, навантаження на направляючі можна зменшити за допомогою роликів опор на підпружиненій підставці, які перекочуються по допоміжних напрямних.

Поверхні тертя повинні мати шорсткість відповідно з видом тертя. Іноді на одній з поверхонь, що працюють в умовах тертя спеціально проводять накатування для поглинання продуктів зносу.

Значна частина передчасної втрати працездатності деталей через процес зношування викликана недосконалістю або відсутністю захисту від забруднень. Захист від забруднень включає: захист відкритих вузлів тертя; герметизацію закритих корпусів; очищення оливи та інші заходи. Захист напрямних технологічних машин виконується за допомогою скребків, щіток-обтирачів, щитків, щілинних ущільнень, телескопічних щитків і захисних чохлаів. Значний вплив на надійність вузлів тертя має ефективна робота уловлювачів пилу та абразиву, що захищають механізми обладнання від забруднень.

Істотний вплив на працездатність і надійність вузлів тертя має застосовування мастильного матеріалу. Основне призначення мастила – забезпечити зниження коефіцієнта тертя в рухомих з'єднаннях машин. Одночасно воно відводить тепло від поверхонь тертя, захищає деталі від корозії, потоком мастила виносяться із вузлів тертя продукти зносу та ін. Мастило призначене також для відділення однієї з поверхонь, що труться від іншої і



сприяти створенню позитивного градієнта механічних властивостей по поверхні контактуючих деталей. Це забезпечується створенням міцної поверхневої плівки, що пов'язана з явищами змочування і налипання, з процесами взаємодії мастильного матеріалу і поверхневих шарів контактуючих деталей, зі зміною структури і властивостей останніх. Велике значення має застосування спеціальних присадок, що поліпшують умови тертя, попереджають заїдання і прискорений знос, а також забезпечують збереження функціональної працездатності мастильного матеріалу протягом тривалого часу.

В якості мастильних матеріалів в машинах застосовують рідкі мінеральні оливи, пластичні (консистентні) мазі і тверді мастила. Детально питання підбору мастильних матеріалів для конкретних вузлів тертя, їх властивості та характеристики розглянуті в спеціальній літературі.

Технологічні способи підвищення довговічності деталей машин розглядають: проблеми отримання матеріалів і покриттів, а також заготовок із заданими властивостями; питання обробки заготовок для отримання деталей необхідної форми і точності; зміцнення робочих поверхонь деталей.

Для підвищення зносостійкості застосовують наступні технологічні процеси: пластичне деформування; термічну, хіміко-термічну і хімічну обробку робочих поверхонь деталей; гальванічні покриття, металізацію напиленням і наплавку поверхонь, електроіскрове зміцнення, фінішну антифрикційні обробку і ін.

Вибір технології виготовлення деталей вузлів тертя машин і їх зміцнення визначається видом зношування, режимом роботи і умовами експлуатації. Цей розділ триботехніки вивчений найбільш глибоко, і має значний довідковий матеріал з розглянутого питання.

Експлуатаційні методи забезпечення зносостійкості деталей машин визначають комплекс організаційних і технічних заходів, що проводяться на підприємствах галузі з метою підтримання працездатного стану обладнання.

До питань експлуатації машин, у зв'язку із забезпеченням зносостійкості вузлів тертя, відносяться: зміна властивостей мастильного матеріалу в процесі

експлуатації; обкатка машин, стендові і експлуатаційні випробування; вплив умов експлуатації та режиму роботи машин на інтенсивність зношування їх деталей; догляд за обладнанням під час роботи; технічне обслуговування та ремонт машин; контроль граничного зносу деталі; встановлення ресурсу деталей та ін.

Конструктивна досконалість і висока якість виготовлення не гарантують тривалої і безвідмовної роботи обладнання. Однією з умов є грамотна технічна експлуатація і ефективна система технічних обслуговувань і ремонтів. Завданням технічної експлуатації обладнання є забезпечення його працездатного стану при мінімальних витратах. Рівень і ефективність технічної експлуатації визначаються збереженням машин в належних умовах, використанням машин відповідно до їх призначення і режимів експлуатації, регламентованими технічними умовами, кваліфікацією обслуговуючого персоналу, організацією технічного обслуговування машин і технічного нагляду за ними.

### **6.6. Питання для обговорення та самоперевірки**

1. Описати вплив якості документації на виготовлення, експлуатацію та ремонт виробів.
2. Описати вплив якості обладнання, пристосувань, інструменту на їх технологічну надійність.
3. Описати вплив якості вимірювальних засобів на їх технологічну надійність.
4. Описати вплив персоналу на технологічну надійність виробів.
5. Описати конструктивні методи, які спрямовані на підвищення зносостійкості виробів.
6. Описати технологічні методи, які спрямовані на підвищення зносостійкості виробів.
7. Описати експлуатаційні методи, які спрямовані на підвищення зносостійкості виробів.

8. Описати технологічні методи забезпечення надійності виробів машинобудування.
9. Описати методи підвищення зносостійкості вузлів тертя.
10. Описати вплив забезпечення нормальної роботи вузлів тертя від ефективної системи мащення.
11. Описати напрями забезпечення надійності обладнання при виробництві.
12. Описати напрями забезпечення надійності обладнання при експлуатації.
13. Описати напрями забезпечення надійності обладнання при ремонті.
14. Описати напрями забезпечення надійності сільськогосподарських машин при зберіганні.
15. Описати напрями забезпечення надійності сільськогосподарських машин при ремонті.

### **Рекомендована література**

1. Боженко Л.І. Стандартизація, метрологія та кваліметрія у машинобудуванні: Посібник. Львів: Світ, 2003. 327 с.
2. Гаврилюк В.І. Стандартизація, якість і сертифікація продукції. Львів: ЛДАУ, 2001. 118 с.
3. ДСТУ 2823-94. Зносостійкість виробів тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення. Держстандарт України. Київ.

4. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення.
5. ДСТУ 2861-94. Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення. Видання офіційне. Держстандарт України. Київ.
6. ДСТУ 2863-94. Надійність техніки. Програма забезпечення надійності. Загальні вимоги. Держстандарт України. Київ.
7. ДСТУ 9050:2020. Система технічного обслуговування та ремонтування техніки. Терміни та визначення понять
8. ДСТУ ISO 10014:2008. Настанови з розроблення документації системи управління якістю. Управління якістю. Держстандарт України. Київ.
9. ДСТУ ISO 9001-95. Системи якості. Модель забезпечення якості в процесі проектування, розроблення, виробництва, монтажу та обслуговування. Держстандарт України. Київ.
10. ДСТУ ISO 9002-95. Системи якості. Модель забезпечення якості продукції в процесі виробництва й монтажу. Держстандарт України. Київ.
11. Надійність сільськогосподарської техніки: Підручник. / М.І. Черновол, В.Ю. Черкун, В.В. Аулін та ін.; За заг. ред. М.І. Черновола. Кіровоград: ТОВ «КОД», 2010. 320 с.
12. Новицький А. В., Карабиньош С. С., Ружи́ло З. В. Організація сервісного виробництва. К.: НУБіПУ, 2017. 221 с.
13. Практикум з ремонту машин. Загальний технологічний процес ремонту та технології відновлення і зміцнення деталей машин. Том 1 : Навчальний посібник / [Сідашенко О. І., Тіхонов О. В., Скобло Т. С., Мартиненко О. Д., Гончаренко О.О., Сайчук О. В., Аветісян В. К., Автухов А. К., Рибалко І. М., Сиромятніков П. С., Бантковський В. А., Маніло В. Л.] /За ред. О.І. Сідашенко, О.В. Тіхонова. – Харків: ТОВ «Пром-Арт», 2018. 416 с.
14. Ревенко Ю. І., Бистрий О. М., Мельник В. І., Новицький А. В., Ружи́ло З. В. Кваліметрія: навчальний посібник. Київ : Прінтеко, 2022. 201 с.
15. Саранча Г.А. Метрологія, стандартизація та управління якістю: Підручник для вузів. – К.: Либідь, 1993. – 255 с.

