

УДК 631.3  
ББК 4.751-5-02я73  
Н17

Надійність сільськогосподарської техніки: Підручник. Друге видання, перероблене і доповнене/ М.І. Черновол, В.Ю. Черкун, В.В. Аулін, Є.К. Солових, С.Г. Гранкін, О.В. Гранкіна. За ред. М.І. Чорновола.- Кіровоград, 2009.-

Наведено основні поняття, визначення й терміни надійності сільськогосподарської техніки, її інженерно-фізичні основи та математичні методи визначення показників надійності. Особливу увагу приділено випробуванню сільськогосподарської техніки на надійність, методом прогнозування та забезпечення і підвищення надійності машин.

Для студентів інженерних спеціальностей вищих навчальних закладів освіти III—IV рівнів акредитації за напрямом "Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва.

УДК 631.3  
ББК 4.751-5-02я73  
Н17

© М.І. Черновол, В.Ю. Черкун, В.В. Аулін,  
Є.К. Солових, С.Г. Гранкін, О.В. Гранкіна, 2009

## ПЕРЕДМОВА

Якісне виготовлення та технічний сервіс сільськогосподарської техніки мають велике значення для функціонування агропромислового комплексу України.

Надійність – одна з основних проблем сучасної техніки, яка вирішується на етапах проектування, виробництва, дослідження, експлуатації й ремонту машин та технологічного обладнання.

Підтримання працездатності, відновлення ресурсу машин і технологічного обладнання, підвищення їх безвідмовності – важливе завдання підприємств, які пов'язані з технічним сервісом. Підвищення надійності сільськогосподарської техніки також має велике економічне значення.

У формуванні та розвитку надійності як науки визначне місце належить вітчизняним та зарубіжним вченим.

Математичну теорію надійності розроблено у працях О.Я. Хінчина, А.М. Колмогорова, Б.В. Гнеденка. Значним є внесок у розвиток теорії надійності вчених А.І. Берга, М.Г. Бруєвича, Б.С. Сотськова, О.С. Пронікова, Я.Б. Шора, В. Вейбулла та ін.

Методику оцінки надійності сільськогосподарської техніки розробили вчені В.Я. Анілович, В.М. Міхлін, М.М. Северньов, В.М. Кряжков, В.Я. Сковородін, Л.В. Тішкін, А.Ш. Рабінович, Р.В. Кугель, Г.М. Велічкін, С.С. Дмитриченко, М.М. Тененбаум, Н.С. Ждановський, О.В. Ніколаєнко та ін.

Теорія надійності належить до інженерних дисциплін, незважаючи на те, що її основними методами є теорія ймовірностей та математична статистика.

Інженерний аналіз характеристик надійності машин та обладнання дає змогу виявити недоліки в організації та технології технічного обслуговування.

Вивчення деталей, складальних одиниць, агрегатів як елементів системи дозволяє отримати необхідні дані для виконання робіт по удосконаленню конструкцій, експлуатації та ремонту сільськогосподарської техніки.

Оволодіння основами надійності сільськогосподарської техніки сприяє досягненню високої ефективності використання машин та обладнання, економії паливо-мастильних матеріалів, енергоресурсів, робочого часу і коштів.

Курс "Надійність сільськогосподарської техніки" для підготовки

спеціалістів інженерних спеціальностей дуже важливий. Мета курсу – навчити майбутніх інженерів забезпечувати експлуатаційні показники сільськогосподарської техніки протягом заданого часу при оптимальних затратах матеріальних і трудових ресурсів на проектування, виробництво, експлуатацію, технічне обслуговування та ремонт.

Студенти повинні оволодіти основними поняттями та термінами, інженерно-фізичними та математичними основами надійності, методами та методиками прогнозування оцінки прийняття оптимальних рішень щодо підвищення показників надійності машин.

Вивчення дисципліни повинно допомогти майбутнім спеціалістам кваліфіковано виявляти та аналізувати причину відмов; проводити випробування техніки на надійність, здійснювати прогнозування і визначати кількісні показники надійності; розробляти і впроваджувати у виробництво заходи щодо забезпечення і підвищення надійності машин за рахунок удосконалення їх методики від проектування, виготовлення, експлуатації до технічного обслуговування і ремонту.

"Надійність сільськогосподарської техніки" є інтегруючою дисципліною і ґрунтується на циклі дисциплін з теорії машинознавства(теорія робочих процесів, кінематика і динаміка машин, технологія та організація їх виготовлення, експлуатація, технічне обслуговування і ремонт).

Дана книга є другим, переробленим і доповненим виданням підручника «Надійність сільськогосподарської техніки» авторів С.Г. Гранкіна, В.С. Малахова, М.І. Черновола, В.Ю. Черкуна виданого в 1998 р, К.: «Урожай».- 208с.

Передмову і розділ 1 підручника підготував професор, канд. техн. наук В.Ю. Черкун; розділ 2 – доцент, канд. техн. наук С. Г. Гранкін; розділ 3 та додатки – спільно В. Ю. Черкун і доцент, канд. техн. наук О.В. Гранкіна; розділ 4 – спільно професор, канд. фіз.-мат. наук В.В. Аулін і професор, канд. техн. наук Є.К. Солових; розділ 5 - професор, канд. фіз.-мат. наук В.В. Аулін; розділ 6 та загальна редакція підручника – професор, доктор техн. наук, член-кор. УААН М.І. Черновол.

# ЗМІСТ:

стор.

<b>Передмова</b> .....	
<b>1. Основні поняття, терміни, визначення та положення</b> .....	
1.1. Поняття про якість продукції. Надійність як складова якості сільськогосподарської техніки... ..	
1.2. Основні поняття, терміни та визначення надійності техніки..... Контрольні запитання.....	
<b>2. Інженерно-фізичні основи надійності</b> .....	
2.1. Причини втрати працездатності об'єктів.....	
2.2. Зношування. Види, характеристики і закономірності процесу.....	
2.3. Деформація й руйнування. утома металів.....	
2.4. Корозія.....	
2.5. Старіння матеріалів.....	
2.6. Види відмов..... Контрольні запитання.....	
<b>3. Математичні методи визначення показників надійності</b> .....	
3.1. Деякі відомості з теорії ймовірностей та математичної статистики.....	
3.2. Характеристика основних законів розподілу показників надійності.....	
3.3. Збирання та обробка інформації про надійність технічних об'єктів.....	
3.4. Показники безвідмовності.....	
3.5. Показники довговічності.....	
3.6. Показники ремонтпридатності та збереженості.....	
3.7. Комплексні показники надійності.....	
3.8. Розрахунки показників надійності.....	

Контрольні запитання.....

#### **4. Випробування сільськогосподарської техніки на надійність.....**

4.1. Загальна характеристика видів та методів випробування сільськогосподарської техніки на надійність.....

4.2. Терміни та визначення.....

4.3. Класифікація випробувань техніки на надійність.....

4.4. Види та методи випробувань післяремонтної надійності сільськогосподарської техніки.....

4.5. Загальна методика проведення випробувань відремонтованої сільськогосподарської техніки на надійність.....

4.6. Організація випробування на надійність.....

4.7. Планування випробувань на надійність.....

4.8. Планування випробувань методами факторного експерименту...

4.9. Загальна схема аналітичної обробки дослідної інформації по результатах спостережень за відмовами.....

4.10. Методи оцінки надійності по результатах завершених випробувань.....

4.11. Методи оцінки надійності по результатах незавершених (зрізаних) випробувань.....

4.12. Загальна характеристика методів прискорених випробувань сільськогосподарської техніки на надійність.....

4.13. Технічні засоби для прискорення випробувань сільськогосподарських машин.....

4.14. Методи та програми прискорених випробувань відремонтованої техніки на надійність.....

Контрольні запитання.....

#### **5. Основи прогнозування надійності машин.....**

5.1. Мета і основні задачі прогнозування надійності машин.....

5.2. Методи прогнозування надійності машин.....

5.3. Методи експертних оцінок.....

5.4.	Методи моделювання.....
5.5.	Статистичні методи прогнозування.....
5.5.1	Методи екстраполяції.....
5.5.2.	Методи вибраних точок.....
5.5.3.	Метод середніх.....
5.5.4.	Метод найменших квадратів.....
5.6.	Приклади вирішення задач прогнозування.....
5.7.	Оцінка якості прогнозування надійності машин.....
	Контрольні запитання.....
<b>6.</b>	<b>Методи забезпечення і підвищення надійності сільсько- господарської техніки.....</b>
6.1.	Керування надійністю машин на всіх стадіях їх життєвого циклу.....
6.2.	Забезпечення надійності машин на стадії проектування.....
6.3.	Забезпечення і підвищення надійності машин на стадії виробництва.....
6.4.	Забезпечення надійності машин у процесі експлуатації і ремонту.....
	Контрольні запитання.....
	<b>Додатки.....</b>
	<b>Бібліографічний список.....</b>

# 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ, ТЕРМІНИ, ВИЗНАЧЕННЯ ТА ПОЛОЖЕННЯ

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

Поняття якості та надійності сільськогосподарської техніки характеризуються такими, найчастіше вживаними визначеннями.

**Продукція** – це матеріалізований результат процесу трудової діяльності, отриманий у певному місці за певний інтервал часу і призначений для використання споживачами з метою задоволення їх потреб як суспільного, так і особистого характеру.

Продукція може бути готовою у незавершеному виробництві (у процесі виготовлення, вирощування тощо), ремонтуватись та ін. Продукція – узагальнене поняття, розрізняють два її види – вироби і продукти.

**Вироби** – одиниця промислової продукції, кількість якої може обчислюватись у штуках або екземплярах. В окремих випадках кількість певних деталей (наприклад, деталей кріплення) характеризується неперервною величиною і обчислюється за допомогою одиниць маси (ваги).

**Продукти** – результат роботи виробничого підприємства (нафтопродукти, волокно та ін.) або підприємства сільського й лісового господарства (зерно, м'ясо, деревина та ін.). Кількість продуктів характеризується неперервною величиною, яка обчислюється у кілограмах, тоннах, кубічних метрах, літрах.

**Властивість продукції** – об'єктивна особливість, яка може виявлятися при створенні, експлуатації або вживанні продукції.

**Експлуатація** – термін, який застосовується до об'єктів або виробів, які в процесі використання витрачають ресурс.

**Вживання** – це витрата продуктів і виробів у процесі їх використання (наприклад, нафтопродукти, метизи та ін.). Продукція має багато різних

властивостей, сукупність всіх властивостей даної продукції дозволяє розрізняти певні її види.

Притаманні продукції властивості виявляються при проектуванні, технічному обслуговуванні, ремонті, зберіганні, транспортуванні.

**Якість продукції** – сукупність її властивостей, які зумовлюють придатність продукції задовольняти певні потреби споживачів згідно з її призначенням.

Якість продукції характеризується переліком простих і складних властивостей, які умовно можна об'єднати у такі групи: технічні (функціональні, експлуатаційні), виробничо-технологічні та економічні.

До технічних відносять: показники призначення (продуктивність, потужність, коефіцієнт корисної дії та ін.), надійність (безвідмовність, довговічність, ремонтоздатність та збереженість), показники ергономіки, естетики, патентоправові показники.

Виробничо-технологічні показники враховують ступінь стандартизації, уніфікації та взаємозамінності, технологічність виробництва.

До економічних показників відносять собівартість виготовлення, одночасні витрати експлуатаційників на придбання машин та витрати для її транспортування, налагодження тощо.

Найважливіша ознака якості промислової продукції – її **надійність**, яка виявляється в процесі роботи. Надійність – одна із складових частин якості.

Перелік виробів, надійність яких постійно турбує людину, дуже великий. Надійність пов'язана з якістю створення (виготовлення), тобто сукупністю властивостей процесу створення (виготовлення) виробів.

Якість виготовлення виробів визначається якістю обладнання, інструменту, сировини, матеріалів та комплектуючих деталей, якістю нормативної документації на виготовлення продукції та якістю праці виробників.

Розглянемо такі поняття як якість експлуатації виробів, ремонту виробів та якість праці.



**Якість експлуатації виробів** – це сукупність властивостей процесу експлуатації продуктів, від яких залежить відповідність цього процесу та його результатів встановленим вимогам. Вона залежить від якості експлуатаційної документації, експлуатаційного обладнання, пристосувань і приладів, запасних частин і приладів (разом з матеріалами), а також від якості праці експлуатаційників.

**Якість ремонту виробів** та якість об'єктів, призначених для ремонту, – це фактори, що визначають стан відремонтованої продукції.

Показник **якості продукції** – це кількісна характеристика однієї або кількох її властивостей, які характеризують якість. Цей показник розглядають стосовно до умов створення, експлуатації і вживання продукції.

Залежно від рівня узагальнення мети розрізняють такі показники:

- *одиничний* – характеризує одну із властивостей продукції;
- *комплексний* – кілька властивостей продукції;
- *інтегральний* (або узагальнений) – це відношення сумарного корисного ефекту від експлуатації або вживання продукції до сумарних витрат на її створення й експлуатацію або вживання.

Інтегральний показник якості у загальному вигляді обчислюють за формулою:

$$I = \frac{E}{B_c + B_e}, \quad (1.1)$$

де  $E$  – сумарний корисний ефект від експлуатації або вживання продукції, наприклад, напрацювання (наробіток) за строк служби до капітального ремонту;  $B_c$  – сумарні витрати на створення продукції (розробка, монтаж та інші одночасні витрати);  $B_e$  – сумарні витрати на експлуатацію продукції (технічне обслуговування, ремонт та інші поточні витрати).

Формулу (1.1) застосовують для продукції, строк служби якої не перевищує року. В цьому випадку одночасні й поточні витрати підсумовують.

Для продукції, строк служби якої більше року, одночасні витрати на виробництво продукції припадають на останній рік її служби з використанням

нормативного коефіцієнта, який враховує самоокупність продукції.

Величину, обернену інтегральному показнику якості продукції, називають витратами на одиницю корисного ефекту. В свою чергу, якість ремонту залежить від якості ремонтної технічної документації, ремонтного обладнання, пристосувань, приладів, інструмента, запасних частин та комплектуючих виробів, а також від праці ремонтників. Ефективність, якість і надійність системи "людина – машина" взаємозв'язані і залежать як від машини, так і від працівників.

**Якість праці працівників** – сукупність властивостей процесу праці, обумовлених здатністю і намаганням працівника виконувати певне завдання відповідно до встановлених вимог. Залежить від складності праці, кваліфікації, навику, психофізіологічного стану працівника та його ставлення до праці.

Система "людина – машина" в умовах сільськогосподарського виробництва надзвичайно складна. Підвищення ефективності використання сільськогосподарської техніки потребує постійного покращення її експлуатаційних можливостей, певної ремонтної бази, високої кваліфікації усіх виробників і користувачів тракторами, комбайнами, автомобілями та обладнання з механізації тваринницьких, переробних й ремонтних підприємств. Важлива роль у цій системі належить соціальному аспекту.

Кожну властивість, яка характеризує якість, оцінюють своїми показниками.

**Кваліметрія** – наукова галузь про кількісні методи оцінки якості, які використовуються для обґрунтування рішень при управлінні якістю продукції.

## **1.2. Основні поняття, терміни та визначення надійності техніки**

Усі терміни й визначення надійності наведено стосовно об'єктів і технічних систем.

**Технічний об'єкт** – це предмет певного цільового призначення, який розглядається при проектуванні, виробництві, експлуатації, дослідженнях і випробуваннях на надійність.

Такими об'єктами є вироби, технічні системи та їх елементи, зокрема пристрої, апарати, прилади та їх частини, агрегати, складальні одиниці та окремі деталі.

**Технічна система** – об'єкт, який є сукупністю сумісно діючих елементів, призначених для самостійного виконання наданих функцій.

**Елемент системи** – найпростіша частина системи, окремі частини якої у рамках конкретного випадку не розглядаються.

Залежно від характеру та точності об'єкт, врахований системою в одному випадку, може розглядатися як елемент при вивченні об'єкта більшого масштабу. Наприклад, якщо коробка передач трактора розглядалась як система елементів – валів, шестерен, підшипників та ін., то при оцінці надійності трактора у цілому вона вважається елементом системи.

**Обслуговуваний об'єкт** – об'єкт, для якого проведення технічного обслуговування передбачено нормативно-технічною документацією та (чи) конструкторською (проектною) документацією.

**Необслуговуваний об'єкт** – об'єкт, для якого проведення технічного обслуговування не передбачено нормативно-технічною документацією та (чи) конструкторською (проектною) документацією.

**Ремонтований об'єкт** – об'єкт, ремонт якого можливий та передбачений нормативною, ремонтною та (чи) конструкторською (проектною) документацією.

**Неремонтований об'єкт** – об'єкт, ремонт якого неможливий чи непередбачений нормативною, ремонтною та (чи) конструкторською (проектною) документацією.

**Відновлюваний об'єкт** – ремонтований об'єкт, який після відмови та усунення несправності знову стає здатним виконувати потрібні функції з заданими кількісними показниками надійності.

**Невідновлюваний об'єкт** – об'єкт, ремонт якого неможливий чи не дозволяє відновити працездатність із заданими кількісними показниками надійності.

Деталі, які не ремонтуються (поршневі кільця, фрикційні накладки гальма та зчеплення, прокладки, ущільнювальні кільця та ін.), під час ремонту змінюють. Одні й ті ж спрацьовані об'єкти залежно від технічного стану і наявності дефектів можуть не ремонтуватися, наприклад тонкостінні вкладиші колінчастого валу або колінчастий вал із тріщинами, і підлягають ремонту, якщо ці ж деталі без тріщин.

**Надійність** – властивість об'єкта зберігати у часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характеризують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування, зберігання та транспортування.

Надійність закладається при проектуванні, забезпечується у виробництві (під час виготовлення) і підтримується (зберігається) в експлуатації. Важливе місце у підтриманні (збереженні), точніше, в реалізації необхідного рівня надійності, має експлуатація разом з технічним обслуговуванням та ремонтом.

**Технічне обслуговування** – окремі операції або їх комплекс для підтримки працездатності або справності об'єкта при використанні за призначенням, зберіганні і транспортуванні.

**Ремонт** – комплекс операцій, призначених для відновлення справності або працездатності об'єкта, а також відновлення ресурсу деталей, або їх складових.

Надійність як сукупність властивостей залежно від призначення об'єкта та умов його використання повинна забезпечувати окремо або у певному поєднанні такі властивості: безвідмовність, довговічність ремонтпридатність, збережуваність (рис. 1.1).

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

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

Довговічність передбачає перерви в експлуатації, пов'язані з технічним

обслуговуванням і ремонтом, а безвідмовність – це безперервна працездатність протягом певного часу або напрацювання.



**Рис. 1.1. Властивості надійності**

**Напрацювання** – це тривалість або обсяг роботи об'єкта; вимірюється у годинах, мото-годинах, кілометрах пробігу, умовних гектарах та ін.

**Ремонтопридатність** – властивість об'єкта бути пристосованим до підтримання та відновлення стану, в якому він здатний виконувати потрібні функції за допомогою технічного обслуговування та ремонту. Від пристосованості машин до робіт, передбачених системами технічного обслуговування і ремонту, залежать збитки, які виникають через непрацездатність машин під час експлуатації. Ремонтопридатність машини – її найважливіша експлуатаційно-технічна властивість, від неї залежить час відновлення працездатності та витрати на технічне обслуговування й ремонт сільськогосподарської техніки.

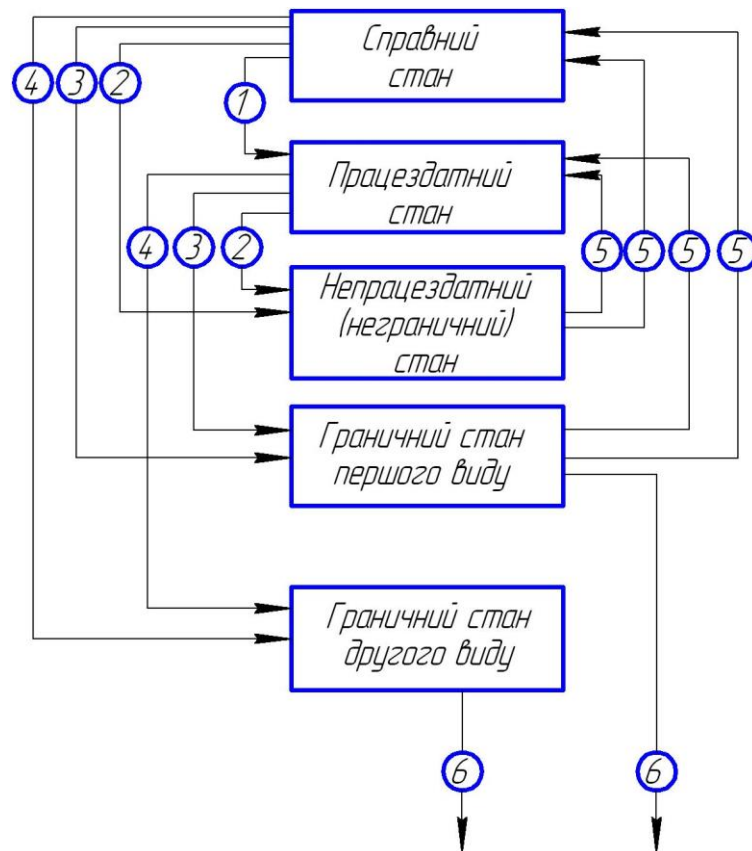
Ремонтопридатною вважають таку конструкцію машини, яка при раціональних витратах на їх проектування, виготовлення та експлуатацію мінімальний час буде у непрацездатному стані (за певний період експлуатації).

**Збережуваність** – властивість об'єкта зберігати в заданих межах значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати потрібні функції, під час і після зберігання та (чи) транспортування. Ця властивість характерна для сільськогосподарської техніки, яка працює сезонно (сівалки, комбайни тощо).

У технічній літературі з надійності й ремонту технічних об'єктів та на

практиці технічні об'єкти можуть бути справними й несправними, працездатними й непрацездатними, а також перебувати у граничному стані.

Взаємозв'язок стану та подій для деталі наведений на рис. 1.2.



**Рис. 1.2. Взаємозв'язок стану та подій для деталі (перелік подій): 1 – пошкодження; 2 – відмова; 3 – перехід в граничний стан першого виду; 4 – перехід в граничний стан другого виду; 5 – відновлення; 6 – списання деталі**

**Справний стан (справність)** – це стан об'єкта, при якому він відповідає всім вимогам нормативно-технічної документації і (або) конструкторській документації.

**Несправний стан (несправність)** – стан об'єкта, не відповідний хоча б одній з вимог нормативно-технічної документації і (або) конструкторській документації.

До несправностей відносять: зниження продуктивності та економічності трактора понад допустимі межі, втрата верстатом точності, відхилення у товщині шару пофарбування кузова тощо.

**Працездатний стан (працездатність)** – стан об'єкта, який характеризується його здатністю виконувати усі потрібні функції. Поняття

"справність" ширше, ніж "працездатність". Sprawний об'єкт завжди працездатний. Працездатний об'єкт може бути несправним, якщо несправність не впливає на його функціонування. Наприклад, коробка передач зберігає працездатність при спрацьованих шестернях, коли її експлуатаційні показники не вийшли за межі технічних вимог.

**Непрацездатний стан** (непрацездатність) – стан об'єкта, при якому він нездатний виконувати хоч би одну з потрібних функцій.

**У граничному стані об'єкта** його подальша експлуатація неприпустима чи недоцільна, або відновлення його працездатного стану неможливе чи недоцільне.

**Причини припинення експлуатації:** неможливість забезпечення безвідмовності або ефективності експлуатації об'єкта та мінімально необхідного рівня безпеки; значні витрати на ремонт (економічна недоцільність); моральне старіння об'єкта.

Перехід об'єкта зі справного стану у несправний, з працездатного – у непрацездатний характеризується його пошкодженням та відмовою.

**Пошкодження** – подія, яка полягає у порушенні справного стану об'єкта коли зберігається його працездатність. Несуттєві пошкодження та випадки їх неусунення можуть стати суттєвими з порушенням працездатності, тобто призвести до відмов.

**Відмова** – подія, яка полягає у втраті об'єктом здатності виконувати потрібну функцію, тобто у порушенні працездатного стану об'єкта.

"Відмова" є подія, на відміну від "несправності", що є станом та причиною відмови.

Роботу об'єкта необхідно припинити через недопустимі відхилення від заданих експлуатаційних характеристик (параметрів).

Відмова завжди пов'язана, як з виникненням несправності, так і втратою працездатності. Зниження потужності двигуна автомобіля понад встановлені межі – це і є відмова, водночас автомобіль переводить у непрацездатний стан. Але несправність не завжди визначає появу відмови. Наприклад, підтікання

мастила в агрегатах трактора свідчить про їх несправність, але не завжди призводить до відмов.

**Збій** – самоусувна відмова або одноразова відмова, яку незначним втручанням усуває оператор.

**Повторювальна відмова** – самоусувна відмова одного й того ж характеру, що виникає багаторазово.

В надійності часто застосовують такі терміни як технічний ресурс, термін служби, строк збережуваності.

**Ресурс** (технічний ресурс) – сумарне напрацювання об'єкта від початку його експлуатації чи поновлення після ремонту до переходу в граничний стан; вимірюється в одиницях виміру напрацювання.

**Термін служби** – календарна тривалість експлуатації об'єкта від початку чи її поновлення після ремонту до переходу в граничний стан; вимірюється у роках.

Ресурс та термін служби мають багато спільного, оскільки характеризуються одним граничним станом, проте і суттєво відрізняються. При одному й тому ж ресурсі може бути різний термін служби залежно від інтенсивності експлуатації об'єкта. Наприклад, два двигуни з ресурсом 12 тис. мото-годин кожний та інтенсивністю експлуатації відповідно 3 тис. і 6 тис. мото-годин на рік будуть мати: перший – термін служби 4, другий – 2 роки.

**Термін збережуваності** – календарна тривалість зберігання та (чи) транспортування об'єкта, протягом якої значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати потрібні функції, перебувають у заданих межах: вимірюється в роках або місяцях.

Для оцінки надійності техніки застосовують різні показники.

**Показник надійності** – кількісна характеристика однієї чи декількох із тих властивостей, які в сукупності складають надійність об'єктів.

**Одиничний показник** – показник надійності, що характеризує одну із тих властивостей, які в сукупності складають надійність об'єкта.

**Комплексний показник** – показник надійності, що характеризує



декілька властивостей, із тих, які в сукупності складають надійність об'єкта. Наприклад, комплексним показником є коефіцієнт готовності, який характеризує дві властивості надійності об'єкта – безвідмовність і ремонтпридатність.

**Експлуатаційний показник** – показник надійності, точкову чи інтегральну оцінку якого визначають за наслідками експлуатації.

**Експериментальний показник** – показник надійності, точкову чи інтегральну оцінку якого визначають за даними випробувань.

**Розрахунковий показник** – показник надійності, значення якого визначають шляхом розрахунку.

Показники надійності та їх розрахунок докладніше розглянуті у розділі 3.

### **Контрольні запитання**

1. Розкрити поняття "продукція", "продукти", "вибори".
2. Розкрити поняття "якість продукції". Який зв'язок між якістю та надійністю сільськогосподарської техніки?
3. Що є кількісною оцінкою якості продукції?
4. Які об'єкти розглядаються у надійності техніки?
5. Що розуміють під терміном "надійність техніки"?
6. У яких станах з точки зору надійності може бути технічний об'єкт при експлуатації? Охарактеризуйте ці стани.
7. Які події зумовлюють перехід об'єкта у несправний стан, у непрацездатний стан? Дати визначення цих подій.
8. Дати визначення властивостей, що обумовлюють надійність техніки.
9. Які втручання необхідні для повернення об'єкта з непрацездатного стану у працездатний, з граничного – у справний?
10. Що таке технічний ресурс та термін служби? Яка між ними різниця?
11. Які показники застосовують для оцінки надійності техніки?

## **2. ІНЖЕНЕРНО-ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ**

### **2.1. Причини втрати працездатності об'єктів**

Практично будь-який технічний об'єкт під час експлуатації, зберігання, транспортування взаємодіє з навколишнім середовищем, людиною-користувачем, об'єктами праці. При цьому відбувається неминуче зниження показників якості технічного об'єкта із часом. Зниження показників якості об'єктів у часі може бути абсолютним і відносним.

Абсолютне зниження показників якості (погіршення вихідних параметрів) називається фізичним старінням (зносом) об'єкта. Воно обумовлене впливом різних процесів, які діють на об'єкти і викликають зміни властивостей чи стану матеріалів і деталей об'єкта.

Відносне зниження якості об'єктів пов'язано з появою нових, удосконалених виробів, вихідні параметри яких перевищують відповідні параметри виробів, що розглядаються.

Такі зміни показників якості, обумовлені відставанням від науково-технічного розвитку, називають моральним старінням або зносом.

В теорії надійності вивчаються процеси, які приводять до абсолютних змін показників якості машин, тобто процеси фізичного старіння.

Основними причинами погіршення вихідних параметрів об'єктів і виникнення відмов є: вплив на об'єкт кліматичних та антропогенних (зокрема, людини-користувача) факторів; вплив внутрішніх залишкових і монтажних напружень, пов'язаних із виготовленням об'єкта; вплив ударно-вібраційних навантажень, обумовлених робочими процесами, які виникають у машині, і рухом (переміщенням) об'єкта.

Зокрема, для об'єктів сільськогосподарського виробництва основними дестабілізуючими кліматичними факторами є: вплив тепла і холоду, відносна вологість повітря, роса та обмерзання, пил і пісок, сонячна радіація та ін. Наприклад, вплив тепла і холоду зумовлює багаторазові температурні

напруження і деформації, які приводять до пошкоджень.

Волога, потрапляючи на поверхню чи в матеріали, може прискорити старіння і викликати корозію матеріалів. Сонячні промені впливають на фотоокислювальні та фотолітичні процеси, активацію поверхонь та інтенсифікацію руйнівних окислювальних реакцій, деструкцію та ін.

Працездатність виробу в більшості випадків визначається і впливом людини-користувача. Порушення режиму використання, правил обслуговування, зберігання, технології ремонту також можуть стати причиною відмов техніки.

При експлуатації технічні об'єкти підлягають впливу різноманітних механічних навантажень, ударам, вібраціям, акустичним шумам та ін. Джерелом цих навантажень можуть бути як робочі процеси, які відбуваються в машині (згоряння палива, рух окремих елементів тощо), так і взаємодія об'єкта з рельєфом (дорожнім, польовим, ґрунтовим та ін.). В умовах тривалих вібрацій проявляються ефекти втоми матеріалів. Удари зумовлюють в елементах конструкції коливання широкого спектру частот, що може викликати на власних резонансних частотах більші амплітудні переміщення цих елементів і відмов виробів. Акустичні шуми за характером впливу подібні вібраціям і ударам, тільки у вищому діапазоні діючих частот.

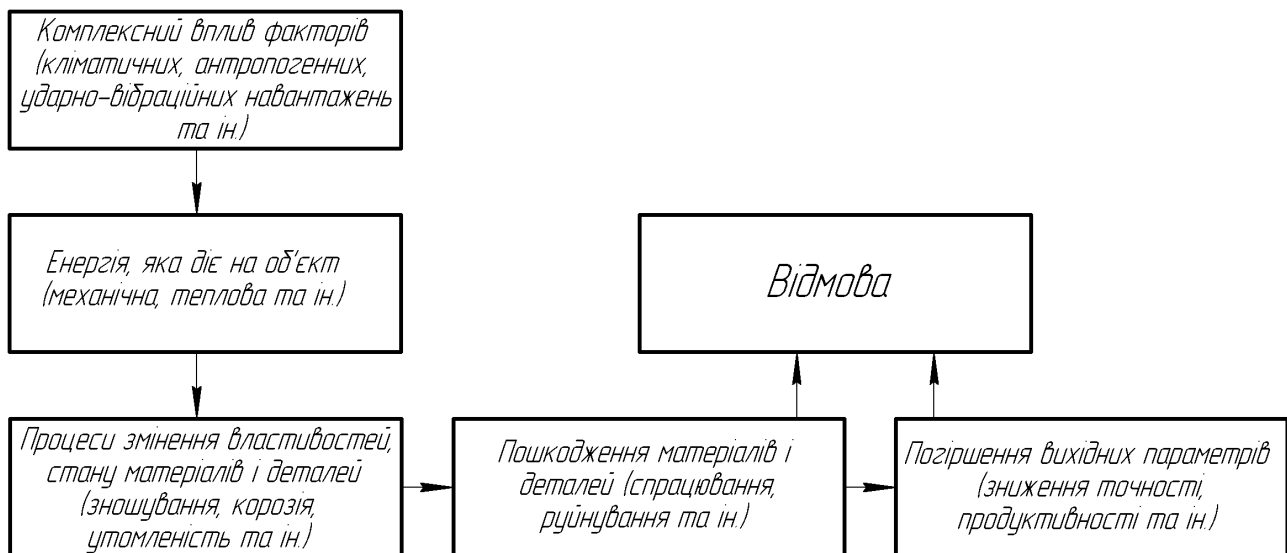
Усі ці впливи перебувають у складній взаємозалежності і виявляються у вигляді механічної, теплової та хімічної енергій. Їх дія на об'єкт комплексна і супроводжується певними процесами в матеріалах деталей і приводять до пошкодження самих деталей, зміни початкових параметрів і втрати працездатності.

Процеси зміни властивостей чи стану матеріалів та деталей поділяють на оборотні і необоротні.

**Оборотні процеси** – це процеси, які викликають тимчасові зміни параметрів елементів, систем об'єкта в певних межах без тенденції прогресивного погіршення і втрати працездатності. Найхарактернішим прикладом такого процесу є пружна деформація.

**Необоротні процеси** – це процеси, у результаті яких з плином часу відбувається прогресуюче погіршення параметрів, що характеризують працездатність об'єкта і, як наслідок, її порушення, тобто відмову. До необоротних процесів належать: зношування, втома, корозія, старіння.

Взаємозв'язок явищ і процесів, які викликають порушення працездатності об'єкта – відмову, можна навести схематично (рис. 2.1).



**Рис. 2.1. Схема виникнення відмови**

Для забезпечення працездатності об'єктів необхідно мати достатню інформацію про всі складові наведеної схеми. При цьому вивчення фізичної суті необоротних процесів (зношування, корозії та ін.) і закономірностей, які характеризують їх розвиток у часі, є основою для досягнення позитивних результатів.

## **2.2. Зношування. Види, характеристики і закономірності процесу**

Для дослідження процесу зношування необхідно мати уяву про основні поняття, які використовуються при вивченні явищ, що відбуваються при контакті та відносному переміщенні тіл, а саме: про поняття зовнішнього тертя, сил тертя, мащення, зношування і зносу.

**Зовнішнє тертя** – явище опору відносному переміщенню, що виникає між двома тілами в зонах стикання поверхонь по дотичних до них, яке супроводжується дисипацією енергії.

Дисипативність процесу тертя характеризується перетворенням зовнішньої роботи, витраченої на подолання сил тертя, у теплову, хімічну, електричну, електромагнітну та інші види енергії. Незначна частина роботи тертя витрачається на збільшення внутрішньої енергії поверхневих шарів контактуючих тіл (не більше кількох відсотків).

Зовнішнє тертя класифікується залежно від особливостей відносного руху і наявності мастила на поверхнях тертя (табл. 2.1).

**Таблиця 2.1. Класифікація видів тертя**

<b>Ознака класифікації</b>	<b>Вид тертя</b>
Наявність відносного руху	Тертя спокою і тертя руху
Характер відносного руху	Тертя ковзання, тертя кочення, тертя кочення з проковзуванням
Наявність мастильного матеріалу	Тертя з мастильним матеріалом і тертя без мастильного матеріалу

**Сила тертя** – сила опору при відносному переміщенні одного тіла по поверхні іншого під дією зовнішньої сили, тангенціально спрямованої до спільної межі між цими тілами.

**Мащення** – дія мастила, внаслідок якої між двома поверхнями зменшується сила тертя і (або) інтенсивність зношування.

**Зношування** – процес відокремлення матеріалу від поверхні тертя твердого тіла і (або) збільшення його залишкової деформації в умовах тертя, що виявляється в поступовій зміні розмірів, форми і (або) маси тіла.

**Знос** – наслідок зношування, який визначається в прийнятих одиницях – довжини, об'єму, маси тощо.

Взаємодія тіл при зовнішньому терті локалізована в дуже тонких поверхневих шарах. Фізико-механічні й хімічні властивості цих шарів відрізняються від аналогічних властивостей основного матеріалу тіл. Ця різниця пояснюється, в основному, змінами в поверхневих шарах, які відбулися

в процесі механічної обробки, а також під впливом тертя.

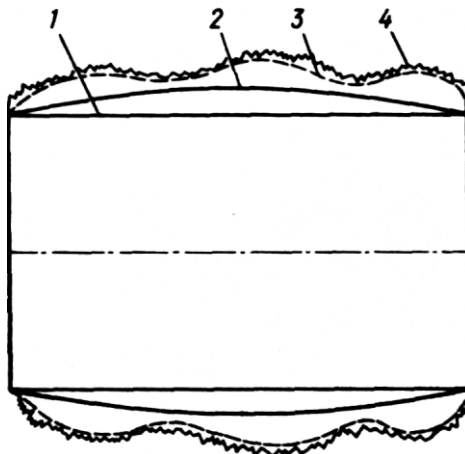
Для з'ясування механізму зношування розглядають параметри, якими характеризуються поверхні деталей машин.