## ДОДАТКИ

### 1. Значення гамма-функцій $\Gamma(t)$

$t$	$\Gamma(t)$	$t$	$\Gamma(t)$	$t$	$\Gamma(t)$	$t$	$\Gamma(t)$
0,5	1,7725	1,27	0,9025	1,55	0,8889	1,83	0,9397
1,0	1,0000	1,28	0,9007	1,56	0,8896	1,84	0,9426
1,01	0,9943	1,29	0,8990	1,57	0,8905	1,85	0,9456
1,02	0,9888	1,30	0,8975	1,58	0,8914	1,86	0,9487
1,03	0,9835	1,31	0,8960	1,59	0,8924	1,87	0,9518

1,04	0,9784	1,32	0,8946	1,60	0,8935	1,88	0,9551
1,05	0,9735	1,33	0,8934	1,61	0,8947	1,89	0,9584
1,06	0,9687	1,34	0,8922	1,62	0,8959	1,90	0,9618
1,07	0,9642	1,35	0,8912	1,63	0,8972	1,91	0,9652
1,08	0,9597	1,36	0,8902	1,64	0,8986	1,92	0,9688
1,09	0,9555	1,37	0,8893	1,65	0,9001	1,93	0,9724
1,10	0,9514	1,38	0,8885	1,66	0,9017	1,94	0,9761
1,11	0,9494	1,39	0,8879	1,67	0,9033	1,95	0,9799
1,12	0,9436	1,40	0,8873	1,68	0,9050	1,96	0,9837
1,13	0,9399	1,41	0,8868	1,69	0,9068	1,97	0,9877
1,14	0,9364	1,42	0,8864	1,70	0,9086	1,98	0,9917
1,15	0,9330	1,43	0,8860	1,71	0,9106	1,99	0,9958
1,16	0,9298	1,44	0,8858	1,72	0,9126	2,00	1,0000
1,17	0,9267	1,45	0,8857	1,73	0,9147	2,5	1,3294
1,18	0,9237	1,46	0,8856	1,74	0,9168	3,0	2,0000
1,19	0,9209	1,47	0,8856	1,75	0,9191	3,5	3,3233
1,20	0,9182	1,48	0,8857	1,76	0,9214	4,0	6,0000
1,21	0,9156	1,49	0,8859	1,77	0,9238	4,5	11,632
1,22	0,9131	1,50	0,8862	1,78	0,9262	5,0	24,000
1,23	0,9108	1,51	0,8866	1,79	0,9288	5,50	52,342
1,24	0,9085	1,52	0,8870	1,80	0,9314	6,00	120,00
1,25	0,9064	1,53	0,8876	1,81	0,9341	6,50	287,88
1,26	0,9044	1,54	0,8882	1,82	0,9368	7,00	720,00

## 2. Параметри і коефіцієнти закону розподілення Вейбулла

$b$	$k_b$	$C_b$	$\nu$	$b$	$k_b$	$C_b$	$\nu$
0,683	—	—	1,5	—	—	—	—
0,589	—	—	1,8	—	—	—	—
0,545	—	—	2,0	—	—	—	—
0,463	—	—	2,5	—	—	—	—

0,441	—	—	3,0	—	—	—	—
0,800	1,133	1,428	1,261	1,620	0,896	0,567	0,633
0,820	1,114	1,367	1,227	1,640	0,895	0,560	0,626
0,832	1,100	1,424	1,20	—	—	—	—
0,840	1,096	1,311	1,196	1,660	0,894	0,553	0,619
0,880	1,066	1,214	1,139	1,700	0,892	0,540	0,605
0,900	1,052	1,171	1,113	1,720	0,892	0,534	0,599
0,920	1,040	1,132	1,088	1,740	0,891	0,528	0,593
0,960	1,018	1,061	1,042	1,780	0,890	0,517	0,581
0,980	1,009	1,029	1,020	1,800	0,889	0,511	0,575
1,000	1,000	1,000	1,000	1,820	0,889	0,506	0,569
1,040	0,984	0,947	0,962	1,840	0,888	0,501	0,564
1,080	0,971	0,900	0,927	0,860	0,888	0,496	0,558
1,120	0,959	0,858	0,894	0,880	0,888	0,491	0,553
1,160	0,949	0,821	0,865	1,900	0,887	0,486	0,547
1,200	0,941	0,787	0,837	1,920	0,887	0,481	0,542
1,240	0,933	0,757	0,811	1,940	0,887	0,476	0,537
1,280	0,926	0,729	0,787	1,960	0,887	0,472	0,532
1,320	0,921	0,704	0,765	1,980	0,886	0,468	0,527
1,360	0,916	0,681	0,744	2,000	0,886	0,463	0,523
1,400	0,911	0,660	0,724	2,020	0,886	0,459	0,518
1,420	0,909	0,650	0,714	2,040	0,886	0,455	0,513
1,440	0,908	0,640	0,705	2,060	0,886	0,451	0,509
1,460	0,906	0,631	0,696	2,080	0,886	0,447	0,505
1,480	0,904	0,622	0,687	2,100	0,866	0,443	0,500
1,500	0,903	0,613	0,679	2,120	0,886	0,439	0,496
1,520	0,901	0,605	0,671	2,140	0,886	0,436	0,492
1,540	0,900	0,597	0,663	2,160	0,886	0,432	0,488
1,560	0,899	0,589	0,655	2,180	0,886	0,428	0,484
1,580	0,898	0,581	0,647	2,200	0,886	0,425	0,476
1,600	0,897	0,574	0,640	2,220	0,886	0,421	0,476
2,240	0,886	0,418	0,472	3,240	0,896	0,304	0,339
2,260	0,886	0,415	0,468	3,260	0,896	0,302	0,337

2,280	0,886	0,412	0,465	2,280	0,897	0,301	0,335
2,300	0,886	0,408	0,461	3,300	0,897	0,299	0,334
2,320	0,886	0,405	0,457	3,320	0,897	0,298	0,332
2,340	0,886	0,402	0,454	3,340	0,898	0,296	0,330
2,360	0,886	0,399	0,451	3,360	0,898	0,295	0,328
2,380	0,836	0,396	0,447	3,380	0,898	0,293	0,326
2,400	0,886	0,393	0,444	3,400	0,898	0,292	0,325
2,420	0,887	0,391	0,441	3,420	0,899	0,290	0,323
2,440	0,887	0,388	0,437	3,440	0,899	0,289	0,321
2,460	0,887	0,385	0,434	3,460	0,899	0,287	0,320
2,480	0,887	0,382	0,431	3,480	0,899	0,286	0,318
2,500	0,887	0,380	0,428	3,500	0,900	0,285	0,316
2,520	0,887	0,377	0,425	3,520	0,900	0,283	0,315
2,540	0,888	0,347	0,422	3,540	0,900	0,282	0,313
2,560	0,888	0,372	0,419	3,560	0,901	0,281	0,312
2,580	0,888	0,369	0,416	3,580	0,901	0,279	0,310
2,600	0,888	0,367	0,413	3,600	0,901	0,278	0,308
2,620	0,889	0,362	0,407	3,640	0,902	0,275	0,307
2,640	0,889	0,362	0,407	3,640	0,902	0,275	0,305
2,680	0,889	0,357	0,402	3,660	0,902	0,274	0,304
2,700	0,889	0,355	0,399	3,680	0,902	0,273	0,302
2,720	0,889	0,353	0,397	3,700	0,902	0,272	0,301
2,740	0,890	0,351	0,394	3,720	0,903	0,270	0,299
2,760	0,890	0,348	0,392	3,740	0,903	0,269	0,298
2,780	0,890	0,346	0,389	3,760	0,903	0,268	0,297
2,800	0,890	0,344	0,387	0,780	0,903	0,267	0,295
2,820	0,891	0,342	0,384	3,800	0,904	0,266	0,294
2,840	0,891	0,340	0,382	3,820	0,904	0,264	0,292
2,860	0,891	0,338	0,379	3,840	0,904	0,263	0,291
2,880	0,891	0,336	0,377	3,860	0,905	0,262	0,290
2,900	0,892	0,334	0,375	3,880	0,905	0,261	0,288
2,920	0,892	0,332	0,372	3,900	0,905	0,260	0,287
2,940	0,892	0,330	0,370	3,920	0,905	0,259	0,286



2,960	0,892	0,328	0,368	3,940	0,906	0,258	0,284
2,980	0,293	0,326	0,366	3,960	0,906	0,256	0,283
3,000	0,893	0,325	0,363	3,980	0,906	0,255	0,282
3,020	0,893	0,323	0,361	4,000	0,906	0,254	0,280
3,040	0,893	0,321	0,359	4,020	0,907	0,253	0,279
3,060	0,894	0,319	0,357	4,040	0,907	0,252	0,278
3,080	0,894	0,317	0,355	4,060	0,907	0,251	0,277
3,100	0,894	0,316	0,353	4,080	0,907	0,250	0,276
3,120	0,895	0,314	0,351	4,100	0,908	0,246	0,274
3,140	0,895	0,312	0,349	4,120	0,908	0,248	0,273
3,160	0,895	0,310	0,347	4,140	0,908	0,247	0,272
3,180	0,895	0,309	0,345	4,160	0,908	0,246	0,271
3,200	0,896	0,307	0,343	4,180	0,909	0,245	0,270
3,220	0,896	0,306	0,341	4,200	0,909	0,244	0,268

### 3. Функція щільності ймовірності $f(t)$ закону Вейбулла

$t/\alpha$	$b$						
	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	3,0
0,1	0,905	0,711	0,536	0,392	0,281	0,198	0,030
0,2	0,819	0,752	0,662	0,565	0,470	0,284	0,119
0,3	0,741	0,745	0,719	0,672	0,613	0,548	0,263
0,4	0,670	0,716	0,735	0,733	0,714	0,682	0,50
0,5	0,607	0,676	0,726	0,759	0,776	0,779	0,662
0,6	0,549	0,630	0,700	0,757	0,803	0,837	0,870
0,7	0,497	0,582	0,662	0,734	0,800	0,858	1,043
0,8	0,449	0,534	0,616	0,695	0,771	0,844	1,151
0,9	0,407	0,487	0,566	0,645	0,723	0,801	1,172
1,0	0,368	0,442	0,515	0,589	0,662	0,736	1,104
1,1	0,333	0,399	0,464	0,529	0,593	0,656	0,959
1,2	0,301	0,359	0,414	0,468	0,520	0,569	0,767
1,3	0,273	0,321	0,367	0,409	0,447	- 0,480	0,564
1,4	0,247	0,287	0,323	0,353	0,377	0,394	0,378
1,5	0,223	0,250	0,282	0,301	0,313	0,316	0,231

1,6	0,183	0,202	0,212	0,213	0,205	0,189	0,064
1,7	0,202	0,227	0,245	0,245	0,255	0,247	0,128
1,8	0,165	0,178	0,182	0,176	0,162	0,141	0,029
1,9	0,150	0,157	0,155	0,144	0,126	0,103	0,011
2,0	0,135	0,139	0,132	0,117	0,096	0,073	0,004
2,1	0,123	0,122	0,112	0,094	0,073	0,051	0,001
2,2	0,111	0,107	0,094	0,075	0,054	0,035	—
2,3	0,100	0,094	0,079	0,060	0,040	0,023	—
2,4	0,091	0,082	0,066	0,047	0,029	0,015	—
2,5	0,082	0,072	0,055	0,036	0,021	0,010	—

#### 4. Функція розподілення F(t) закону Вейбулла

$t/\alpha$	$b$								
	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0	3,5
0,1	0,095	0,061	0,039	0,025	0,016	0,010	0,003	0,001	0,000
0,2	0,181	0,135	0,100	0,073	0,054	0,039	0,018	0,008	0,004
0,3	0,259	0,210	0,169	0,136	0,108	0,086	0,048	0,027	0,015
0,4	0,330	0,283	0,242	0,206	0,175	0,148	0,096	0,062	0,040
0,5	0,393	0,353	0,315	0,281	0,250	0,221	0,162	0,117	0,085
0,6	0,451	0,418	0,387	0,357	0,329	0,302	0,243	0,194	0,154
0,7	0,503	0,479	0,455	0,432	0,409	0,387	0,336	0,290	0,249
0,8	0,550	0,535	0,519	0,503	0,488	0,473	0,436	0,401	0,367
0,9	0,593	0,586	0,578	0,570	0,563	0,555	0,536	0,518	0,499
1,0	0,632	0,632	0,632	0,632	0,632	0,632	0,632	0,632	0,632
1,1	0,667	0,674	0,681	0,688	0,695	0,702	0,719	0,736	0,752
1,2	0,669	0,712	0,725	0,738	0,750	0,763	0,793	0,822	0,850
1,3	0,727	0,746	0,764	0,782	0,799	0,815	0,854	0,889	0,918
1,4	0,753	0,776	0,798	0,820	0,840	0,850	0,902	0,936	0,961
1,5	0,777	0,803	0,829	0,852	0,874	0,895	0,936	0,966	0,984
1,6	0,798	0,828	0,855	0,880	0,903	0,923	0,961	0,983	0,994
1,7	0,817	0,849	0,878	0,903	0,926	0,944	0,977	0,993	0,998
1,8	0,835	0,868	0,897	0,923	0,944	0,961	0,987	0,997	—
1,9	0,850	0,885	0,914	0,939	0,958	0,973	0,993	0,999	—

2,0	0,865	0,899	0,929	0,952	0,969	0,982	0,996	—	—
2,1	0,877	0,912	0,941	0,962	0,978	0,988	0,998	—	—
2,2	0,889	0,924	0,951	0,971	0,984	0,992	0,999	—	—
2,3	0,900	0,934	0,960	0,977	0,989	0,995	—	—	—
2,4	0,909	0,943	0,967	0,983	0,992	0,997	—	—	—
2,5	0,918	0,950	0,973	0,987	0,994	0,998	—	—	—

### 5. Щільність ймовірності закону нормального розподілення

$t$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,3989	3989	3989	3988	3986	3984	3982	3980	3977	3973
0,1	3970	3965	3961	3956	3951	3945	3939	3932	3925	3918
0,2	3910	3902	3894	3885	3876	3867	3857	3847	3836	3835
0,3	3814	3802	3790	3778	3765	3752	3739	3726	3712	3697
0,4	3683	3668	3653	3637	3621	3605	3589	3572	3555	3538
0,5	3521	3503	3485	3467	3448	3429	3410	3391	3372	3352
0,6	3332	3312	3292	3271	3251	3230	3209	3187	3166	3144
0,7	3123	3101	3079	3056	3034	3011	2989	2966	2943	2920
0,8	2897	2874	2850	2827	2803	2780	2756	2732	2709	2685
0,9	2661	2637	2613	2589	2565	2541	2516	2492	2468	2444
1,0	0,2420	2396	2371	2347	2323	2299	2275	2251	2227	2203
1,1	2179	2155	2131	2107	2083	2059	2036	2012	1989	1965
1,2	1942	1919	1895	1872	1849	1826	1804	1781	1758	1736
1,3	1714	1691	1669	1647	1626	1604	1582	1561	1539	1518
1,4	1497	1476	1456	1435	1415	1394	1374	1354	1334	1315
1,5	1295	1276	1257	1238	1219	1200	1182	1163	1145	1127
1,6	1109	1092	1074	1057	1040	1023	1006	0989	0973	0957
1,7	0940	0925	0909	0893	0878	0863	0848	0833	0818	0804
1,8	0790	0775	0761	0748	0734	0721	0707	0694	0681	0669
1,9	0656	0644	0632	0620	0608	0596	0584	0573	0562	0551
2,0	0,0540	0529	0519	0508	0498	0488	0478	0468	0459	0449
2,1	0440	0431	0422	0413	0404	0,396	0387	0379	0371	0363

2,2	0355	0347	0339	0332	0325	0317	0310	0303	0297	0290
2,3	0283	0277	0270	0264	0258	0252	0246	0241	0235	0229
2,4	0224	0219	0213	0208	0203	0198	0194	0189	0184	0180
2,5	0175	0171	0167	0163	0158	0154	0151	0147	0143	0139
2,6	0136	0132	0125	0126	0122	0119	0116	0113	0110	0107
2,7	0104	0101	0099	0096	0093	0091	0088	0086	0084	0081
2,8	0079	0077	0075	0073	0071	0069	0067	0065	0063	0061
2,9	0059	0058	0056	0053	0051	0050	0048	0047	0047	0046
3,0	0,0044	0043	0042	0040	0039	00,38	0037	0036	0035	0034
3,1	0033	0032	0031	0030	0029	0028	0027	0026	0025	0025
3,2	0024	0023	0022	0022	0021	0020	0020	0019	0018	0018
3,3	0017	0017	0016	0016	0015	0015	0014	0014	0013	0013
3,4	0012	0012	0011	0011	0011	0010	0010	0010	0009	0009
3,5	0009	0008	0008	0008	0008	0007	0007	0007	0007	0006
3,6	0006	0006	0006	0005	0005	0005	0005	0005	0005	0004
3,7	0004	0004	0004	0004	0004	0004	0003	0003	0003	0003
3,8	0003	0003	0003	0003	0003	0002	0002	0002	0002	0002
3,9	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0002	0001	0001

**6. Таблица ймовірностей  $P$  для критерія К, Пірсона  $\chi^2$**

$\chi^2$	$k$								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,6065	0,8013	0,9098	0,9626	0,9856	0,9948	0,9982	0,9994	0,9998
2	3679	5724	7358	8491	9197	9598	9810	9915	996,3
3	2231	3916	5878	7000	8088	8850	9344	9643	9814
4	1353	2615	4060	5494	6767	7798	8571	9114	9473
5	0821	1718	2873	4159	5438	6600	7576	8343	8912

6	0498	1116	1991	3062	4232	5398	6472	7399	8153
7	0183	0460	0916	1562	2318	3326	4335	5341	5288
8	0302	0719	1359	2206	3208	4289	5366	6371	7254
9	0111	0293	0611	1091	1736	2527	3423	4373	5321
10	0067	0186	0404	0752	1247	1886	2650	3505	4405
11	0041	0117	0266	0514	0884	1386	2017	2757	3575
12	0025	0074	0174	0348	0620	1006	1512	2133	2851
13	0015	0046	0113	0234	0430	0721	1119	1626	2237
14	0009	0029	0073	0156	0226	0512	0818	1223	1730
15	0006	0018	0047	0104	0203	0360	0591	0909	1321
16	0003	0001	0030	0068	0138	0251	0424	0669	0996
17	0002	0007	0019	0045	0093	0174	0301	0487	0744
18	0001	0004	0012	0029	0062	0120	0212	0352	0550
19	0001	0003	0008	0019	0042	0082	0149	0252	0403
20	0000	0002	0005	0013	0028	0056	0103	0179	0293
21	0000	0001	0003	0008	0018	0038	0071	0126	0211
22	0000	0001	0002	0005	0012	0025	0049	0089	0151
23	0000	0000	0001'	0003	0008	0017	0034	0062	0107
24	0000	0000	0001	0002	0005	0011	0023	0043	0076
25	0000	0000	0001	0001	0003	0008	0016	0030	0053
26	0000	0000	0000	0001	0002	0005	0010	0020	0037
27	0000	0000	0000	0001	0001	0003	0007	0014	0026
28	0000	0000	0000	0000	0001	0002	0005	0010	0018
29	0000	0000	0000	0000	0001	0001	0003	0006	0012
30	0000	0000	0000	0000	0000	0001	0002	0004	0009