Комплекс властивостей, наданих поверхні тіла (деталі) у результаті її обробки, називається якістю поверхні.

Якість поверхні деталей визначається геометричними параметрами, залишковими напруженнями, структурою і зміцненням.

Геометричні параметри характеризують відхилення форми реальних поверхонь від ідеальних (за кресленням).

Розрізняють такі основні види відхилень форми поверхонь: (Рис. 2.2) макровідхилення, хвилястість, шорсткість.



**Рис. 2.2. Схема відхилень форми поверхні твердого тіла: 1 – поверхня за кресленням; 2 – макровідхилення; 3 – хвилястість; 4 – шорсткість**

*Макровідхилення* – це нерегулярне відхилення поверхні в цілому від заданої форми (овальність, конусоподібність та ін.).

*Хвилястість* – періодичні хвилеподібні мікровідхилення від геометричної форми у вигляді практично однакових за розмірами виступів і западин як у поздовжньому, так і в поперечному напрямках. Характеризується кроком хвилі та її висотою. Крок хвилі коливається в межах 0,25...14 мм, висота досягає 15 мкм.

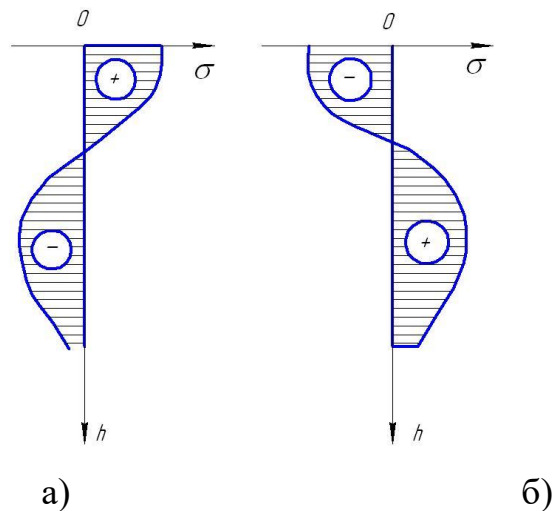
*Шорсткість* – сукупність мікровідхилень геометричного профілю поверхні. Нерівності розташовані без певної закономірності, відстань між їх

вершинами в багато разів менша від кроку хвилі хвилястості.

*Залишковими напруженнями* називають ті, які проявляються в матеріалі (металі) після припинення зовнішнього впливу силового і (або) температурного. Це залежить від способу обробки. Розрізняють гартівні, зварювальні, шліфувальні та інші залишкові напруження.

Наприклад, при механічній обробці металів на поверхневий шар деталі впливають сили, які виникають при різанні. Це викликає нагрівання поверхневого шару та його пластичне деформування. Середня температура поверхневого шару сталі при шліфуванні становить 300...400°C, а самої поверхні – 800...850°C.

Температури того ж порядку характерні і для швидкісного точіння. Нагрівання поверхневого шару металу викликає утворення в ньому після охолодження температурних напружень розтягу (рис. 2.3, а). Пластична деформація металу сприяє розвитку напружень стиску (рис. 2.3, б).



**Рис. 2.3. Епюри залишкових напружень у поверхневому шарі металу:**  
а – напруження розтягу; б – напруження стиску; де  $\sigma$  – напруження;  $h$  – відстань від поверхні

При сумісній дії температурного й силового факторів знак залишкових напружень в поверхневому шарі визначається впливом переважаючого фактора.

Наприклад, при фрезеруванні з різними швидкостями різання в поверхневому шарі можуть виникнути як стискуючі, так і розтягуючі

напруження. Малі швидкості різання сприяють виникненню стискуючих залишкових напружень.

Залишкові напруження суттєво впливають на експлуатаційні властивості робочих поверхонь, оскільки вони алгебраїчно додаються до зовнішніх (робочих) напружень і можуть їх збільшити (або зменшити). Найнебезпечнішими вважаються розтягуючі напруження, які найчастіше приводять до зниження втомної міцності деталей.

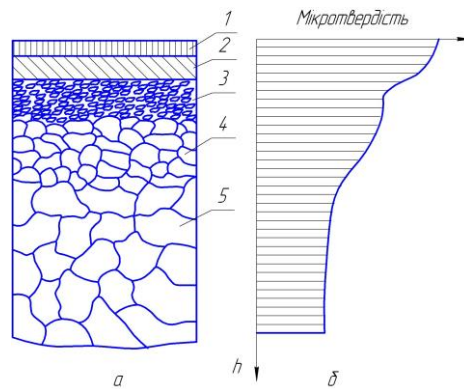
Вплив силового й температурного факторів викликають також структурні та фазові зміни в поверхневому шарі матеріалу деталей, що обумовлює неоднорідність його будови. На поверхні шару матеріалу атоми мають вільні, неврівноважені зв'язки і більшу активність, ніж атоми всередині. Це створює в поверхневих шарах атомне (молекулярне) тяжіння мікрочастинок інших речовин із зовнішнього середовища. Відбувається *адсорбція* – утворення на поверхні плівки з газів, вологи, мастила і (або) *абсорбція* - поглинання цих речовин поверхнею. Крім цього, через вплив атмосферного кисню поверхня вкривається плівкою окислів. Під плівками є метал, який залежно від відстані до поверхні має різний ступінь деформації та зміцнення. Схематичну будову поверхні сталюї шліфованої деталі і характер зміни мікротвердості поверхневого шару із глибиною наведено на рис. 2.4.

Залежно від виду і режиму обробки, матеріалу, мастильно-охолоджувальної рідини глибина поверхневого шару становить від 0,2 мкм (при поліруванні) до 2,0 мм (при чорновому точінні).

Складність процесів, які відбуваються при контактуванні тіл, обумовлює до виникнення різних теорій зовнішнього тертя: механічної, молекулярної, молекулярно-механічної, енергетичної та ін.

Найбільшого розвитку в інженерній практиці набула молекулярно-механічна теорія, запропонована І. В. Крагельським. Ця теорія базується на уявленні про двоїсту (молекулярно-механічну) природу тертя і дискретність контакту поверхонь при терті.



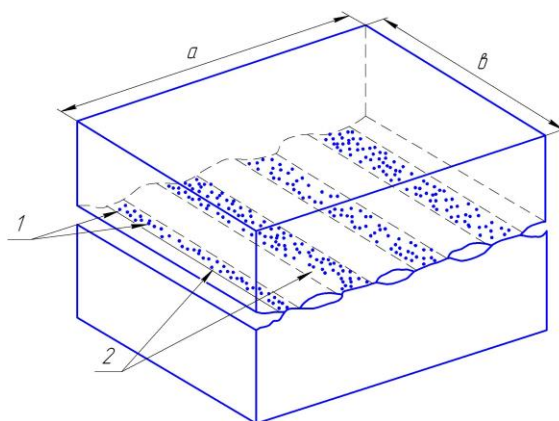


**Рис. 2.4.** Схема будови поверхневого шару шліфованої деталі (а) і зміна мікротвердості цього шару (б): 1 – адсорбована плівка газів, вологи і забруднень; 2 – плівка окислів; 3 – неклепаний шар з дуже деформованою кристалічною ґраткою; 4 – наклепаний шар з спотвореною кристалічною ґраткою; 5 – шар з природною початковою структурою;  $h$  – глибина шару

Розгляд контактування поверхонь з позиції молекулярно-механічної теорії дає таке уявлення про протікання цього процесу.

Внаслідок неминучої наявності макро- і мікровідхилень та хвилястості взаємне зіткнення двох оброблених поверхонь деталей, що контактують, відбувається не по номінальній площі  $A_{ном} = ab$ , а тільки по її частині (рис. 2.5).

У зіткнення звичайно входять найвищі мікронерівності, сумарна площа контакту яких називається фактичною  $A_{факт}$ . Внаслідок деформацій мікронерівностей утворюються плями дотику, які становлять контурну площу дотику  $A_{кон}$ . Фактична площа контакту дорівнює сотим чи десятим часткам відсотка від номінальної площі, а контурна – кільком відсоткам.



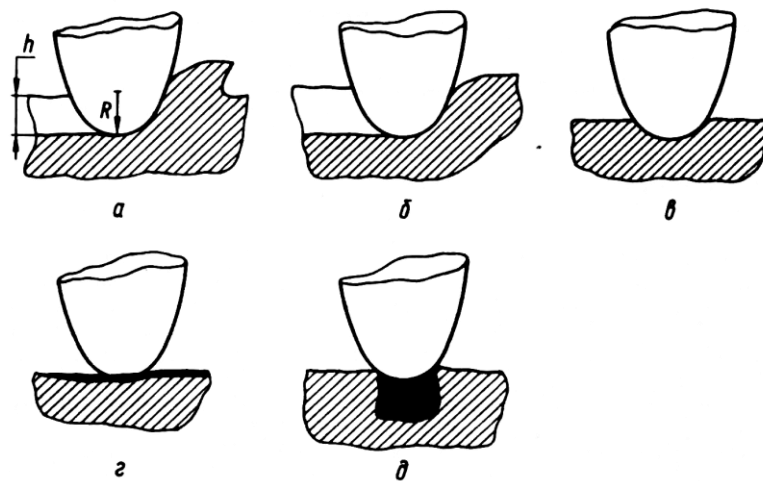
**Рис. 2.5.** Схематичне зображення різних площ контакту: фактична (1)

## *A<sub>факт</sub>* та контурна (2) *A<sub>конт</sub>* площі контактування

При переміщенні однієї поверхні відносно другої плями дотику переміщуються, зникають або знову з'являються. Взаємодію виступів, що утворюють плями дотику поверхонь тертя, називають фрикційними зв'язками.

Тертя з точки зору молекулярно-механічної теорії – це процес подолання фрикційних зв'язків. Виникнення і порушення цих зв'язків обумовлює процес зношування.

За класифікацією І.В. Крагельського при взаємодії поверхонь розрізняють п'ять видів фрикційних зв'язків (рис. 2.6).



**Рис. 2.6. Схематичне зображення фрикційних зв'язків при взаємодії поверхонь (а, б, в, г, д)**

Вид фрикційного зв'язку визначається за відношенням глибини впровадження  $h$  одиничної нерівності до її радіуса кривизни  $R$ , а також за градієнтом механічних властивостей  $d\tau/dh$ , що характеризує різницю міцності адгезійного зв'язку поверхневих шарів контртіла від міцності розташованих приповерхневих шарів ( $\tau$  – опір зсуву).

При першому виді фрикційного зв'язку (рис. 2.6, а) здійснюється мікрорізання. Умовою протікання цього процесу є співвідношення  $h/R > 0,1$  для незмащених поверхонь і  $h/R > 0,2-0,3$  – при наявності мастила. Мікрорізання потребує значних тисків для глибокого впровадження одиничної мікронерівності. При нормальних умовах роботи сполучень деталей

мікрорізання практично не спостерігається.

Пластичне деформування (другий вид зв'язку) проявляється за умови  $h/R < 0,1$  (рис. 2.6, б). Поверхневий шар деталі при такому деформуванні зміцнюється, мікронерівності вигладжуються. Сили адгезії при цьому незначні.

Третій вид фрикційного зв'язку належить до пружного відтиснення матеріалу, тобто на контактуючих поверхнях здійснюється взаємодія в умовах пружної деформації –  $h/R < 0,01$  (рис. 2,6, в).

При четвертому виді зв'язку (рис. 2.6, г) виникає адгезійна взаємодія плівок, що утворюються на поверхнях тертя деталей. Цей вид фрикційного зв'язку відомий як позитивний градієнт механічних властивостей  $d\tau/dh > 0$ , коли поверхневі шари матеріалу (плівки) мають меншу міцність, ніж шари розташовані на певній глибині. Руйнування поверхонь локалізується в поверхневих шарах матеріалу або плівках, що виникли (або створені) на поверхні деталі. Якщо поверхні деталей, що контактують, мають позитивний градієнт механічних властивостей, то їх пошкодженість найменша.

За п'ятим видом фрикційного зв'язку (рис. 2.6, д) здійснюється схоплювання поверхонь, яке супроводжується глибинним "вириванням" матеріалу менш міцної поверхні. Для виникнення схоплювання основних матеріалів необхідні достатня величина міжмолекулярних (атомних) сил і попереднє руйнування плівок на поверхні деталей.

Перші три види фрикційних зв'язків характеризують механічну взаємодію поверхонь, четвертий і п'ятий – молекулярну.

Перераховані фрикційні зв'язки практично не існують відокремлено, найчастіше при контактуванні поєднується декілька їх видів. Складність вивчення та опису процесу зношування полягає в тому, що утворення й руйнування фрикційних зв'язків супроводжуються так званими перехідними процесами, виникненням локальних температур, адсорбційним насиченням поверхні тертя елементами з навколишнього середовища, від контртіла та хімічною взаємодією (окисленням) тощо.

Незважаючи на складність і різноманітність процесів, що впливають на

зношування поверхонь, є основні, які переважають у даних конкретних умовах тертя. Вони визначають вид зношування і характер зносу поверхонь. Наприклад, за ДСТУ 2823, для уніфікації уявлень про основні процеси при зношуванні їх класифікують на три основні групи (табл. 2.2).

**Таблиця 2.2. Види зношування**

Ознака класифікації	Вид
Механічне зношування	Абразивне, гідро-газоабразивне, гідро-газоерозійне, кавітаційне, утомне, фретингове, адгезійне
Механохімічне зношування	Окиснювальне, фретинг-корозійне
При дії електричного струму	Електроерозійне

**Механічне зношування** – це зношування в результаті механічної дії. Руйнування поверхневого шару матеріалу відбувається в процесі силового впливу з боку зовнішнього середовища, яке рухається відносно поверхні тіла, рідини та ін. Різновиди механічного зношування обумовлені специфічними явищами, які викликають руйнування робочих поверхонь, а саме:

*абразивне* – механічне зношування матеріалу внаслідок різальної або дряпаючої дії на нього твердих частинок, які перебувають у вільному або закріпленому стані;

*гідроабразивне (газоабразивне)* відбувається внаслідок дії твердих частинок, що їх переносить потік рідини (газу);

*гідроерозійне (газоерозійне)* – механічне зношування в результаті дії потоку рідини (газу) ;

*утомне* – механічне зношування внаслідок руйнування від втоми в умовах багаторазового деформування мікрооб'ємів матеріалу поверхневого шару;

*кавітаційне* – механічне зношування в умовах руху твердого тіла відносно рідини, коли утворені в рідині парогазові бульбашки захоплюються біля поверхні, що призводить до створення локального високого тиску або

температури;

*фретингове* – механічне зношування тіл, які перебувають у контакті в умовах коливальних відносних мікрозміщень;

*адгезійне* – механічне зношування при дії на контрповерхню нерівностей, які виникли в результаті схоплення, глибокого виривання та переносу матеріалу з однієї поверхні на іншу.

**Механохімічне** зношування відбувається через механічну взаємодію, яка супроводжується хімічною і (або) електрохімічною взаємодією матеріалу із середовищем. Різновиди цього зношування:

*окиснювальне* – механохімічне зношування, при якому основний вплив має хімічна реакція матеріалу з киснем або окислювальним навколишнім середовищем;

*фретинг-корозійне зношування* – механохімічне зношування контактуючих тіл при незначних коливальних відносних переміщеннях.

**Електроерозійне** – зношування матеріалу внаслідок дії на поверхню тертя розрядів електричного струму.

В умовах експлуатації деталі сільськогосподарських машин підлягають практично всім видам зношування, але окремі з них є переважаючими. Наприклад, абразивне зношення типове для робочих органів ґрунтообробних машин – лемешів, дисків та ін., деталей ходової частини – траків гусениць, котків та ін. Гідро-газоабразивне зношення спостерігається на деталях розпилювачів поливних установок, обпилювачів, водяних насосів.

Приклад гідроерозійного зношування – це руйнування робочих кромek золотників гідравлічних агрегатів, клапанів запірних та регулювальних пристроїв гідравлічних і парових систем.

Утомне зношування характерно для зубів шестерень та доріжок кочення підшипників.

Кавітаційному зношуванню підлягають зовнішні поверхні гільз циліндрів двигунів внутрішнього згорання, лопатки відцентрових насосів.

Фретингове зношування притаманне деталям нерухомих з'єднань типу

корпус – підшипник, шліцьовий вал – шестерня.

Адгезійне зношування найчастіше спостерігається в парах тертя – ковзання (торцеві ущільнення гідросистем, колінчастий вал-вкладиш в умовах порушення режимів мащення).

Окиснювальне зношування відбувається в тому випадку, коли на контактуючих поверхнях виникають плівки окислів, які в процесі тертя руйнуються і знову утворюються. Цей вид зношування спостерігається в шарнірно-болтових з'єднаннях тяг і важелів механізмів керування.

Ковзаючі електричні контакти типу щітка-колектор є типовим прикладом з'єднання, де деталі зазнають дії електроерозійного зношування.

Розглянуті види зношення і пошкодження деталей машин не є вичерпними, оскільки з розвитком науки і техніки відбувається подальше вдосконалення понять і відповідно їх класифікацій.

Для оцінки зношування поверхонь тертя використовують регламентовані визначення характеристик процесу. До них належать поняття про граничні та допустимі зноси, швидкість та інтенсивність зношування.

**Граничний знос** – це знос, який відповідає граничному стану об'єкта або його складової частини.

**Допустимий знос** – знос, при якому об'єкт зберігає працездатність протягом установленого напрацювання (допустимий знос завжди менший від граничного).

**Швидкість зношування** – відношення величини зносу  $U$  до інтервалу часу  $t$ , протягом якого він виникає:  $V = \frac{U}{t}$

**Інтенсивність зношування** – відношення величини зносу до шляху тертя, уздовж якого відбувалося зношування, або до обсягу виконаної роботи.

Відповідно до одиниць виміру зносу розрізняють лінійну, об'ємну і масову інтенсивності зношування. Наприклад, лінійна інтенсивність зношування  $I_h$  розраховується за формулою :

$$I_h = \frac{\Delta h}{L} = \frac{U_n}{L}, \quad (2.1)$$

де  $\Delta h = U_n$  – товщина зношеного шару, м;  $L$  – шлях тертя, де відбувається знос, м;

Для характеристики здатності матеріалу чинити опір зношуванню часто використовують термін "зносостійкість". Кількісно зносостійкість оцінюється величиною, яка є оберненою інтенсивності або швидкості зношування.

Визначення кількісних параметрів зносу, необхідних для характеристики вивчаемого процесу, здійснюється під час лабораторних досліджень, стендових та експлуатаційних випробувань. Залежно від призначення вимірювання зносу здійснюють одним з наведених основних методів: мікрометражним вимірюванням, зважуванням, визначенням продуктів зношування в мастилі, за допомогою поверхневої активації, вмонтованих датчиків та штучних баз та інші.

Метод *мікрометражного вимірювання* – найбільш поширений метод, який застосовується для виявлення динаміки і характеру зношування робочих поверхонь деталей. Він базується на визначенні зносу шляхом визначення розмірів деталей (або зразків) вимірювальними інструментами (мікрометрами, індикаторами та ін.) до і після зношування. Величина зносу визначається як різниця розмірів поверхонь деталей до і після зношування. До недоліків цього методу можна віднести наступне: необхідність розбирання вузла, складність повторювання вимірювання в одних і тих же точках, недостатня точність при невеликих значеннях зносу, значний вплив суб'єктивного фактору тощо.

*Профілографування* поверхонь – це графічне відображення мікротопографічного рельєфу зношеної поверхні за допомогою спеціальних приладів – профілографів. Отримані профілограми містять зображення поверхонь до і після зношування, обробка цих профілограм надає можливість визначити фактичний знос поверхонь.

*Зважуванням* визначається масовий сумарний знос поверхонь. Вимірювання складається з визначення різниці маси деталі до і після зношування. Недоліком методу є неможливість визначити значення зносу на різних поверхнях тертя та необхідність розбирати з'єднання.

Метод *штучних баз* полягає у визначенні зміни розмірів штучно нанесених заглиблень на поверхню, знос якої вивчається. Заглиблення виконують натисканням індентора (конусного або пірамідального) для отримання відбитків або вирізанням лунок. Найрозповсюдженим є метод вирізання лунок на поверхні тертя тригранним алмазним різцем, що обертається. На відміну від попереднього способу (нанесення відбитків), вирізання не створює напливів від тиснення, що надає більш реальну картину процесу, який досліджується.

Величина зносу плоскої поверхні з використанням вирізаних лунок (рис. 2.7) визначають за формулою:

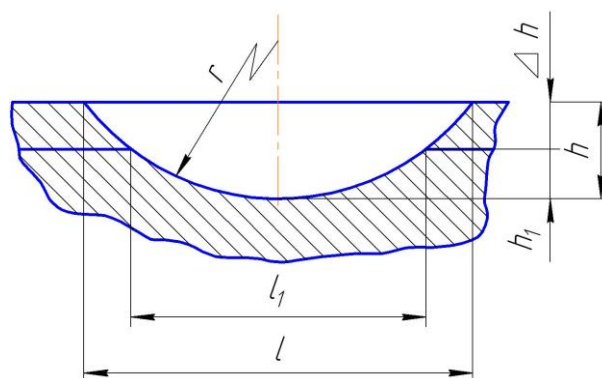
$$u_n = \Delta h = h - h_1 = \frac{\ell^2 - \ell_1^2}{8r}, \quad (2.2)$$

де  $\Delta h$  – товщина зношеного шару (знос);  $h$ ,  $h_1$  – відповідно глибина відбитка до і після зношування;  $\ell$ ,  $\ell_1$  – відповідно довжина лунки до і після зношування;  $r$  – радіус, описаний верхівкою різця.

При визначенні зносу циліндричної поверхні користуються формулою:

$$u_n = \Delta h = 0,125(\ell^2 - \ell_1^2)\left(\frac{1}{r} \pm \frac{1}{R}\right), \quad (2.3)$$

де  $R$  – радіус кривизни поверхні тертя на місці лунки.



**Рис. 2.7. Схема визначення зносу методом вирізування лунок**

У формулі (2.3) приймають знак "плюс" для опуклих, "мінус" – вгнутих поверхонь.

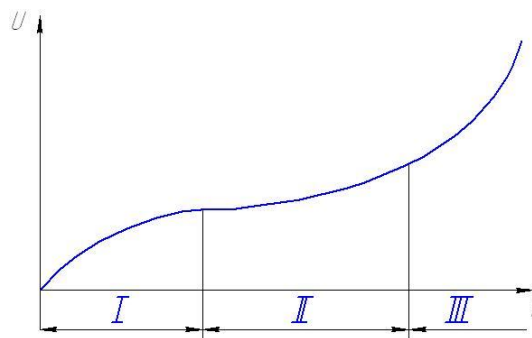
Для визначення зносу за *вмістом продуктів зношування в мастилі* періодично відбирають його проби з порожнин об'єкта, що експлуатується.



Відібрані проби спалюються і за допомогою хімічного або спектрального аналізу золи спаленого масла визначається вміст елементів матеріалів, з яких виготовлені деталі. Цей метод не потребує розбирання вузла, але і не дає диференціювати знос різних поверхонь деталей з однаковим хімічним складом.

Метод визначення зносу деталей *за допомогою поверхневої активації* дає сталу інформацію про вузли діючих агрегатів, які зазнають тертя. Радіоактивність досягається опромінюванням деталей або установкою вставок у зони тертя. У першому способі продукти зношування виносяться маслом разом із радіоактивним ізотопом і проходять через лічильник імпульсів, що визначає радіоактивність масла, яка збільшується по мірі спрацьовування поверхонь деталей. При застосуванні вставок у процесі роботи і зношування активованої зони зменшується активність випромінювання, що реєструється спеціальною апаратурою.

Хід процесу зношування в часі має вигляд кривої залежності зносу  $u$  від часу  $t$  (рис. 2.8).



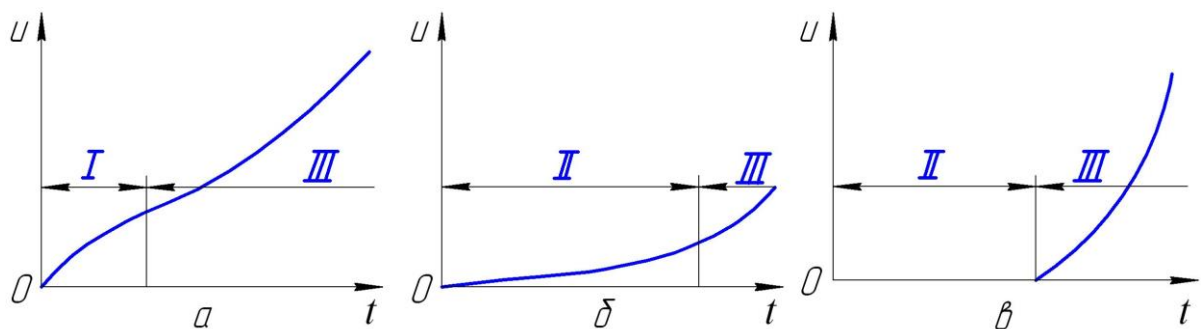
**Рис. 2.8.** Залежність зносу від тривалості часу (обсягу робіт): I – стадія припрацювання; II – стадія нормальної роботи; III – стадія аварійного зношування

Зношування відбувається в три стадії (періоди). На стадії I здійснюється припрацювання контактуючих поверхонь деталей (графік наводить зміни зносу тільки однієї з поверхонь). Ця стадія характеризується нестабільністю параметрів тертя, початковою високою швидкістю зношування  $du/dt$ , що обумовлено значними пластичними деформаціями нерівностей поверхневих шарів деталей, перебудовою технологічного мікрорельєфу поверхонь на експлуатаційний та зміною фізико-механічних властивостей.

Найтриваліша – стадія II. Ця ділянка кривої відповідає періоду нормальної роботи з'єднання після припрацювання. При нормальній роботі спостерігається стабілізація параметрів тертя, швидкість зношування відносно невелика і приблизно однакова і стала.

Знос деталей поступово спричиняє до погіршенню умов тертя при роботі з'єднань, у результаті чого швидкість зношування різко зростає. Цей період процесу зношування відповідає кривій на стадії III.

Криві зміни зносу в часі залежно від умов роботи деталей (виду з'єднання, фізико-механічних властивостей поверхонь тощо) можуть мати не всі три стадії вихідної (класичної) кривої, а дві або одну (рис. 2.9).



**Рис. 2.9. Приклади графіків процесу зношування: а – відсутня стадія нормальної роботи; б, в – відсутня стадія припрацювання**

Представлення законів зношування в аналітичній формі – складне завдання і перебуває в процесі становлення.

Професор О. С. Проніков сформулював особливості, якими повинні характеризувати закони зношування. На його думку закони зношування в аналітичній формі – це залежність зносу від таких факторів:

- силових і кінематичних параметрів і, у першу чергу, від тиску на поверхню тертя і швидкості відносного ковзання (від факторів  $P$  і  $V$ );
- параметрів, які характеризують склад, структуру і механічні властивості матеріалів трибосистеми;
- властивостей поверхневого шару деталей;
- видів тертя і мащення;

– зовнішніх умов, які впливають на процес зношування – температури, вібрації та ін.

Крім того, усі закономірності повинні описувати зміни зносу в часі.

Одна із загальних формул для розрахунку зносу  $u$  при множинному контакті за теорією І. В. Крагельського має вигляд:

$$u = K\alpha \sqrt{\frac{h}{R} \frac{P_a}{P_r} \frac{1}{n}}, \quad (2.4)$$

де  $K$  – стала, яка визначається формою і розташуванням по висоті одиничних нерівностей на поверхнях (звичайно  $K=0,2$ );  $\alpha$  – коефіцієнт перекриття, який залежить від відношення номінальної площі контакту  $A_a$  до фактичної  $A_r$ ;  $h$  – глибина впровадження;  $R$  – радіус одиничної мікронерівності;  $P_a, P_r$  – відповідно тиск на номінальній  $A_a$  та фактичній  $A_r$  площинах контакту;  $n$  – кількість циклів, що приводять до руйнування об'єму, який деформується.

Відношення  $h/R$  визначає вид фрикційного зв'язку, умови тертя відношення  $P_a/P_r$  пов'язане з якістю поверхні, множник  $1/n$  характеризує опір втомі та вводить у рівняння часовий зв'язок.

Залежно від теорії контактування, матеріалів, пари тертя, умов роботи з'єднання, необхідної точності розрахунків, в теорії надійності розроблено методики та аналітичні вирази, за допомогою яких виконують інженерні розрахунки для багатьох видів зношування.

### **2.3. Деформація й руйнування. втома металів**

Деталі машин, виготовлені з металів та їх сплавів, під дією прикладених до них зовнішніх навантажень, зазнають деформації.

**Деформація** – процес зміни взаємного розташування ліній, поверхонь, які визначають конфігурацію деталі (форму і розмір)

Деформація з'являється при виникненні напружень у матеріалі деталі.

Зміни конфігурації деталей можуть відбуватися і без прикладення зовнішніх навантажень. Наприклад, внаслідок старіння матеріалу, тобто

поступових змін його фізико-механічних властивостей, пов'язаних зі структурними перетвореннями матеріалу чи релаксаційними процесами.

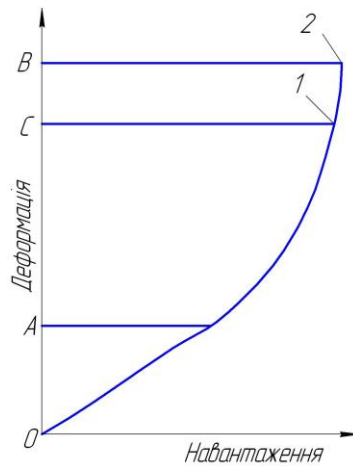
При відповідних умовах навантаження (досягнення граничних напружень) деформація закінчується руйнуванням – повним або частковим порушенням цілісності деталі.

Деформація може бути оборотною – якщо зникає після зняття навантаження, яке викликає її, і необоротною – якщо залишається після усунення сил, під дією яких вона виникла.

Оборотну деформацію ще називають пружною, її вплив на форму, структуру і властивості тіла повністю зникає після припинення дії навантаження і не викликає помітних залишкових змін у структурі й властивостях матеріалів. Під дією таких напружень виникає незначне зміщення атомів кристалічної ґратки, при якому порушується баланс міжатомних сил тяжіння та відштовхування. Після зняття навантаження ці сили повертають зміщені атоми до врівноваженого стану й у мікромасштабі (конфігурація деталі) деформація зникає. Деталь при цьому зберігає свою первісну форму і розміри.

Необоротну деформацію ще називають пластичною. Вона проявляється у вигляді вигину, скрученості, зміни лінійних розмірів деталей та елементів конструкцій. У кристалічних матеріалах пластична деформація найчастіше відбувається шляхом зміщення (ковзання) однієї частини кристалу відносно іншої під впливом тангенціальних (дотичних) критичних напружень, діючих у площині і напрямку ковзання. Ковзання здійснюється в певних кристалографічних площинах і напрямках з найбільшою атомною щільністю.

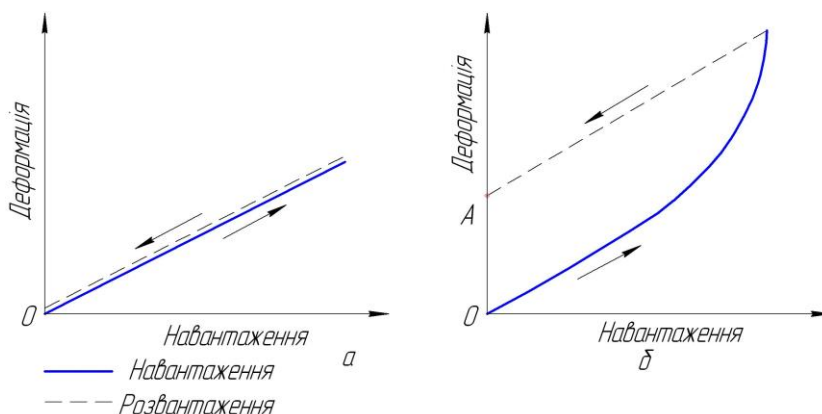
Наочно процес деформації наведено на діаграмі зміни деформації матеріалу під впливом зростаючого навантаження (рис. 2.10).



**Рис. 2.10. Залежність деформації від навантаження:  $OA$  – область переваги пружних деформацій;  $AB$  – область переваги пластичних деформацій;  $BC$  – область руйнування; 1 – початок руйнування; 2 – повне руйнування**

Процес деформації має три послідовні стадії: область переважання пружних деформацій; область переважання пластичних деформацій; область руйнування. Наведений поділ умовний, оскільки неможливо чітко розмежувати стадії прояву деформації на мікроскопічних рівнях, і як пружні, так і пластичні деформації.

Але такий поділ виправданий тим, що дає можливість розмежувати основні закономірності поведінки матеріалів деталей при механічному навантаженні. Зокрема, якщо розглянути хід деформації металу при зніманні навантаження на різних стадіях деформування, то можна помітити суттєві відмінності в ході процесу (рис. 2.11).

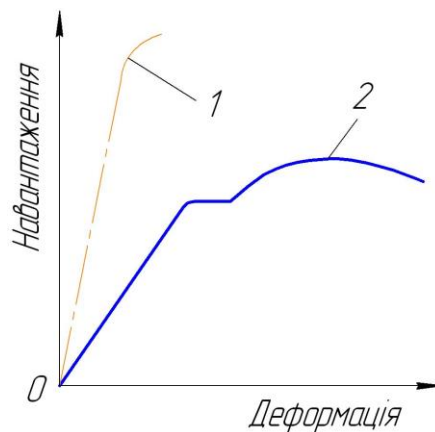


**Рис. 2.11. Деформація при зніманні навантаження на різних стадіях: а – знімання навантаження в області пружних деформацій; б – знімання навантаження**

в області пластичних деформацій;  $A_0$  – область залишкової деформації

Якщо навантаження зупинити в області пружної деформації, то деформація при зніманні навантаження зникає (рис. 2.11, а), якщо в області пластичного деформування – зникає тільки пружна складова і проявляється залишкова (пластична) деформація  $A_0$  деталі (рис. 2.11, б).

Процес деформування металу при досягненні критичних напружень закінчується руйнуванням – в'язким або крихким. В'язке руйнування з'являється від тангенціальних (дотичних) напружень, крихке – при дії нормальних напружень. В'язкому руйнуванню передують значна пластична деформація матеріалу, при крихкому руйнуванні пластична деформація незначна (рис. 2.12).



**Рис. 2.12. Приклад діаграми деформування при крихкому і в'язкому руйнуванні: 1 – деформація при крихкому малопластичному руйнуванні; 2 – деформація при в'язкому пластичному руйнуванні**

Є відмінності також у розташуванні площини руйнування – зламу. Для в'язкого руйнування характерним є розташування площини руйнування під кутом до напрямку прикладення навантаження. Злам збігається з напрямом дії тангенціальних напружень. Площина крихкого руйнування часто перпендикулярна напрямку прикладення навантаження. На практиці вид руйнування можна встановити за характером зламу. В'язкий злам має матовий

відтінок, крихкий – блискучий.

Здатність матеріалів чинити опір деформації під впливом зовнішніх навантажень визначається механічними властивостями конструкційних матеріалів (межа пружності, текучості, міцності та ін.) і залежить від характеру прикладення зовнішнього навантаження (статичне, динамічне, циклічне тощо) та способу навантаження (розтягування, стискування, згинання, кручення).

При експлуатації сільськогосподарської техніки поява залишкової деформації та руйнування деталей часто є наслідком перевищення розрахункових навантажень, це може трапитись через порушення правил експлуатації або в аварійних, екстремальних ситуаціях. Але з практики відомо, що руйнування металів буває й при навантаженнях, значно менших за критичні. Явище руйнування матеріалів під час експлуатації при напруженнях, значно менших за їх механічні характеристики, називається **утомою матеріалів**. Під утомою розуміють процес поступового накопичення внутрішніх пошкоджень матеріалу під дією динамічних навантажень, що циклічно змінюються в часі, і в результаті приводять до раптового руйнування деталей.

Багаторазові навантаження обумовлюють руйнування деталей машин при напруженнях, значно менших за границею міцності, текучості, а інколи і пружності матеріалу.

Спостерігаються руйнування через утому в деталях, які підлягають дії розтягування – стискання, згинання і кручення (вали, осі, зуби шестерень, зварні з'єднання та ін.). Це явище притаманне і пошкодженням, які виникають у поверхневих шарах деталей при терті ковзання і кочення. У цих випадках руйнування через утому проявляється як розтріскування і викришування матеріалу з поверхні деталі.

За сучасними уявленнями природа утоми пов'язується з недосконалістю кристалічної будови матеріалів. Розрізняють наступні елементарні дефекти кристалічної структури: вакансії, дислокації, межі зерен, включення та ін.

*Вакансія* – це точкоподібний дефект, являє собою вільне (без атому) місце у вузлі кристалічної ґратки. У реальних кристалах вакансії постійно зароджуються і зникають під дією теплових флуктуацій.

Іншим видом недосконалості кристалічної будови є *дислокація* (лінійний дефект) – спотворення структурної ґратки. Дислокації – це джерела внутрішніх напружень у кристалічній ґратці. Кількість дислокацій у чистих металах значна: у 1 см<sup>3</sup> до 10<sup>6</sup>...10<sup>7</sup>. Поблизу дислокаційної лінії розвиваються великі спотворення і напруження. Ці області навколо дислокацій мають значну потенціальну енергію.

При пластичній деформації під дією зовнішніх сил, термічної активації, тобто при наданні додаткової енергії, можливий рух дислокацій, коли спотворення ґратки від дислокації передаються в інші області кристалу, так звана естафета. При цьому атоми (площини) переміщуються незначно з неврівноваженого положення у врівноважене, виводячи зі стану стійкості сусідні атоми до певного моменту, наприклад виходу дислокації на поверхню кристалу, перетину з іншою дислокацією або взаємодії з іншими дефектами кристалічної ґратки. Рух дислокацій супроводжується появою вакансій. Вони коагулюють, займають певний об'єм, а при першій можливості здатні перерости в мікро- і макроскопічні тріщини від утомленості.

У дислокаційних теоріях І.А. Одінга, В.С. Іванової, М.М. Афанасьєва та ін. запропоновано кілька схем утворення тріщин, але у всіх теоріях механізми зародження, розвитку тріщин і руйнування металу базуються на процесі руху й концентрації дислокацій біля перешкод – межами зерен, атомів, домішок та ін. Узагальнено хід процесу зародження тріщини від утомленості та руйнування металу характеризується кількома періодами.

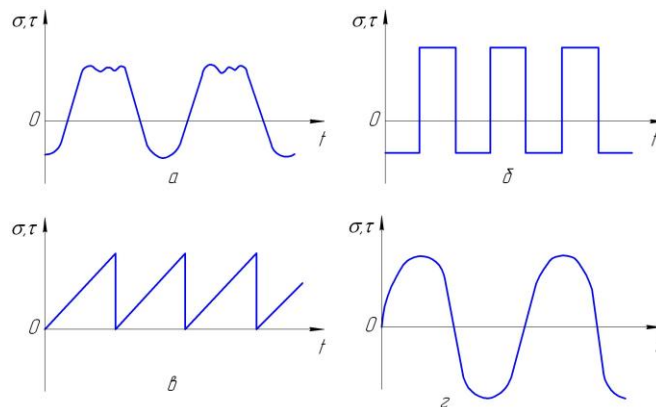
У перший період основні субструктурні зміни відбуваються по межах зерен. При цьому накопичується пластична деформація, матеріал зміцнюється внаслідок скупчення дислокацій перед перешкодою та дифузії атомів домішок до меж кристалів. Усе це призводить до концентрації вакансій, у другому періоді здійснюється локальне послаблення зв'язків кристалічної ґратки, виникають субмікроскопічні тріщини. Третій період характеризується розвитком субмікроскопічних тріщин у мікроскопічні. Четвертий період настає з моменту досягнення мікроскопічною тріщиною критичних розмірів і триває до руйнування матеріалу.



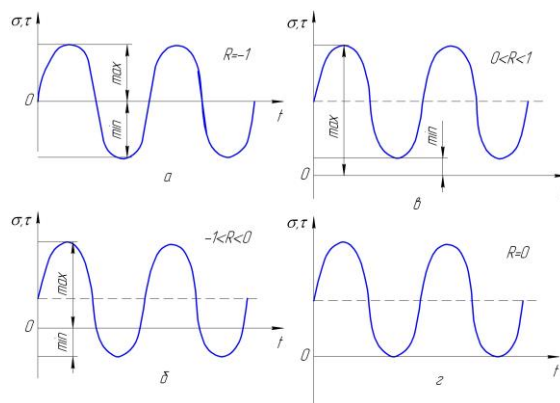
Дослідами встановлено сумісність проходження пластичної деформації та руйнування металів незалежно від умов деформації й виду руйнування – в'язкого, крихкого чи від утомленості. Різниця лише в тому, що при циклічних навантаженнях генерування дислокацій, їх рух і коагуляція вакансій відбуваються інтенсивніше, ніж при статичному навантаженні.

На практиці закономірності змін циклічних напружень у часі найрізноманітніші. Періодичні закономірності циклічних напружень, що часто спостерігаються, наведено на рис. 2.13.

Коли фактичний закон зміни в часі циклічного напруження встановити складно, його умовно приймають за синусоїдний (рис.2.13, г). До основних характеристик циклічного напруження належать: цикл напружень, період (час) циклу, максимальне і мінімальне напруження (рис. 2.14), коефіцієнт асиметрії циклу  $R$  – відношення мінімального напруження до максимального.



**Рис. 2.13. Графіки циклічних напружень:** а – загальний випадок періодичної закономірності; б – прямокутний; в – пилоподібний; г – синусоїдний



**Рис. 2.14. Цикли змінних напружень:** а – симетричний; б, в – асиметричний; г – пульсуючий

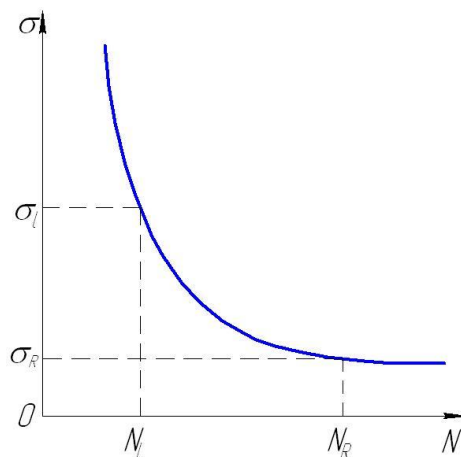
Розрізняють симетричні й несиметричні цикли. У першому випадку

максимальні та мінімальні напруження рівні за абсолютним значенням, але протилежні за знаком; коефіцієнт асиметрії  $R=-1$  (рис. 2.14, а). При несиметричному циклі напруження різні за абсолютними значеннями і можуть мати знаки різні й однакові; коефіцієнт асиметрії  $R \neq 0$  і  $R \neq -1$ . У випадку  $R=0$  цикл називається пульсуючим (рис. 2.14, г).

Основним критерієм, який характеризує опір металу руйнуванню від втоми, є границя витривалості (границя втоми)  $\sigma_R$  – значення максимального напруження циклу з асиметрією  $R$ , яке може витримати матеріал зразка без руйнування при необмеженій (на практиці – базовій  $N_0$ ) кількості циклів напруження (навантаження).

Другим критерієм, яким характеризується стійкість металу проти втоми, є довговічність. Під довговічністю розуміється кількість циклів напруження  $N$ , що витримує деталь до руйнування в даних умовах випробувань.

Величина змінних напружень і кількість циклів зміни цих напружень, що витримується деталлю до руйнування, пов'язані між собою залежністю, яка графічно зображається кривою втоми, або кривою Велера (рис. 2.15).



**Рис. 2.15 Крива втоми**

Рівняння цієї кривої, доведене експериментально, має вигляд:

$$\sigma^m N = \text{const} , \quad (2.5)$$

де  $\sigma$  – максимальне значення змінного напруження, яке викликає руйнування через утомленість;  $N$  – кількість циклів змінного напруження до

руйнування;  $m$  – показник степеня, який залежить від матеріалу деталі, виду деформації, концентрації напружень і коефіцієнта асиметрії.

Після досягнення базового значення кількості циклів  $N = N_0$  (див. рис. 2.15) крива утоми асимптотично наближається до горизонтальної прямої, яка відповідає рівню напруження, що дорівнює границі витривалості  $\sigma_R$ , тобто значення границі витривалості зі збільшенням кількості циклів змінюється дуже повільно. Для практичних розрахунків приймається, що значення границі витривалості залишається постійним. Оскільки відомі базова кількість циклів і границя витривалості, визначають будь-яке значення точки кривої утомленості при заданій кількості циклів. Для цього достатньо навести залежність (2.5) у вигляді:

$$\sigma^m N = \sigma_R^m N_0, \quad (2.6)$$

а після перетворень отримаємо:

$$\sigma = \sigma_R \left( \frac{N_0}{N} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (2.7)$$

де  $\sigma$  – границя витривалості при заданій кількості циклів  $N$ ;  $\sigma_R$  – границя витривалості при базовій кількості циклів  $N_0$ ;  $m$  – показник степеня (визначається за довідниками).

При визначенні границі витривалості реальної деталі необхідно враховувати значну кількість факторів, зокрема вид навантаження, концентрацію напружень у деталі, якість поверхні, вплив посадки з'єднання, дію робочого середовища, температуру.

Одна з формул, за допомогою якої приблизно визначають границю витривалості деталі з урахуванням більшості наведених факторів, така:

$$\sigma_{RK} = \frac{2\sigma_{-1}}{[(1-R)K + (1+R)C]K_M}, \quad (2.8)$$

де  $\sigma_{RK}$  – границя витривалості деталі при коефіцієнті асиметрії  $R (R \leq 1)$  та ефективному коефіцієнті концентрації  $K$ ;  $\sigma_{-1}$  – границя витривалості гладкого зразка  $K=1$  при симетричному циклі  $R=-1$ , яка визначається за лабораторними

випробуваннями або за довідковими даними;  $K$  – ефективний коефіцієнт концентрації, який враховує геометричну форму деталі, шорсткість поверхні, вплив посадок з натягом;  $C$  – коефіцієнт чутливості матеріалу до асиметрії циклу (для вуглецевих і низьколегованих сталей  $C=0,2$ ; для легованих сталей  $C=0,3$ );  $K_M$  – масштабний коефіцієнт;  $R$  – коефіцієнт асиметрії руйнуючого циклу.

Теоретичними та експериментальними дослідженнями встановлено, що границі витривалості деталей в основному залежать від механічних характеристик матеріалу деталей, їх термічної обробки, якості поверхні, геометричної форми і розмірів.

Форма деталі в першу чергу обумовлює можливість існування місць з концентраторами напружень, які викликають локальну зміну (зростання) поля напружень. Концентратори напружень знижують витривалість з інтенсивністю, яка визначається величиною і розподілом напружень до перерізу деталі, а також структурною неоднорідністю металу. Різні матеріали неоднаково чутливі до концентрації напружень. Наприклад, малочутливими є чавуни (за винятком високоміцних), нержавіюча сталь, більшість кольорових металів і м'які пластичні сплави, а найчутливішими є гартовані сталі, при цьому їх чутливість зростає зі збільшенням границі міцності.

Опір утомі також пов'язаний з впливом металургійних факторів, технологій обробки деталей. Забрудненість металу заготовки, з якої виготовлена деталь включеннями, нерівномірність розподілення легуючих елементів, дефекти прокатки або кування знижують опір утомі. На практиці у більшості випадків руйнування від утоми є наслідком дефектів, допущених при обробці поверхні в процесі виготовлення або ремонту. До цих дефектів належать дефекти механічної обробки: подрізи, подряпини та ін.; гартувальні тріщини, залишкові напруження розтягу, перервність наклепаного шару та ін.

За результатами досліджень впливу якості поверхні на стійкість металів проти утоми механічна обробка, різноманітні види поверхневого зміцнення, за яких відбувається зниження шорсткості поверхні та зміна напруженого стану

поверхневого шару металу (наклеп), значно впливають на границю витривалості й можуть підвищити її в 1,2...2,0 рази і більше.

Відомості про основні фактори, які впливають на утому матеріалів, дають змогу розробити необхідні для підвищення довговічності деталей машин конструкційні зміни або рекомендації щодо вдосконалення технології виготовлення і ремонту.

## **2.4. Корозійне руйнування**

**Корозія** – це руйнування металів внаслідок хімічної або електрохімічної взаємодії їх з навколишнім середовищем. Корозійні процеси значно впливають на довговічність технічних об'єктів. Втрати від корозії в розвинутих країнах складають майже 10 % національного прибутку.

Корозійний процес відбувається на межі "метал – навколишнє середовище", тобто є гетерогенним процесом взаємодії рідкої чи газоподібної фази з металом. Причина корозії в термодинамічній нестійкості металів. Швидкість корозії визначається багатьма факторами: станом поверхні металу і особливостями його структури; температурою, складом і швидкістю руху корозійного середовища, механічними напруженнями тощо.

Оскільки корозійний процес має гетерогенний характер, його швидкість залежить від умов здійснення таких основних стадій: переміщення до поверхні металу корозійно-активних частинок (іонів, молекул) шляхом дифузії або конвекції; реакції цих частинок з металом і відведення продуктів корозії від поверхні металу. Класифікують корозійні процеси за двома типами та 36 видами. Типи корозій металів розрізняють за механізмами взаємодії металу з корозійним середовищем, а види – за умовами проходження (корозійними середовищами, додатковими впливами) і характером ураження поверхонь.

За механізмом перебігу корозійного процесу розрізняють два типи: хімічну та електрохімічну корозію.

**Хімічна корозія** зумовлена процесами, які відбуваються при хімічній

взаємодії металу з агресивним (рідким чи газоподібним) середовищем, що не має властивості електропровідності (сухі гази, рідкі неелектроліти – спирти, мінеральні мастила, бензин, розплави металів та ін.). Найчастіше цей тип корозії спостерігається при високих температурах (газова корозія). Наприклад, окиснення металу в печах при різних видах термообробки, руйнування поверхні випускного колектора двигуна внутрішнього згоряння при взаємодії металу з відпрацьованими газами в зоні високих температур тощо.

**Електрохімічна корозія** – це взаємодія металу з корозійним середовищем – електролітом, при якому іонізація атомів металу й відновлення окислювального компонента корозійного середовища відбуваються неодноразово, а їх швидкості залежать від електродного потенціалу металу.

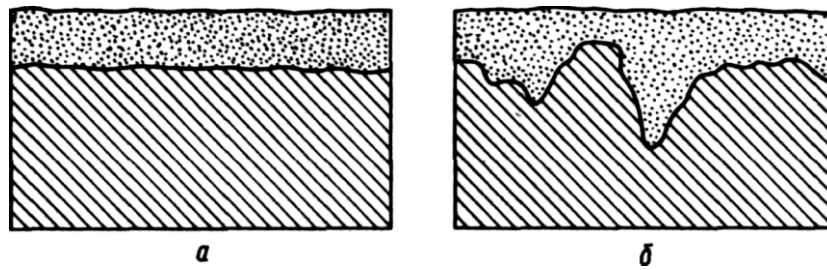
Анодний процес електрохімічної корозії завжди супроводжується іонізацією металу. У катодному процесі можуть брати участь різні іони або молекули, які окислюють метал.

Можливі кілька основних типів катодних реакцій: відновлення катіонів; аніонів; молекул газів, розчинених в електроліті; окисних та гідроокисних плівок; органічних сполук.

За умовами проходження (типу корозійного середовища) розрізняють такі види корозії: атмосферна, газова, підземна, ґрунтова, підводна, біокорозія, щілинна, контактна, під напругою, при терті тощо. Відповідно атмосферна – це корозія металів у атмосфері; підводна – корозія металу, повністю зануреного у воду; біокорозія – під впливом продуктів життєдіяльності мікроорганізмів; контактна – через контакт металу з різними потенціалами в даному середовищі тощо.

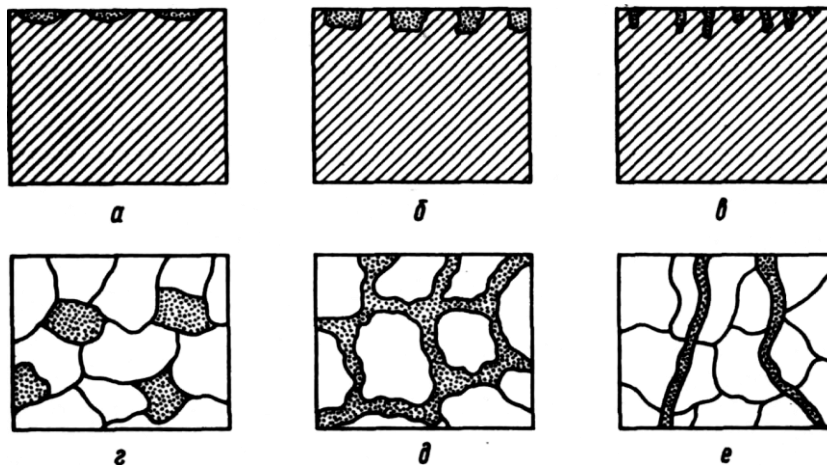
За характером розвитку корозійного руйнування розрізняють суцільну (загальну) і місцеву (локальну) корозію.

**Суцільна корозія** охоплює всю поверхню металу, яка перебуває під впливом даного корозійного середовища. Розрізняють рівномірну корозію, яка поширюється з приблизно однаковою швидкістю на різних ділянках поверхні металу, та нерівномірну (рис. 2.16).



**Рис. 2.16. Суцільна (загальна) корозія: а – рівномірна; б – нерівномірна**

**Місцева корозія** вражає поверхню металу на окремих ділянках. За видом корозійного ураження розрізняють місцеву корозію скупчену і підповерхневу (структурно-вибіркову), які у свою чергу, поділяються на кілька підвидів (рис. 2.17).



**Рис. 2.17. Місцева (локальна) корозія: а – плямами (діаметр ураження більше глибини); б – виразками (діаметр ураження і глибина приблизно однакові); в – крапчаста (діаметр ураження менше глибини); г – вибіркова; д – міжкристалічна; е – транскристалічна**

До локальних видів корозії також належать: *контактна* – у зонах контакту різнорідних металів; *щілинна* – у вузьких щілинах і зазорах (завширшки від сотих часток міліметра до кількох міліметрів); *пов'язана з утомою металу* – у зонах, які зазнають комплексного впливу циклічних навантажень та агресивного середовища; *підплівкова* – під лакофарбовими і полімерними покриттями тощо.

Кількісно корозійні руйнування визначаються під час натурних, лабораторних і стендових випробувань. Випробування матеріалів на корозійну

стійкість специфічні, методики їх проведення розробляються залежно від типу і виду корозії, середовища, умов навантаження тощо. У спеціальній літературі є стандартні методики і рекомендації по розробці оригінальних методів випробувань. Для порівняння результатів кількісної оцінки корозійної стійкості рекомендується використовувати прямі й непрямі показники корозії.

До прямих показників належать: зміна маси зразка; швидкість та глибина корозії; частка поверхні ураження; об'єм водню, який виділився з одиниці поверхні, або поглиненого кисню; час до появи перших ознак корозії.

Зміна маси зразка (її зменшення або збільшення) визначається за формулами:

$$\Delta m = m_0 - m_1; \quad (2.9)$$

$$\Delta m = m_2 - m_0, \quad (2.10)$$

де  $m_0$  – початкова маса зразка, кг;  $m_1$  – маса зразка після видалення продуктів корозії, кг;  $m_2$  – маса зразка разом з продуктами зносу, кг.

Швидкість корозії, на підставі зміни маси, розраховується за формулою:

$$K_m = \frac{m_0 - m_1}{S \cdot t}, \quad (2.11)$$

де  $K_m$  – швидкість корозії, кг/м<sup>2</sup>·год;  $S$  – площа зразка, м<sup>2</sup>;  $t$  – тривалість випробування, год.

Глибина корозії визначається у випадку, коли вона має явний нерівномірний характер.

Середнє значення глибини корозії обчислюють за допомогою швидкості  $K_m$ :

$$K_z = 8,76 \frac{K_m}{\rho}, \quad (2.12)$$

де  $\rho$  – густина металу, кг/м<sup>3</sup>.

Глибину корозійного ураження вивчають також за допомогою мікроскопу.

Третій показник – частка поверхні, зайнятої корозією. У цьому випадку корозія оцінюється за допомогою частотного показника  $C$  за формулою:



$$C = \frac{n}{N} \cdot 100, \quad (2.13)$$

де  $n$  – кількість квадратів з однаковою площею, які мають одну або більше ділянок з корозією;  $N$  – загальна кількість цих квадратів на досліджуваній поверхні.

Використання четвертого показника – об'єму водню, який виділяється з одиниці поверхні, або кількості поглибленого кисню, ґрунтується на переході металу в продукти корозії, коли виділяється еквівалентна кількість водню або поглинається кисень. За об'ємом цих газів (вимірюють за допомогою встановленого над зразком евдіометра), визначають зміни маси металу.

До непрямих показників належать: зміни фізико-математичних властивостей виробу (тимчасовий опір, відносне подовження); зміни електричного опору та відбивної здатності тощо.

Найпоширенішим видом корозії поверхонь сільськогосподарської техніки є атмосферна.

Відомо, що до 80 % всіх металевих виробів у вигляді конструкцій та машин експлуатується в атмосферних умовах. На частку атмосферної корозії припадає більше половини загальних корозійних втрат металу. Розрізняють три основні види атмосферної корозії: мокру, вологу й суху.

Мокра корозія відбувається в результаті краплинної конденсації вологи на поверхні металу і утворенні видимої неозброєним оком рідинної плівки. Такі умови створюються при потраплянні на поверхню крапель дощу, снігу та при 100 % вологості повітря.

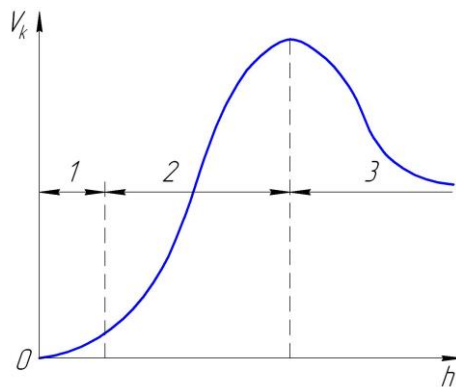
Волога корозія виникає при вологості повітря до 100% і супроводжується адсорбційною, капілярною й хімічною конденсацією вологи на поверхні.

Суха корозія виникає під дією кисню повітря і відносній вологості до 60%, при цьому на металі утворюються дуже тонкі плівки з продуктів корозії. В умовах сухої атмосферної корозії ця плівка зростає дуже повільно. Зі збільшенням вологості повітря суха корозія переходить у вологу, а при потраплянні на поверхню металу крапель вологи – у мокру.

При атмосферній корозії роль електропровідного середовища виконує плівка вологи на поверхні металу. Причиною утворення анодних і катодних ділянок під плівкою вологи є електрохімічна неоднорідність металевої поверхні. Це пов'язано з мікро- і макровключеннями, різницею в складі адсорбованих поверхнею плівок, нерівномірністю внутрішніх напружень у поверхневому шарі, структурними різницями матеріалу деталі тощо.

Основними факторами, які впливають на інтенсивність процесу атмосферної корозії є: вологість повітря, коливання температури, промислові забруднення повітря (сірчистий газ, хлор, аміак та ін.).

Залежність швидкості атмосферної корозії  $V_K$  від товщини шару вологи  $h$  на поверхні металу, тобто від вологості, наведена на рис. 2.18.



**Рис. 2.18. Залежність швидкості корозії від товщини плівки вологи на поверхні металу: 1, 2, 3 – ділянки відповідно сухої, вологої та мокрої корозії**

При практичній оцінці корозії в атмосферних умовах швидкість корозії розглядається як функція тривалості зволоження металу крапельно-рідинними плівками вологи  $\tau$ , температури  $T$  і концентрації забруднень у атмосферному повітрі  $c$ :

$$V_K = f(\tau, T, c). \quad (2.14)$$

При оцінюванні і прогнозуванні працездатності сільськогосподарської техніки після її зберігання виходять з того, що основним фактором для визначення швидкості корозійного руйнування залізвуглецевих сплавів є тривалість впливу на метал атмосферних опадів.

Наприклад, типова закономірність корозії елементів облицювання тракторів та автомобілів має такий вигляд:

$$h = h_0(1 - e^{-Vt}), \quad (2.15)$$

де  $h$  – товщина шару металу, пошкодженого корозією;  $h_0$  – початкова товщина металу;  $V$  – швидкість корозійного процесу;  $t$  – тривалість впливу зовнішнього середовища на елемент облицювання;  $e$  – основа натурального логарифма. Для кількісної оцінки впливу атмосферної корозії на незахищені металеві поверхні сільськогосподарської техніки використовують емпіричні формули, які визначають зв'язок між масовими втратами металу, товщиною кородуючої поверхні та тривалістю опадів.

Величину втрат металу за рахунок корозії залежно від тривалості атмосферних опадів  $t_{am}$  визначають за рівнянням:

$$K = 55 \cdot 10^{-4} \cdot t_{am}^{0,5}. \quad (2.16)$$

Залишкову товщину кородованої тонколистової обшивки розраховують за формулою:

$$h_3 = h_n - (0,7t_{am}^{0,5} + 2t_{am}^{0,4}), \quad (2.17)$$

де  $h_3$  – залишкова товщина металу обшивки, мкм;  $h_n$  – початкова товщина металу обшивки, мкм;  $t_{am}$  – середня тривалість атмосферних опадів (рідинних і мішаних), год.

## 2.5. Старіння матеріалів деталей

**Старіння матеріалів** – це зміна їх фізико-механічних властивостей у часі в умовах тривалого зберігання та (або) експлуатації.

Процес старіння являє собою самочинний перехід матеріалів з метастабільного стану в стабільний з нижчим рівнем внутрішньої енергії. Для металів та їх сплавів найбільше практичне значення мають процеси старіння, пов'язані з розпадом пересичених твердих розчинів (процеси виділення), викликаних змінами механічних і фізичних властивостей матеріалів (міцності,

твердості, електроопору, магнітних властивостей, стійкості проти корозії, ударної в'язкості та ін.). Старіння може бути і причиною деформації деталей, спотворення їх просторової геометрії.

Такі дефекти властиві, наприклад, базисним (корпусним) деталям. Якщо для деталей з металів та їх сплавів старіння не є основною причиною появи дефектів, то для деталей з неметалевих матеріалів, які використовуються в конструкціях сільськогосподарської техніки, старіння дуже небезпечне.

Основою багатьох неметалевих матеріалів є природні і штучні полімерні речовини (качуки, смоли та ін.). Фізико-механічні властивості полімерів (границя міцності при розтягуванні, опір пластичній деформації, еластичність тощо) визначаються їх хімічним складом і структурою. На властивості полімерів впливає і ступінь полімеризації, тобто кількість структурних ланок, утворених молекулами вихідних речовин (мономерів у макромолекулі), які повторюються.

Старіння полімерів та матеріалів на їх основі являє собою необоротні зміни їх властивостей, які відбуваються під дією температури, кисню, сонячного світла, води тощо. При старінні, в основному, виникає розпад основних ланцюгів макромолекул на частинки простішої будови або відбуваються зміни будови і видів зв'язку в макромолекулах без їх розриву. Ці процеси називають деструкцією. Крім процесів деструкції, зміни властивостей полімерів і пластмас у часі можуть виникнути внаслідок структурування (тобто утворення додаткових внутрішніх зв'язків), виділення пластифікатора тощо.

Процеси деструкції можуть відбуватися під впливом фізичних (тепло, світло та ін.) і хімічних (кисень, озон, вода та ін.) факторів. Є два основних типи деструкції полімерів – термічна та окислювальна.

При *термічній деструкції* в полімерах виникають фізичні й хімічні зміни. Фізичні зміни пов'язані з переміщенням макромолекул або їх фрагментів, хімічні – з розривом хімічних зв'язків, зменшенням розмірів макромолекул, які супроводжуються зміною їх хімічного складу.

*Окислювальна деструкція* викликається дією молекулярного кисню і

підпорядковується звичайним закономірностям хімічних реакцій. Але процеси окислення макромолекулярних речовин мають і певні особливості, коли спостерігається нерівномірна участь в реакції окремих груп, здатних реагувати всередині макромолекули.

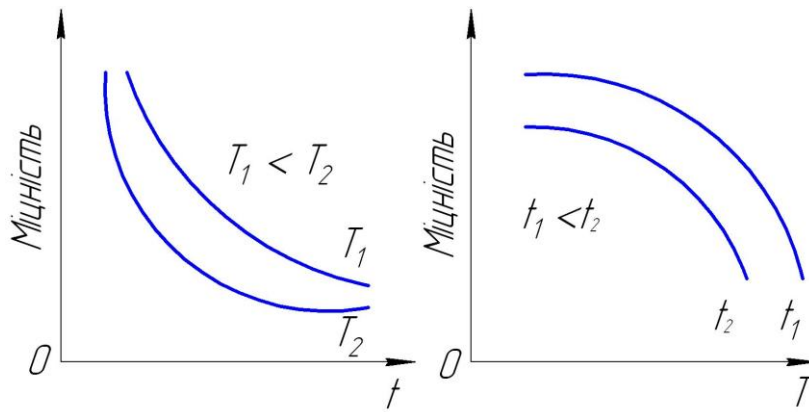
Найважливіші процеси, які відбуваються при старінні – деструкція і структурування, які протилежно впливають на властивості полімерів. Внаслідок деструкції суттєво погіршуються механічні властивості: знижується міцність при розтягу, збільшується крихкість при низьких температурах, зменшується стійкість до стирання. Процеси, які відбуваються при структуруванні (з'єднання ланцюгів, виникнення тривимірної структури) підвищують твердість полімерів, їх крихкість, але при цьому знижується їх пластичність й еластичність.

У звичайних умовах старіння полімери підпадають під комплексний вплив тепла і світла, що значно інтенсифікує процес старіння.

До факторів, які стимулюють старіння, належать також вплив ультрафіолетового випромінювання, вплив динамічних навантажень та мікробіологічні фактори. Наприклад, при дії на певні полімери світла і, особливо, ультрафіолетового випромінювання, виникає поверхнева фотохімічна деструкція, внаслідок якої на поверхні матеріалу змінюється структура, твердість, з'являються тріщини.

Основним результатом процесу старіння є часто небажана зміна фізико-механічних властивостей. Типову залежність цих властивостей полімеру від часу і температури старіння наведено на рис. 2.19. Спостереженнями за старінням еластомерів, які використовуються для виготовлення ущільнень рухомих і нерухомих з'єднань, доведено, що в результаті термоокислювальних процесів виникає погіршення параметрів, які характеризують герметичність.

Зокрема, основним параметром, який впливає на герметичність ущільнень, є контактний тиск. Зменшення його в процесі старіння визначається за рівнянням:



**Рис. 2.19. Залежність фізико-механічних властивостей полімеру від тривалості  $t$  і температури  $T$  старіння**

$$P_K = P_{KM} \cdot e^{-K \cdot t}, \quad (2.18)$$

де  $P_K$  – контактний тиск ущільнення, МПа;  $P_{KM}$  – контактний тиск ущільнення після монтажу, МПа;  $K$  – константа швидкості старіння, яка залежить від властивостей матеріалу та температури;  $t$  – тривалість процесу старіння, год.;  $e$  – основа натурального логарифма.

Оцінка впливу старіння на властивості матеріалів досить складна, оскільки необхідно враховувати певні фактори: умови навантаження, зміни температури, активність середовища. Тому для різних матеріалів та умов їх використання розроблені методи розрахунків, довідкові таблиці, рекомендації, які ґрунтуються на теоретичних розробках та експериментальних даних.

## 2.6. Види відмов та їх класифікація

Правильне розуміння фізичної суті відмов, їх причин, можливих наслідків є найважливішою умовою успішного вирішення практичних питань забезпечення працездатності об'єктів.

При аналізі причин виникнення відмов, розробки їх моделей та прогнозування в теорії надійності використовується класифікація відмов представлена в табл. 2.3

**Таблиця 2.3. Класифікація відмов**

<b>Ознака класифікації</b>	<b>Вид відмови</b>
Характер зміни основного параметра об'єкту до моменту виникнення відмови	Раптова Поступова
Можливість наступного використання об'єкта після відмови	Повна Часткова
Зв'язок між відмовами	Незалежні Залежні
Тривалість непрацездатності	Тривала відмова, збій Відмова, яка самоусувається Відмова, що чергується
Наявність зовнішніх проявів відмови	Очевидна (явна) Прихована (неявна)
Причина виникнення	Конструкційна Виробнича Експлуатаційна
Походження	Природна (натуральна) Штучна (викликана навмисно)
Час виникнення	Відмова при випробовуванні Відмова періоду припрацювання Відмова періоду нормальної експлуатації Відмова останнього періоду експлуатації(аварійного зношування)
Можливість усунення	Відмова, яка усувається Відмова, яка не усувається

Раптова відмова характеризується стрибкоподібною зміною одного або кількох вихідних параметрів об'єкта. Причина раптових відмов переважно залежить від раптової концентрації навантажень (механічних, теплових та ін.), діючих усередині та зовні об'єкта (елемента). Об'єкт відмовляє тоді, коли сумарні або одиничні навантаження, що діють на нього, перевищують його міцність.

Поступова відмова характеризується повільними, розтягнутими в часі змінами значень одного або кількох вихідних параметрів.

Фізична природа поступових відмов обумовлена необоротними повільними фізико-хімічними процесами, які відбуваються в будь-якому виробі та кожній його деталі (зношування, корозія, втома, старіння).

За можливістю наступного використання виробу після відмови останні поділяються на повні і часткові. Повною називають відмову, після виникнення якої використання об'єкта за призначенням неможливе до відновлення його працездатності. При частковій відмові використання об'єкта за призначенням неможливе, але при цьому значення одного або кількох основних параметрів перебувають поза допустимі межі.

За наявністю зовнішніх проявів відмови поділяють на очевидні (явні), які виявляються відразу після виникнення і приховані (неявні) – за побічними ознаками або при усуненні відмов інших елементів конструкції.

За зв'язком з іншими відмовами розрізняють незалежні (необумовлені пошкодженнями і відмовами інших елементів об'єкта) та залежні (обумовлені) відмови.

За причиною виникнення відмови поділяються на конструкційні, виробничі та експлуатаційні.

Конструкційні відмови обумовлені недосконалістю чи порушенням методів і норм конструювання; виробничі – порушенням установленого процесу виготовлення (ремонт) або недосконалістю технологій; експлуатаційні – внаслідок порушення встановлених правил чи умов експлуатації об'єкта.

За часом виникнення розрізняють відмови періоду припрацювання, нормальної експлуатації й аварійного зношування.

Відмови періоду припрацювання звичайно є наслідком наявності у виробі дефектних елементів, міцність яких значно нижче потрібного рівня. Причиною цих відмов можуть бути і помилки при ремонті деталі, складанні виробів тощо.

Фізична природа виникнення відмов періоду припрацювання має такий же випадковий характер, як і раптових. Різниця полягає в тому, що якщо раптова відмова нормального елемента викликана дуже високою



концентрацією навантажень, то для відмови дефектного елемента буває достатньо значно меншого навантаження. Відмови періоду нормальної експлуатації є випадковими, а періоду аварійного зношування, в основному, поступовими.

### **Контрольні запитання**

1. У чому різниця між фізичним і моральним старіннями?
2. Які процеси зумовлюють погіршення вихідних параметрів об'єктів при експлуатації?
3. Яка природа зовнішнього тертя твердих тіл? Які процеси відбуваються при терті?
4. Що розуміється під терміном "зношування"? У чому суть процесу?
5. У чому суть механічного зношування? Назвати основні види механічного зношування, охарактеризувати їх.
6. У чому суть механохімічного зношування? Охарактеризувати основні види.
7. Що править за кількісну оцінку процесу зношування?
8. Що таке знос? У чому різниця між допустимим і граничним зносами?
9. Які методи використовують для вимірювання зносу?
10. Що таке залишкова деформація металу та причини її появи?
11. Що таке втома металів? Розкрити фізичну суть цього поняття.
12. Які фактори визначають границю витривалості деталі?
13. Що таке корозія металів? У чому полягає фізична суть хімічної та електрохімічної корозії?
14. Якими показниками оцінюють корозійні ураження?
15. Що таке старіння матеріалів, суть цього процесу?
16. Які фактори інтенсифікують старіння полімерів?
17. З якою метою застосовують класифікацію відмов?
18. У чому різниця між поступовою та раптовою відмовами?

### 3. МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ

#### 3.1. Деякі відомості з теорії ймовірностей та математичної статистики

Надійна робота сільськогосподарської техніки залежить від численних об'єктивних та суб'єктивних факторів, які часто знаходяться у складній взаємозалежності.

**Об'єктивні фактори** – це дія навколишнього середовища (температура, вологість тощо) та різних процесів (зношування, старіння, втомленість, навантаження та ін.).

**Суб'єктивні фактори** – це фактори, які певним чином залежать від діяльності людини: конструктивні рішення при проектуванні, вибір режимів нормальної експлуатації, організація системи технічного обслуговування та ремонту машин тощо.

Випадковість процесів, які призводять до порушення працездатності об'єктів, зумовлює відмови, зміну показників надійності, що також мають випадковий характер. Цим пояснюється застосування методів теорії ймовірностей та математичної статистики для визначення показників, які характеризують надійність об'єктів.

У теорії ймовірностей та математичній статистиці використовується ряд понять, основними з яких є: дослід (експеримент, випробування, спостереження), подія, ймовірність, випадкова величина.