$\chi^2$	$k$								
	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0,9999	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0,9985	0,9994	0,9998	0,9999	1	1	1	1	1
3	0,9907	0,9955	0,9979	0,9991	0,9998	0,9998	0,9998	1	1
4	0,9699	0,9834	0,9912	0,9955	0,9977	0,9989	0,9996	0,9998	0,9999
5	9312	9580	9752	9858	9921	9958	9978	9989	9994
6	8734	9161	9462	9665	9797	9881	9932	9962	9979

7	7991	8536	9022	9343	9576	'9733	9835	9901	9942
8	7133	7851	8436	8893	9238	9489	9665	9786	9867
9	6219	7029	7729	8311	8775	9134	9403	9597	9735
10	5304	6160	6939	7622	8197	8666	9063	9319	9529
11	4433	5289	6108	6860	7526	8095	8566	8944	9238
12	3626	4457	5276	6063	6790	7440	8001	8472	8856
13	2933	3690	4478	5265	6023	6728	7362	7916	8386
14	2330	3007	3738	4497	5255	5987	6671	7291	7837
15	1825	2414	3074	3782	4514	5246	5955	6620	7226
16	1411	1912	2491	3134	3821	4530	5238	5925	5673
17	1079	1496	1993	2562	3189	3856	4544	5231	5899
18	0816	1157	1575	2068	2627	3239	3888	4557	5224
19	0611	0885	1231	1649	2137	2687	3285	3918	4568
20	0453	0671	0952	1301	1719	2202	2742	3328	3946
21	0334	0504	0729	1016	1368	1785	2263	2794	3368
22	0244	0375	0554	0786	1078	1432	1847	2320	2843
23	0177	0277	0417	0603	0841	1137	1493	1806	2373
24	0127	0203	0311	0458	0651	0895	1194	1550	1962
25	0091	0148	0231	0346	0499	0698	0947	1249	1605
26	0065	0107	0170	0259	0380	0540	0745	0998	1302
27	0046	0077	0124	0193	0287	0415	0581	0790	1047
28	0032	0055	0090	0142	0216	0316	0449	0621	0834
29	0023	0039	0065	0104	0161	0239	0345	0484	0660
30	0016	0028	0047	0076	0119	0180	0263	0374	0518

$\chi^2$	$k$									
	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0,9997	0,9999	0,9999	1	1	1	1	1	1	1
6	9899	9991	9997	0,9999	0,9999	1	1	1	1	1

7	9967	9981	9990	9993	9997	0,9999	0,9999	1	1	1
8	9919	9951	9972	9984	9991	9995	9997	0,9999	0,9999	1

$\chi^2$	$k$									
	26	21	22	23	24	25	26	27	28	29
9	9829	9892	9933	9960	9976	9986	9992	9995	9997	0,9999
10	9682	9789	9863	9913	9945	9967	9980	9988	9993	9996
II	9462	9628	9747	9832	9890	9929	9955	9972	9983	9990
12	9161	9396	9574	9705	9799	9866	9912	9943	9964	9977
13	8774	9086	9332	9520	9661	9765	9840	9892	9929	9954
14	8305	8696	9015	9269	9466	9617	9730	9813	9872	9914
15	7764	8230	8622	8946	9208	9414	9573	9784	9850	9850
16	7166	7696	8159	8553	8881	9148	9362	9529	9658	9750
17	6530	7111	7634	8093	8487	8818	9311	9486	9622	9622
18	5874	6490	7060	7575	8030	8424	8758	9035	9261	9443
19	5218	5851	6453	7012	7520	7971	8364	8700	8981	9213
20	4579	5213	5830	6419	6968	7468	7916	8308	8645	8929
21	3971	4589	5207	5811	6387	6926	7420	7863	8253	8591
22	3405	3995	4599	5203	5793	6357	6887	7374	7813	8202
23	2888	3440	4017	4608	5198	5776	6329	6850	7330	7765
24	2424	2931	3472	4038	4616	5194	5760	6303	6815	7289
25	2014	2472	2971	3503	4058	4624	5190	5745	6278	6782
26	1658	2064	2517	3009	3532	4076	4631	5186	5730	6255
27	1353	1709	2112	2560	3045	3559	4093	4638	5182	5717
28	1094	1402	1757	2158	2600	3079	3585	4110	4644	5179
29	0878	1140	1449	1803	2201	2639	3111	3609	4125	4651
30	0699	0920	1185	1494	1884	2243	2676	3142	3632	4140

**7. Таблица значень  $P(\lambda)$  критерія Колмогорова**

$\lambda$	$P(\lambda)$	$\lambda$	$P(\lambda)$	$\lambda$	$P(\lambda)$
0,30	1,000	0,75	0,6272	1,60	0,0120
0,35	0,9997	0,80	0,5441	1,70	0,0062
0,40	0,9972	0,85	0,4653	1,80	0,0032

9,45	0,9874	0,90	0,3927	1,90	0,0015
0,50	0,9639	0,95	0,3275	2,00	0,0007
0,55	0,9228	1,00	0,2700	2,10	0,0003
0,58	0,8896	1,10	0,1777	2,20	0,0001
0,60	0,8643	1,20	0,1122	2,30	0,0001
0,64	0,8073	1,30	0,0681	2,40	0,0000
0,65	0,7920	1,40	0,0597	2,50	0,0000
0,70	0,7112	1,50	0,0222		

8. Значення  $\sum_{i=1}^n \frac{(\lambda t)^i t^{\lambda t}}{i!}$

<i>n</i>	$\lambda t$					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0	0,90484	0,81873	0,74082	0,67032	0,60653	0,55881
1	0,99532	0,98248	0,96306	0,93845	0,90980	0,87810
2	0,99985	0,90858	0,99639	0,99207	0,98561	0,97789
3	1,00000	0,99994	0,99972	0,99922	0,99825	0,99664
4	1,00000	1,00000	0,99997	0,99994	0,99983	0,99964
Б	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	0,99999	0,99996

<i>n</i>	$\lambda t$					
	0,7	0,8	0,9	1,0	2,0	3,0
0	0,49659	0,44933	0,40657	0,36788	0,13534	0,04979
1	0,84420	0,80879	0,77248	0,73576	0,40601	0,19915
2	0,96586	0,95258	0,93714	0,91970	0,67668	0,42319
3	0,99425	0,99092	0,98654	0,98101	0,85712	0,64723
4	0,99921	0,99859	0,99766	0,99634	0,94735	0,81526
5	0,99991	0,99982	0,99966	0,99941	0,98344	0,91608



9. Значения  $\frac{\varepsilon d}{v}$  и  $q$

$\varepsilon d/v$				$q$			
$\alpha$				$\alpha$			
$N$	0,80	0,90	0,95	$N$	0,80	0,90	0,95
4	0,82	1,17	1,59	4	2,29	2,93	3,67
5	0,69	0,95	1,24	5	2,05	2,54	3,08
6	0,60	0,82	1,05	6	1,90	2,29	2,73
7	0,54	0,73	0,92	—	—	—	—
8	0,50	0,67	0,83	8	1,72	2,01	2,31
9	0,47	0,62	0,77	—	—	—	—
10	0,44	0,58	0,72	10	1,61	1,83	2,08
15	0,35	0,45	0,55	15	1,46	1,62	1,78
20	0,30	0,39	0,47	20	1,37	1,51	1,64
25	0,26	0,34	0,41	25	1,33	1,44	1,55
30	0,24	0,31	0,37	30	1,29	1,39	1,48
40	0,20	0,26	0,32	40	1,24	1,32	1,40
50	0,18	0,24	0,28	50	1,21	1,28	1,35
80	0,14	0,19	0,22	80	1,16	1,21	1,26
100	0,13	0,17	0,20	100	1,14	1,19	1,23

10. Функция распределения  $F(t)$  нормального закона

$t$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,500	504	508	512	516	520	524	528	532	536
0,1	0,540	544	548	552	556	560	564	568	571	575
0,2	0,579	583	587	591	595	599	603	606	610	614
0,3	0,618	622	626	629	633	637	641	644	648	652
0,4	0,655	659	663	666	670	674	677	681	684	688