**Дослід (експеримент, випробування, спостереження)** – це практичне створення відтворюваної сукупності умов, в яких спостерігається певне явище та фіксується результат. Дослід не обов'язково повинен бути поставлений людиною, він може відбуватись незалежно від неї. При цьому від людини залежить тільки рішення, що саме спостерігати та які параметри фіксувати.

**Подія** – явище, яке очікується в результаті дослідження; воно може відбутися або не відбутися.

У теорії ймовірностей події поділяють на вірогідні, неможливі, випадкові, сумісні, несумісні, залежні, незалежні, рівноможливі.

*Вірогідна* – подія, яка обов'язково відбудеться в результаті даного досліду; *неможлива* – напевно не відбудеться в умовах досліду; *випадкова* – при досліді може відбутися або не відбутися.

Наприклад, підвищення твердості вуглецевої сталі після загартування, вібрація при роботі неврівноваженого ротора – це вірогідні події; згоряння у двигуні палива без виділення тепла – неможлива подія; відмова трактора в умовах звичайної експлуатації – випадкова подія.

*Сумісні події* – якщо при випробуванні одна подія не виключає появу іншої (наприклад, вигин та знос валу); *несумісні* – якщо одна з подій виключає появу інших в одному досліді (наприклад, нормальна робота масляного фільтра та забруднення фільтруючого елемента); *залежні* – коли настання однієї події зумовлюється появою (або не появою) іншої (наприклад, відмова коробки передач трактора – це відмова трактора в цілому); *незалежні* – поява однієї з подій не залежить від появи (або не появи) іншої (наприклад, знос корінних шийок колінчастого вала); *рівноможливі* – не одна з подій не є можливішою ніж інші (знос гільз циліндрів, встановлених в одному двигуні).

*Повною групою* називають кілька несумісних подій, з яких при одному випробуванні настане хоча б одна. У випадку, коли повна група складається з двох подій, ці події називають *протилежними*. Подія протилежна даній  $A$ , позначається  $\bar{A}$ . Для повної групи подій достатньо мати дві несумісні події –  $A$  і  $\bar{A}$ . Прикладом протилежних подій є запускання та незапускання двигуна.

**Ймовірність** чисельно характеризує можливість появи (або не появи) події, яка вивчається. Розрізняють математичну (або теоретичну) та дослідну (або статистичну) ймовірності.

*Математична ймовірність події* – це відношення кількості випадків, які сприяють появі даної події, до загальної кількості всіх можливих подій.

Математична ймовірність події  $A$  визначається за формулою:

$$P(A) = \frac{M}{N}, \quad (3.1)$$

де  $P(A)$  – математична ймовірність події  $A$ ;  $M$  – кількість випадків, які сприяють появі події  $A$ ;  $N$  – кількість всіх можливих подій випробування (несумісних, вірогідних та рівноможливих).

Ймовірність події виражають позитивним числом із значеннями від нуля до одиниці, тобто  $0 \leq P(A) \leq 1$  чи у відсотках  $0 \leq P(A) \leq 100\%$ .

Ймовірність вірогідної події дорівнює одиниці, неможливої – нулю.

При вирішенні технічних задач мають справу не з достовірними або неможливими, а з практично вірогідними та практично неможливими подіями.

Практично вірогідною називають подію, ймовірність якої наближена до одиниці, практично неможливою – подію, ймовірність якої наближена до нуля. Ці події в одному досліді (або випробуванні) завжди супроводжують одна одну.

При випробуванні машин на надійність визначити математичну ймовірність появи значення показника надійності сільськогосподарської техніки практично неможливо, тому обмежуються визначенням статистичної ймовірності (або відносної частоти).

*Статистичною ймовірністю* (або відотною частотою) події називають відношення кількості випадків появи події до загальної кількості фактичних дослідів.

Статистична ймовірність  $W(A)$  визначається за формулами:

$$W(A) = \frac{m}{n} \quad \text{або} \quad W(A) = \frac{m}{n} \cdot 100\%, \quad (3.2)$$

де  $m$  – кількість появ події  $A$ ;  $n$  – загальна кількість дослідів.

**Приклад 3.1.** При випробуванні 50 тракторів протягом 2000 мото-год сталися: 5 відмов двигунів, 4 відмови коробок передач (КП). Яка статистична ймовірність відмови коробки передач та двигунів за період випробування?

*Розв'язання.* Кількість появи подій (відмов) КП  $m=4$ ; загальна кількість дослідів (об'єктів)  $n=50$ .

Підставивши значення до формули (3.2), отримують:  $W_{кп} = \frac{4}{50} = 0,08$ , або 8 %, тобто статистична ймовірність відмови коробок передач тракторів за 2000 мото-год становить 0,08 (або 8 %), а двигунів  $W_{ос} = \frac{5}{50} = 0,10$  (або 10 %).

Співставляючи визначення ймовірності математичну ймовірність події визначають розрахунковим шляхом, без випробувань, до досліду. Визначення статистичної ймовірності дає змогу припустити, що випробування проводились фактично, а розрахунок виконується після досліду.

*Дослідна ймовірність появи певного показника надійності являє собою кількість об'єктів (у частках або, відсотках від загальної кількості об'єктів, які випробуються), які реалізують ці ж значення показника при наступному випробуванні.*

Наприклад, якщо при спостереженні за достатньо представницькою групою однотипних об'єктів (трактори однієї марки, які експлуатуються в одному агропідприємстві) було встановлено ймовірність  $W=0,25$  появи ресурсної відмови ходової частини до напрацювання 3000 мото-год, тоді з достатньою точністю можна розрахувати, що 25% тракторів цієї марки потребують ремонту до напрацювання 3000 мото-год при експлуатації (або випробуванні) їх в аналогічних умовах.

Для визначення ймовірностей складних подій, наприклад, появи однієї з кількох сумісних або несумісних подій, чи одночасному здійсненні кількох незалежних подій, використовують формули додавання та множення ймовірностей.

*Формула (теорема) додавання ймовірностей* дає змогу визначити ймовірність появи однієї події з групи однорідних подій.

Для несумісних подій вона має такий вигляд:

$$P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n) = \sum_{i=1}^n P(A_i), \quad (3.3)$$

де  $P(A_1 + A_2 + \dots + A_n)$  – ймовірність появи події  $A_1, A_2$  або  $A_n$ ;  $A_1, A_2, A_n$  – попарно несумісні події;  $P(A_1), P(A_2), P(A_n)$  – ймовірності подій  $A_1, A_2, A_n$ , відповідно.

Для двох сумісних подій:

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(AB), \quad (3.4)$$

де  $AB$  – сумісні події  $A$  і  $B$ ;  $P(A+B)$  – ймовірність появи події  $A$  або події  $B$ ;  $P(A), P(B)$  – ймовірності появи події  $A$  чи події  $B$ , відповідно;  $P(AB)$  – ймовірність сумісної появи подій  $A$  і  $B$ .

**Приклад 3.2.** В результаті випробувань встановлено, що ймовірність відмови ножного гальма автомобіля на 100 тис. км пробігу 0,05, а ймовірність відмови ручного гальма – 0,01. Визначити ймовірність відмови гальмової системи автомобіля.

*Розв'язання.* Оскільки відмова ножного та ручного гальма може відбутися одночасно, тобто ці події сумісні, для визначення відмови системи в цілому використовується формула (3.4).

Підставивши значення, отримаємо:

$$P_{\text{сист}} = 0,05 + 0,01 - 0,05 \cdot 0,01 = 0,0595 .$$

*Формула (теорема) множення ймовірностей* дає змогу визначити ймовірність сумісної появи кількох незалежних подій.

Зокрема, для незалежних подій вона має вигляд:

$$P(A_1, A_2, \dots, A_n) = P(A_1)P(A_2)\dots P(A_n) = \prod_{i=1}^n P(A_i), \quad (3.5)$$

де  $P(A_1, A_2, \dots, A_n)$  – ймовірність сумісної появи подій  $A_1, A_2, A_n$ ;  $A_1, A_2, \dots, A_n$  – незалежні події;  $P(A_1), P(A_2), P(A_n)$  – ймовірності події  $A_1, A_2, A_n$  відповідно;  $P(A_i)$  – ймовірність події  $A_i$ .

**Приклад 3.3.** За спостереженнями, ймовірність безвідмовної роботи коробки передач трактора становить 0,80, а двигуна – 0,75. Визначити ймовірність безвідмовної роботи трактора.

*Розв'язання.* При розгляді безвідмовної роботи коробки передач та двигуна як незалежних одна від одної подій, за формулою (3.5) визначаємо ймовірність безвідмовної роботи трактора:

$$P_{mp} = 0,80 \cdot 0,75 = 0,60.$$

**Випадкова величина** – це змінна величина, яка в результаті досліду може приймати різні, заздалегідь невідомі значення.

Основними параметрами, які характеризують роботу об'єктів у часі і використовуються для оцінки їх надійності, є випадкові величини. Це пояснюється розсіюванням характеристик машин, різними умовами експлуатації та якістю обслуговування.

Випадкові величини поділяють на дискретні (перервні) та неперервні.

*Дискретними* називають випадкові величини, які приймають лише кінцеві, цілочисельні значення (кількість відмов, які виникають протягом будь-якого напрацювання, кількість ремонтів та ін.).

*Неперервні* випадкові величини приймають будь-які значення з певного скінченного або нескінченного інтервалу (напрацювання об'єкта до відмови, величина зносу деталей та ін.).

Поняття випадкової величини пов'язано з поняттям розподілу.

Для повної характеристики випадкової величини разом з її можливими значеннями потрібно вказувати, наскільки часто вона ці значення приймає, тобто навести розподіл випадкової величини.

Розрізняють емпіричний (дослідний) та теоретичний розподіли.

В емпіричних розподілах можливі значення випадкових величин оцінюються статистичними ймовірностями (відносними частотами), отриманими в результаті випробувань, у теоретичних – математичними ймовірностями, визначеними згідно з обраною математичною моделлю розподілу – теоретичного закону розподілу.

Співвідношення, яке встановлює зв'язок між можливими значеннями випадкових величин та відповідними цим значенням ймовірностями, називають

### законом розподілу.

За законом розподілу визначається ймовірність появи випадкової величини у будь-якому інтервалі її можливих значень, це потрібно для розв'язання практичних інженерних завдань.

Повну характеристику емпіричного розподілу дає ряд розподілу (статистичний ряд), який подається як таблиця, де наведено інтервали значень випадкової величини; кількість значень випадкової величини, які потрапляють у даний інтервалу з частотою  $m$ , та дослідною (статистична) ймовірністю (табл. 3.1).

**Таблиця 3.1. Статистичний ряд розподілу випадкової величини**

Інтервал значень випадкової величини	$(x_1; x_1 + h)$	$(x_1 + h; x_1 + 2h)$	...	$(x_1 + (k-1)h; x_n)$
Частота $m_i, i = \overline{1, k}$	$m_1$	$m_2$	...	$m_k$
Дослідна ймовірність, $W_i = \frac{m}{n}, i = \overline{1, k}$	$W_1$	$W_2$	...	$W_k$
Нагромаджена дослідна ймовірність $\sum_{i=1}^k W_i, i = \overline{1, k}$	$W_1$	$W_1 + W_2$	...	$W_1 + W_2 + \dots + W_{k-1}$

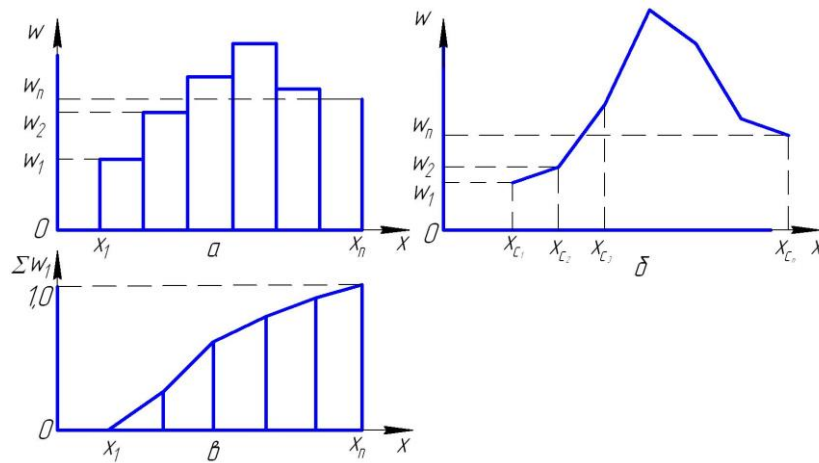
Примітки:  $h$  – ширина інтервалу;  $k$  – кількість інтервалів;  $n$  – загальна кількість дослідів (об'єктів при випробуванні).

Графічно емпіричний розподіл зображено як ступінчастий графік (рис.3.1) – гістограма (для неперервних величин); як багатокутник – полігон (для дискретних величин); як ламана лінія – кумулята (крива накопичених ймовірностей).

Ряд розподілу та його графічні інтерпретації є зручною формою зображення тільки для емпіричного розподілу, оскільки кількість значень випадкової величини, визначеної при випробуванні, кінцева.

Для характеристики розподілу випадкової величини, можливі значення якої безперервно заповнюють деякий інтервал та кількість їх необмежена, ці способи уявлення закону розподілу неприпустимі.





**Рис. 3.1. Графічне зображення емпіричних розподілів:** а – гістограма для неперервних величин; б – полігон для дискретних величин; в – кумулята

Універсальний спосіб завдання закону розподілу випадкової величини будь-якої природи полягає у використанні функцій розподілу. Вони можуть мати графічну форму або бути у вигляді явної функціональної залежності, де аргумент – значення випадкової величини, а функція – математична ймовірність цих значень випадкової величини.

У надійності найчастіше застосовують два типи функцій розподілу – інтегральну  $F(x)$  та диференціальну  $f(x)$ .

Інтегральна функція або функція нагромадження математичної ймовірності – це ймовірність того, що випадкова величина  $X$  прийме значення, яке менше за певну задану величину  $x$ , тобто:

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

Функції  $F(x)$  притаманні властивості, які витікають з її імовірнісної природи.

1. Функція розподілу будь-якої (перервної чи безперервної) випадкової величини є неспадна функція, значення якої обмежені нулем та одиницею, тобто  $0 \leq F(x) \leq 1$ , крім того:

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

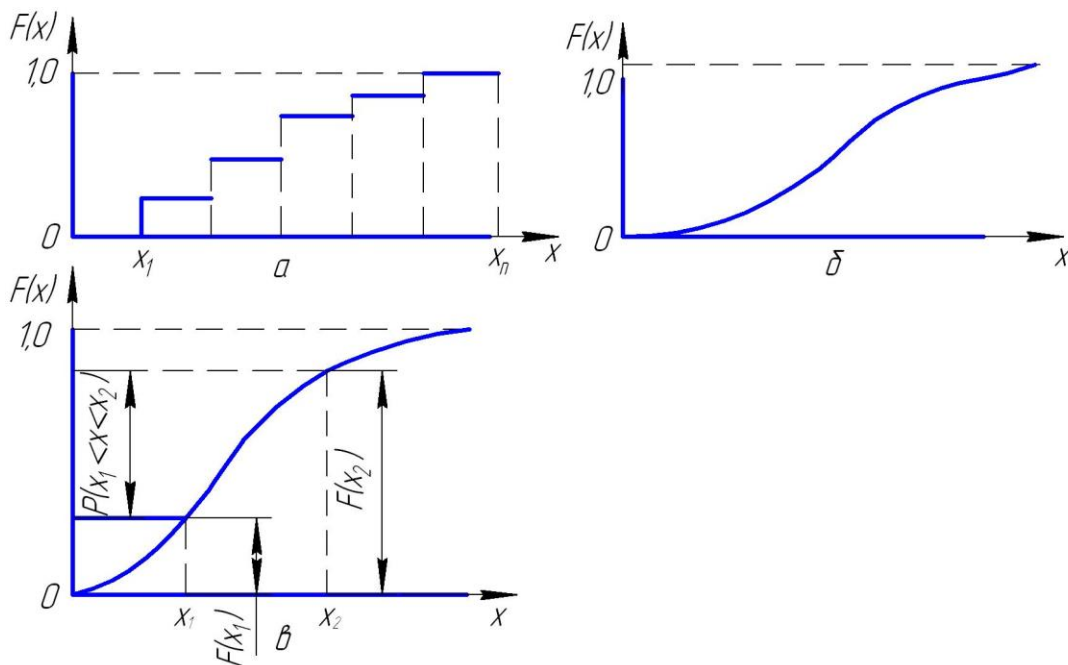
2. Ймовірність перебування випадкової величини в інтервалі  $[X_1; X_2]$  визначається як різниця значень функції розподілу, отриманих у верхній і

нижній межах інтервалу, тобто:

$$P(X_1 \leq x \leq X_2) = F(X_2) - F(X_1). \quad (3.6)$$

Інтегральна функція розподілу може характеризувати як дискретні, так і неперервні випадкові величини.

Функцію розподілу можна зобразити як аналітично, так і графічно. Приклади графіків дискретних і неперервних інтегральних функцій розподілу наведені на рис. 3.2.



**Рис. 3.2. Функція розподілу випадкових величин:** а – розподіл дискретної випадкової величини; б – розподіл неперервної випадкової величини; в – визначення ймовірності перебування випадкової величини в інтервалі  $[X_1; X_2]$

*Диференціальна функція розподілу* випадкової величини  $f(x)$ , яку називають також щільністю розподілу, – це перша похідна від інтегральної функції, тобто  $f(x) = F'(x)$ .

Слід зазначити, що для дискретної випадкової величини функція щільності розподілу не існує, оскільки інтегральна функція дискретної величини неперервно не диференціюється.

Диференціальна функція має такі основні властивості:

1. Щільність розподілу невід'ємна, тобто:

$$f(x) \geq 0.$$

Геометрично це означає, що точки графіка функції, розташовані на осі  $X$  і над нею.

2. Невластивий інтеграл від диференціальної функції у нескінчених межах (від  $-\infty$  до  $+\infty$ ) дорівнює одиниці, тобто:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1. \quad (3.7)$$

У графічному зображенні це означає, що вся площа криволінійної трапеції, обмеженої віссю абсцис і графіком диференціальної функції, дорівнює одиниці.

3. Інтеграл від щільності розподілу в інтервалі від  $-\infty$  до будь-якого  $X$  дорівнює функції розподілу, визначеної для  $X$ , тобто:

$$\int_{-\infty}^x f(x) dx = F(X). \quad (3.8)$$

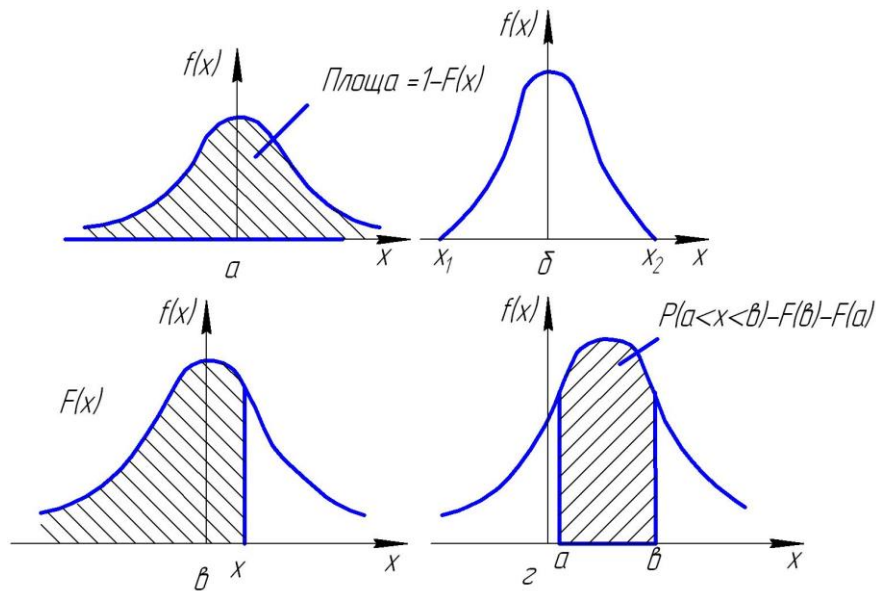
У практичних дослідженнях випадкових величин звичайно визначається ймовірність того, що випадкова величина не вийде за межі заданого інтервалу значень.

У таких випадках застосовується формула, яка пов'язує диференціальну та інтегральну функції:

$$P(a \leq x < b) = \int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a). \quad (3.9)$$

У графічній інтерпретації ймовірність того, що випадкова величина  $x$  приймає значення в інтервалі  $[a; b]$ , є частиною площі під графіком, обмежена прямими  $x=a$  і  $x=b$  та віссю абсцис.

Графік диференціальної функції називають кривою розподілу. Приклади кривих розподілу та ілюстрація властивостей диференціальної функції наведено на рис. 3.3.



**Рис. 3.3. Приклади графіків диференціальної функції розподілу:**

а – щільність розподілу необмеженої випадкової величини; б – щільність розподілу випадкової величини, значення якої обмежені інтервалом  $[X_1; X_2]$ ; в – зв'язок щільності і функції розподілу; г – ймовірність перебування випадкової величини в інтервалі  $[a; b]$

На практиці найчастіше немає потреби застосовувати повний опис випадкової величини функцією ймовірності або графіком, оскільки це пов'язано зі складними експериментами, значними витратами часу, затратами праці і коштів. При вирішенні певних задач щодо оцінки надійності об'єктів можна не володіти точними законами розподілу випадкових величин, достатньо знати числові характеристики розподілу, визначення яких значно простіші за закон розподілу.

Числові характеристики, обчислені за отриманими в процесі випробування значеннями випадкової величини, називають емпіричними характеристиками (статистичними оцінками), а визначені за теоретичними законами розподілу – параметрами розподілу.

До основних статистичних характеристик, які описують розподіл випадкової величини, належать характеристики положення (математичне сподівання або середнє значення, мода, медіана) і характеристики розсіювання (дисперсія, середнє квадратичне відхилення, коефіцієнт варіації).

Характеристики положення фіксують місце випадкової величини на

числовій осі, тобто визначають певне орієнтовне значення випадкової величини, біля якого збігаються її можливі значення.

*Математичним сподіванням* випадкової величини називається сума добутків всіх можливих значень випадкової величини на відповідні їм ймовірності.

Для дискретної випадкової величини формула визначення математичного сподівання має вигляд:

$$M_{(X)} = \sum_{i=1}^n x_i P_i, \quad (3.10)$$

де  $M_{(X)}$  – математичне сподівання;  $x_i$  –  $i$ -е значення випадкової величини;  $P_i$  – ймовірність  $i$ -го значення випадкової величини.

Для неперервно випадкової величини:

$$M_{(X)} X = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx. \quad (3.11)$$

де  $f(x)$  – щільність розподілу випадкової величини  $x$ .

Статистичну оцінку математичного сподівання за дослідними даними називають середнім арифметичним, або середнім зваженим значенням.

Середня арифметична проста величина  $\bar{X}$  визначається за формулою:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (3.12)$$

де  $X_i$  – отримані під час дослідів  $i$ -і значення випадкової величини;  $n$  – число дослідів.

Середня арифметична зважена підраховується тоді, коли серед отриманих у досліді значень випадкових величин є однакові, які повторюються кілька разів:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i X_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (3.13)$$

де  $m_i$  – частота (кількість) появ повторюваного  $i$ -го значення у досліді;

$X_i$  –  $i$ -е значення випадкової величини;  $\sum_{i=1}^n m_i$  – кількість дослідів.

Враховуючи, що відношення  $m_i/n$  визначає дослідну ймовірність  $i$ -го значення випадкової величини, формула (3.13) матиме такий вигляд:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n X_i W_i, \quad (3.14)$$

де  $W_i$  – дослідна ймовірність  $i$ -го значення випадкової величини  $x$ .

*Мода* ( $M_o$ ) дискретної випадкової величини – таке значення випадкової величини, якому відповідає максимальна щільність її розподілу.

Мода емпіричної сукупності – значення випадкової величини, яке зустрічається найчастіше (з найбільшою частотою).

*Медіана* ( $M_e$ ) теоретичного розподілу – значення випадкової величини, відносно якого рівноймовірно отримати більше чи менше значення випадкової величини, тобто:

$$P(x > M_e) = P(x < M_e) = 0,5.$$

*Медіана емпіричної сукупності* – значення випадкової величини, відносно якого впорядкований у порядку зростання (або спадання) ряд отриманих під час дослідів значень поділяється на дві частини, рівні за кількістю членів.

Характеристики розсіювання визначають ступінь розкиду випадкової величини відносно центра розподілу – математичного сподівання (середнього значення).

*Дисперсія* – випадкової величини – це математичне сподівання квадрату відхилення цієї величини від її математичного сподівання.

Для дискретної величини дисперсія визначається як сума:

$$D_{(x)} = \sum_{i=1}^n (x_i - M_{(x)})^2 P_i, \quad (3.15)$$

де  $D_X$  – дисперсія випадкової величини;  $M_X$  – математичне сподівання випадкової величини;  $x_i$  –  $i$ -е значення випадкової величини;  $P_i$  – ймовірність  $i$ -го значення випадкової величини.

Для неперервної випадкової величини формула визначення дисперсії

така:

$$D_{(x)} = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - M_x)^2 f(x) dx, \quad (3.16)$$

де  $f(x)$  – щільність розподілу випадкової величини  $x$ .

*Емпірична дисперсія* – величина, яка характеризує відхилення зафіксованих у досліді значень від їх середнього значення.

Формула для визначення дисперсії при кількості спостережень менше двадцяти п'яти ( $n < 25$ ) має такий вигляд:

$$S_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n m_i (x_i - \bar{X})^2, \quad (3.17)$$

де  $S^2$  – емпірична дисперсія;  $m_i$  – частота  $i$ -го значення випадкової величини;  $x_i$  –  $i$ -е значення випадкової величини;  $\bar{X}$  – середнє значення;  $n$  – кількість спостережень.

При кількості спостережень більше 25 застосовується формула:

$$S_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i (x_i - \bar{X})^2. \quad (3.18)$$

Для зручності замість дисперсії використовується її додатній квадратичний корінь. Ця величина називається *середнім квадратичним відхиленням*:

$$\sigma_x = \sqrt{D_{(x)}}, \quad (3.19)$$

де  $\sigma$  – середнє квадратичне відхилення випадкової величини;  $D_X$  – дисперсія випадкової величини.

Підставивши формули (3.15–3.18) до формули (3.19), отримаємо:

– для дискретної випадкової величини

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - M_{(x)})^2 P_i}; \quad (3.20)$$

– для неперервної випадкової величини

$$\sigma_x = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} (x - M_{(x)})^2 f(x) dx}. \quad (3.21)$$

Емпіричне середнє квадратичне відхилення визначається за формулами:

– для  $n < 25$

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n m_i (x_i - \bar{x})^2}; \quad (3.22)$$

– для  $n \geq 25$

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i (x_i - \bar{x})^2}. \quad (3.23)$$

Дисперсія і середнє квадратичне відхилення є абсолютними характеристиками розсіювання випадкової величини.

Розсіювання у відносних одиницях (частках одиниці чи відсотках) характеризується *коефіцієнтом варіації*  $V_x$ , який визначається як відношення середнього квадратичного відхилення  $\sigma_x$  до математичного сподівання  $MX$ :

$$V_x = \frac{\sigma_x}{M_{(x)}}. \quad (3.24)$$

Для емпіричного розподілу коефіцієнт варіації дорівнює:

$$V_x = \frac{S_x}{\bar{X}}. \quad (3.25)$$

### **3.2. Характеристика основних законів розподілу показників надійності**

У теорії надійності найчастіше застосовують такі закони розподілу: нормальний (Гаусса), Вейбулла-Гнеденка, експоненціальний – для неперервних величин та біномний і Пуассона – для дискретних величин. Також використовуються ряд інших законів розподілу –  $\chi^2$ -квадрат, гамма – розподіл, логнормальний та ін.

**Закон нормального розподілу** (або нормальний закон Гаусса) використовується найчастіше у технічних системах. Він займає особливе місце і в теорії ймовірностей та теорії надійності. Особливість нормального розподілу – симетричне розсіювання окремих значень випадкової величини відносно середнього значення.

Диференціальна функція нормального розподілу визначається за



формулою:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}\right), \quad (3.26)$$

де  $\sigma_x$  – середнє квадратичне вiдхилення випадкової величини  $x$ ;

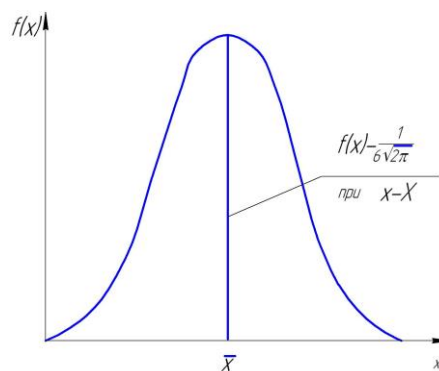
$\bar{x}$  – математичне сподiвання випадкової величини  $x$ ;

Величини  $\bar{x}$  та  $\sigma_x$  називають параметрами розподiлу.

Значення диференцiальної функцiї нормального закону розподiлу наведенi в додатку А табл 1

Випадкова величина, пiдпорядкована закону нормального розподiлу, має три властивостi: однаковi додатнi та вiд'ємнi вiдхилення вiд середнього рiвноможливи; меншi вiдхилення ймовiрнiшi, нiж бiльшi; досить великi вiдхилення вiд середнього значення малоймовiрнi.

Диференцiальна крива, яка вiдповiдає нормальному закону, має дзвоноподiбний вигляд i є симетричною вiдносно ординати, проведеної в точцi  $x = \bar{x}$  (рис. 3.4).



**Рис. 3.4.** Диференціальна форма нормального закону розподілу

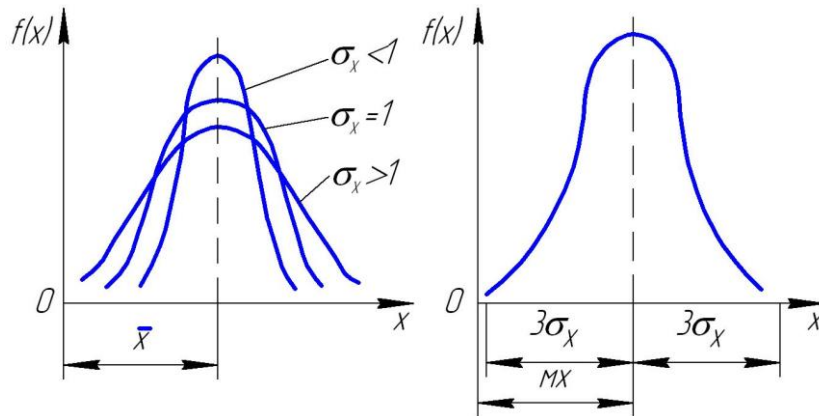
Характерні загальні риси кривих нормального розподілу, наведені на рис.

3.5. Основні з них наступні:

1. При значенні  $x \rightarrow \pm\infty$  крива асимптотично наближається до осі абсцис і йде у нескінченість.

2. Максимум кривої відповідає по осі абсцис математичному сподіванню, по осі ординат – величині, яка дорівнює  $1/\sigma\sqrt{\pi}$ . Щільність розподілу

знижується з віддаленням від математичного сподівання (середнього значення).



**Рис.3.5. Графічне зображення деяких властивостей кривої нормального розподілу**

3. Зі зменшенням значення середнього квадратичного відхилення крива витягується уверх, одночасно стискаючись з боків; при збільшенні  $\sigma_x$  стає більш плоскою, розтягуючись вздовж осі абсцис (в обох випадках обмежуючи одиничну площу).

4. Ймовірність відхилення випадкової величини від свого математичного сподівання (середнього значення) не більше ніж на  $\pm 3\sigma_x$  і дорівнює 99,73 %, тобто практично всі значення випадкової величини перебувають в інтервалі  $MX \pm 3\sigma_x$  (правило трьох сигм).

Інтегральна функція нормального розподілу має вигляд:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(x-\bar{X})^2}{2\sigma_x^2}\right) dx, \quad (3.27)$$

Інтеграл, який входить до формули (3.27), у скінченному вигляді не береться. Значення інтегральної функції визначається за допомогою центрованої і нормованої функції  $F_0(x)$  із співвідношення:

$$F(x) = F_0\left(\frac{x-\bar{X}}{\sigma_x}\right). \quad (3.28)$$

Інтегральна функція табульована, її значення, наведені у додатку А, табл. 2А.

Для обчислення  $F_0(x)$  при від'ємних значеннях  $x$  використовується вираз:

$$F_0(-x) = 1 - F_0(x). \quad (3.29)$$

Ймовірність того, що випадкова величина, підвладна закону нормального розподілу при випробуваннях, прийматиме значення у межах від  $X_1$  до  $X_2$ , може бути визначена так:

$$P(X_1 < x < X_2) = F(X_2) - F(X_1) = F_0\left(\frac{X_2 - \bar{X}}{\sigma_x}\right) - F_0\left(\frac{X_1 - \bar{X}}{\sigma_x}\right). \quad (3.30)$$

**Приклад 3.4.** Визначити відсоток двигунів, що відмовили, до напрацювання 2500 мото-год, якщо відомо, що доремонтний ресурс розподілений за нормальним законом з параметрами:  $\bar{X} = 3000$  мото-год і  $S_x = 300$  мото-год.

*Розв'язання.* За формулою (3.30):

$$F(2500 \text{ мото-год}) = F_0\left(\frac{2500 - 3000}{300}\right);$$

$$F_0\left(\frac{2500 - 3000}{300}\right) = F_0(-1,67);$$

$$F_0(-1,67) = 1 - F_0(1,67).$$

Визначаємо  $F_0(1,67) = 0,95$  (додаток 1А, табл.1), тоді  $F(2500) = 1 - 0,95 = 0,05$ .

Це означає, що до напрацювання 2500 мото-год можлива втрата працездатності у 5 % двигунів.

$F_0(x)$  звичайно обчислюють для зручних значень  $x$ . Наприклад, 0,8; 0,9; 0,95; 0,98; 0,99; 0,999 та ін.

Можна вчинити навпаки, тобто виписати прийнятні для аналізу значення  $F_0(x)$ , які дорівнюють  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ , і визначити відповідні їм значення  $x = V_\alpha$ . Такі значення називають квантилями.

Наприклад,  $F_0(x) = F_0(V_\alpha) = \alpha$ , де  $\alpha$  – прийнятні значення функції  $F_0(x)$ ;

$V_\alpha$  – квантиль.

Значення квантилей наведено у додатку А, табл. 3А.

**Приклад 3.5.** Якщо  $\alpha_1 = 0,95$  і  $\alpha_2 = 0,99$ , тоді визначаємо (додаток, табл. 3) квантиль  $U_{\alpha_1} = U_{0,95} = 1,645$  і  $U_{\alpha_2} = U_{0,99} = 2,326$ . Потрібно обчислити ймовірність зміни від  $U_{0,95} = 1,645$  до  $U_{0,99} = 2,326$ , тобто ймовірність того, що  $1,645 \leq x \leq 2,326$ .

Визначаємо (додаток, табл. 3)  $P(x \geq U_{0,95}) = 0,95$ ;  $P(x \leq U_{0,99}) = 0,99$  або  $P(U_{0,95} \leq x \leq U_{0,99}) = F_0(U_{0,99}) - F_0(U_{0,95}) = 0,04$ .

Таким чином, квантилі  $U_{0,99} = 2,326$  та  $U_{0,95} = 1,645$  визначають область зміни випадкової величини  $x$ , ймовірність влучення в яку дорівнює 0,04.

**Зрізаний нормальний розподіл** – це розподіл, в якому будь-яка випадкова величина  $x$  з обох боків обмежена певними значеннями.

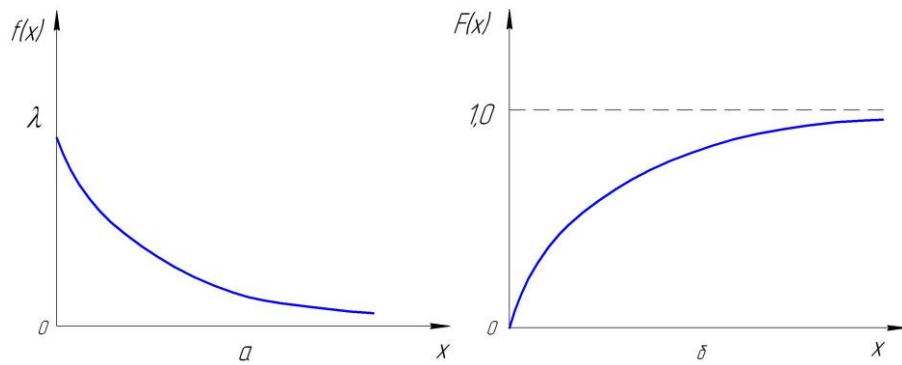
**Логарифмічний нормальний розподіл** – розподіл випадкової величини  $y$ , десятковий логарифм якої розподіляється за нормальним законом: при цьому за формулою (3.26)  $x = \lg y$ .

**Експоненціальний (показниковий) розподіл** широко застосовують при розв'язанні питань надійності.

Неперервна випадкова величина розподілена за експоненціальним законом, якщо її щільність розподілу ймовірності (рис. 3.6, а) при  $x \geq 0$  має вигляд:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} = \lambda \exp(-\lambda x), \quad (3.31)$$

де  $\lambda$  – постійна величина (коефіцієнт).



**Рис. 3.6. Експоненціальний закон розподілу випадкових величин:** а – щільність розподілу; б – функція розподілу

Функцію розподілу (рис. 3.6, б) визначають за формулою:

$$F(x) = \int_0^x f(x)dx = \int_0^x \lambda \exp(-\lambda x) dx = 1 - \exp(-\lambda x). \quad (3.32)$$

Математичне сподівання і середнє квадратичне відхилення випадкової величини  $x$  такого розподілу – це величина, обернена коефіцієнту  $\lambda$ :

$$M_{(x)} = \sigma_x = 1 / \lambda .$$

**Розподіл Реллея** характеризується тим, що щільність розподілу випадкової додатної величини має вигляд:

$$f(x) = \frac{x}{\sigma_x^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right). \quad (3.33)$$

Інтегральна функція розподілу Реллея дорівнює:

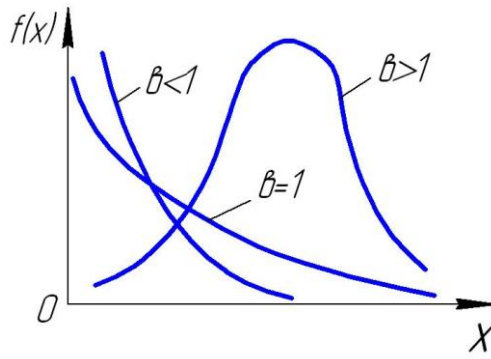
$$F(x) = 1 - \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{x^2}{\sigma_x^2}\right]. \quad (3.34)$$

**Розподіл Вейбулла-Гнеденка.** Диференціальна функція розподілу **Вейбулла-Гнеденка** має вигляд:

$$f(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} \exp - \left(\frac{x}{a}\right)^b, \quad (3.35)$$

де  $a$  і  $b$  – параметри розподілу і зображена на рис. 3.7.

Зазначимо, що при  $b=1$  розподіл Вейбулла-Гнеденка збігається з експоненціальним розподілом, а при  $b=2$  – з розподілом Реллея.



**Рис. 3.7. Диференціальна форма розподілу Вейбулла-Гнеденка**

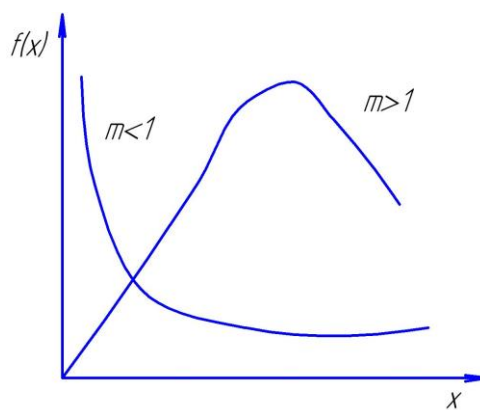
Інтегральна функція розподілу Вейбулла-Гнеденка дорівнює:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{a}\right)^b\right] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{a}\right)^b\right]. \quad (3.36)$$

**Гамма – розподіл** у теорії надійності набув широкого застосування. Диференціальна функція його розподілу має вигляд:

$$f(x) = \frac{x^{m-1}}{\Gamma(m)} \exp\left(-\frac{x}{2}\right), \quad (3.37)$$

де  $\Gamma(x)$  – гама-функція (рис. 3.8).



**Рис. 3.8. Диференціальна форма гамма-розподіл**

**Розподіл Пуассона.** При розв'язанні практичних задач надійності часто застосовують розподіл дискретних випадкових величин за законом розподілу Пуассона. Наприклад, якщо у початковий період експлуатації виробу (період припрацювання) потік відмов нестаціонарний, то після закінчення періоду припрацювання потік відмов стає стаціонарним, отже, простішим,

пуассонівським.

Ймовірності частоти подій, які рідко бувають при певній кількості випробувань, для розподілу Пуассона визначають за формулою:

$$P_m = \frac{(np)^m \exp(-np)}{m!} = \frac{a^m}{m!} \exp(-a), \quad (3.38)$$

де  $m$  – частота даної події;  $n$  – кількість випробувань (спостережень);  $P$  – ймовірність подій при одному випробуванні;  $a = np$  – математичне сподівання випадкової величини.

Значення  $P_m$  наведені у додатку, табл. 4.

Для розподілу Пуассона дисперсія дорівнює математичному сподіванню.

Якщо у рівнянні (3.38)  $m=0$  і  $\alpha = \lambda x$ , то це буде рівняння експоненціального закону розподілу, який є окремим випадком закону розподілу Пуассона.

**Закон біноміального розподілу**, як і закон розподілу Пуассона, має практичне значення для дискретних випадкових додатних величин. Наприклад, його застосовують при проведенні серії послідовних незалежних випробувань, кожне з яких закінчується одним з двох несумісних між собою результатів – або подія  $A$  настає, або не настає.

Ймовірність появи події  $A$  у кожному випробуванні дорівнює  $p$ , а ймовірність її відсутності дорівнює  $q = 1 - p$ . Оскільки випробування незалежні, ймовірність появи чи відсутності  $A$  не залежить від результатів попередніх випробувань.

За такою схемою випробувань ймовірність появи події  $A$  задану кількість разів підпорядковано закону біноміального розподілу, який формулюється так: якщо ймовірність події  $A$  постійна у серії послідовних незалежних випробувань і дорівнює  $p$ , то ймовірність появи події  $A$   $m$  разів у  $n$  випробуваннях становитиме:

$$P_{m,n} = C_n^m p^m q^{n-m} \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m q^{n-m}. \quad (3.39)$$

Математичне сподівання  $M(m)$  і дисперсія  $\sigma^2(m)$  біноміального розподілу

відповідно дорівнюють:

$$M(m) = np; \quad (3.40)$$

$$\sigma^2(m) = npq. \quad (3.41)$$

Якщо замість випадкової величини  $m$  розглядати випадкову частіть  $x = m/n$ , то з рівняння (3.40) та (3.41) отримаємо:

$$M(x) = \bar{x} = \frac{1}{n} M(m) = p; \quad (3.42)$$

$$\sigma(x) = \frac{1}{n} \sigma(m) = \sqrt{\frac{pq}{n}}. \quad (3.43)$$

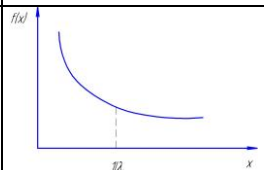
**Композиція законів розподілу.** На практиці при аналізі надійності найчастіше мають справу зі складними об'єктами, в яких можливі різні фізичні причини відмов окремих елементів об'єкта. Різні види відмов підвладні своїм специфічним законам розподілу. Наприклад, випадкові раптові відмови в основному підпорядковані експоненціальному закону розподілу (табл. 3.2).

Так, у складних об'єктів закони розподілу відмов і несправностей – це сполучення багатьох різних розподілів.

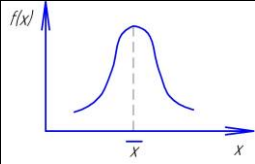
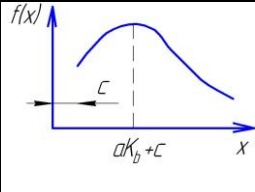
Якщо випадкова величина являє собою суму незалежних випадкових величин, кожна з яких підпорядкована своєму закону розподілу, то закон розподілу суми визначається за законами розподілу доданків.

Припускається, що є кілька незалежних випадкових величин:  $x$ ;  $y$ ;  $z$ , яким відповідають щільності розподілу ймовірностей:  $f(x)$ ;  $f(y)$ ;  $f(z)$ .

**Таблиця 3.2. Характеристики основних законів розподілу показників надійності**

Закон	Розподіл щільності ймовірностей		Статистичні характеристики	
	Графічне зображення	Математичний вираз	Математичне сподівання	Середнє квадратичне відхилення
Експоненціальний (однопараметричний)		$f(x) = \lambda \exp(-\lambda x),$ <p>де <math>\lambda</math> – показник розподілу</p>	$\lambda^{-1}$	$\lambda^{-1}$



Нормальний Гаусса (двопараметричний)		$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-MX)^2}{2\sigma^2}\right),$ де $MX$ – математичне сподівання; $\sigma$ – середнє квадратичне відхилення	$\bar{x}$	$S$
Вейбулла-Гнеденка (трипараметричний)		$f(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{x-c}{a}\right)^{b-1} \exp\left(-\left(\frac{x-c}{a}\right)^b\right)$ де $a, b, c$ – відповідно параметри масштабу форми та зсуву	$aK_e+c,$ де $K_e$ – допоміжний коефіцієнт Вейбулла	$aC_e,$ де $C_e$ – коефіцієнт Вейбулла

Складна величина  $u$  дорівнює сумі незалежних випадкових величин:

$$u = x + y + z.$$

Якщо  $x; y; z$  – випадкові величини, то їх сума також буде випадковою величиною, а її щільність розподілу ймовірностей становитиме  $f(u)$ .

Закон розподілу величини  $u$  – це композиція законів розподілу величин  $X; Y; Z$ . Композиція може існувати для будь-якого числа випадкових величин.

Композиція законів розподілу має певні загальні та окремі властивості. Загальні властивості композицій не залежать від виду законів розподілу, що розглядаються.

Наприклад, математичне сподівання (середнє значення) та дисперсія композиції розподілу відповідно дорівнюють сумі математичних сподівань незалежних випадкових величин, які утворюють складну випадкову величину.

Окремі властивості застосовують тільки до певних законів розподілу. Наприклад, композиція випадкових величин з нормальним розподілом – це також нормальний розподіл, композиція розподілів Пуассона – це розподіл Пуассона тощо.

Якщо маємо велику кількість розподілів (з однаковими або різними законами розподілу) за умовою, що дисперсії складових розподілів мають незначні відмінності, тоді розподіл їх композиції буде наближений до нормального. Це положення в теорії ймовірностей називається центральною граничною теоремою.

### **3.3. Збирання та обробка інформації про надійність технічних об'єктів**

Збирання, обробка та аналіз інформації про надійність пов'язані з необхідністю дослідження випадкових подій.

Загальні вимоги до інформації про надійність такі: повнота інформації, вірогідність, однорідність, дискретність (дані за окремими ознаками), своєчасність та ін.

При статистичній оцінці основних характеристик надійності вивчаються сукупності об'єктів та явищ, об'єднаних єдиною ознакою або властивістю (наприклад, деталі можуть утворювати сукупності за різними ознаками: розмірами, відхиленнями за формою, зносами та ін.; машини – за довговічністю тощо). При цьому деталі, складальні одиниці, системи машин є об'єктами (елементами) сукупності.

**Статистична сукупність** складається з однорідних об'єктів, які мають якісну спільність.

У випадках, коли мають справу з кількісною ознакою, її називають статистичною змінною або за означенням теорії ймовірностей – випадковою величиною.

Для кожного об'єкта (елемента) сукупності, складеної з кінцевого числа об'єктів, за допомогою спостережень визначаються відповідні значення випадкової величини, які називають спостереженим значенням випадкової величини.

Якщо сукупність містить велику кількість об'єктів або дослідження об'єкта пов'язано з його руйнуванням, з всієї сукупності враховують обмежену кількість об'єктів і вивчають їх. При невеликій кількості об'єктів обстежують кожний з них залежно від ознаки, що цікавить.

**Генеральна, або загальна сукупність** містить усі досліджувані об'єкти (значення показників надійності), з яких вибирають необхідні для спостереження.

**Вибірка, або вибіркова сукупність** – певна кількість об'єктів (значення показників надійності), відібраних із сукупності, що досліджується, для отримання відомостей про генеральну сукупність.

Вибірка у всіх своїх частинах повинна бути подібна до генеральної сукупності, щоб на її підставі можна було достатньо впевнено робити висновок про ознаку генеральної сукупності. Основна вимога при цьому: вибірка повинна бути представницькою (репрезентативною), коли кожний об'єкт вибирають випадково, всі об'єкти мають однакову ймовірність потрапити до вибірки.

*Об'єм сукупності* (генеральної або вибіркової) – це кількість об'єктів цієї сукупності.

*Об'єм вибірки* – кількість об'єктів спостереження, які складають вибірку.

Система збирання і обробки інформації про надійність нових або відремонтованих виробів, які виготовляють серійно, приладо- та машинобудування являють собою сукупність організаційно-технічних заходів щодо отримання необхідних відомостей про надійність.

Метою системи збирання та обробки інформації про надійність виробів є: конструктивне удосконалення виробів для підвищення їх надійності; удосконалення технології виготовлення, складання, контролю й випробувань, спрямованих на забезпечення та підвищення надійності; розробка заходів щодо додержання правил експлуатації й підвищення ефективності технічного обслуговування; розробка заходів, спрямованих на підвищення якості ремонтів і зниження витрат на їх проведення.

Задачами системи збирання та обробки інформації про надійність є:

- визначення та оцінка показників надійності об'єктів;
- виявлення конструктивних і технологічних недоліків об'єктів, які знижують надійність;
- встановлення деталей та складальних одиниць, які обмежують надійність готових виробів;
- визначення закономірностей виникнення відмов;

- встановлення впливу умов і режимів експлуатації на надійність виробів;
- коригування показників надійності, що нормуються;
- оптимізація норм витрати запасних частин, виявлення недоліків експлуатації та вдосконалення системи технічного обслуговування й ремонту;
- визначення ефективності заходів, спрямованих на підвищення надійності виробів до оптимального рівня.

Обробка результатів експериментальних спостережень виконується у такій послідовності:

- за дослідними даними будується емпірична крива;
- обчислюють характеристики емпіричного розподілу;
- висувається одна з кількох гіпотез про функцію щільності випадкової величини, що досліджується, виходячи з зовнішнього вигляду експериментальної кривої та значень її характеристик розподілу та факторів, які впливають на її вигляд;
- емпірична крива вирівнюється за однією або послідовно за кількома теоретичними кривими (теоретичні частоти випадкових величин визначають за відповідними формулами і таблицями);
- емпірична і теоретична (апроксимована (вирівняна) емпірична) криві порівнюються за одним із критеріїв узгодження;
- визначається функція (закон) для даного розподілу з урахуванням найкращої узгодженості емпіричної та теоретичної кривих.

Можна розв'язати і обернену задачу, вирівнюючи емпіричний розподіл за теоретичними (параметри теоретичні) і порівнюючи їх за одним з критеріїв узгодження.

**Критерії узгодження.** Часто постає необхідність визначити, є розбіжність між емпіричним законом розподілу і припущеним (теоретичним) результатом обмеженої кількості спостережень. Можливо ця розбіжність суттєво пов'язана з тим, що дійсний розподіл випадкової величини відрізняється від припущеного. Щоб дати відповідь на ці питання, використовують критерії узгодження – критерії перевірки гіпотези про

припущений закон невідомого розподілу.

Найпростішим критерієм узгодження є критерій  $\lambda$ , запропонований академіком

А.М. Колмогоровим.

При використанні цього критерію припускають, що розподіл статистичних даних в більшості випадків має, зокрема, характер нормального розподілу. За параметри розподілу приймають відповідні характеристики вибірки.

Приймається, що параметри теоретичного розподілу, дорівнюють параметрам емпіричного розподілу, тоді теоретичні частоти  $m_{imeop}$  будь-якого значення  $x$  в емпіричному розподілі обчислюються за формулою:

$$m_{imeop} = \frac{\Delta x N}{\sigma} f(x) \text{ або } m_{imeop} = \frac{h}{S} N \varphi(t), \quad (3.44)$$

де  $\Delta x$  або  $h$  – ширина (ціна) інтервалу або гранична різниця розмірів в інтервалі.

Значення  $f(x)$ , обчислені для різних величин, наведено у додатку А, табл. 1А.

За обчисленими частотами будують теоретичні криві розподілу. З середини інтервалів, відкладених на осі абсцис, проводять ординати, рівні обчисленим теоретичним частотам. Кінці ординат з'єднують плавною суцільною лінією.

Близькість теоретичних частот до емпіричних дає змогу орієнтовно стверджувати, що емпірична крива розподілу в основному підпорядковується закону нормального розподілу.

За емпіричними та можливими теоретичними частотами розподілу обчислюють значення критерію узгодження  $\lambda$  за формулою:

$$\lambda = \frac{\left| \sum_1^n m_i - \sum_1^n m_{imeop} \right|_{\max}}{N} / \sqrt{N} = D_{\max} / \sqrt{N}, \quad (3.45)$$

де  $\sum_1^n m_i$  – нагромаджена емпірична частота;  $\sum_1^n m_{теор}$  – нагромаджена теоретична частота;  $D_{\max}$  – найбільша абсолютна різниця між нагромадженими емпіричними та теоретичними частотами;  $N$  – загальна кількість всіх спостережених значень (об'єм вибірки).

Під нагромадженою частотою для заданого значення  $x$  розуміється сума всіх частот, які передують цьому значенню.

Величини  $\sum_1^n m_i/N$  і  $\sum_1^n m_{теор}/N$  являють собою інтегральні функції  $F_n(x)$  емпіричного та  $F(x)$  теоретичного розподілу, а тому вираз для  $\lambda$  має вигляд:

$$\lambda = [F_n(x) - F(x)] / \sqrt{N}. \quad (3.46)$$

Для обчислення інтегральних функцій теоретичного розподілу користуються виразом:

$$F(x) = 0,5 + \Phi\left[\frac{x-X}{\sigma}\right] = 0,5 + \Phi(t), \quad (3.47)$$

де  $x$  – верхня межа відповідного інтервалу;  $\Phi(t)$  – функція Лапласа (див. додаток А, табл. 9).

Критерій узгодження  $\lambda$  підпорядковується певному закону розподілу, за яким обчислюється ймовірність  $P(\lambda)$ .

У довідковій літературі є таблиця значень ймовірностей  $P(\lambda)$  для різних  $\lambda$  (див. додаток, табл. 5).

У випадку, коли ймовірність  $P(\lambda)$  дуже мала (менше 0,05), за принципом практичної неможливості малоїмовірних подій можна дійти висновку, що емпіричний розподіл не відповідає припущеному теоретичному розподілу.

У випадку  $P(\lambda) > 0,05$  вважають, що розбіжності між значеннями нагромаджених частот випадкові, а встановлений теоретичний розподіл приймається як характеристика досліджуваного явища.

Часто використовують критерій узгодження Пірсона ( $\chi^2$ ), так званий «хі-квадрат». Цей критерій є найприпустимим при значній кількості спостережень.

Він забезпечує мінімальну похибку прийняття неправильної гіпотези порівняно з іншими критеріями. Критерій Пірсона слід застосовувати у тих випадках, коли теоретичні значення параметрів функції розподілу невідомі:

$$\chi^2 = \sum \frac{|m_i - m_{imeop}|^2}{m_{imeop}}. \quad (3.48)$$

Обчисливши  $\chi^2$ , визначають  $k$  – кількість степенів вільності:

$$k = n - r - 1,$$

де  $n$  – кількість частот, які порівнюються (кількість груп та часткових інтервалів) вибірки;  $r$  – кількість параметрів припущеного розподілу, які оцінюють за даними вибірки.

За заданим рівнем значущості  $P^*$  і кількості степенів вільності  $k$  визначають критичну точку  $\chi_{кр}^2(P^*, k)$ , ( додток А, табл. 8А.)

Якщо  $\chi^2 < \chi_{кр}^2$ , розходження між емпіричними і теоретичними частотами при даному рівні значущості  $P^*$  незначне, дані спостережень узгоджуються з гіпотезою про припущений закон розподілу випадкових величин. Рівень значущості  $P^*$  повинен бути не менше 0,1.

Дослідна інформація обробляється також графічним методом за допомогою ймовірносного паперу або функціональних сіток. Функціональна сітка складається таким чином, щоб нанесена на цей папір функція розподілу мала вигляд прямої лінії.

Це "випрямлення" досягається зміною координат функції розподілу  $F(x)$  і змінної  $x$  координатами  $F'(x)$  і  $x'$ , закон зміни яких підібрано так, щоб "випрямити" функцію заданого закону розподілу.

Для вибору закону розподілу на сітку наносять значення нагромаджених дослідних ймовірностей, які взято по кінцях інтервалів статистичного ряду. Якщо ці точки розташовані на прямій лінії або поблизу від неї, це означає, що дослідна інформація відповідає обраному закону розподілу, а оцінки параметрів цього закону можуть бути визначені за допомогою ймовірносного паперу за дослідними даними. Ймовірносний папір може бути застосований для будь-

якого закону розподілу.

**Оцінювання точності.** Основні параметри теоретичного розподілу – математичне сподівання  $M_{(X)}$  та дисперсія  $D_{(X)}$ . Раніше було розглянуто порядок обчислення за емпіричним розподілом середнього значення  $\bar{X}$  та дисперсії  $S_x^2$ .

Це величини – точкові оцінки, які визначають одним числом, для теоретичних значень  $M_{(X)}$  та  $D_{(X)}$  і при достатньо великій кількості дослідів можна вважати, що  $\bar{X} = M_{(X)}$  і  $S_x^2 = D_{(X)}$ .

Оскільки обсяг вибірки, як правило, невеликий, користуються *інтервальними оцінками*, які визначаються двома числами – кінцями інтервалу.

Інтервальні оцінки дозволяють встановити точність і надійність оцінювання, тобто до яких помилок може призвести заміна значення теоретичного параметра  $m$  статистичною характеристикою  $m^*$ . Відомо, що  $m^*$  тим точніше визначає параметр  $m$ , чим менше абсолютна величина різниці  $|m - m^*|$ , тобто  $|m - m^*| < \delta$ ,  $\delta > 0$ ; чим менше  $\delta$ , тим оцінка точніша. Таким чином, додатне число  $\delta$  характеризує точність оцінювання.

Але статистичні методи не дозволяють категорично стверджувати, що оцінка  $m^*$  задовольняє нерівності  $|m - m^*| < \delta$ ; можна говорити лише про ймовірність  $\alpha$ , при якій ця нерівномірність правильна.

Надійною ймовірністю (надійністю) оцінки  $m$  за  $m^*$  називають ймовірність  $\alpha$ , при якій виконується нерівність  $|m - m^*| < \delta$ .

Як правило, надійність оцінювання задається наперед, при цьому за  $\alpha$  приймається число, близьке до одиниці. Наприклад, ймовірність того, що  $|m - m^*| < \delta$  дорівнює  $\alpha$ :

$$P\left[|m - m^*| < \delta\right] = \alpha, \quad (3.49)$$

де  $\delta$  – задана точність;  $\alpha$  – вірогідність оцінки.

Замінивши нерівність  $|m - m^*| < \delta$  рівнозначною їй подвійною нерівністю



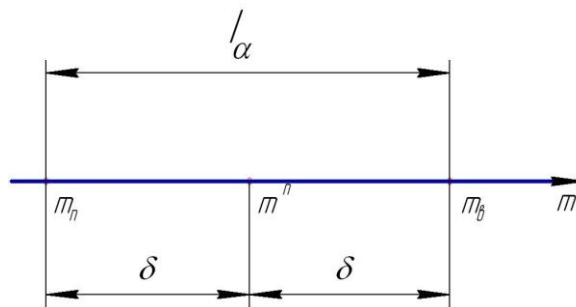
$-\delta < m - m^* < \delta$  або  $m^* - \delta < m < m^* + \delta$ , отримаємо:

$$P[m^* - \delta < m < m^* + \delta] = \alpha.$$

Це співвідношення слід розуміти так: ймовірність того, що інтервал  $[m^* - \delta; m^* + \delta]$  містить у собі невідомий параметр  $m$ , дорівнює  $\alpha$ .

Надійним інтервалом  $I_\alpha$  називають інтервал  $[m^* - \delta; m^* + \delta]$ , який містить невідомий параметр із заданою надійністю  $\alpha$ , тобто це інтервал, до якого при заданій надійній (певній) ймовірності потрапляє 100 %  $\alpha$  випадків від  $N$ .

На рис. 3.9 наведено, що  $I_\alpha = 2\delta$  характеризує точність оцінювання.



**Рис. 3.9. Надійний інтервал та надійні межі**

Інтервал  $[m^* - \delta; m^* + \delta]$  має випадкові кінці, які називають *надійними межами*.

Межі, у яких можуть коливатися значення оцінювального показника при заданій ймовірності  $\alpha$ , називаються *нижньою*  $m_n = m^* - \delta = m_1$  та *верхньою*  $m_g = m^* + \delta = m_2$ .

Надійні межі – випадкові величини і залежать від величини вибірки. За відомими надійними межами визначають надійний інтервал:

$$I_\alpha = m_2 - m_1.$$

Надійні інтервали для оцінювання математичного сподівання розподілу можуть визначатися при відомому чи невідомому середньоквадратичному відхиленню  $\sigma$ . Якщо відомі величини оцінки  $m^*$  і  $\sigma$ , то верхню та нижню межі визначають за рівняннями:

$$m_n = m^* - t \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \quad (3.50)$$

$$m_g = m^* + t \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (3.51)$$

де  $t$  – число, яке визначається за рівнянням (додаток А, табл. 9А):  $2\Phi(t) = \alpha$  або  $\Phi(t) = \alpha/2$ .

З іншого боку, за формулою  $\delta = t\sigma/\sqrt{n}$  при зростаючому об'ємі вибірки  $n$  число  $\delta$  спадає і точність оцінювання збільшується.

Збільшення надійної ймовірності оцінювання  $\alpha = 2\Phi(t)$  зумовить збільшення  $t$ , оскільки  $\Phi(t)$  – функція зростаюча, а відповідно і до зростання  $\delta$ . Отже при цьому спостерігається зростання  $m$ , яке призводить до зменшення точності функції.

Для оцінювання математичного сподівання із заданою точністю  $\delta$  та ймовірністю  $\alpha$  мінімальний обсяг вибірки, який може забезпечить цю точність, обчислюють за формулою:

$$n = \frac{t^2 \sigma^2}{\delta^2}. \quad (3.52)$$

**Приклад 3.6.** Випадкова величина  $x$  має нормальний розподіл з відомим середнім квадратичним відхиленням  $\sigma = 2$ . Знайти надійний інтервал для оцінювання невідомого математичного сподівання вибіркоким середнім  $\bar{X}$ , якщо обсяг вибірки  $n = 49$  та відома надійність оцінювання  $\alpha = 0,95$ .

*Розв'язання.* Визначають  $t$ . Із співвідношення  $2\Phi(t) = 0,95$  отримують  $\Phi(t) = 0,475$ , за табл. 9 додатка –  $t = 1,96$ . Звідки точність оцінки:

$$\delta = t \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \frac{1,96 \cdot 2}{\sqrt{49}} = 0,56.$$

Надійний інтервал такий:  $\bar{x} - 0,56$ ;  $\bar{x} + 0,56$ . Наприклад, якщо  $\bar{x} = 4,5$ , надійний інтервал має такі межі:  $\bar{x} - 0,56 = 4,5 - 0,56 = 3,94$ ;  $\bar{x} + 0,56 = 4,5 + 0,56 = 5,06$ .

Отже, значення невідомого параметра  $m$ , яке погоджується з даними вибірки, задовольняють нерівності:

$$3,94 < m < 5,06.$$

Коли значення середнього квадратичного відхилення невідоме, замість величини  $\delta = t\sigma / \sqrt{n}$  визначають:

$$\delta = t_\gamma \sigma / \sqrt{n},$$

де  $t_\gamma$  – табличний коефіцієнт (додаток, табл. 6) для заданої ймовірності  $\alpha$  та кількості ступенів свободи  $k = n - 1$ ;  $S_x$  – вибіркова характеристика, яка визначається за рівнянням:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m - m^*)^2}. \quad (3.53)$$

Аналогічно за допомогою надійних інтервалів проводять оцінювання значення величини, що вимірюється за середнім арифметичним значенням окремих вимірювань.

**Приклад 3.7.** Кількісна ознака  $X$  генеральної сукупності розподілена нормально. При вибірці об'єму 25 визначено вибірккову середню  $\bar{x} = 18,4$  та емпіричний середнє квадратичне відхилення  $S_x = 0,6$ . Потрібно оцінити невідоме математичне сподівання за допомогою інтервалу надійності з ймовірністю  $\alpha = 0,95$ .

*Розв'язання.* Користуючись табл. 6А додатка А, за  $\gamma = 0,95$  і  $k = n - 1 = 25 - 1 = 24$  визначаємо  $t_\gamma = 2,064$ . Далі обчислюємо надійні межі:

$$\bar{x} - t_\gamma \frac{S}{\sqrt{n}} = 18,4 - \left( \frac{2,064 \cdot 0,6}{\sqrt{25}} \right) = 18,15;$$

$$\bar{x} + t_\gamma \frac{S}{\sqrt{n}} = 18,4 + \left( \frac{2,064 \cdot 0,6}{\sqrt{25}} \right) = 18,65.$$

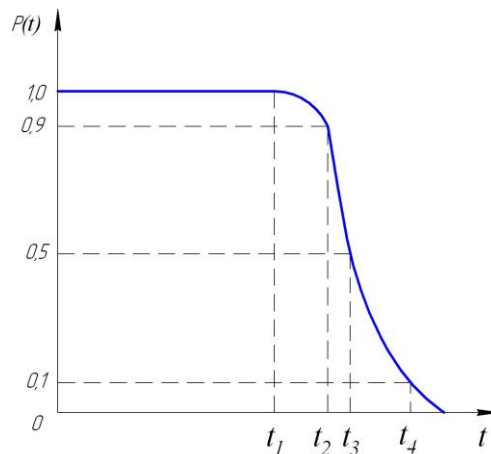
Отже, з надійною ймовірністю 0,95 невідомим параметр  $m$  замкнений в інтервалі  $18,15 < m < 18,65$ .

### 3.4. Показники безвідмовності

Ймовірність безвідмовної роботи – це ймовірність того, що у межах заданого напрацювання відмова об'єкта не виникає.

Ймовірність безвідмовної роботи застосовується як кількісний критерій надійності об'єктів для відновлених та невідновлених об'єктів.

Для режимів зберігання та транспортування використовується аналогічний термін – "ймовірність невникнення відмови". Ймовірність безвідмовної роботи визначається у частках одиниці або у відсотках і змінюється від одиниці до нуля. Наприклад (рис. 3.10), до напрацювання  $t_1$  ймовірність безвідмовної роботи дорівнює 1, а при напрацюванні  $t_4$  – 0,1.



**Рис. 3.10. Функція ймовірності безвідмовної роботи залежно від напрацювання об'єкта**

Ймовірність безвідмовної роботи являє собою безумовну ймовірність того, що в інтервалі від 0 до  $t$  відмови не буде, і визначається за формулою:

$$P(t) = 1 - F(t), \quad (3.54)$$

де  $F(t)$  – функція розподілу напрацювання до відмови.

Ймовірність безвідмовної роботи – безрозмірний показник, при його призначенні або визначенні необхідно вказувати час  $t$  або напрацювання, протягом якого його значення повинно бути не нижче наведеної величини.

Аналітичний, вираз для визначення  $P(t)$ :

$$P(t_0) = 1 - F_0\left(\frac{\bar{T} - t_0}{\sigma}\right),$$

де  $\bar{T}$  – середнє арифметичне значення напрацювання;  $t_0$  – задане значення напрацювання.

Ймовірність безвідмовної роботи за статистичними даними про відмови оцінюється виразом:

$$\hat{P}(t) = 1 - \frac{n(t)}{N_0}, \quad (3.55)$$

де  $\hat{P}(t)$  – статистична оцінка ймовірності безвідмовної роботи;  $N_0$  – кількість об'єктів на початку випробування;  $n(t)$  – кількість об'єктів, що відмовили протягом певного часу.

При великій кількості об'єктів  $N_0$  статистична оцінка практично збігається з ймовірністю безвідмовної роботи  $P(t)$ :  $P(t) = \lim_{n \rightarrow N_0} \hat{P}(t)$

На практиці в деяких випадках зручніше користуватись характеристикою ймовірності відмови.

**Ймовірність відмови** – ймовірність того, що за певних умов експлуатації у заданому інтервалі часу або у межах заданого напрацювання виникає хоча б на одну відмову.

Ймовірність відмови  $Q(t)$  при  $t = 0$  дорівнює 0, змінюється від 0 до 1 і обчислюється до формулою:

$$Q(t) = 1 - P(t). \quad (3.56)$$

Для статистичного визначення ймовірності відмови користуються формулою:

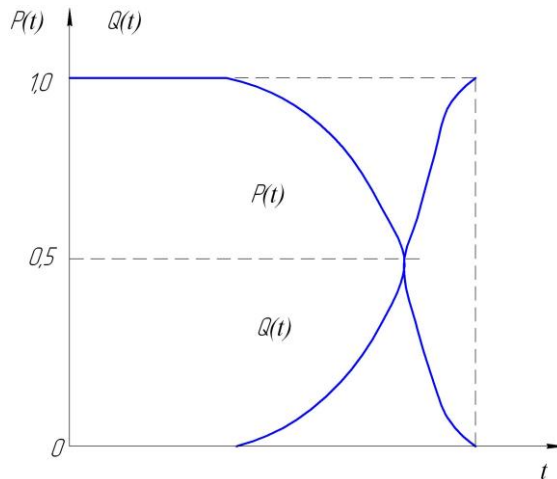
$$Q(t) = 1 - \left(1 - \frac{n(t)}{N_0}\right) = \frac{n(t)}{N_0}, \quad (3.57)$$

де  $n(t)$  – кількість об'єктів, що відмовили за час  $t$ .

**Приклад 3.8.** Для групи тракторів, що експлуатуються, після напрацювання 1000 мото-год отримано  $Q(t) = 0,05$  або  $Q(1000) = 0,05$ . Це

означає, що 5 % тракторів будуть мати відмову раніше, ніж через 1000 мото-год напрацювання.

За формулою (3.55) обчислюють, що при  $P(t)=0,5$   $Q(t)$  також дорівнюватиме 0,5, а графік функції ймовірності відмови (Рис. 3.11) – дзеркальне відображення функції ймовірності безвідмовної роботи.



**Рис. 3.11.** Графіки функцій "безвідмовності"  $P(t)$  та "відмовності"  $Q(t)$

Ймовірність безвідмовної роботи машини залежить від кількості деталей у машині та їх ймовірності безвідмовної роботи, тобто маємо:  $P_m = P_1(t) P_2(t) \dots P_n(t)$  (за правилом множення ймовірностей).

Якщо  $P_1(t) = P_2(t) = \dots = P_n(t)$ , то  $P_m = P_i^n(t)$ ,

що є прикладом практичного застосування теорії ймовірностей і математичної статистики у надійності.

**Середнє напрацювання до відмови** – математичне сподівання (середнє значення) напрацювання до першої відмови.

Для невідновлюваних об'єктів середнє напрацювання до першої відмови рівнозначне середньому напрацюванню до відмови. Значення середнього напрацювання до відмови обчислюють за формулою:

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (3.58)$$

або

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i, \quad (3.59)$$

де  $t_i$  – напрацювання  $i$ -го об'єкта до відмови.

Точність визначення середнього напрацювання до відмови залежить від кількості об'єктів, які випробовуються на надійність.

Інший спосіб точного визначення цієї величини – визначення закону розподілу напрацювання до відмови об'єктів від величини напрацювання. Для цього будується графік розподілу щільності ймовірностей появи величини напрацювання до відмови  $f(t)$ , а потім інтегрується за формулою (3.58) для визначення середнього часу напрацювання об'єктів до відмови.

Найпоширенішими законами розподілу напрацювання до відмови відновлених деталей є експоненціальний, Вейбулла-Гнеденка, нормальний та логарифмічно-нормальний.

Щільність ймовірності експоненціального розподілу визначають так:

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t), \quad (3.60)$$

де  $\lambda$  – параметр розподілу;  $\lambda = 1/\bar{T}$  – обернена величина середнього напрацювання до відмови або інтенсивність відмов.

Ймовірність безвідмовної роботи  $P(t) = \exp(-\lambda t)$  дорівнює:

$$\lambda(t) = \lambda,$$

– математичне сподівання:

$$M(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \frac{1}{\bar{T}} \int_0^{\infty} t \exp\left(-\frac{t}{\bar{T}}\right) dt = \bar{T};$$

– значення дисперсії для експоненціального закону:

$$D(t) = \bar{T}^2.$$

Таким чином, експоненціальний закон розподілу характеризується одним параметром – середнім напрацюванням до відмови.

Щільність ймовірності для розподілу Вейбулла-Гнеденка визначається за рівнянням (3.35).

**Інтенсивність відмов** – умовна щільність ймовірності виникнення відмови невідновлюваного об'єкта, обчислюється для моменту часу, що розглядається за умови, що до цього моменту відмови не було.

Визначення цього терміна ґрунтується на понятті щільності ймовірності відмови у момент  $t$ , яке використовується в теорії ймовірностей і відповідає межі відношення ймовірності відмови в інтервалі часу (від  $t$  до  $t + \Delta t$ ) до величини інтервалу  $\Delta t$  при  $\Delta t \rightarrow 0$ . Фізичне розуміння щільності ймовірності відмови – це ймовірність відмови у досить малій одиниці часу.