0,5	0,691	695	699	702	705	709	712	716	719	722
0,6	0,726	729	732	736	739	742	745	749	752	755
0,7	0,758	761	764	767	770	773	776	779	782	785
0,8	0,788	791	794	797	800	802	805	808	811	813
0,9	0,816	819	821	824	826	829	831	834	837	839
1,0	0,841	844	846	849	851	853	855	858	860	862
1,1	0,864	867	869	871	873	875	877	579	881	883
1,2	0,885	887	889	891	893	894	896	898	900	902
1,3	0,903	905	907	908	910	911	913	915	916	918'
1,4	0,919	921	922	924	925	926	929	929	931	932
1,5	0,933	934	936	937	938-	939	941	942	943	944
1,6	0,945	946	947	948	950	951	952	953 '	954	955
1,7	0,955	956	957	958	959	960	961	962	962	963
1,8	0,964	965	966	966	967	968	969	969	970	971
1,9	0,971	972	973	973	974	974	975	976	976	977
2,0	0,977	978	978	979	979	980	980	981	981	982
2,1	0,982	983	983	983	984	984	985	985	985	986
2,2	0,986	986	987	987	987	988	988	988	989	989
2,3	0,989	990	990	990	990	991	991	991	991	992
2,4	0,992	992	992	992	993	993	993'	993	993	994
2,5	0,994	994	994	994	994	995	995	995	995	995
2,6	0,995	995	995	996	996	996	996	996	996	996
2,8	0,997	998	998	998	998	998	998	998	998	998
3,0	0,999	999	999	999	999	999	999	999	999	999

**11. Квантилі  $H_{\kappa}^H$  закону нормального розподілення**

$P$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5	0,00	0,02	0,05	0,07	0,10	0,12	0,15	0,17	0,20	0,22
	0	5	0	5	0	6	1	6	2	7
0,6	0,25	0,27	0,30	0,33	0,35	0,38	0,41	0,44	0,46	0,49
	3	9	5	2	8	5	2	0	8	6

0,7	0,52 4	0,55 3	0,58 3	0,61 3	0,64 3	0,67 5	0,70 6	0,73 9	0,77 2	0,80 6
0,8	0,84 2	0,78 3	0,91 5	0,95 4	0,99 4	0,03 6	1,08 0	1,12 6	1,17 5	1,22 7
0,9	1,28 2	1,34 1	1,40 5	1,47 6	1,55 5	1,64 5	1,75 1	1,88 1	2,05 4	2,32 6

$P = 0,975; H_K = 1,96; P = 0,9957 H_K = 2,57; P = 0,999 H_K = 3,09,$

### 12. Квантилі $H_K/a$ розподілення закону Вейбулла ( $H^a_K$ )

F (t)	b							
	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,6	3,0
0,01	0,010	0,022	0,037	0,056	0,078	0,100	0,159	0,216
0,02	0,020	0,039	0,062	0,087	0,114	0,143	0,210	0,272
0,05	0,051	0,084	0,120	0,156	0,192	0,226	0,305	0,372
0,07	0,073	0,112	0,154	0,194	0,233	0,269	0,350	0,417
0,10	0,105	0,153	0,200	0,245	0,286	0,325	0,407	0,472
0,15	0,174	0,232-	0,285	0,332	0,380	0,419	0,498	0,558
0,20	0,223	0,287	0,343	0,392	0,435	0,472	0,549	0,607
0,30	0,357	0,424	0,479	0,525	0,564	0,597	0,662	0,709
0,40	0,511	0,571	0,619	0,657	0,688	0,715	0,764	0,799
0,50	0,693	0,737	0,770	0,795	0,816	0,833	0,864	0,885
0,60	0,916	0,930	0,939	0,947	0,953	0,957	0,966	0,971
0,70	1,200	1,17	1,14	1,12	1,11	1,10	1,08	1,06
0,80	1,61	1,49	1,41	1,35	1,30	1,27	1,21	1,17
0,90	2,30	2,00	1,81	1,68	1,59	1,52	1,40	1,32
0,93	2,66	2,26	2,01	1,84	1,72	1,63	1,48	1,39
0,95	3,00	2,49	2,19	1,99	1,84	1,73	1,55	1,44
0,98	3,91	3,12	2,65	2,35	2,13	1,98	1,73	1,58
0,99	4,60	3,57	2,98	2,60	2,34	2,15	1,84	1,66

### 13. Значення коефіцієнтів $r_1$ і $r_3$

Число спостережень (долідів або відмов)	Ймовірність Pa							
	0,80		0,90		0,95		0,99	
	$r_1$	$r_3$	$r_1$	$r_3$	$r_1$	$r_3$	$r_1$	$r_3$
1	4,48	0,62	9,50	0,43	19,5	0,33	100	0,22

2	2,42	0,67	3,77	0,51	5,63	0,42	13,5	0,39
3	1,95	0,70	2,73	0,57	3,66	0,48	6,88	0,36
4	1,74	0,73	2,29	0,60	2,93	0,52	4,85	0,40
5	1,62	0,75	2,05	0,62	2,54	0,55	3,91	0,43
6	1,54	0,76	1,90	0,65	2,29	0,57	3,36	0,46
7	1,48	0,77	1,80	0,67	2,13	0,59	3,00	0,48
8	1,43	0,78	1,72	0,68	2,01	0,61	2,75	0,50
9	1,40	0,79	1,66	0,69	1,91	0,63	2,56	0,52
10	1,37	0,80	1,61	0,70	1,83	0,64	2,42	0,53
11	1,35	0,80	1,57	0,70	1,78	0,64	2,31	0,54
12	1,33	0,81	1,53	0,71	1,73	0,65	2,21	0,56
13	1,31	0,81	1,50	0,73	1,69	0,66	2,13	0,57
14	1,29	0,83	1,48	0,74	1,65	0,67	2,06	0,58
15	1,28	0,83	1,46	0,74	1,62	0,68	2,01	0,59
20	1,24	0,85	1,37	0,77	1,51	0,72	1,81	0,63
25	1,21	0,86	1,33	0,79	1,44	0,74	1,68	0,66
30	1,18	0,87	1,29	0,80	1,39	0,76	1,60	0,68'
40	1,16	0,88	1,24	0,83	1,32	0,78	1,50	0,71
50	1,14	0,89	1,21	0,84	1,28	0,80	1,43	0,74
60	1,12	0,90	1,19	0,86	1,25	0,82	1,38	0,76
80	1,10	0,91	1,16	0,87	1,21	0,84	1,32	0,78
100	1,09	0,92	1,14	0,88	1,19	0,86	1,28	0,80
150	1,07	0,93	1,12	0,90	1,15	0,88	1,22	0,84
200	1,06	0,94	1,10	0,92	1,13	0,89	1,19	0,86
250	1,06	0,95	1,09	0,92	1,11	0,90	1,17	0,87
300	1,05	0,95	1,08	0,93	1,10	0,91	1,15	0,88
400	1,04	0,96	1,07	0,94	1,09	0,92	1,13	0,89
500	1,04	0,96	1,06	0,94	1,08	0,93	1,11	0,90

600	1,04	0,97	1,05	0,95	1,07	0,94	1,10	0,91
800	1,03	0,97	1,05	0,96	1,06	0,94	1,09	0,92
1000	1,03	0,97	1,04	0,96	1,05	0,95	1,08	0,93

14. Значення функції  $\Phi_t = \frac{1}{\sqrt{2\lambda}} \int_0^t l^{-\frac{t^2}{2}} dt$

$t$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0000	0010	0080	0120	0160	0199	0239	0279	0319	0359
0,1	0398	0438	0478	0517	0557	0596	0030	0675	0714	0753
0,2	0793	0832	0871	0909	0918	0987	1026	1064	1103	1141
0,3	1179	1217	1255	1293	1331	1368	1406	1443	1480	1517
0,4	1555	1591	1628	1661	1700	1736	1772	1808	1814	1879
0,5	1915	1950	1985	2019	2045	2088	2123	2157	2190	2224
0,6	2257	2291	2324	2357	2389	2422	2454	2486	2517	2549
0,7	2580	2611	2642	2673	2703	2734	2764	2794	2823	2852
0,8	2881	2910	2939	2967	2995	3023	3051	3078	3106	3133
0,9	3159	3186	3212	3238	3261	3289	3315	3340	3365	3389
1,0	3413	3438	3464	3485	3508	3531	3554	3577	3590	3621
1,1	3643	3665	3636	3708	3729	3749	3770	3790	3810	3830
1,2	3849	3869	3888	3907	3925	3944	3962	3980	3997	4015
1,3	4032	4049	4066	4082	4099	4115	4131	4147	4162	4177
1,4	4192	4207	4222	4236	4251	4265	4279	4292	4306	4319
1,5	4332	4345	4357	4370	4382	4391	4406	4418	4429	4441
1,6	4452	4463	4474	4484	4495	4505	4515	4525	4535	4545
1,7	4554	4564	4573	4582	4591	4599	4608	4616	4625	4633
1,8	4641	4649	4656	4661	4671	4678	4686	4693	4699	4706
1,9	4713	4719	4726	4732	4738	4744	4750	4756	4761	4767
2,0	4772	4778	4783	4788	4793	4898	4803	4808	4812	4817