За визначенням інтенсивності відмов  $\lambda(t)$  обчислюється співвідношення:

$$P(t) \lambda(t) \Delta t = f(t) \Delta t,$$

де  $P(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи за час  $t$ ;  $f(t)$  – щільність розподілу напрацювання до відмови. З цього співвідношення отримаємо:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (3.61)$$

Ця формула призначена для аналітичного визначення  $\lambda(t)$  за відомим законом розподілу напрацювання до відмови.

Інтенсивність відмов визначається за наближеною статистичною формулою як відношення кількості об'єктів, що відмовили за одиницю часу до середньої їх кількості, працездатної у даний час:

$$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t) \Delta t}, \quad (3.62)$$

де  $N(t)$  – кількість об'єктів, працездатних до моменту напрацювання  $t$ ;  $\Delta t$  – заданий, достатньо малий інтервал часу.

Якщо  $\Delta t$  достатньо мала, а величина  $N(t) - N(t + \Delta t) = \Delta N(\Delta t)$  при цьому велика, то:

$$\hat{\lambda} \approx \frac{\Delta N(\Delta t)}{N(t) \Delta t},$$

де  $\Delta N(\Delta t)$  – кількість об'єктів, що відмовили за час  $\Delta t$ . Після певних перетворень визначається  $\hat{\lambda}(t) = \frac{1}{T}$ .



Інтенсивність відмов можна оцінити і за іншою формулою:

$$\hat{\lambda} \approx \frac{n(\Delta t)}{\bar{N}\Delta t}, \quad (3.63)$$

де  $n(\Delta t)$  – кількість об'єктів, що відмовили в інтервалі часу від  $t - \Delta t / 2$  до  $t + \Delta t / 2$ ;  $\bar{N} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}$  – середня кількість, справно працюючих об'єктів в інтервалі  $\Delta t$ ;  $N_i$  – кількість об'єктів, справно працюючих на початку інтервалу  $\Delta t$ ;  $N_{i+1}$  – кількість об'єктів, справно працюючих у кінці інтервалу  $\Delta t$ .

За формулою для визначення інтенсивності відмов випливає, що вона у момент напрацювання  $t$  дорівнює частці об'єктів, які мають відмови в одиницю напрацювання після напрацювання  $t$ , при цьому ця частка має відношення до кількості об'єктів, що були працездатними у момент напрацювання  $t$ , тобто до  $N(t)$ .

**Потік відмов.** Для відновлюваних об'єктів, у яких ймовірна багаторазова поява відмов, напрацювання на відмову – випадкова подія. Тому елементи, що відмовили, замінюють на справні і працездатність об'єкта відновлюється, тобто спостерігається потік відмов та потік відновлень.

Потік відмов характеризується двома величинами: середньою кількістю відмов  $m_{cep}(t)$  та параметром потоку відмов  $\omega(t)$ .

Якщо випробовують або експлуатують  $N$  об'єктів, що відновлюються (ремонтуються), при цьому фіксується кількість відмов та напрацювань, при яких вони проявляються  $m_1(t), m_2(t), \dots, m_i(t)$ , то загальна кількість відмов становитиме:

$$m_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N m_i(t).$$

*Середня кількість відмов до напрацювання  $t$ , що наближено характеризує потік відмов, визначають за формулою:*

$$\bar{m}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N m_i(t)}{N}, \quad (3.64)$$

де  $N$  – кількість об'єктів, що відновлюються (ремонтуються), за

випробуваннями або експлуатацією яких у заданих умовах проводять спостереження;  $m_i(t)$  – кількість відмов кожного з цих об'єктів до напрацювання  $t$ .

Переходячи до границі, отримують *характеристику потоку відмов*:

$$H(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \bar{m}(t).$$

На практиці часто буває так, що після деякого напрацювання  $t_{np}$  (час припрацювання) функція  $H(t)$  стає лінійною і у будь-якому інтервалі часу  $t - t_{np}$  (у період нормальної експлуатації) набуває вигляду:

$$H(t) = H(t_{np}) + \omega(t)(t - t_{np}), \quad (3.65)$$

де  $\omega(t)$  – параметр потоку відмов (основна характеристика потоку відмов).

*Параметром потоку відмов* називають щільність ймовірності виникнення відмов відновлюваного об'єкта; визначається для певного моменту часу або напрацювання.

Параметр потоку відмов визначають за рівнянням:

$$\omega(t) = \frac{dH(t)}{dt}. \quad (3.66)$$

часто для визначення параметра потоку відмов, на підставі експериментальних даних, користуються наближеною формулою:

$$\hat{\omega}(t) = \frac{\bar{m}(t + \Delta t) - \bar{m}(t)}{\Delta t}, \quad (3.67)$$

Виходячи з цієї формули можна бачити, що параметр потоку відмов – це середня кількість відмов об'єктів, що відновлюються (ремонтуються), за одиницю часу для досить малого проміжку часу  $\Delta t$ . При експоненціальному розподілі напрацювання між відмовами  $\omega(t) = \lambda$  і статистична оцінка параметра потоку відмов визначається за формулою:  $\hat{\omega}(t) = \hat{\lambda}$ . Після періоду припрацювання  $\omega(t) = \omega_{const}$ .

Якщо позначити через  $Q(t)$  ймовірність появи відмови у проміжок напрацювання від  $t_1$  до  $t_2$ , то параметр потоку відмов визначають за формулою:

$$\omega(t) = \frac{dQ(t)}{dt},$$

тобто параметр потоку відмов за час  $t$  дорівнює ймовірності відмови об'єкта в одиницю напрацювання після цього напрацювання  $t$ .

Якщо об'єкт складається з кількох елементів, для яких визначені параметри потоку відмов, загальний параметр потоку відмов обчислюють за виразом:

$$\omega_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^N \omega_i, \quad (3.68)$$

де  $N$  – кількість елементів об'єкта;  $\omega_i$  – параметр потоку відмов  $i$ -го елемента.

Рівняння (3.68) визначає важливе положення, яке широко використовується у розрахунках надійності. Якщо скласти кілька потоків відмов, то параметр сумарного потоку відмов дорівнюватиме сумі параметрів всіх потоків.

Напрацювання на відмову  $\bar{T}$  являє собою середнє значення напрацювання об'єктів, що відновлюються (ремонтуються), між відмовами і визначає, яке напрацювання у середньому припадає на одну відмову (у год, мото-год, кілометрах пробігу, циклах вмикання та ін.). Якщо напрацювання обчислюється в одиницях часу, то може застосовуватись термін "середній час безвідмовної роботи".

**Напрацювання на відмову  $\bar{T}$**  (середній час безвідмовної роботи) – величина, обернена параметру потоку відмов  $\omega(t)$  для напрацювання  $t_1$  до  $t_2$ ; визначається за теоретичними або статистичними формулами:

$$\bar{T} = \frac{t_2 - t_1}{H(t_2) - H(t_1)}; \quad (3.69)$$

$$\hat{T} = \frac{t_2 - t_1}{\bar{m}(t_2) - \bar{m}(t_1)}. \quad (3.70)$$

За рівняннями (3.69) і (3.70) для періоду після припрацювання отримуємо:

$$T = \frac{1}{\omega} = \text{const.} \quad (3.71)$$

Якщо за цих умов при випробуванні  $N$  об'єктів отримано  $m$  відмов, то напрацювання на відмову становитиме:

$$\hat{T} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (3.72)$$

де  $t_i$  – напрацювання  $i$ -го об'єкта між відмовами після періоду припрацювання.

Напрацювання на відмову статистичне визначають відношенням сумарного напрацювання відновлюваних об'єктів до сумарної кількості відмов цих об'єктів. При експоненціальному розподілі напрацювання між відмовами оцінки для напрацювання на відмову визначають за формулою:

$$T = \frac{1}{\lambda}.$$

Значення напрацювання на відмова у загальному випадку залежить від тривалості періоду, протягом якого воно визначається. Це обумовлено несталою характеристикою потоку відмов.

За стандартом напрацювання на відмову визначають як відношення напрацювання відновлюваного об'єкта до математичного, сподівання кількості його відмов протягом цього напрацювання.

Для режимів зберігання і (або) транспортування можна застосовувати аналогічні показники безвідмовності, наприклад, середній час зберігання (транспортування) до відмови; час зберігання (транспортування) на відмову.

### 3.5. Показники довговічності

Довговічність кількісно оцінюється за допомогою двох груп показників: ресурсу як показника, пов'язаного з напрацюванням об'єкта, та терміном служби. Кожна з цих груп має багато різновидів, які дають змогу конкретизувати етапи або характер експлуатації.

**Середній ресурс** (термін служби) – це математичне сподівання ресурсу

(терміну служби).

**Призначений ресурс** – сумарне напрацювання об'єкта, по досягненні якого експлуатація припиняється незалежно від його стану. Цей ресурс найчастіше призначають з міркувань безпеки або економічності. Після відпрацювання призначеного ресурсу двигуни знімають з машин і використовують, наприклад, для сушіння зерна, захисту садів від морозів тощо.

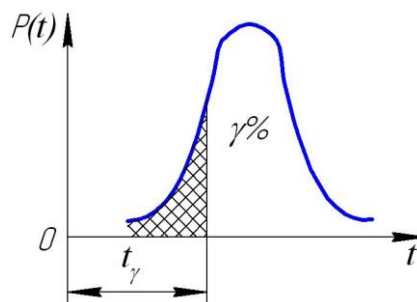
Середній ресурс (термін служби) **до ремонту**  $\bar{t}_{op}$  – середній ресурс від початку експлуатації об'єкта до його першого ремонту; середній ресурс (термін служби) **між ремонтами**  $\bar{t}_{mp}$  – між суміжними ремонтами об'єкта; середній ресурс (термін служби) **до списання**  $\bar{t}_{cn}$  – від початку експлуатації до його списання, обумовленого граничним станом.

Гамма-відсотковий ресурс  $t_\gamma$  – напрацювання, протягом якого об'єкт не досягне граничного стану із заданою ймовірністю  $\gamma$  відсотків.

Гамма-відсотковий ресурс має велике практичне значення, оскільки в результаті неминучого розсіювання довговічності сільськогосподарської техніки при навантаженнях в умовах експлуатації, що змінюються, їх довговічність – величина статистична. Визначається експериментально за даними про довговічність великої групи об'єктів.

Гамма-відсотковий ресурс має і перевищує у середньому обумовлену кількість  $\gamma$  відсотків виробів даного типу.

Заданий відсоток об'єктів  $\gamma$  – регламентована ймовірність. Наприклад при  $\gamma = 90\%$ , відповідний ресурс називають 90%-ним ресурсом. На рис. 3.10, де 90%-ний ресурс відповідає  $t_2$ . Ілюстрація змісту гамма-відсотковою ресурсу  $t_\gamma$  наведено на рис. 3.12.



**Рис. 3.12.** Гамма-відсотковий ресурс при роботі об'єктів

Якщо ресурс виробів має розподіл зі щільністю ймовірності  $f(t)$ , то гамма-відсотковий ресурс  $t_\gamma$  обчислюють за рівнянням:

$$P(t_\gamma) = \frac{\gamma}{100}. \quad (3.73)$$

Якщо  $\gamma = 50\%$ , то це медіанний (середній) ресурс  $t_{me}$  (рис. 3.10, де  $t_{me} = t$ ).

У випадку розподілу Вейбулла-Гнеденка рівняння (3.73) приймає вигляд:

$$\exp\left[-\left(\frac{t_\gamma}{t_0}\right)^b\right] = \frac{\gamma}{100}.$$

Логарифмуючи це рівняння, отримують:

$$\left(\frac{t_\gamma}{t_0}\right)^b = -\ln \frac{\gamma}{100},$$

звідки

$$t_\gamma = t_0^b \sqrt[b]{-\ln \frac{\gamma}{100}}. \quad (3.74)$$

Для експоненціального розподілу при  $t_0 = \bar{t}$  і  $b = 1$  застосовують рівняння:

$$t_\gamma = t_0 \left(-\ln \frac{\gamma}{100}\right) = \bar{t} \left(-\ln \frac{\gamma}{100}\right). \quad (3.75)$$

Якщо, наприклад,  $\gamma = 90\%$ , то за рівнянням (3.72)  $t_{90} = 0,105\bar{t}$ .

Частина об'єктів (рис. 3.12), які вичерпали свій ресурс до певного напрацювання, визначається заштрихованою частиною площі під кривою до ординати даного напрацювання (при цьому вся площа під кривою приймається за 100%).

Якщо спостереження (випробування) вести, поки всі 100% об'єктів вичерпають свій ресурс (досягнуть граничного стану) – до напрацювання  $t_{\gamma=0}$  то за їх результатами нескладно визначити середній ресурс. Тривалість випробувань (спостережень) при цьому буде максимальною.

Наприклад, середній доремонтний ресурс  $t_{dp}$  сільськогосподарських тракторів та їх агрегатів повинен досягати 6...8 тис. мото-год. При цьому

довговічність окремих тракторів певної марки може значно перевищувати середній доремонтний ресурс. Це потребує для завершення випробувань (спостережень) в умовах експлуатації з вичерпуванням ресурсу всіх досліджуваних тракторів п'ять і більше років.

Гамма-відсотковий ресурс як показник оцінки довговічності сприяє скороченню часу випробувань (спостережень) тракторів або їх агрегатів, оскільки випробування (спостереження) приводять до вичерпування ресурсу порівняно невеликої кількості (10...20%) машин. При цьому значення гамма-відсоткового ресурсу відповідно рівні  $t_{\gamma_1}$  і  $t_{\gamma_2}$  ( $\gamma_1 = 90\%$  та  $\gamma_2 = 80\%$ ).

Чим більше встановлена  $\gamma$ , тим менше тривалість випробувань (спостережень). Проте для оцінки ресурсу з певною регламентованою точністю при зменшенні тривалості випробувань потрібно збільшити кількість об'єктів, що випробовуються.

За гамма-відсотковим ресурсом оцінюють якість нових і відремонтованих машин та їх агрегатів.

Для тракторів, комбайнів та іншої нової й відремонтованої сільськогосподарської техніки значення  $\gamma_1 = 80\%$  ( $t_{\gamma=80}$ ), тобто у 80% машин ресурс при випробуванні або спостереженні повинен перевищувати встановлену величину  $t_{\gamma=80}$ .

Розрахунок 80%-го ресурсу виконують так.

Обчислюють послідовно при кожному напрацюванні  $t_i$  значення кривої спадання (ймовірності безвідмовної роботи) за формулою:

$$P(t_i) = \frac{N+1-i}{N+1}, \quad (1 \leq i \leq N). \quad (3.76)$$

Якщо серед значень кривої спадання є значення  $P(t_i) = 0,8$ , оцінка 80%-го ресурсу  $t_{0,8} = t_i$  у протилежному випадку  $\hat{t}_{0,8}$  визначають за кривою спадання або методом лінійної інтерполяції за формулою:

$$\hat{t}_{0,8} = t_{i-1} + (t_i - t_{i-1}) \frac{P(t_{i-1}) - 0,8}{P(t_{i-1}) - P(t_i)}. \quad (3.77)$$

Для розрахунку оцінок довговічності  $\hat{T}$  середнього квадратичного відхилення ресурсу  $\sigma_t$  та коефіцієнта варіації  $\bar{V}$  використовують відповідні формули.

**Приклад 3.9.** При випробуванні 13 двигунів їх ресурс був вичерпаний при напрацюваннях  $t_1 = 3000$ ;  $t_2 = 3500$ ;  $t_3 = 3700$ ;  $t_4 = 4000$ ;  $t_5 = 4200$ ;  $t_6 = 4300$ ;  $t_7 = 4500$ ;  $t_8 = 4800$ ;  $t_9 = 4900$ ;  $t_{10} = 5100$ ;  $t_{11} = 5400$ ;  $t_{12} = 5500$ ;  $t_{13} = 6000$  мото-год.

Визначити кількісні оцінки характеристик довговічності двигунів.

*Розв'язання.* Значення кривої спадання обчислюють за формулою (3.76):

$$P(3000) = \frac{13+1-1}{13+1} = 0,9286;$$

$$P(3500) = \frac{13+1-2}{13+1} = 0,8571;$$

$$P(3700) = \frac{13+1-3}{13+1} = 0,7857 \text{ і т.д.}$$

За цими даними  $P(3700) < 0,8 < P(3500)$ . За формулою (3.77) визначають:

$$t_{0,8} = 3500 + (3700 - 3500) \frac{0,8571 - 0,8}{0,8571 - 0,7857} = 3660 \text{ мото-год.}$$

Користуючись відповідними формулами обчислюють:

$$\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i = \frac{1}{13} (3000 + 3500 + 3700 + 4000 + 4200 + 4300 +$$

$$+ 4500 + 4800 + 4900 + 5100 + 5400 + 5500 + 6000) = 4530 \text{ мото-год;}$$

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2} = \sqrt{\frac{1}{12} (1530^2 + 1030^2 + 830^2 + 330^2 - 230^2 +$$

$$+ 300^2 + 270^2 + 370^2 + 570^2 + 870^2 + 970^2 + 1470^2)} = 860 \text{ мото-год;}$$

$$\bar{V} = \frac{\sigma_t}{\bar{t}} = \frac{860}{4530} = 0,19$$

**Гамма-відсотковий термін служби** – календарна тривалість експлуатації, протягом якої об'єкт не досягатиме граничного стану із заданою



ймовірністю  $\gamma\%$ .

Певним чином довговічність характеризується й такими показниками як гарантійне напрацювання (ресурс) і термін гарантії.

Конкретні значення кількісних показників довговічності задають залежно від призначення, особливостей застосування об'єктів та впливу відмов на безпеку роботи. Для встановлення їх проводять спеціальні розрахунки на міцність та ресурсні випробування прототипів і дослідних зразків об'єктів.

### 3.6. Показники ремонтпридатності та збережуваності

Ремонтпридатність має такі одиничні кількісні показники.

**Ймовірність відновлення у заданий час**, або ймовірність вчасного відновлення – це ймовірність часу виявлення, пошуку причини та усунення наслідків відмови, який не перевищуватиме заданого.

**Середній час відновлення** – математичне сподівання часу відновлення працездатності. При наявності статистичних даних про тривалість відновлення для об'єктів, які відновлюються (ремонтуються), середній час відновлення  $\bar{T}_e$  визначають за формулою:

$$\bar{t}_e = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_{ei}, \quad (3.78)$$

де  $m$  – кількість відмов об'єктів, виявлених і усунених;  $t_{ei}$  – час усунення  $i$ -ої відмови.

Якщо розглядати всі проміжки  $t_i$  у порядку зростання індексу  $i$ , то ці величини визначають як потік відновлення, який найчастіше має логарифмічно нормальний розподіл. У першому наближенні потік відновлення можна вважати простішим з параметром  $\omega = 1/\bar{t}_e$ .

Як характеристики розсіювання часу відновлення, а також для інших випадкових величин використовуються також дисперсія  $\sigma_{t_e}^2$  та середнє квадратичне відхилення  $\sigma_{t_e}$ .

При застосуванні статистичних даних значення емпіричної дисперсії та

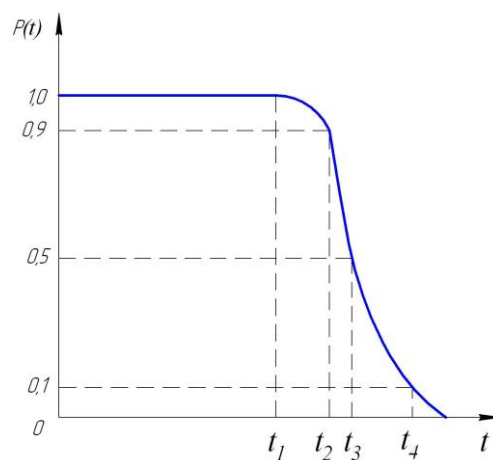
середнє квадратичне відхилення визначають за формулами (3.17), (3.18), (3.22) і (3.23).

Збережуваність кількісно оцінюється за допомогою таких показників, які вимірюються у роках, місяцях та інших одиницях.

**Середній термін збережуваності** – це математичне сподівання терміну збережуваності.

**Гамма-відсотковий термін збережуваності** – термін збережуваності, який досягається об'єктом із заданою ймовірністю процентів.

На рис. 3.13 90%-ний термін збережуваності об'єктів, що не відновлюються (не ремонтуються), становить  $\tau_1$ , а середній термін збережуваності –  $\tau_2$ . При зберіганні протягом терміну  $\tau_3$  виходить з ладу 80% об'єктів.



**Рис. 3.13. Гамма-відсотковий строк збережуваності при зберіганні об'єктів**

Ці показники при необхідності фіксують у нормативно-технічній документації, але без зміни терміну зберігання, який також є у технічних вимогах до об'єкта.

### **3.7. Комплексні показники надійності**

**Коефіцієнт готовності  $K_r$**  – ймовірність того, що об'єкт виявиться працездатним у довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких використання об'єкта за призначенням не передбачається.

Цей коефіцієнт статистично визначається як відношення сумарного часу перебування досліджуваних об'єктів у працездатному стані до добутку кількості цих об'єктів  $N$  на тривалість експлуатації (за винятком простоїв при проведенні запланованих ремонтів і технічного обслуговування):

$$\hat{K}_r = \frac{\sum_{i=1}^N \xi_i}{NT}, \quad (3.79)$$

де  $\xi_i$  – сумарний час перебування  $i$ -го об'єкта у працездатному стані ( $i = 1, 2, \dots, N$ );  $T = T_{окс} + T_{\epsilon}$  – тривалість експлуатації (роботи), яка складається з інтервалів часу роботи і відновлення (усунення відмов), що чергуються.

При порядку обслуговування, який передбачає негайний початок відновлення об'єкта, що відмовив, тобто, при усталеному режимі експлуатації коефіцієнт готовності обчислюють за формулою:

$$K_r = \frac{T_{екс}}{T_{екс} + \bar{T}_{\epsilon}} = \frac{1}{1 + \frac{\bar{T}_{\epsilon}}{T_{екс}}} = \frac{1}{1 + \rho}, \quad (3.80)$$

де  $T$  – напрацювання на відмову, яке характеризує безвідмовність;  $\bar{T}_{\epsilon}$  – середній час відновлення, характеризує ремонтпридатність;  $T$  і  $\bar{T}_{\epsilon}$  – визначають за формулами (3.72) і (3.78). Так за формулою (3.80) коефіцієнт готовності – це та частка часу роботи від сумарного часу, який витрачається на роботу та відновлення. Характеризує водночас дві різні властивості об'єкта: його безвідмовність і ремонтпридатність, а тому є комплексним показником.

**Коефіцієнт технічного використання  $K_{тв}$**  – відношення математичного сподівання часу перебування об'єкта в працездатному стані за певний період експлуатації до суми математичних сподівань часу перебування об'єкта в працездатному стані; часу простоїв, обумовлених технічним обслуговуванням, і часу ремонту за той же період експлуатації.

Цей коефіцієнт статистичне визначається як відношення сумарного часу перебування досліджуваних об'єктів у працездатному стані до добутку кількості об'єктів, що спостерігаються на заданий час експлуатації:

$$\hat{K}_{\text{ТВ}} = \frac{\sum_{i=1}^N \xi_i}{T}, \quad (3.81)$$

де  $T = T_{\text{експл}} + t_{\text{ТО}} + t_p$  – тривалість експлуатації, яка складається з інтервалів часу роботи, технічного обслуговування і ремонту.

Якщо заданий час експлуатації  $t_{\text{експл}}$  для кожного об'єкта різний, то для підрахунку величини  $K_{\text{ТВ}}$  застосовується формула:

$$\hat{K}_{\text{ТВ}} = \frac{t_{\Sigma}}{t_{\Sigma} + t_p + t_{\text{ТО}}} = \frac{1}{1 + \frac{t_{\text{рем}} + t_{\text{обсл}}}{t_{\Sigma}}}, \quad (3.82)$$

де  $t_{\Sigma}$  – сумарне напрацювання всіх об'єктів;  $t_p$  – сумарний час простоїв через плановий і позаплановий ремонт всіх об'єктів;  $t_{\text{ТО}}$  – сумарний час простоїв через планове і позапланове технічне обслуговування всіх об'єктів (час простоїв через організаційні причини тут не враховується).

Якщо поділити вираз (3.79) на загальну кількість відмов  $m$ , які спостерігаються певний період часу, то:

$$K_{\text{ТВ}} = \frac{t_{\text{екс}}}{t_{\text{екс}} + t_{\text{в}} + t_{\text{ТО}}} = \frac{1}{1 + \frac{t_{\text{в}}}{t_{\text{екс}}} + \frac{T_{\text{ТО}}}{T_{\text{екс}}}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{\Gamma}} + \frac{t_{\text{ТО}}}{t_{\text{екс}}}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{\Gamma}} + K_{\Pi}}, \quad (3.83)$$

де  $T_{\Pi}$  – середній час, який витрачається при технічному обслуговуванні (профілактиці) на усунення однієї відмови;  $K_{\Pi} = t_{\text{ТО}} / t_{\text{екс}}$  – коефіцієнт профілактики.

Тому, значення коефіцієнта  $K_{\text{ТВ}}$  знаходиться в оберненій залежності до відношень  $t_{\text{в}}/t_{\text{екс}}$  і  $t_{\text{ТО}}/t_{\text{екс}}$  або у прямій – до значення коефіцієнта  $K_{\Gamma}$ .

Коефіцієнт технічного використання  $K_{\text{ТВ}}$  – узагальнений комплексний показник надійності і є ширшою характеристикою працездатності ніж коефіцієнт готовності, оскільки враховує всі простої, пов'язані з технічним обслуговуванням і ремонтом об'єкта.

**Коефіцієнт оперативної готовності**  $K_{\text{ог}}$  – ймовірність того, що об'єкт, перебуваючи у режимі очікування, буде працездатним у довільний момент часу, і, починаючи з цього моменту, буде працювати безвідмовно протягом

заданого інтервалу часу.

Режим очікування – це перебування об'єкта при повному або полегшеному навантаженні без виконання основних (робочих) функцій. При цьому можливо виникнення відмов, які повинні бути усунені з відновленням працездатності об'єкта для виконання необхідного завдання. Потрібно також, щоб у разі необхідності об'єкт був працездатним.

Якщо ймовірність безвідмовної роботи об'єкта  $P(t_{екс})$  протягом часу  $t_p$  не залежить від моменту початку роботи  $t$ , то величину коефіцієнта оперативної готовності визначають за формулою:

$$K_{ог} = K_r P(t_{екс}). \quad (3.84)$$

Цей коефіцієнт характеризує надійність техніки, призначеної для збирання врожаю, кормоприготувальних машин тваринницьких комплексів та ін.

До показників, які враховують сумарну і питому сумарну трудомісткість (вартість) технічного обслуговування і ремонту, і є комплексними показниками надійності, належать такі:

– середня сумарна трудомісткість технічного обслуговування – математичне сподівання сумарних затрат праці на проведення технічного обслуговування за певний період експлуатації;

– середня сумарна трудомісткість ремонту – математичне сподівання сумарних затрат праці на всі види ремонту об'єктів за певний період експлуатації;

– середня сумарна вартість технічного обслуговування (ремонту) – математичне сподівання сумарних витрат на проведення технічного обслуговування (на всі види ремонту) об'єкта за певний період експлуатації.

Для цих показників (разом з їх середніми значеннями) застосовують питомі величини, які визначають як відношення середніх сумарних величин до відповідного математичного сподівання сумарного напрацювання об'єкта за певний період експлуатації.

Важливими показниками є коефіцієнт відновлення  $K_v$  і коефіцієнт

### відновлення ресурсу $K_{вр}$ :

$t_{відн}$  до середнього ресурсу до першого капітального ремонту (нових об'єктів)  
 $t_{нов}$ :

$$K_B = \frac{\bar{t}_{відн}}{\bar{t}_{нов}} 100\% ;$$
$$K_{вр} = \frac{\bar{t}_{мп}}{\bar{t}_{др}} 100\% , \quad (3.85)$$

де  $\bar{t}_{відн}$ ,  $\bar{t}_{нов}$ , - відповідно середній ресурс капітально-відремонтованих і нових об'єктів;  $T_{мп}$  і  $T_{др}$  – відповідно середній міжремонтний і доремонтний ресурси.

Для співставлення кількісних показників надійності агрегатів нових і капітально відремонтованих тракторів визначають величину  $(t_{відр}/t_{нов}) 100\%$  (за гамма-відсотковим ресурсом) або для оцінки рівня безвідмовності діленням середнього напрацювання на відмову відповідної групи складності капітально відремонтованих агрегатів чи систем на відповідний показник агрегатів нових машин. Якщо відома середня кількість відмов нових і капітально відремонтованих тракторів за певне, встановлене напрацювання, визначають величину:

$$\left( m_{сер}^{нов} / m_{сер}^{відр} \right) 100\% .$$

Показники експлуатаційної технологічності характеризують затрати праці, а також кошти на підготовку сільськогосподарської техніки до експлуатації, на планові технічні обслуговування в процесі експлуатації, на роботи після експлуатації техніки (зокрема, встановлення на зберігання, консервацію тощо).

Показники ремонтної технологічності характеризують пристосованість конструкції об'єкта та його складових (деталей, складальних одиниць та ін.) до ремонтних робіт, які виконуються для відновлення їх працездатності на ремонтних підприємствах.

До цих показників відносять: середній час ремонту; ймовірність його закінчення у заданий час; середні абсолютні витрати на ремонт техніки певного

виду; відносні витрати, віднесені до одиниці часу перебування машини в експлуатації (для деталей, складальних одиниць та ін.) або до одиниці виробленої продукції (для верстатів, машин та ін.). Додаткові показники ремонтпридатності у сполученні з основними дозволяють конкретизувати окремі вимоги до ремонтпридатності.

Показники, які характеризують загальну технічну досконалість конструкції машини, у тому числі й конструктивні рішення, такі.

**Коефіцієнт застосованості конструктивних елементів** – відношення суми кількості найменувань типорозмірів стандартизованих, нормалізованих, запозичених та придбаних деталей та вузлів до загальної кількості найменувань конструктивних елементів об'єкта.

**Коефіцієнт уніфікації** визначає, яку частину використаних деталей об'єкта уніфіковано. Наприклад, коефіцієнт уніфікації двигунів ЯМЗ близько 0,9.

**Коефіцієнт конструктивної послідовності** – відношення кількості найменувань раніше освоєних складальних одиниць і деталей до загальної кількості найменувань конструктивних елементів об'єктів.

Послідовність значно спрощує організацію й технологію виготовлення машин і дає змогу раціональніше вирішувати питання їх експлуатації і ремонту.

Перераховані коефіцієнти належать до найважливіших показників стандартизації.

**Коефіцієнт взаємозамінності** – відношення кількості взаємозамінних елементів до загальної кількості конструктивних елементів машин.

Раціональний рівень взаємозамінності конструктивних елементів у машині – важливий засіб зниження затрат праці й коштів при усуненні відмов.

**Коефіцієнт кратності обслуговування та термінів служби конструктивних елементів** – відношення відповідної кількості елементів машин періодичності обслуговувань і ремонту базового конструктивного елемента до загальної кількості найменувань конструктивних елементів.

Дотримання вимог і кратності або рівної періодичності й строків служби

елементів машини значно скорочує сумарний час простою машини та витрати на її обслуговування і ремонт.

**Коефіцієнт загальної контролепридатності** – відношення кількості конструктивних елементів, пристосованих до контролю різними способами технічного стану машини в процесі експлуатації, до загальної кількості елементів машини, контроль яких необхідний під час експлуатації.

Показники, які характеризують пристосованість конструкції машини до профілактичних і відновлюваних робіт, такі.

**Коефіцієнт зручності поз** – відношення загальної кількості зручних поз при виконанні робіт до загальної кількості можливих поз.

**Коефіцієнт доступності** враховує сумарну трудомісткість баластних робіт (підготовка машини, необхідні розбірно-складальні роботи тощо), які необхідно виконати при усуненні відмов і технічному обслуговуванні.

**Коефіцієнт маси демонтованих складальних одиниць** характеризує легкознімність конструкції машини. Його визначають з відношення кількості складальних одиниць, які демонтуються і маса їх не перевищує встановленого граничного значення при демонтажі вручну, до загальної кількості одиниць машини, що демонтуються при усуненні відмов, технічному обслуговуванні та ремонті в процесі експлуатації.

### **3.8. Розрахунки показників надійності**

Розрахунки об'єктів на надійність призначені для визначення кількісних показників надійності, їх проводять на етапах розробки, створення та експлуатації об'єктів (машин, обладнання, пристроїв).

Для розрахунку показників надійності сільськогосподарської техніки користуються державними і галузевими стандартами, методичними вказівками та Інструкціями щодо оцінювання надійності машин.

На етапі проектування розрахунок надійності виконують з метою прогнозування очікуваної надійності даного об'єкта.



При випробуваннях й експлуатації розрахунки на надійність необхідні для оцінювання кількісних показників надійності. Результати розрахунків характеризують надійність об'єктів, які пройшли випробування або використовуються у певних експлуатаційних умовах.

На основі цих розрахунків визначають слабкі елементи об'єкта, намічають основні напрямки щодо підвищення їх надійності, оцінюють надійність об'єкта і вплив на неї різних факторів.

При цьому завдання полягає у визначенні одної або кількох кількісних характеристик надійності сільськогосподарської техніки.

Наприклад, на основі розрахунків машини та її елементів на надійність визначають ймовірність безвідмовної роботи, коефіцієнти готовності, технічного використання тощо, а потім вказують шлях покращання отриманих показників надійності. При цьому не всі показники надійності можна розрахувати, деякі з них визначають експериментально.

Загальну схему розрахунку машини на надійність наведено на рис. 3.14.

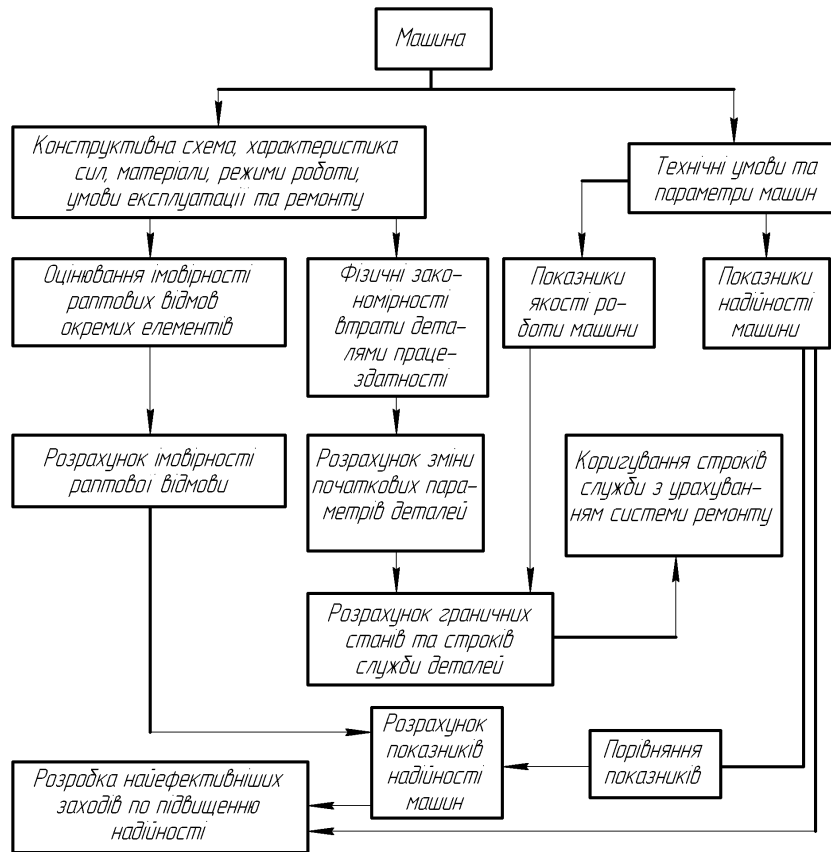
Ця схема стосується випадку, коли втрата машиною працездатності пов'язана як з поступовими (зносними), так і з раптовими відмовами.

Початкові дані для розрахунку такі: конструкції елементів; характеристики сил; матеріали, які застосовуються; режими роботи; умови експлуатації та ремонту; інші параметри, якими визначається працездатність сільськогосподарської техніки.

**Оцінювання ймовірності безвідмовної роботи об'єктів.** Ймовірність безвідмовної роботи об'єкта (машини)  $P_0(t)$  при сумісній дії поступових (зносних) і раптових відмов розраховується за формулою множення ймовірностей:

$$P_0(t) = P_z(t) P_p(t), \quad (3.86)$$

де  $P_z(t)$  – безвідмовність при зносних відмовах;  $P_p(t)$  – те ж саме, при раптових відмовах.