2,1	4821	4826	4831	4834	4838	4842	4846	4850,	4854	4857
2,2	4861	4865	4868	4871	4875	4878	4881	4884	4887	4890
2,3	4893	4896	4898	4901	4904	4906	4909	4911	4913	4916
2,4	4918	4920	4922	4925	4827	4929	4931	4932	4934	4936
2,5	4938	4940	4941	4943	4945	4946	4948	4949	4951	4952
2,6	4953	4955	4956	4957	4959	4960	4961	4962	4963	4964
2,7	4965	4966	4967	4968	4969	4970	4971	4972	4973	4974
2,8	4974	4975	4976	4977	4977	4978	4979	4979	4980	4981
2,9	4981	4982	4982	4983	4984	4984	4985	4985	4986	4986
3,0	9865	9869	9874	9878	9882	9886	9889	9893	9896	9900
3,1	9903	9906	9909	9912	9912	9918	9921	9924	9926	9929
3,2	9931	9934	9936	9936	9940	9942	9944	9946	9948	9950
3,3	9952	9954	9955	9957	9958	9960	9961	9962	9964	9965
3,4	9966	9968	9969	9970	9971	9972	9973	9974	9975	9976

Примітка, Значення 0 для  $\Phi(t)$  опущено, а для  $t = 3,0 - 3,49$  опущено 0,4 (вміщено десяткові значення, починаючи з другого знака після коми), Приклад:  $t = 3,25$ ;  $\Phi(t) = 0,49942$ .

Значення для знаходження  $\Phi(t)$  за величиною  $t$  із трьома десятковими знаками

1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	8	12	16	20	24	28	32	36	2	4	6	8	10	12	14	16	19
4	8	12	16	20	24	28	32	36	2	4	5	7	9	11	13	15	16

4	8	12	15	19	23	27	31	35	2	3	5	6	8	10	11	13	14
4	8	11	15	18	23	26	30	34	1	3	4	6	7	8	10	11	13
4	7	11	14	18	22	25	29	32	1	2	4	5	6	7	8	10	11
3	7	10	14	17	21	24	27	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	6	10	13	16	19	23	26	29	1	2	3	3	4	5	6	7	8
3	6	9	12	15	18	21	24	27	1	1	2	3	4	4	5	6	6
3	6	8	11	14	17	19	22	25	1	1	2	2	3	4	4	5	5
3	5	8	10	13	15	18	20	26	0	1	1	2	2	3	3	4	4
2	5	7	9	11	14	16	18	21									

<i>t</i>	$\Phi(t)$	<i>t</i>	$\Phi(t)$	<i>t</i>	$\Phi(t)$	<i>t</i>	$\Phi(t)$
3,50	49977	3,80	499928	3,65	49987	4,50	4999
3,55	49981	3,90	499952	3,70	49989	5,00	4999

15. Значення коефіцієнта Ірвіна  $\lambda$

<i>N</i>	$\alpha=0,95$	$\alpha=0,99$	<i>N</i>	$\alpha=0,95$	$\alpha=0,99$	<i>N</i>	$\alpha=0,95$	$\alpha=0,99$	<i>N</i>	$\alpha=0,95$	$\alpha=0,99$
2	2,8	3,7	30	1,2	1,7	10	1,5	2,0	100	1,0	1,5
3	2,2	2,9	50	1,1	1,6	20	1,3	1,8	400	0,9	1,3

16. Розподілення Пуассона  $P_m = \frac{a^m}{m!} t^{-a}$

<i>m</i>	$\alpha=0,1$	$\alpha=0,2$	$\alpha=0,3$	$\alpha=0,4$	$\alpha=0,5$	$\alpha=0,6$	$\alpha=0,7$	$\alpha=0,8$	$\alpha=0,9$
0	0,9048	0,8187	0,7408	0,6703	0,6065	0,5488	0,4966	0,4493	0,4066
1	0,0905	0,1638	0,2222	0,2681	0,8033	0,3293	0,3476	0,3595	0,3659
2	0,0045	0,0164	0,0333	0,0536	0,0758	0,0988	0,1217	0,1438	0,1647
3	0,0002	0,0019	0,0033	0,0072	0,0126	0,0198	0,0284	0,0383	0,0491
4	—	0,0001	0,0002	0,0007	0,0016	0,0030	0,0050	0,0077	0,0111
5	—	—	—	0,0001	0,0002	0,0004	0,0007	0,0012	0,0020
6	—	—	—	—	—	—	0,0001	0,0002	0,000

<i>m</i>	$\alpha=1$	$\alpha=2$	$\alpha=3$	$\alpha=4$	$\alpha=6$	$\alpha=6$	$\alpha=7$	$\alpha=8$	$\alpha=9$	$\alpha=10$
0	0,3679	0,1353	0,0498	0,0183	0,0087	0,0025	0,0009	0,0003	0,0001	0,0000
1	0,3679	0,2707	0,1494	0,733	0,0337	0,0149	0,0064	0,0027	0,0011	0,0005

2	0,1839	0,2707	0,2240	0,1465	0,0842	0,0446	0,0223	0,0107	0,0050	0,0023
3	0,0613	0,1804	0,2240	0,1954	0,1404	0,0892	0,0521	0,0286	0,0150	0,0076
4	0,0153	0,0902	0,1680	0,1954	0,1755	0,1339	0,0912	0,0572	0,0337	0,0189
5	0,0031	0,0361	0,1008	0,1563	0,1755	0,1606	0,1277	0,0916	0,0607	0,0378
6	0,005	0,0120	0,0504	0,1042	0,1462	0,1606	0,1490	0,1221	0,0911	0,0631
7	0,0001	0,0037	0,0216	0,0595	0,1044	0,1377	0,1490	0,1396	0,1171	0,0901
8	—	0,0009	0,0081	0,0298	0,06553	0,1033	0,1304	0,1396	0,1318	0,1126
9	—	0,0002	0,0027	0,0132	0,03(53	0,0688	0,1014	0,1241	0,1318	0,1251
10	—	—	0,0008	0,0053	0,0181	0,0413	0,0710	0,0993	0,1186	0,1251
11	—	—	0,0002	0,0019	0,0082	0,0225	0,0452	0,0722	0,0970	0,1137
12	—	—	0,0001	0,0006	0,0034	0,0126	0,0263	0,0481	0,0728	0,0948
13	—	—	—	0,0002	0,0013	0,0052	0,0142	0,0296	0,0504	0,0729
14	—	—	—	0,0001	0,0005	0,0022	0,0071	0,0169	0,0324	0,0521
15	—	—	—	—	0,0002	0,0009	0,0033	0,0090	0,0194	0,0347
16	—	—	—	—	—	0,0003	0,0014	0,0045	0,0109	0,0217
17	—	—	—	—	—	0,0001	0,0006	0,0021	0,0058	0,0128
18	—	—	—	—	—	—	0,0002	0,0009	0,0029	0,0071
19	—	—	—	—	—	—	0,0001	0,0004	0,0014	0,0037
20	—	—	—	—	—	—	—	0,0002	0,0006	0,0019
21	—	—	—	—	—	—	—	0,0001	0,0003	0,0009
22	—	—	—	—	—	—	—	—	0,0001	0,0004
23	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,0002
24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,0001

**17. Таблица значений  $e^{-t}$**

$t$	$e^{-t}$	$t$	$e^{-t}$	$t$	$e^{-t}$	$t$	$e^{-t}$	$t$	$e^{-t}$
0,00	1,0000	0,50	0,6065	1,00	0,3679	1,50	0,2231	2 00	0,1353
0,01	0,9900	0,51	0,6005	1,01	0,3642	1,51	0,2209	2,1	0,1225