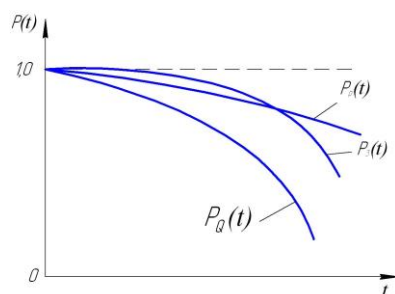
**Рис. 3.14. Загальна схема розрахунку машини на надійність**

Наприклад, якщо розглянути гідроагрегати з позиції кількості ущільнень, які найчастіше призводять до раптових відмов, і з врахуванням поступових (зносних) відмов рухомих з'єднань, то за формулою (3.86) у найгіршому становищі серед інших агрегатів гідросистеми перебувають гідронасоси, які мають велику кількість гумових ущільнень. Якщо відомі параметри законів розподілу ( $\bar{T}$ ,  $\sigma$ ,  $\lambda$ ) можна розрахувати ймовірність безвідмовної роботи об'єкта або його елементів.

У випадку, коли зносні відмови підпорядковуються нормальному закону розподілу, а раптові – експоненціальному, формула (3.85) матиме такий вигляд:

$$P_0(t) = \frac{e^{-\lambda t}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} \exp\left(-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}\right) dt, \quad (3.86)$$

У початковий період роботи об'єкта основний вплив на  $P_0(t)$  чинять раптові відмови, а потім зростає вплив зносних відмов (рис. 3.15).

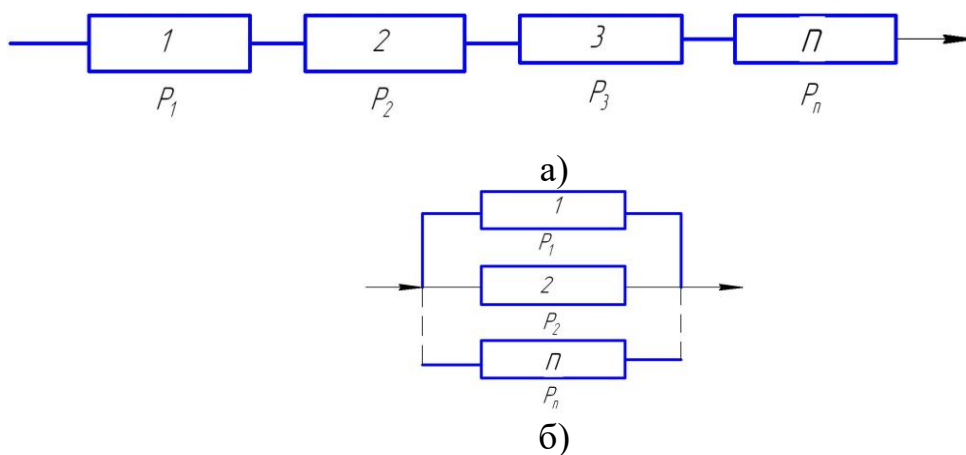


**Рис. 3.15. Ймовірність безвідмовної роботи при сумісній дії зносних та раптових відмов**

Сільськогосподарська техніка – це складні об'єкти (системи), які складаються з окремих, взаємопов'язаних елементів. Відмова будь-якого елемента впливає на працездатність об'єкта, оскільки це залежить від працездатності елементів та від способу їх з'єднання у систему.

У надійності розрізняють два основних види з'єднань елементів – послідовне і паралельне.

Під послідовним з'єднанням елементів (рис. 3.16, а) у надійності розуміють таке з'єднання, при якому відмова одного будь-якого елемента спричинює відмова усієї системи. Цій умові підлягають більшість приводів і механізмів передач машин, оскільки вихід з ладу будь-якої шестерні, підшипника, електродвигуна тощо, викликають втрату працездатності всієї системи.



**Рис. 3.16. Схема з'єднань елементів складних систем: а – послідовне, б – паралельне**

Якщо відома ймовірність безвідмовної роботи  $i$ -го елемента  $P_i(t)$ , з урахуванням виду з'єднання елементів безвідмовність  $P(t)$  складної системи можна підрахувати за формулами теорії ймовірностей.

Ймовірність безвідмовної роботи системи з послідовним з'єднанням елементів. У цьому випадку ймовірність безвідмовної роботи визначається за формулою множення ймовірностей незалежних подій і дорівнює добутку ймовірностей безвідмовної роботи елементів:

$$P_{\text{носл}}(t) = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n. \quad (3.88)$$

Ймовірність відмови послідовного елемента визначають за виразом:

$$Q_{\text{носл}} = 1 - P_{\text{носл}}(t). \quad (3.89)$$

При однаковій ймовірності безвідмовної роботи елементів формула матиме вигляд:

$$P_{\text{носл}}(t) = p_i^n. \quad (3.90)$$

Так, якщо система складається з 50 послідовно з'єднаних елементів ( $n = 50$ ) з ймовірністю безвідмовної роботи кожного елемента за певний проміжок часу  $P_i = 0,99$ , то ймовірність безвідмовної роботи всієї системи становитиме:

$$P_{\text{носл}}(t) = 0,99^{50} \approx 0,6.$$

Для випадку виникнення раптових відмов, які підпорядковуються експоненціальному закону розподілу,  $p_1 = \exp(-\lambda_1 t)$ ;  $p_2 = \exp(-\lambda_2 t)$ ; ...;  $p_n = \exp(-\lambda_n t)$ . Виконавши відповідні розрахунки за формулою (3.91) отримують:

$$P_{\text{носл}}(t) = \exp(-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t) = \exp(-\lambda_0 t). \quad (3.91)$$

Ймовірність безвідмовної роботи складної системи також підпорядковується експоненціальному закону з таким параметром:

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

Ймовірність відмови становить:

$$Q_{\text{носл}} = 1 - \exp(-\lambda_0 t).$$

При експоненціальному розподілі часу безвідмовної роботи параметр

потоків відмов і напрацювання на відмова для відновлюваних об'єктів відповідно дорівнює:

$$\omega(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i(t);$$

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

де  $\omega_i(t)$  і  $T_i(t)$  – відповідно параметр потоку відмов і напрацювання на відмова  $i$ -го елемента протягом часу (напрацювання)  $t$ .

Зокрема, якщо  $\omega_i(t) = \text{const}$ , то і  $\omega(t) = \text{const}$ .

*Ймовірність безвідмовної роботи при паралельному з'єднанні елементів.*

Паралельним з'єднанням (рис. 3.16, б) називається сукупність елементів, працездатність якої порушується тільки за умов відмови всіх паралельних елементів сукупності.

Паралельне з'єднання елементів у системи є основою резервування. Резервні елементи, постійно приєднані до основних, перебувають у тому ж режимі, що і основний елемент, тобто резерв навантажений.

У даному випадку буде постійне резервування, при якому резервні елементи беруть участь у функціонуванні об'єкта на рівні з основними.

Ймовірність безвідмовної роботи при навантаженому резервуванні підраховують так.

Якщо  $q_1, q_2, \dots, q_n$  ймовірності появи відмови кожного з елементів протягом часу  $t$ , то відмова системи у цьому випадку паралельного з'єднання виникає за умов відмови всіх елементів.

Ймовірність сумісної появи всіх відмов  $Q(t)$  за формулою множення ймовірностей дорівнює:

$$Q_{\text{нар}}(t) = q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_n = \prod_{i=1}^n q_i. \quad (3.92)$$

Оскільки  $P_{\text{нар}}(t) + Q_{\text{нар}}(t) = 1$

То маємо формулу безвідмовності системи з паралельним з'єднанням

елементів:

$$P_{нар}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i), \quad (3.93)$$

Наприклад, якщо ймовірність відмови кожного з трьох елементів  $q_i = 0,1$ , то  $P_{нар}(t) = 1 - 0,1^3 = 0,999$ .

Автомобіль (або трактор) має у системі освітлення й сигналізації фари, підфарники і габаритні ліхтарі, з'єднані методом резервування (по два вироби у кожному ланцюзі). Відмова будь-якого одного об'єкта (наприклад, фари) не викликає відмови освітлення, експлуатація автомобіля або трактора триває до повернення у гараж і усунення там відмов. У цьому випадку ймовірність безвідмовної роботи системи освітлення й сигналізації визначається за формулою (3.93).

Щоб визначити надійність гальмівної системи автомобіля, якщо відомо, що ножне гальмо  $P_n = 0,98$ , а ручне  $P_p = 0,97$ , також застосовують формулу (3.89):

$$Q_n = 1 - P_n = 1 - 0,98 = 0,02;$$

$$Q_p = 1 - P_p = 1 - 0,97 = 0,03.$$

Ймовірність відмови гальмівної системи становить:

$$Q_m = Q_n Q_p = 0,02 \cdot 0,03 = 0,0006.$$

Ймовірність безвідмовної роботи визначають за формулою:

$$P_m = 1 - Q_n Q_p = 1 - (1 - P_n)(1 - P_p) = 1 - (1 - 0,98)(1 - 0,97) = 0,9994.$$

Для окремого випадку експоненціального закону розподілу відмов розрахункові формули для паралельного з'єднання елементів можна представити у вигляді:

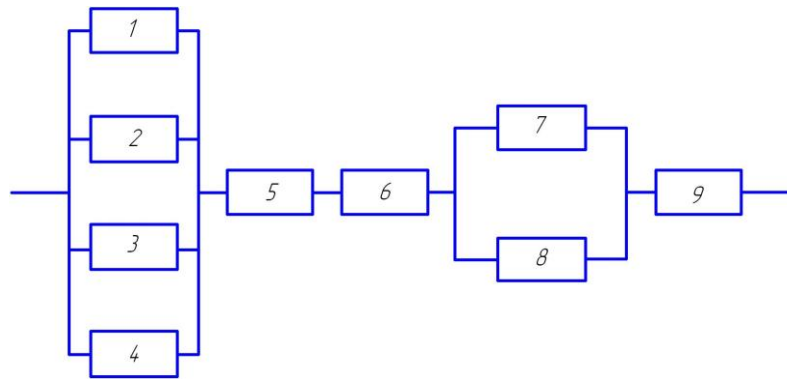
$$P_{нар} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \exp(-\lambda_i t)); \quad (3.94)$$

$$q_{нар} = \prod_{i=1}^n (1 - \exp(-\lambda_i t)). \quad (3.95)$$

На практиці часто застосовують структурні схеми, які складаються з  $m$

паралельних ланцюгів, кожний з яких має послідовно з'єднані елементи. В цьому випадку ймовірність безвідмовної роботи обчислюють з використанням формул для паралельно-послідовних схем.

**Приклад 3.10.** Визначити ймовірність безвідмовної роботи автомобіля, якщо ймовірність безвідмовної роботи кожного елемента становить 0,9 (рис. 3.17).



**Рис. 3.17.** Структурна схема автомобіля

За схемою автомобіль має чотири паралельно з'єднаних елемента (чотири циліндри двигуна), а з ними послідовно з'єднуються два елемента 5 та 6 трансмісії (наприклад, коробка передач і задній міст).

Двом різним системам гальмування відповідає два паралельних елемента 7 та 8, включених послідовно з елементами 5 та 6. Останній, теж з послідовним включенням, елемент 9 належить до системи живлення.

*Розв'язання.* Для визначення безвідмовної роботи при паралельному і послідовному з'єднаннях елементів застосовують формули (3.93) і (3.89).

Оскільки у даному прикладі ймовірності безвідмовної роботи елементів однакові, ймовірності безвідмовної роботи паралельно з'єднаних елементів розраховують за формулою:

$$P_{\text{пар}} = 1 - (1 - p_i)^n,$$

тому ймовірність безвідмовної роботи двигуна:

$$P_{1-4} = 1 - (1 - p_1)^4,$$

ймовірність безвідмовної роботи системи гальмування:

$$P_{7-8} = 1 - (1 - p_7)^2.$$

Так, ймовірність безвідмовної роботи автомобіля:

$$P_a = p_{1-4}p_5p_6p_{7-8}p_9 = [1 - (1 - p_1)^4]p_5p_6[1 - (1 - p_7)^2]p_9 = \\ = [1 - (1 - 0,9)^4]0,9 \cdot 0,9[1 - (1 - 0,9)^2]0,9 = 0,72$$

За відсутністю ввімкнених паралельно елементів ймовірність безвідмовної роботи дорівнюватиме:

$$P_a = p_1p_5p_6p_7p_9 = p_1^5 = 0,9^5 \approx 0,6,$$

тобто буде значно нижчою.

**Граничні стани (зноси) деталей, з'єднань складальних одиниць та механізмів машин.** Обґрунтування і розрахунок граничного стану дозволяють повніше використати кожен деталь, з'єднання, складальну одиницю і механізм машини при мінімальних витратах коштів.

При знижених граничних станах ресурс сільськогосподарської техніки не використовується повністю, а при завищених можуть виникнути аварійні відмови, зрости простої сільськогосподарської техніки і витрати на її експлуатацію та ремонт.

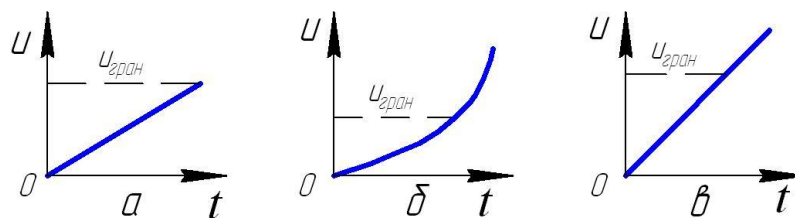
Зміна стану з'єднань характеризується переважно зносом деталей, а тому граничний стан з'єднань встановлюється за критеріями (ознаками) граничного зносу.

Пропонується розглянути три критерія граничного стану деталей і з'єднань: технічний (безвідмовність, робота без поломок), технологічний (якість роботи) та економічний.

Критерії граничного зносу пропонується встановити залежно від впливу зносу деталі на роботу машини. При цьому розглядаються три випадки (Рис.3.18).

У першому випадку (рис. 3.18, а) в результаті зносу машина не може більше функціонувати, тобто стає непридатною. Наприклад, відбувається злам колінчастого вала, поломка поршневого кільця, заїдання зубів шестерень.





**Рис. 3.18. Критерії граничного зносу**

У другому випадку (рис. 3.18, б) знос приводить до потрапляння в зону інтенсивного виходу з ладу машини та її деталей. При цьому виникають удари, відбувається форсоване зношування поверхонь, зростають вібрації машини, підвищується температура вузлів.

На кривій зносу (залежно від напрацювання) – це період аварійного зношування.

Цей випадок можна проілюструвати на прикладі верхнього поршневого компресійного кільця, вкритого електролітичним хромом. Граничний знос настане в результаті зношування шару хрому і відповідно різкого зростання інтенсивності зношування з'єднання.

У третьому випадку (рис. 3.18, в) через знос характеристики машини виходять за допустимі або запропоновані межі (знижуються точність роботи, продуктивність та коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт подачі тощо).

Наприклад, металорізальний верстат не забезпечує необхідної продуктивності й отримання продукції відповідної якості (за точністю і шорсткістю).

При зносі деталей циліндро-поршневої групи двигуна змінюється потужність, питома витрата палива, підвищується витрата мастильного матеріалу, проривання газів у картер, підсилюються стуки.

Двигун може продовжувати роботу, але як тільки стан його з'єднань буде відповідати максимально допустимим змінам його характеристики, цей стан стане граничним.

Насос гідросистеми при граничному стані не забезпечує необхідної подачі.

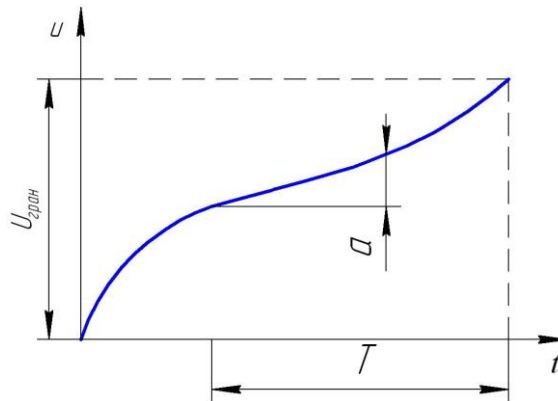
Граничні зноси основних деталей часто встановлюють на підставі

практичних даних експлуатації та ремонту машин окремих марок.

Для визначення напрацювання (ресурсу)  $t$  деталі необхідно мати її зносу залежно від напрацювання (рис. 3.19) і значення граничного зносу  $u_{гран}$ , оскільки:

$$T = \frac{u_{гран}}{\zeta}, \quad (3.96)$$

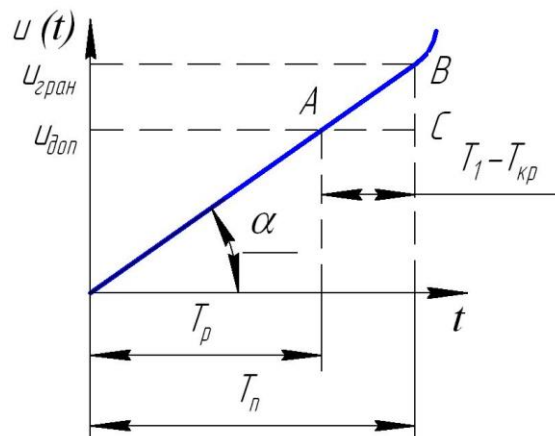
де  $\zeta$  – випадкова функція, яка характеризує швидкість зношування з'єднання.



**Рис. 3.19. Залежність зносу від напрацювання**

З іншого боку,  $\zeta = du / dt = f(P, V, K_m, K_e)$ , тобто функція, яка залежить від навантаження, швидкості ковзання і технологічних та експлуатаційних факторів.

Допустимі зноси  $u_{доп}$  (рис. 3.20) менші за граничні  $u_{гран}$ , оскільки деталь не повинна вийти з ладу протягом наступного міжремонтного напрацювання  $T_1$ . За період міжремонтного напрацювання знос деталі збільшується на  $\zeta T_1$ .



**Рис. 3.20. Розрахунок допустимого і граничного зносів деталі**

Звідки:

$$u_{\text{дон}} + \zeta t_1 = u_{\text{гран}} \text{ або } u_{\text{дон}} = u_{\text{гран}} - \zeta T_1. \quad (3.96)$$

Враховуючи, що  $\text{tg } \alpha = \zeta = u_{\text{дон}} / t_p$ , де  $t_p$  – напрацювання до ремонту, який виконується, отримують:

$$u_{\text{дон}} \left( 1 + \frac{t_1}{t_p} \right) = u_{\text{гран}}; \quad (3.97)$$

$$u_{\text{дон}} = \frac{u_{\text{гран}}}{1 + \frac{t_1}{t_p}}. \quad (3.98)$$

Якщо від останнього ремонту даний періодичний ремонт, при якому проводиться дефектування деталей, становить  $K$ , то  $t_p = K t_1$ .

Тоді формула для оцінки допустимого зносу матиме вигляд:

$$U_{\text{дон}} = \frac{U_{\text{гран}}}{1 + \frac{t_1}{K t_1}}; \quad U_{\text{дон}} = \frac{K}{K+1} U_{\text{гран}}. \quad (3.99)$$

**Приклад 3.11.** При  $u_{\text{гран}} = 0,1$  мм визначити необхідність відновлення деталі, якщо при третьому періодичному ремонті її знос дорівнював 0,08 мм.  
*Розв'язання.*

$$u_{\text{дон}} = \frac{K}{K+1} u_{\text{гран}} = \frac{3}{3+1} \cdot 0,1 = 0,075 \text{ мм}$$

Отже, деталь необхідно відновлювати, хоч її знос і менший за  $u_{\text{гран}}$  ( $0,08 < u_{\text{гран}} = 0,01$ ); вона не може працювати до наступного періодичного ремонту, оскільки  $u_{\text{дон}} = 0,075$  менший за величину її фактичного зносу, яка дорівнює 0,08 мм.

За значеннями  $u_{\text{гран}}$  можна визначити напрацювання деталей, які замінюються при періодичному ремонті.

Підставляючи у формулу значення  $u_{\text{дон}} + \zeta t_p$ :

$$\zeta T_p = \frac{K}{K+1} u_{\text{гран}},$$

звідки:

$$t_p = \frac{K}{K+1} u_{гран} / \zeta,$$

або

$$T_p = \frac{K}{K+1} T_n,$$

Враховуючи, що  $\zeta$  – випадкова величина, яка значно залежить від реальних умов експлуатації, спостерігається розсіюванням величини  $t_p$ , і на практиці користуються ймовірнісними показниками  $t_p$ ,  $\sigma$  та ін.

Розглянемо ще один приклад визначення граничних і допустимих розмірів або інших контрольних показників технічного стану деталей, з'єднань механізмів, необхідних для дефектації машин, що ремонтуються.

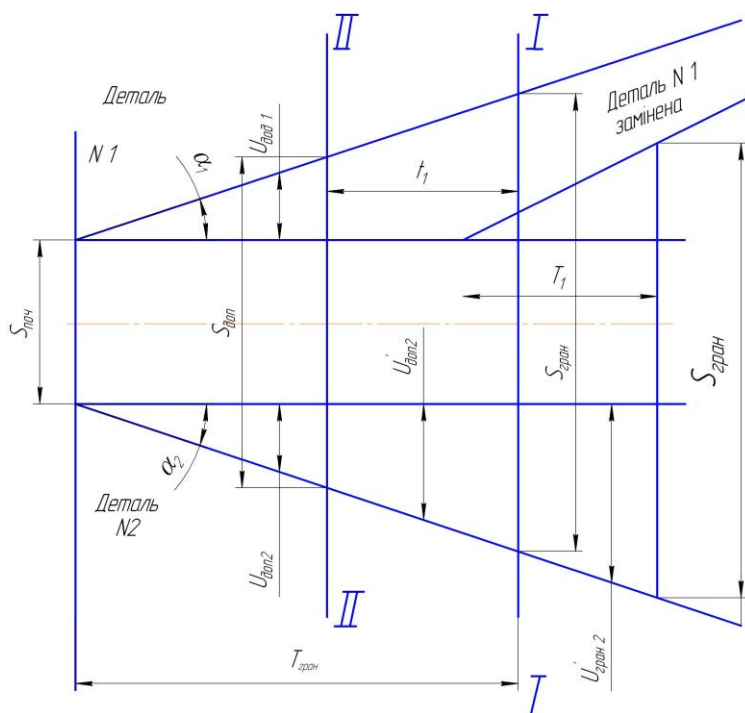
**Визначення допустимих зносів деталей і допустимих зазорів з'єднань, які мають недовговічні змінні деталі.** На схемі (рис. 3.21) побудовано лінії зносу деталей 1 та 2, які працюють у з'єднанні.

Початковий зазор у з'єднанні деталей  $S_{поч}$ . Середня інтенсивність (швидкість) зношування деталі 1 характеризується кутом  $\alpha_1$  нахилу лінії зносу, а деталі 2 – кутом  $\alpha_2$ . Граничне напрацювання з'єднання, а отже, і граничний зазор у з'єднанні визначаються аналітично або графічно. На схемі ці показники наведені як вертикальна лінія  $I-I$ , граничне напрацювання позначене  $t_{гран}$ , а граничний зазор  $S_{гран}$ .

Якщо відомо, через яке напрацювання дане з'єднання обов'язково повторно надійде на ремонтне підприємство на контроль або ремонт, то за наведеною схемою можна встановити допустимий знос обох деталей і допустимий зазор у з'єднанні.

Для цього необхідно ліворуч від вертикалі  $I-I$  відкласти значення  $T_1$ , яке відповідає міжремонтному напрацюванню, і провести вертикаль  $II-II$ . Розмір  $S_{дон}$ , наведений на цій вертикалі, буде відповідати значенню допустимого зазору у з'єднанні, при якому деталі зі зносом можна без відновлення залишати в машині, оскільки вони відпрацюють ресурс до наступного ремонту. Перетин

вертикалі II–II з лінією зносу деталі 1 дозволяє визначити також допустимий її знос  $u_{дон1}$ , а з лінією зносу деталі 2 – допустимий знос  $u_{дон2}$ .



**Рис. 3.21. Визначення допустимих зносів деталей і допустимих зазорів у з'єднаннях**

Коли граничний зазор у з'єднанні збільшити не можна і за умовами експлуатації з'єднання одна з деталей має більші ресурси і граничний знос (без небезпеки аварії), при ремонті машини працездатність з'єднання відновлюють, замінюючи одну з деталей (наприклад деталь 1). У даному випадку деталь 2 буде мати підвищені граничні й допустимі зноси ( $u_{гран2}$  і  $u_{дон2}$ ).

Допустимі та граничні зноси в основних з'єднаннях отримують з використанням даного методу.

**Приклад 3.12.** Трактор ДТ-75М після ремонту мав напрацювання 2200 мото-год ( $t_p = 2200$  мото-год). Вимірюванням товщини зубів шестерен коробки передач встановлено, що  $h_{вим} = 8,76$  мм. Потрібно визначити залишковий ресурс шестерні та його межі надійності при  $\alpha = 0,80$ , якщо з технічних умов відомо: початкова товщина зуба  $h = 9,35_{-0,158}^{0,110}$ ; гранична товщина зуба  $h_{гран} = 8,34$  мм;

допустима товщина зуба  $h_{дон} = 8,64$  мм.

*Розв'язання.* 1. Визначається середня швидкість зношування зубів шестерні при середньому допуску на виготовлення:

$$-\left(\frac{0,110 + 0,158}{2}\right) = -0,134 \text{ мм.}$$

За формулою обчислюють:

$$\zeta = \frac{u_{вим}}{T_p} = \frac{9,35 - 0,134 - 8,76}{2200} = \frac{9,22 - 8,76}{2200} = 0,20 \text{ мкм/мото-год.}$$

2. Обчислюється середній залишковий ресурс шестерні за рівнянням:

$$T_{зал} = \frac{1}{\zeta} (u_{гран} - u_{вим}) = \frac{(9,22 - 8,34) - (9,22 - 8,76)}{0,0002} = 2100 \text{ мото-год.}$$

3. Визначаються надійні межі залишкового ресурсу шестерні за формулами для розподілу Вейбулла-Гнеденка:

$$t_{зал}^H = 0,70 T_{зал} = 0,70 \cdot 2100 = 1470 \text{ мото-год;}$$

$$t_{зал}^G = 1,35 T_{зал} = 1,35 \cdot 2100 = 2840 \text{ мото-год.}$$

### Контрольні запитання

1. Що таке подія? Які є різновиди подій?
2. Що таке дискретна і неперервна випадкова величина? Навести їх приклади.
3. Що таке ймовірність, які є формули додавання та множення ймовірностей?
4. Які бувають функції розподілу випадкових величин?
5. Що називається щільністю розподілу випадкових величин?
6. Які основні характеристики розподілу випадкових величин?
7. Які закони розподілу випадкових величин найчастіше зустрічаються у надійності?
8. Як визначити основні характеристики (показники) надійності виробів, що не ремонтується (не відновлюються)?
9. Як розрахувати основні показники надійності виробів, що

ремонтуються (відновлюються)?

10. Які показники безвідмовності виробів, що не ремонтуються і ремонтуються? Дати їх визначення.

11. Що править за показник довговічності виробів?

12. Що таке гамма-відсотковий ресурс?

13. Навести основні і додаткові показники ремонтпридатності виробів.

14. Що таке показник збережуваності виробу?

15. Яка залежність між надійністю об'єкта і схемою з'єднання його елементів?

16. Як розраховуються допустимі й граничні розміри деталей і з'єднань?

## **4. ВИПРОБУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ НА НАДІЙНІСТЬ**

### **4.1. Загальна характеристика видів та методів випробування сільськогосподарської техніки на надійність**

Випробування сільськогосподарської техніки – це основа для створення нових конструкцій машин, технологічних ліній та комплексів у рослинництві й тваринництві, визначення рівня їх якості, удосконалення методів проектування, технологій первинного та вторинного виробництва, експлуатації, технічного обслуговування і ремонту. В Україні розроблена і застосовується Державна система випробувань сільськогосподарської техніки.

Система з метою захисту інтересів споживача передбачає сертифікацію (встановлення відповідності машин певним технологічним і технічним вимогам). Це досягається на основі випробувань машин, які проводяться заводами-виробниками, а також спеціалізованими центрами. В Україні випробування сільськогосподарських машин здійснюється Українським центром випробування і прогнозування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва (УкрЦВТ) ім. Л. Погорілого та чотирма державними зональними машиновипробувальними станціями (МВС).

Оцінка якості нових машин здійснюється на різних етапах їх життєвого циклу: проектування і доведення дослідних зразків, виготовлення, експлуатації.

Найбільший об'єм випробувань припадає на період конструювання та модернізації техніки. Після доводки на державних випробувальних центрах здійснюються приймальні (державні, відомчі, міжвідомчі) випробування.

На цьому етапі визначають номінальні та потенційні експлуатаційно-технологічні, економічні, ергономічні можливості і характеристики машин, перевіряють ефективність виконаних доробок, оцінюють їх експлуатаційну якість та надійність.

Система випробувань сільськогосподарських машин передбачає проведення



в період їх серійного випуску спеціальних контрольних випробувань (періодичних, типових), які здійснюються з метою контролю якості виготовлення машин та доцільності продовження їх випуску. Таким випробуванням підлягає техніка, яка експортується та імпортується.

Модель випробувань сільськогосподарської техніки має базуватись на системному підході, а їх нормативна база – на відповідних державних стандартах, що позитивно впливає на трудомісткість і результативність її експлуатації.

Проблема забезпечення надійності тісно пов'язана з усіма періодами життєвого циклу машин, починаючи з обґрунтування ідеї про їх створення і до прийняття рішення про припинення випуску. Її можна розв'язати лише при наявності відповідної інформації про надійність машин на етапах їх проектування, доводки, виготовлення дослідних зразків і випуску серійної продукції.

При наявності інформації про надійність не тільки стає можливою цілеспрямована робота щодо її забезпечення, але й уточнюються та удосконалюються методи проектування, технологія виготовлення, оптимальні режими використання нових моделей машин, систем їх технічного обслуговування та ремонту.

## **4.2. Терміни та визначення**

*Випробування* – експериментальне визначення кількісних та якісних характеристик властивостей об'єкта випробувань як результату дії на нього, при його функціонуванні, моделюванні та впливах.

*Система випробувань* – сукупність засобів випробувань, виконавців та визначених об'єктів випробувань, взаємодіючих за правилами встановленими нормативною документацією.

*Умови випробувань* – сукупність діючих факторів та режимів функціонування об'єкта при випробуваннях.

*Вид випробувань* – класифікаційне групування випробувань за певною

ознакою.

*Категорія випробувань* – це такий їх вид, який характеризується організаційною ознакою їх проведення та прийняттям рішень по результатах оцінки об'єкта в цілому.

*Метод випробувань* – правила використання певних принципів та засобів випробувань.

*Програма випробувань* – організаційно-методичний документ, обов'язковий до виконання, який встановлює об'єкт та мету, види випробувань, їх послідовність та обсяг, порядок, умови, місце та тривалість проведення випробувань, забезпеченість та звітність по результатам випробувань, а також відповідальність за забезпечення їх проведення.

*Методика випробувань* – організаційно-методичний документ, обов'язковий до виконання, який включає метод, засоби та умови випробувань, відбір проб, алгоритми виконання операцій за визначенням однієї або декількох взаємозв'язаних характеристик, властивостей об'єкта, форми подання даних, оцінювання точності та вірогідності результатів, за вимогами техніки безпеки та охорони навколишнього середовища.

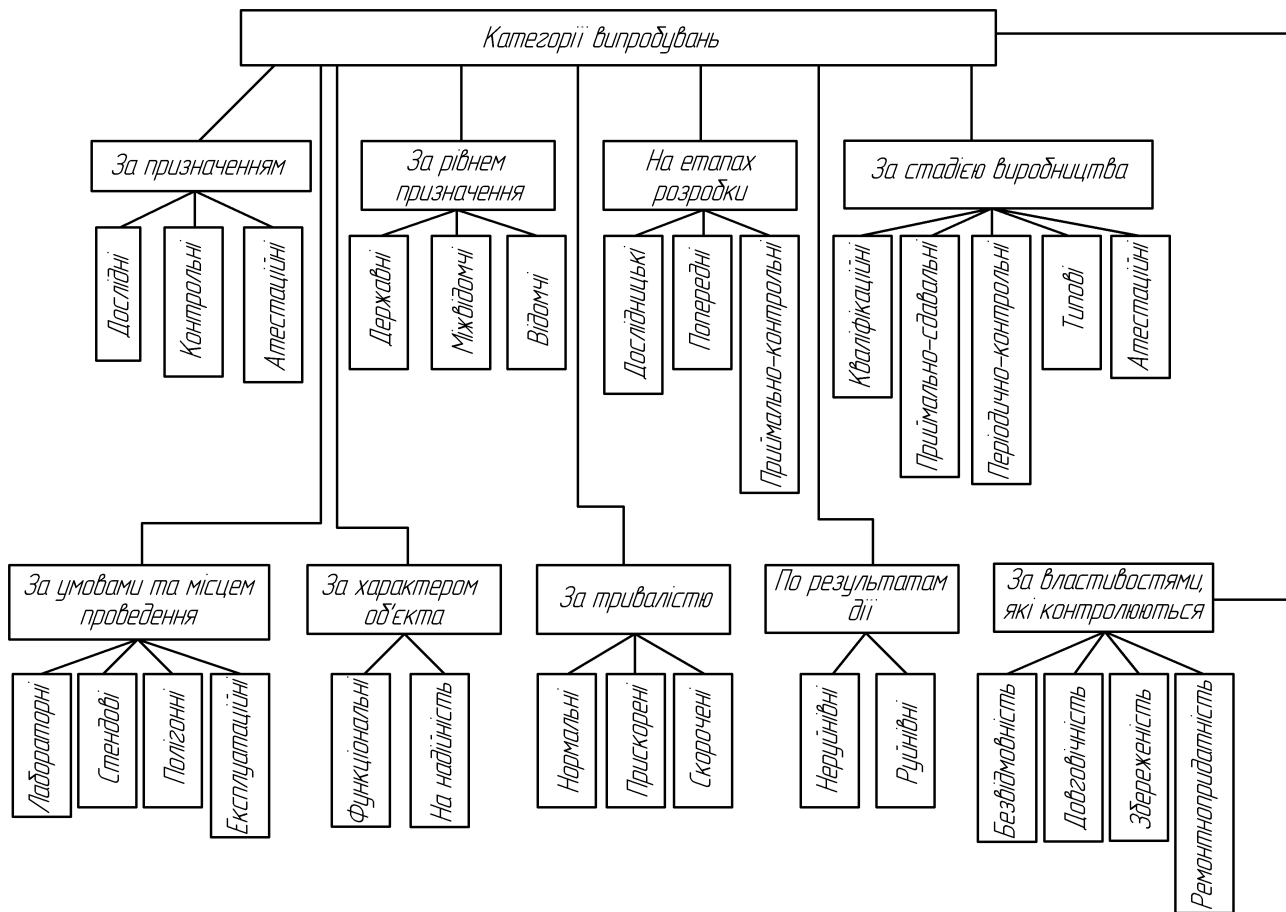
*Засоби випробувань* – технічні пристрої, речовини та матеріали для проведення випробувань.

*Дослідне устаткування* – технічні засоби для відтворення умов випробувань.

*Дослідний полігон* – територія та дослідні споруди на ній, які забезпечують випробування об'єкта в умовах близьких до умов експлуатації.

### **4.3. Класифікація випробувань техніки на надійність**

Заданий рівень надійності нової сільськогосподарської техніки забезпечують на основі випробувань різних категорій, класифікація яких наведена на рис. 4.1.



**Рис. 4.1. Класифікація категорій випробувань на надійність**

Випробування техніки на надійність розрізняються за призначенням, за рівнем проведення, на етапах розробки продукції, на етапах випробувань готової продукції, за умовами та місцем проведення, за визначуваними характеристиками об'єкта, за тривалістю випробувань та результатами дії.

*Випробування техніки за призначенням* підрозділяються на:

- *дослідні*, які проводяться для вивчення певних характеристик властивостей об'єкту; контрольні, які проводяться для контролю якості об'єкту;
- *атестаційні*, які проводяться для оцінки рівня якості продукції при її атестації за категоріями якості.

*Випробування техніки за рівнем проведення* підрозділяються на:

- *державні*, які проводяться головною організацією державних випробувань або приймальні, які проводяться спеціальною комісією або дослідною організацією, якій надано право на їх проведення;
- *міжвідомчі*, які проводяться комісією із представників декількох

зацікавлених міністерств та відомств;

– *відомчі*, які влаштовуються комісією із представників зацікавлених міністерств та відомств.

*Випробування на етапах розробки продукції* включають:

– *дослідницькі*, які проводяться при розробці продукції;

– *попередні* – контрольні випробування експериментальних зразків або експериментальних партій продукції з метою визначення можливості їх представлення на приймальні випробування;

– *приймально-контрольні випробування експериментальних зразків* або експериментальних партій продукції, які проводяться з метою вирішення питання доцільності постановки цієї продукції на виробництво.