0,02	0,9802	0,52	0,5945	1,02	0,3606	1,52	0,2187	2,2	0,1108
0,03	0,9704	0,53	0,5886	1,03	0,3570	1,53	0,2165	2,3	0,1003
0,04	0,9608	0,54	0,5827	1,04	0,3535	1,54	0,2144	2,4	0,0907
0,05	0,9512	0,55	0,5769	1,05	0,3499	1,55	0,2122	2,5	0,0821
0,06	0,9418	0,56	0,5712	1,06	0,3465	1,56	0,2101	2,6	0,0743
0,07	0,9324	0,57	0,5655	1,07	0,3430	1,57	0,2080	2,7	0,0672
0,08	0,9231	0,58	0,5599	1,08	0,3396	1,58	0,2060	2,8	0,0608
0,09	0,9139	0,59	0,5543	1,09	0,3362	1,59	0,2039	2,9	0,0550
0,10	0,9048	0,60	0,5488	1,10	0,3329	1,60	0,2019	3,0	0,0498
0,11	0,8958	0,61	0,5434	1,11	0,3296	1,61	0,1999	3,1	0,0451
0,12	0,8869	0,62	0,5379	1,12	0,3263	1,62	0,1979	3,2	0,0408
0,13	0,8781	0,63	0,5326	1,13	0,3230	1,6,1	0,1959	3,3	0,0369
0,14	0,8694	0,64	0,5273	1,14	0,3198	1,64	0,1940	3,4	0,0334
0,15	0,8607	0,65	0,5220	1,15	0,3166	1,65	0,1920	3,5	0,0302
0,16	0,8521	0,66	0,5169	1,16	0,3135	1,66	0,1901	3,6	0,0273
0,17	0,8437	0,67	0,5117	1,17	0,3140	1,67	0,1818	3,7	0,0247
0,18	0,8353	0,68	0,5066	1,18	0,3073	1,68	0,1864	3,8	0,0224
0,19	0,8270	0,69	0,5016	1,19	0,3042	1,69	0,1845	3,9	0,0202
0,20	0,8187	0,70	0,4966	1,20	0,3012	1,70	0,1827	4,0	0,0183
0,21	0,8106	0,71	0,4916	1,21	0,2982	1,71	0,1809	4,1	0,0166
0,22	0,8025	0,72	0,4868	1,22	0,2952	1,72	0,1791	4,2	0,0150
0,23	0,7945	0,73	0,4819	1,23	0,2923	1,73	0,1773	4,3	0,0136
0,24	0,7866	0,74	0,4771	1,24	0,2894	1,74	0,1755	4,4	0,0213
0,25	0,7788	0,75	0,4724	1,25	0,2865	1,75	0,1738	4,5	0,0111
0,26	0,7711	0,76	0,4674	1,26	0,2837	1,76	0,1720	4,6	0,0101
0,27	0,7634	0,77	0,4630	1,27	0,2808	1,77	0,1703	4,7	0,0091
0,28	0,7558	0,78	0,4584	1,28	0,2780	1,78	0,1686	4,8	0,0082
0,29	0,7483	0,79	0,4538	1,29	0,2753	1,79	0,1670	4,9	0,0074

0,30	0,7408	0,80	0,4493	1,30	0,2725	1,80	0,1653	5,0	0,0067
0,31	0,7334	0,81	0,4449	1,31	0,2698	1,81	0,1637	5,1	0,0061
0,32	0,7189	0,82	0,4404	1,32	0,2761	1,82	0,1620	5,2	0,0055
0,33	0,7189	0,83	0,4360	1,33	0,2645	1,83	0,1604	5,3	0,0050
0,34	0,7118	0,84	0,4317	1,34	0,2618	1,84	0,1588	5,4	0,0045
0,35	0,7047	0,85	0,4274	1,35	0,2592	1,85	0,1572	5,5	0,0041
0,36	0,6977	0,86	0,4232	1,36	0,2567	1,86	0,1557	5,6	0,0037
0,37	0,6907	0,87	0,4190	1,37	0,2541	1,87	0,1541	5,7	0,0033
0,38	0,6839	0,88	0,4148	1,38	0,2516	1,88	0,1526	5,8	0,0030
0,39	0,6771	0,89	0,4107	1,39	0,2491	1,89	0,1511	5,9	0,0027
0,40	0,6703	0,90	0,4066	1,40	0,2466	1,90	0,1496	6,0	0,0025
0,41	0,6637	0,91	0,4025	1,41	0,2441	1,91	0,1481	6,1	0,0022
0,42	0,6570	0,92	0,3985	1,42	0,2417	1,92	0,1466	6,2	0,0020
0,43	0,6505	0,93	0,3946	1,43	0,2393	1,93	0,1451	6,3	0,0018
0,44	0,6440	0,94	0,3906	1,44	0,2369	1,94	0,1437	6,4	0,0018
0,45	0,6376	0,95	0,3867	1,45	0,2346	1,95	0,1423	6,5	0,0015
0,46	0,6313	0,96	0,3829	0,46	0,2322	1,96	0,1409	6,6	0,0014
0,47	0,6250	0,97	0,3791	0,47	0,2299	1,97	0,1395	6,7	0,0012
0,48	0,6188	0,98	0,3753	0,48	0,2276	1,98	0,1381	6,8	0,0011
0,49	0,6126	0,99	0,3716	0,49	0,2254	1,99	0,1367	6,9	0,0010

18. Значення  $\left[\frac{U_n}{U_1(t)}\right]^{1/2}$

$\frac{U_n}{U_1(t)}$	Значення при показнику степені									
	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	, 1,5	1,7	2,0	2,5

10	17,78	10,0	8,13	6,81	5,88	5,19	4,65	3,87	3,14	2,51
9	15,59	9,0	7,39	6,23	5,42	4,80	4,33	3,64	3,00	2,41
8	13,45	8,00	6,63	5,66	4,96	4,42	4,01	3,40	2,83	2,30
7	11,39	7,00	5,88	5,06	4,46	4,01	3,66	3,14	2,65	2,18
6	9,39	6,00	5,41	4,45	3,97	3,60	3,33	2,87	2,45	2,05
5	7,48	5,00	4,33	3,83	3,45	3,16	2,92	2,58	2,24	1,90
4	5,66	4,00	3,53	3,17	2,90	2,69	2,52	2,26	2,00	1,74
3	3,95	3,00	2,72	2,49	2,33	2,19	2,08	1,91	1,73,	1,55
2,8	3,62	2,80	2,55	2,36	2,21	2,09	1,99	1,84	1,67	1,51
2,5	3,14	2,50	2,30	2,17	2,02	1,82	1,84	1,71	1,58	1,44
2,2	2,68	2,20	2,05	1,93	1,83	1,74	1,69	1,59	1,48	1,37
2,0	2,38	2,00	1,88	1,78	1,70	1,64	1,59	1,50	1,41	1,32
1,9	2,23	1,90	1,79	1,71	1,64	1,58	1,54	1,46	1,38	1,29
1,8	2,08	1,8	1,71	1,63	1,57	1,52	1,48	1,41	1,34	1,27
1,7	1,94	1,70	1,62	1,56	1,50	1,46	1,42	1,37	1,30	1,24
1,6	1,80	1,6	1,53	1,48	1,44	1,40	1,37	1,32	1,27	1,21
1,5	1,66	1,5	1,45	1,40	1,37	1,34	1,31	1,27	1,22	1,18
1,4	1,52	1,4	1,36	1,33	1,30	1,27	1,25	1,21	1,18	1,14
1,3	1,39	1,3	1,27	1,24	1,22	1,20	1,19	1,17	1,14	1,11
1,25	1,32	1,25	1,23	1,20	1,19	1,17	1,16	1,14	1,12	1,10
1,2	1,26	1,2	1,18	1,16	1,15	1,14	1,13	1,11	1,10	1,08
1,15	1,19	1,15	1,13	1,13	1,11	1,11	1,10	1,09	1,07	1,06
1,1	1,13	1,1	1,09	1,08	1,08	1,07	1,07	1,06	1,05	1,04
1,05	1,06	1,05	1,05	1,05	1,04	1,04	1,03	1,03	1,03	1,02

### 19. Квантилі розподілення Стюдента

Число степенів свободи  $k(N-n) = t$	Ймовірність, P							
	0,90	0,95	0,975	0,990	0,995	0,999	0,995	0,995
1	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	318,3	636,6	636,6

2	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	22,33	31,60
3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	10,22	12,94
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	7,173	8,610
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	5,893	6,859
6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,208	5,959
7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,490	4,785	5,405
8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	4,501	5,041
9	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,297	4,781
10	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,144	4,587
11	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,025	4,437
12	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,930	4,318
13	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,852	4,221
14	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,787	4,140
15	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,733	4,073
16	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,686	4,015
17	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,646	3,965
18	1,330	0,734	2,101	2,552	2,878	3,611	3,965
19	1,328	0,729	2,003	2,539	2,861	3,579	3,883
20	1,325	0,725	2,086	2,528	2,845	3,552	3,850
21	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,527	3,819
22	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,505	3,792
23	1,319	1,714	2,069	2,500 -	2,807	3,485	3,767
24	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,467	3,745
25	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,450	3,725
26	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,435	3,707
27	1,314	1,702	2,052	2,473	2,771	3,421	3,690
28	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,408	3,674
29	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,396	3,659

30	1,310	1,607	2,042	2,457	2,750	3,385	3,646
40	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,307	3,551
50	1,208	1,676	2,002	2,403	2,678	3,262	3,495
60	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,232	3,460
80	1,292	1,664	1,990	2,374	2,639	3,195	3,415
100	1,200	1,660	1,984	2,365	2,626	3,174	3,389
200	1,286	1,653	1,972	2,345	2,601	3,131	3,339
500	1,283	1,648	1,965	2,334	2,586	3,106	3,310

**20. Квадрати, куби, корні квадратні та кубічні, десяткові та натуральні логарифми, подвійні логарифми та площі кіл для цілих чисел від 1 до 100**

$n^1$	$n^2$	$n^3$	$\sqrt{n}$	$\sqrt[3]{n}$	$\lg n$	$\ln n$	$\log n$	$\frac{\pi n^2}{4}$
1	1	1	1,0000	1,0000	0,00000	0,00000	0,00000	0,7854
2	4	8	1,4141	1,2599	0,30103	0,69315	1,00000	3,1416
3	9	27	1,7321	1,4422	0,47712	1,09861	1,68496	7,0686
4	16	64	2,0000	1,5874	0,60206	1,38629	2,00000	12,5664
5	25	125	2,2361	1,7100	0,69897	1,60944	2,32193	19,6350
6	36	216	2,4495	1,8171	0,77815	1,79176	2,58496	28,2743
7	49	343	2,6458	1,9129	0,84510	1,94591	2,80737	38,4845
8	64	512	2,8284	2,0000	0,90309	2,07944	3,00000	50,2655
9	81	729	3,0000	2,0801	0,95424	2,19722	3,16993	63,6173
10	100	1000	3,1623	2,1544	1,00000	2,30259	3,32193	78,5398
11	121	1331	3,3166	2,2240	1,04139	2,39790	3,45943	95,0332
12	144	1728	3,4641	2,2894	1,07918	2,48491	3,58496	113,097
13	169	2197	3,6056	2,3513	1,11394	2,56495	3,70044	132,732
14	196	2744	3,7417	2,4101	1,14613	2,63906	3,80735	153,938
15	225	3375	3,8730	2,4662	1,17609	2,70805	3,90689	176,715
16	256	4096	4,0000	2,5198	1,20412	2,77259	4,00000	201,062

17	289	4913	4,1231	2,5713	1,23045	2,83321	4,08746	226,980
18	324	5832	4,2426	2,6207	1,25527	2,89037	4,16993	251,469
19	361	6859	4,3589	2,6684	1,27875	2,94444	4,24793	283,529
20	400	8000	4,4721	2,7144	1,30103	2,99573	4,32193	314,159
21	441	9261	4,5826	2,7589	1,32222	3,04452	4,39232	346,361
22	481	10648	4,6904	2,8020	1,34242	3,09104	4,45943	380,133
23	529	12167	4,7958	0,8439	1,36173	3,13549	4,52356	415,476
24	576	13824	4,8990	2,8845	1,38021	3,17805	4,58496	452,389
25	625	15625	5,0000	2,9240	1,39794	3,21888	4,64386	490,874
26	676	17576	5,0990	2,9625	1,41497	3,25810	4,70044	530,929
27	729	19683	5,1962	3,0000	1,43136	3,29584	4,75489	572,555
28	784	21952	5,2915	3,0366	1,44716	3,33220	4,80735	615,752
29	841	24389	5,3852	3,0723	1,46240	3,36730	4,85798	660,520
30	900	27000	5,4772	3,1072	1,47712	3,40120	4,90689	706,858
31	961	29791	5,5678	3,1414	1,49136	3,43399	4,95420	754,768
32	1024	32768	5,6569	3,1748	1,50515	3,46574	5,00000	804,248
33	1089	35937	5,7446	3,2075	1,51851	3,49651	5,04439	855,299
34	1156	39304	5,8310	3,2396	1,53148	3,52636	5,08746	907,920
35	1225	42875	5,9161	3,2711	1,54407	3,55535	5,12928	962,113
36	1296	46656	6,0000	3,3019	1,55630	3,58352	5,16993	1017,830
37	1369	50653	6,0828	3,3322	1,56820	3,61092	5,20945	1075,210
38	1444	54872	6,1644	3,3620	1,57978	3,63759	5,24793	1134,11
39	1521	59319	6,2450	3,3912	1,59106	3,66356	5,28540	1194,59
40	1600	64000	6,3246	3,4200	1,60206	3,68888	5,32193	1256,64
41	1681	68921	6,4031	3,4482	1,61278	3,71357	5,35755	1320,25
42	1764	74088	6,4807	3,4760	1,62325	3,71767	5,39232	1385,44
43	1849	79507	6,5574	3,5034	1,63347	3,76120	5,42628	1452,20
44	1936	85184	6,6332	3,5303	1,64345	3,78419	5,45943	1520,53

45	2025	91125	6,7082	3,5569	1,65321	3,80666	5,49185	1590,43
4G	2116	97336	6,7823	3,5830	1,66276	3,82864	5,52356	1661,90
47	2209	103823	6,8557	3,6088	1,67210	3,85015	5,55450	1734,94
48	2304	110592	6,9282	3,6342	1,68124	3,87120	5,58496	1809,56
49	2401	117649	7,0000	3,6593	1,69020	3,89182	5,61471	1885,74
50	2500	125000	7,0711	3,6840	1,69897	3,91202	5,64386	1963,50
51	2601	132651	7,1414	3,7084	1,70757	3,93183	5,67242	2042,82
52	2704	140608	7,2111	3,7325	1,71600	3,95124	5,70044	2123,72
53	2809	148877	7,2801	3,7563	1,72428	3,97029	5,72792	2206,18
54	2916	157464	7,3485	3,7793	1,73239	3,98898	5,75489	2290,22
55	3025	166375	7,4162	3,8030	1,74036	4,00733	5,78136	2375,83
56	3136	175616	7,4833	3,8259	1,74819	4,02535	5,80735	2463,01
57	3249	185193	7,5493	3,8485	1,75587	4,04306	5,83289	2551,76
58	3364	195112	7,6158	3,8709	1,76343	4,06044	5,85798	2642,08
59	3481	205379	7,6811	3,8930	1,77085	4,07754	5,88264	2733,97
60	3600	216000	7,7460	3,9149	1,77815	4,09434	5,90689	2827,43
61	3721	226981	7,8102	3,9365	1,78533	4,11087	5,93074	2922,47
62	3844	238328	7,8740	3,9579	1,78239	4,12713	5,95420	3019,07
63	3969	250047	0,9373	3,9791	1,79934	4,14313	5,97728	3117,25
64	4095	262144	8,0000	4,0000	1,80610	4,15888	6,00000	3216,99
65	4225	274625	8,0623	4,0207	1,81291	4,17439	6,02237	3318,31
66	4356	287496	8,1240	4,0412	1,81954	4,18965	6,04439	3421,19
67	4489	300763	8,1854	4,0615	1,82607	4,20469	6,06609	3525,65
06	4624	314432	8,2462	4,0817	1,83251	4,21951	6,08746	3631,68
69	4761	328509	8,3066	4,1016	1,83885	4,23411	6,10852	3739,28
70	4900	343000	8,3660	4,1213	1,84510	4,24850	6,12928	3848,45
71	5041	357911	8,4261	4,1403	1,85126	4,26268	6,14975	3959,19
72	5184	373248	8,4853	4,1602	1,85733	4,27667	6,16992	4071,50

73	5329	389017	8,5440	4,1793	1,86332	4,29046	6,18982	4185,39
74	5476	405224	8,6023	4,1983	1,86923	4,30407	6,20945	4300,84
75	5625	421875	8,6603	4,2172	1,87506	4,31749	6,22882	4417,86
76	5776	438976	8,7178	4,2358	1,88081	4,33073	6,24793	4536,46
77	5929	456533	8,7750	4,2543	1,88649	4,34381	6,26679	4656,63
78	6034	474552	8,8318	4,2727	1,89209	4,35671	6,28540	4778,36
79	6241	493039	8,8882	4,2903	1,89763	4,36945	6,30378	4901,67
80	6400	512000	8,9443	4,3089	1,90309	4,38203	6,32193	5026,55
81	6561	531441	9,0000	4,3267	1,90849	4,39445	6,33985	5153,00
82	6724	551368	9,0554	4,3445	1,91381	4,40672	6,35755	5281,02
83	6889	571787	9,1104	4,3621	1,91903	4,41884	6,37504	5410,61
84	7056	592704	9,1652	4,3795	1,92428	4,43082	6,30232	5541,77
85,	7225	614125	9,2195	4,3968	1,92942	4,44265	6,40939	5674,50
86	7396	636056	9,2736	4,4140	1,93450	4,45435	6,42626	5808,80
87	7569	658503	9,3274	4,4310	1,93952	4,46591	6,44294	5944,68
88	7744	681472	9,3808	4,4480	1,94448	4,47734	6,45943	6082,12
89	7921	704939	9,4340	4,4647	1,94939	4,48864	6,47573	6221,14
90	8100	729060	9,4868	4,4814	1,95424	4,49981	6,49185	6361,73
91	8281	753571	9,5394	4,4979	1,95904	4,51086	6,50779	6503,88
92	8464	778688	9,5917	4,5144	1,96379	4,52179	6,52356	6647,61
93	8649	804357	9,6437	4,5307	1,96848	4,53260	6,53916	6792,91
94	8836	830584	9,6954	4,5468	1,97313	4,54329	6,55459	6939,78
95	9025	857375	9,7468	4,5629	1,97772	4,55388	6,56986	7088,22
96	9216	884736	9,7980	4,5789	1,98227	4,56435	6,58496	7238,23
97	9409	912673	9,8489	4,5947	1,98677	4,57471	6,59991	7389,81
98	9604	941192	9,8995	4,6104	1,99123	4,58497	6,61471	7542,96
99	9801	970299	9,9499	4,6261	1,99564	4,59512	6,62936	7697,69
100	10000	1000000	10,0000	4,6416	2,00000	4,60517	6,64386	7853,93