*За стадією виробництва* існують:

– *кваліфікаційні* або контрольні випробування установчої серії або першої промислової партії виробів, які проводяться з метою оцінки готовності підприємства до випуску продукції даного типу у заданому обсязі;

– *приймально-сдавально-контрольні випробування продукції при приймальному контролі*;

– *періодично-контрольні* випробування випущеної продукції, які проводяться в об'ємах та строках, які встановлені нормативно-технічною документацією, з метою контролю стабільності якості продукції та можливості продовження її випуску;

– *типові контрольні випробування випущеної продукції*, які проводяться з метою оцінки ефективності впроваджуваних змін в конструкцію або технологічний процес;

– *атестаційні*, які проводяться для оцінки рівня якості продукції при атестації за категоріями якості.

*Випробування за умовами та місцем проведення* діляться на:

– *лабораторні*, які проводяться в лабораторних умовах;

– *стендові*, які проводяться на дослідному устаткуванні;

– *полігонні*, які проводяться на дослідному полігоні;

– *експлуатаційні*, які проводяться в період експлуатації.

*Випробування за визначуваними характеристиками об'єкта* діляться на:

– *функціональні*, які проводяться з метою визначення показників за призначенням об'єкту;

– *на надійність*, які проводяться для визначення показників надійності об'єкту в заданих умовах.

*Випробування за тривалістю* бувають:

– *нормальні*, методи та умови проведення яких забезпечують одержання необхідного об'єму інформації про характеристики якостей об'єкту в таких же інтервалах часу, як і в передбачених умовах експлуатації;

– *прискорені*, методи та умови проведення яких забезпечують одержання необхідної інформації про характеристики якостей об'єкту в більш короткий строк, ніж при нормальних випробуваннях;

– *скорочені*, які проводяться за скороченою програмою.

Випробування по результатах дії можуть бути:

– *руйнівні*, з використанням руйнівних методів контролю;

– *неруйнівні*, з використанням неруйнівних методів контролю.

*Інспекційні* – це випробування встановлених видів продукції з метою контролю стабільності якості машин і можливості їх подальшого випуску.

*Типові випробування* – контрольні випробування продукції, коли оцінюють ефективність і доцільність змін конструкції машин при їх модернізації.

*Атестаційні випробування* – випробування, які проводяться для оцінки рівня якості машин при їх атестації за відповідними категоріями.

*Сертифікатні випробування* – контрольні випробування продукції з метою встановлення відповідності характеристик її властивостей національним і міжнародним нормативно-технічним документам.

*За властивостями, які контролюються*, випробування класифікуються на безвідмовність, довговічність, збереженість і ремонтпридатність.

*Контрольні випробування на безвідмовність* передбачають контроль

імовірності безвідмовної роботи за певний час або напрацювання на відмову.

*Контрольні випробування на довговічність* - це контроль середнього або гамма-відсоткового ресурсів.

*Контрольні випробування на ремонтпридатність* виконують, коли до виробів ставлять вимоги стосовно відновлення їх в умовах експлуатації на об'єкті при усуненні відмов, виявлених між плановими ремонтами і технічним обслуговуванням.

*Випробування на збереженість* – контроль гамма-відсоткового строку збереженості машини, визначення імовірності дотримання рівня гама-величини за інтервал часу, який відповідає заданому строку зберігання.

*Натурні випробування* – це випробування машин в умовах їх використання, тобто випробується виготовлена машина, дія на яку відповідає її цільовому призначенню, а технічні характеристики чи властивостей вимірюються безпосередньо.

*Випробування з використанням моделей* – це проведення розрахунків на ПЕОМ за математичними або фізико-математичних моделями об'єкта випробування і дії на нього у поєднанні з натурними випробуваннями його складових частин, а також використання фізичної моделі об'єкта випробувань.

*Нормальні випробування* – це випробування, які забезпечують інформацію про надійність машин за той же інтервал часу, що передбачено умовами експлуатації.

*Скорочені випробування* – це випробування за скороченою програмою. При цьому порівняно з нормальними випробуваннями забезпечують отримання інформації про надійність машин у коротші календарні строки. Це досягається за рахунок ущільнення часу самих випробувань: цілодобовою роботою машин, скороченням кількості і часу холостих ходів, збільшенням частоти робочого циклу, імітацією дії робочого середовища на машину.

При проведенні скорочених випробувань сільськогосподарської техніки застосовують замість натуральних робочих середовищ (зерна, соломи, сіна та ін.) їх штучні замітники (капронова крихта, відходи шкіри, синтетичного

волокна та ін.).

Значною перевагою скорочених випробувань є те, що ефект прискорення (скорочення календарного часу їх проведення) досягається без зміни фізичної суті втрати машинами своєї працездатності.

При прискорених випробуваннях забезпечується отримання необхідної інформації про надійність машини за більш короткий час, ніж при нормальних випробуваннях. Скорочення часу при проведенні прискорених випробувань досягається за рахунок інтенсифікації фізико-хімічних і фізико-механічних процесів руйнування (пошкодження) деталей машин: форсування навантажень, швидкостей, температури, вібрацій, введення абразиву та ін.

Але неправильне форсування режимів прискорених випробувань може призвести до спотворення результатів випробувань, оскільки кожний процес пошкодження деталей має свою критичну зону, за якою відбуваються зміни. Тому режими і методи прискорених натуральних випробувань повинні визначатися так, щоб не було досягнуто критичної зони. Щоб забезпечити ефективність і достовірність прискорених випробувань, необхідно погодити їх подібність з експлуатаційними випробуваннями, забезпечуючи фізичну та математичну подібність.

Фізична подібність полягає у тому, що суть відмов при форсованих й експлуатаційних випробуваннях повинна залишатись однаковою за видом і характером. Математична подібність полягає в тому, що імовірність безвідмовної роботи машин при форсованих й експлуатаційних випробуваннях має бути однаковою.

При забезпеченні масштабної подібності коефіцієнт переходу випробувань від прискорених до експлуатаційних має бути сталим. При цьому умова рівності імовірностей призводить до рівності коефіцієнтів варіації часу безвідмовної роботи при прискорених випробуваннях та в експлуатації.

#### **4.4. Організація випробування на надійність**

Одержання необхідної інформації про надійність на стадіях виготовлення дослідних зразків, дослідних партій та серійних машин пов'язані зі значними витратами часу та трудових ресурсів.

*Організація випробувань* передусім включає: систему випробувань; вибір об'єктів випробувань та переважаючого виду пошкодження, вибір обладнання та обґрунтування режимів випробувань та ін.

*Система випробувань* – це комплекс експериментів та спостережень, які виконуються у певному обсязі, в заданій послідовності і забезпечують отримання інформації про надійність виробу з певними витратами.

Складна сільськогосподарська техніка випробовується за схемою: деталь, сполучення деталей, складальна одиниця (агрегат) та машина в цілому. Основний обсяг випробувань доцільно проводити в лабораторних умовах з розв'язанням задач оптимізації. При виборі об'єктів випробувань машину поділяють на агрегати, сполучення деталей і деталі з урахуванням їх навантаженості.

Визначаються групи елементів, які не потребують випробувань, потребують незначного обсягу випробувань та для яких необхідні значні обсяги випробувань. Виділяються деталі і сполучення, які випробовують окремо або у складі агрегатів, і агрегати, які випробовуються окремо. Проводиться класифікація елементів за впливом їх на надійність та обґрунтовується перелік складальних одиниць, надійність яких повинна нормуватися.

При виборі переважаючого виду пошкодження граничний стан елементів машин в експлуатації обумовлюється спрацюванням, яке супроводжується спотворенням розмірів та форми робочих поверхонь деталей та їх правильного взаємного положення. При цьому зростають зазори у сполученнях, погіршуються фізико-механічні властивості матеріалів деталей, знижується твердість робочих поверхонь і міцність деталей.

Граничний стан деталей машин обумовлюється також втомою. Часто



руйнуючі фактори діють сумісно: зношування і корозія та зношування з втомою. З різноманітних пошкоджень виявляється одне або кілька типових їх видів для даної конструкції.

Шлях до підвищення ресурсу і безвідмовності машин починається з вивчення видів їх пошкодження.

При виборі режимів та методів випробувань машин керуються експериментальними даними про види руйнування деталей та вузлів машин-аналогів.

При випробуванні сільськогосподарської техніки застосовуються спеціальні стенди та їх комплекси, які дозволяють уніфікувати методичні прийоми і здійснити її випробування з оптимальними витратами часу та коштів. Вибір методу й випробуваного обладнання має здійснюватися з урахуванням існуючої матеріально-технічної бази.

Дуже важливо правильно вибрати режими випробувань. Під режимом випробувань розуміють сукупність факторів, які визначають механізм та інтенсивність процесів руйнування деталей машин: навантаження; швидкості (або частота прикладення навантажень); середовища у навантаженому контакті (кількість, властивості і температура мастила, дисперсність, форма та інші властивості абразивних частинок); зовнішнє середовище (температура, тиск, вологість, агресивність). Режим і методи випробувань взаємопов'язані між собою.

Основою вибору ресурсних випробувань є характеристики режиму роботи машини в умовах експлуатації. Ці характеристики мають входити до технічного завдання на проектування. Вони використовуються при виборі конструкції, розмірів та розрахунків елементів машин, розробці режимів випробувань та прогнозуванні експлуатаційної надійності. Режими прискорених випробувань в основному відрізняються від експлуатаційних режимів, але зв'язані з ними.

Тому випробування машин на надійність можуть проводитися в режимах:  
– які відтворюють режими експлуатації без будь-яких змін;

- з підвищеною частотою робочого циклу;
- які включають дії, що суттєво не впливають на надійність виробу;
- на комбінованих режимах;
- на умовних режимах, які відрізняються від експлуатаційних, але еквівалентні їм за руйнуючою дією;
- на режимах, важчих за експлуатаційні.

При випробуваннях на експлуатаційних режимах прискорення випробувань досягається за рахунок цілодобової роботи машини та імітування режимів їх експлуатації завдяки використанню різних технологічних середовищ. Особливо представляють інтерес варіанти випробувань, коли створюються умови і режими, важчі за експлуатаційні. Такі режими забезпечують значне прискорення випробувань. При випробуваннях важчі умови, порівняно з експлуатаційними, створюються також за рахунок зміни середовища у контакті деталей: зниження в'язкості масла, введення у зону тертя деталей дозованої кількості абразивів.

Без обґрунтованого вибору, методу та режимів випробувань неможливо отримати достовірну інформацію.

#### **4.5. Планування випробувань на надійність**

Показники надійності деталей та СГТ в цілому визначаються в результаті проведення спеціальних стендових, полігонних та експлуатаційних випробувань.

При оцінці надійності можуть бути використані різні способи опрацювання результатів випробувань. Питання планування випробувань на надійність регламентовані рядом стандартів, якими передбачається проведення випробувань на надійність по одному із планів:

$[NUN]$ ;  $[NUT]$ ;  $[NUr]$ ;  $[NU(r,T)]$ ;  $[NMT]$ ;  $[NM(r,T_{\Sigma})]$  і т.д.,

де  $N$  – число виробів (об'єм випробувань), поставлених під спостереження;

$T$  – встановлене напрацювання або календарна тривалість спостережень;

U – плани, в яких вироби, що відмовили, не відновлюються і не замінюються новими, а знімаються з випробувань;

г – число відмов або граничних станів, до виникнення яких ведуться спостереження;

R – плани, в яких вироби, що відмовили, замінюються новими;

M – плани, в яких вироби, що відмовили, відновлюються.

План [NUN] – на випробування одночасно поставлено N об'єктів; випробування проводять до виникнення відмов або граничного стану всіх об'єктів; об'єкти, що відмовили, новими або відновленими не замінюються і знімаються з випробувань.

План [NUT] – на випробування одночасно поставлено N об'єктів; об'єкти, що відмовили за час випробувань, не відновлюються і не замінюються; випробування припиняють при закінченні часу випробувань або напрацюванні T для кожного об'єкта.

План [NMT] – на випробування одночасно поставлено N об'єктів; після кожної відмови об'єкт відновлюють; кожний об'єкт випробують до закінчення часу випробувань або напрацювання T.

План [NUr] – на випробування одночасно поставлено N об'єктів; ті об'єкти, які відмовили під час випробувань, не відновлюють і не замінюють; випробування закінчують, якщо число об'єктів, що відмовили, досягло г і т.д.

Вибір планів випробувань залежить від типу об'єкту, мети випробувань, оцінюваних показників надійності, умов експлуатації з урахуванням економічної доцільності та технічної необхідності (табл. 4.2).

**Таблиця 4.2. Пропозиції по використанню деяких планів випробувань (спостережень)**

План випробувань (спостережень)	Показники надійності	Розподіл випадкових величин
[NUN]	Середнє напрацювання до відмови, середній ресурс, середній строк служби, гама-відсотковий ресурс, гама-відсотковий строк служби, імовірність	Вейбулла, експоненціальний, нормальний, логарифмічно-

	безвідмовного напрацювання.	нормальний.
[NUr]	Гама-відсотковий ресурс, гама-відсотковий строк служби, імовірність безвідмовного напрацювання.	Невідомий.
[NUT]	Середнє напрацювання до відмови, середній ресурс, середній строк служби.	Вейбулла, експоненціальний, нормальний.
[NRr]; [NRT]	Середнє напрацювання до відмови.	Експоненціальний.
[NMr]	Середнє напрацювання на відмову, коефіцієнт готовності.	Невідомий.
[NMT]	Середнє напрацювання на відмову.	Експоненціальний.

При випробуваннях сільськогосподарської техніки найбільше розповсюдження набули плани [NUN], [NUT], [NUr].

План випробувань залежить від типу машин, зайнятості їх на сільськогосподарських роботах протягом року, передбаченої довговічності, прийнятої системи технічного обслуговування і ремонту та ін.

Завдання планування випробувань – це визначення мінімального їх обсягу.

Під обсягом спостережень треба розуміти:

- число об'єктів спостережень  $N$  – для плану [NUN];
- число об'єктів спостережень  $N$  та число відмов (граничних станів) спостережуваних об'єктів  $r$  – для планів [NUr], [NRr] та [NMr];
- число об'єктів спостережень  $N$  та тривалість спостережень  $T$  – для планів [NUT], [NRT] та [NMT].

Показники надійності, визначені за вибірковими даними, є випадковими величинами, розташованими у певних інтервалах. Значення цих інтервалів залежить від розсіювання показників надійності та кількості об'єктів у вибірці. Для оцінки точності параметрів розподілу користуються поняттям надійної імовірності інтервалу.

Початковими даними для розрахунку мінімального обсягу спостережень для розглянутих планів служать:

- довірча імовірність  $\gamma$  для оцінки відповідного показника надійності.

Довірчу імовірність  $\gamma$  вибирають з ряду: 0,80; 0,90; 0,95; 0,99;

– гранична відносна помилка  $\delta$  оцінки показника надійності.

Гранична відносна помилка  $\delta$  оцінки відповідного показника надійності являє собою міру точності оцінки показника надійності:

$$\delta = \max\left(\frac{H - H_n}{H}, \frac{H_e - H}{H}\right),$$

де  $H$  – оцінка показника надійності;

$H_n$  – нижня границя одностороннього інтервалу  $(H_n, \infty)$  при заданій довірчій імовірності  $\gamma$ ;

$H_e$  – верхня границя одностороннього довірчого інтервалу  $(0, H_e)$  при заданій довірчій імовірності  $\gamma$ .

Граничну відносну помилку  $\delta$  вибирають з ряду: 0,05; 0,10; 0,15; 0,20.

Довірчий інтервал визначають відповідно стандарту.

Довірча імовірність характеризує вірогідність того, що визначені по результатах спостережень значення показників надійності не будуть відрізнятися від дійсних більше, ніж в межах відносної помилки. Припущення, наприклад, відносної помилки  $\delta=0,15$  з довірчою імовірністю 0,90 свідчить про те, що у 90% випадків визначена середня величина показника не повинна виходити за межі помилки 0,15 і тільки в 10% можливі перевищення у відхиленнях більше, ніж на 15%. Чим вища бажана точність у визначенні показників надійності, тим більше виробів необхідно брати для спостережень.

Орієнтовно коефіцієнти варіації при організації спостережень можна вибирати з виду руйнування та по типових елементах (табл. 4.3).

**Таблиця 4.3. Наближені значення коефіцієнтів варіації ресурсів в залежності від виду руйнування об'єкту**

Вид руйнування деталей	Значення коефіцієнта варіації
1. Спрацювання деталей двигунів, трансмісій, ходових систем і т. д.	0,3...0,4
2. Втома при вигині та крученні: – пружини, ресори;	0,3

– зубчасті колеса, ланцюги гусениць;	0,6
– решта деталей з геометричними концентраторами та зварними з'єднаннями	0,4
3. Контактна втома:	
– підшипників кочення;	0,7...0,9
– решта деталей	0,5
4. Комплексне спрацювання основних агрегатів автомобілів, тракторів та сільськогосподарських машин:	
– до першого капітального ремонту	0,3...0,4
– між капітальними ремонтами	0,5...0,7

Для основних агрегатів колісних та гусеничних машин рекомендується приймати коефіцієнти варіації 0,3...0,4 до першого капітального ремонту і 0,5...0,8 між капітальними ремонтами. При організації спостережень доцільно вибирати більше значення коефіцієнта варіації. Якщо в ході випробувань він виявиться дещо меншим, то це призведе тільки до підвищення точності оцінки показників, а якщо ж коефіцієнт варіації буде більше за прийнятий, то з'явиться необхідність у додаткових спостереженнях.

#### **4.6. Планування випробувань методами багатofакторного експерименту**

Планування випробувань здійснюється як на стадії попередніх експериментів при виборі факторів, що визначають спрацювання деталей, так і безпосередньо при проведенні випробувань на зносостійкість.

У першому випадку відшукування факторів, суттєво впливаючих на спрацювання деталі, здійснюється шляхом попередніх досліджень на основі методів математичного планування експериментів.

Виходячи з того, що при зносних випробуваннях геометричний, структурний та тепловий фактори, як правило, лімітовані і зміні не піддаються, то прискорення спрацювання вузлів здійснюється в залежності від трьох головних факторів: навантаження, швидкості відносного переміщення та навколишнього середовища.

Останній фактор практично залежить від наявності абразиву. Так, змащення, вологість та інші спрацювання імітуються на рівнях максимально можливих реальних умов експлуатації і приймаються постійними.

Ступінь впливу кожного з цих факторів встановлюється методом математичного планування експерименту, виходячи з дробової репліки  $2^{3-1}$  при рівнянні відгуку:

$$y = \epsilon_0 + \epsilon_1 \cdot x_1 + \epsilon_2 \cdot x_2 + \epsilon_3 \cdot x_3, \quad (4.4)$$

де  $y$  – спрацювання деталі від тертя;

$x_1, x_2, x_3$  – змінні фактори ( навантаження, швидкість, абразив);

$\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$  – коефіцієнти регресії, які характеризують ступінь впливу кожного з факторів на спрацювання деталі. Матриця планування експерименту для цього випадку – табл.4.12.

**Таблиця 4.4. Матриця планування трифакторного експерименту при дробовій репліці  $2^{3-1}$**

Номер дослідів	Фактори				Середнє значення спрацювання
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	
1	+	–	–	+	$\bar{y}_1$
2	+	+	–	–	$\bar{y}_2$
3	+	–	+	–	$\bar{y}_3$
4	+	+	+	+	$\bar{y}_4$

Примітка. "+" (плюс) визначає верхнє, а "–" (мінус) – нижнє числові значення фактора.

Середнє значення спрацювання визначається, виходячи з числа повторюваностей кожною дослідів. Всі дослідів мають бути точно визначеної довгочасності. Послідовність кожною з них має бути рандомізована.

Коефіцієнти регресії рівняння (4.4) визначаються за формулами:

$$\epsilon_0 = \sum_1^N \bar{y}_i / N; \quad (4.5)$$

$$\epsilon_j = \sum_1^N x_j \cdot \bar{y}_i / N, \quad (4.6)$$

де  $N$  – число дослідів;  $i$  – номер дослідів;  $j$  – номер фактору.

Результати дослідів перевіряються на відтворенність, а також на адекватність одержаної протягом випробувань моделі спрацювання. Відтворенність результатів випробувань перевіряють порівнянням їх дисперсій на однорідність за допомогою критерію Кохрена, який являє собою відношення максимальної дисперсії дослідів до суми всіх дисперсій:

$$G = \sigma_{\max}^2 / \sum_1^N \sigma_{\bar{y}}^2. \quad (4.7)$$

Якщо одержане значення критерія при ступенях вільності, відповідаючих  $\sigma_{\max}$  і  $\sigma_i$  та рівня значущості 0,05, виявиться меншим за табличне значення цього критерія, то дисперсії відрізняються між собою незначно, і однорідність результатів випробувань забезпечена. При протилежному співвідношенні критеріїв результати випробувань неоднорідні і вимагають повторення дослідів при уточненні режимів випробувань, підвищенні точності вимірювань спрацювання або збільшенні числа дослідів.

Адекватність досліджуваного параметру – спрацювання деталей – визначають за допомогою критерія Фішера, який являє собою відношення дисперсії адекватності до дисперсії середніх значень спрацювання:

$$F = \sigma_{ad}^2 / \sigma_{\bar{y}}^2. \quad (4.8)$$

Дисперсію адекватності розраховують за формулою:

$$\sigma_{ad}^2 = \sum_1^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 / N - (k + 1), \quad (4.9)$$

де  $\bar{y}_i$  – середнє значення спрацювання в  $i$ -му досліді;  $\hat{y}_i$  – середнє значення спрацювання, яке підраховане по рівнянню регресії (4.4) при умовах  $i$ -го дослідів;  $k$  – число факторів.

Значення підрахованого критерія Фішера порівнюють з табличним значенням при рівні значущості 0,06, і ступіням вільності [ $f_1 = N - (k + 1)$  та  $f_2 = N \cdot (m - 1)$ ], де  $m$  – число повторностей в кожному досліді].

Адекватність забезпечується, якщо розрахункове значення критерія менше за табличне.



Потім проводиться перевірка значущості коефіцієнтів регресії, яку виконують за  $t$  - критерієм Стьюдента:

$$t = \frac{|\beta_i|}{\sigma_{ei}}, \quad (4.11)$$

де  $|\beta_i|$  – абсолютне значення  $i$ -го коефіцієнта регресії;  $\sigma_{ei}$  – середньоквадратична помилка коефіцієнта регресії, яка обчислюється за виразом:

$$\sigma_{ei} = \sqrt{\sum_1^N \sigma_y^2 / N}, \quad (4.21)$$

За умови  $t > t_{\text{табл}}$  аналізований коефіцієнт регресії признається значущим, і при проведенні досліджень фактор, який характеризує цей коефіцієнт, має бути врахований як один із основних. В протилежному випадку даним факторам нехтують. Обґрунтування факторів, що визначають спрацювання деталей вузла, а також граничних значень їх показників, є основою для побудови плану прискорених порівняльних випробувань.

Спочатку досліджуються всі еталонні об'єкти, а потім порівняльні.

З метою забезпечення рандомізації процесу послідовність випробувань тих чи інших об'єктів здійснюється за законами випадкової вибірки. Вимірювальні операції над випробуваними деталями вузла проводяться звичайно не менше як на трьох стадіях перед початком випробувань з метою перевірки їх відповідності заданим технічним вимогам, після припрацювання для визначення вихідних параметрів робочих поверхонь та після закінчення випробувань. При необхідності вимірювання проводять і на проміжних стадіях випробувань (число циклів навантаження). Основними об'єктами вимірювань при здійсненні процесу випробувань вузла є геометричні розміри, шорсткість робочої поверхні деталей та тривалість випробувань. Додатково можуть вимірюватись твердість поверхонь тертя, об'ємна температура, сила навантаження, частота обертання та інші параметри. Обов'язковою умовою всіх вимірювань протягом випробувань є їх повторюваність.

#### **4.7. Обробка дослідної інформації по результатах спостережень за відмовами**

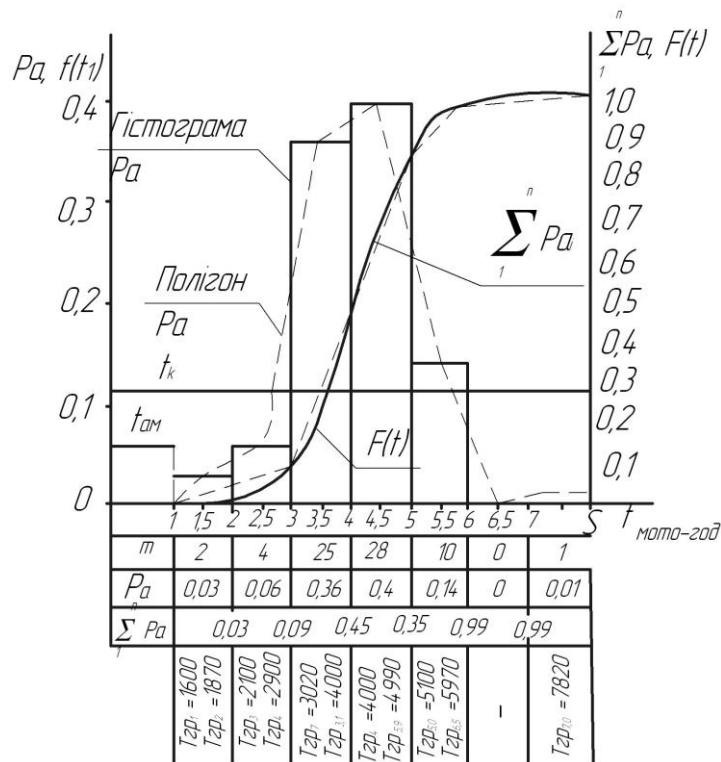
Обробка дослідної інформації включає наступні етапи:

- складення варіаційного ряду вихідної інформації в порядку збільшення показника надійності;
- складення статистичного ряду вихідної інформації з групуванням її в "n" інтервалів;
- визначення середнього значення та абсолютних характеристик розсіювання (дисперсія та середньоквадратичне відхилення) показника надійності;
- перевірка інформації на випадючі точки;
- графічне відображення дослідної інформації (побудування гістограми, полігону та кривої накопичених дослідних імовірностей);
- визначення відносного розсіювання показника надійності (коефіцієнта варіації);
- вибір теоретичного закону розподілу; визначення його параметрів та графічна побудова диференціальної та інтегральної теоретичних кривих розподілу;
- перевірка ступеня розбіжності дослідних та теоретичних законів розподілу показників надійності за критеріями згоди;
- визначення довірчих границь розсіювання поодиноких і середніх значень показників надійності та найбільших можливих помилок розрахунків.

Для побудування статистичного ряду всю інформацію розбивають на "n" інтервалів, визначених за формулою Страджерса:

$$n=1+3.3 \cdot \ln N, \quad (4.12)$$

де  $N$  – об'єм спостережень. Кількість інтервалів повинна знаходитись в межах  $n=6...14$ .



**Рис. 4.2. Схема поетапної обробки інформації післяремонтного ресурсу трансмісії трактора**

Наочне уявлення про частоту відмов дають гістограма та полігон розподілу частот та дослідних ймовірностей (Рис 4.2). Для побудови гістограми ймовірність відмов кожного інтервалу необхідно поділити на його довжину  $m_i / N \cdot \Delta t$  і одержане число взяти як висоту прямокутника. В цьому випадку повна площа її буде дорівнювати одиниці.

Середнє значення ресурсу об'єкта випробувань (спостережень) обчислюють за виразом:

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^n t_{ci} \cdot P_i, \quad (4.13)$$

де  $n$  – кількість інтервалів статистичного ряду;  $t_{ci}$  – значення середини  $i$ -го інтервалу;  $p_i$  – дослідна ймовірність  $i$ -го інтервалу.

Абсолютна характеристика розсіювання показника надійності оцінюється дисперсією та середньоквадратичним відхиленням:

$$D_t = \frac{\sum_1^N (t_i - \bar{t})^2}{N}; \quad \sigma_t = \sqrt{D_t}, \quad (4.14)$$

При наявності статистичного ряду інформації ( $N > 25$ )  $\sigma_t$  можна визначити за виразом:

$$\sigma_t = \sqrt{\sum_1^n (t_{ci} - \bar{t})^2 \cdot p_i}, \quad (4.15)$$

де  $n$  – число інтервалів.

Дослідна інформація по показниках надійності, одержана в період спостережень в умовах рядової експлуатації, може включати помилкові точки, які випадають із загального закону розподілу. Тому перед заключною математичною обробкою вихідна інформація повинна перевірятися на випадючі точки. Наближена перевірка інформації може бути проведена за правилом "трьох сигм" ( $\pm 3\sigma$ ). Таким чином, із одержаного розрахунковим шляхом середнього значення показника надійності  $\bar{t}$  віднімається або до нього додається  $3\sigma$ . Дослідні точки в цьому інтервалі вважаються дійсними.

Якщо точка інформації виходить за верхню границю достовірності, то вона має бути виключена із розгляду як помилкова. Уточнена перевірка, як крайніх, так і суміжних точок інформації може проводитись і по критерію Ірвіна  $\lambda$  (табл.4.14).

**Таблиця 4.5. Значення коефіцієнта Ірвіна  $\lambda_{\text{табл}}$  при довірчій імовірності  $\gamma$**

N	$\gamma=0,95$	$\gamma=0,99$	N	$\gamma=0,95$	$\gamma=0,99$
2	2,8	3,7	30	1,2	1,7
3	2,2	2,9	50	1,1	1,6
10	1,5	2,0	100	1,0	1,5
20	1,3	1,8	400	0,9	1,3

Фактичне значення критерію Ірвіна  $\lambda_\delta$ , визначається за виразом:

$$\lambda_\delta = \frac{t_{i+1} - t_i}{\sigma}, \quad (4.16)$$

де  $t_{i+1}$  та  $t_i$  – суміжні точки інформаційного ряду.

Помилкове значення інформації є те, для якого  $\lambda_0 > \lambda_{табл}$ . В тих випадках, коли після перевірки проводиться виключення точок інформації, необхідно заново перебудувати статистичний ряд і перерахувати середнє значення та середнє квадратичне відхилення.

Уявлення про відповідність дослідних даних теоретичному закону розподілу можна одержати шляхом наочної відповідності гістограми та функції розподілу  $f(t)$ , а також шляхом порівняння величини  $\sum_{i=1}^n P_{oi}$  з відповідними значеннями інтегральної теоретичної функції розподілу  $F(t)$ .

Відносною характеристикою розсіювання показника надійності є коефіцієнт варіації:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{T} - T_{зм}}, \quad (4.17)$$

де  $T_{зм}$  – величина зміщення ряду.

Між теоретичною кривою та експериментальним статистичним розподілом можливі завжди деякі розбіжності. Існують оцінки збігу дослідних та теоретичних даних по так званим "критеріям згоди". Фізичне розуміння перевірки "згоди" полягає в тому, щоб визначити ступінь розбіжності дослідної та теоретичної ймовірностей. При цьому як міра співпадання або розбіжності можуть бути обрані різні критерії згоди: сума квадратів відхилення теоретичних ймовірностей від дослідних, або сумарне відхилення накопичених дослідних ймовірностей від інтегральної кривої теоретичного закону розподілу та ін.

Стосовно показників надійності сільськогосподарської техніки частіше використовують критерій Пірсона  $\chi^2$ . Критерій  $\chi^2$  визначається як сума квадратів відхилення дослідних та теоретичних частот в кожному інтервалі статистичного ряду інформації:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(m_{gi} - m_{ti})^2}{m_{ti}}, \quad (4.18)$$

де  $n$  – число інтервалів статистичного ряду;  $m_{gi}$ ,  $m_{ti}$  – дослідна та

теоретична частота в  $i$ -му інтервалі статистичного ряду;

$$m_{ii} = |F(t_{i+1}) - F(t_i)|. \quad (4.19)$$

Для визначення критерія згоди  $\chi^2$  будують статистичний ряд інформації за умови  $m_i > 5, n > 4$ .

При побудові укрупненого ряду допускається об'єднання тих інтервалів, в яких число випадків  $m_i < 5$ .

Враховуючи, що ймовірність співпадання при інших рівних умовах залежить також від повторності використаної інформації необхідно визначити число "ступенів вільності":

$$r = n - k, \quad (4.20)$$

де  $n$  – число інтервалів укрупненого статистичного ряду;  $k$  – число обов'язкових зв'язків.

**Таблиця 4.6. Критерій згоди  $\chi^2$**

$r \backslash \gamma$	0,95	0,90	0,98	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05
1	0,00	0,02	0,06	0,15	0,45	1,07	1,64	2,71	3,8
2	0,10	0,21	0,45	0,71	1,39	2,41	3,22	4,60	6,0
3	0,35	0,58	1,00	1,42	2,37	3,66	4,64	6,25	7,8
4	0,71	1,06	1,65	2,20	3,36	4,88	5,99	7,78	9,5

Враховуючи, що ймовірність співпадання при інших рівних умовах залежить також від повторності використаної інформації необхідно для входження в табл. 4.4 визначити число "ступенів вільності":

$$r = n - k, \quad (4.21)$$

де  $n$  – число інтервалів укрупненого статистичного ряду;  $k$  – число обов'язкових зв'язків.

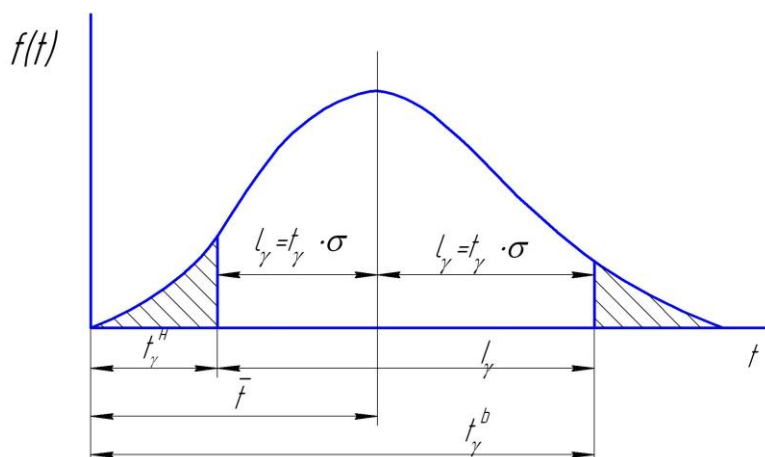
Стосовно двопараметричних законів (нормального та Вейбулла) число обов'язкових зв'язків  $k=3$  (два параметри розподілу і третій зв'язок  $\sum_{i=1}^n P_i = 1$ ).

По розрахованому значенню критерія  $\chi^2$  і числу "r" визначають ймовірність згоди  $P(x)$  теоретичного і емпіричного розподілу. Якщо  $P(\chi^2) > 0,05$ ,

то вважають, що емпіричний розподіл узгоджується з теоретичним. В протилежному випадку вибирають найбільш схожий теоретичний закон.

Точність оцінювання показника надійності проводиться по двох величинах: довірча імовірність  $\gamma$  оцінки, яка характеризує частку випадків, одержану із заданою відносною помилкою  $\delta$  і визначає границі можливих коливань значення показника надійності. Якщо були проведені спостереження за  $N$  виробами і на цій основі визначено середнє значення показника надійності  $\bar{t}$ , то одиничні значення цього показника конкретного виробу можуть в крайніх випадках відрізнятись від дійсного значення на величину  $\pm 3\sigma$  при нормальному законі розподілу і на величину від  $0,1a$  і до  $2,5a$  при законі розподілу Вейбулла-Гнеденка.

Довірча імовірність  $\gamma$  визначається площиною під кривою щільності розподілу в межах границь коливань значень показника надійності (рис. 4.3) відносно нормального закону розподілу.



**Рис.4.3. Довірчі границі розсіювання показника надійності**

$t_\gamma^H$  та  $t_\gamma^B$  – нижня та верхня довірчі границі відповідно:  $J_\gamma = t_\gamma^B - t_\gamma^H$  – довірчий інтервал, який перекриває можливі значення зміни показника надійності;  $I_\gamma = t_\gamma \cdot \sigma_t$  – найбільша помилка

Визначення показників надійності може бути виконане двома способами: параметричним – по параметрах прийнятого теоретичного закону розподілу, якому відповідають дані спостережень; непараметричним – при невідомому законі розподілу. Вирази для визначення точкових оцінок показників надійності для нормального закону та закону Вейбулла-Гнеденка наведені в

табл. 4.18.

**Таблиця 4.7. Вирази для визначення точкових оцінок показників надійності параметричним методом**

Закон розподілу з щільністю	Нормальний $f(t) = (\sigma_t \cdot \sqrt{2\pi})^{-1} \cdot e^{-(t_i - \bar{t})^2 / 2\sigma_t^2}$	Вейбулла-Гнеденка $f(t) = \left\{ b \cdot a^{-1} \cdot [(t - c) \cdot a^{-1}]^{b-1} \right\} \cdot e^{-[(t-c)a^{-1}]^b}$
Середні показники	$\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n t_i$	$\bar{t} = a \cdot \Gamma(1 + b^{-1}) + c$
Гама-відсотковий показник	$\gamma / 100 = 0,5 - 0,5 \cdot F_0[(t_\gamma - \bar{t}) \cdot \sigma_t^{-1}]$	$t_\gamma = a \cdot [-\ln(\gamma / 100)]^{1/b} + c$
Імовірність безвідмовної роботи	$P(t) = 0,5 - 0,5 \cdot F_0[(t_\gamma - \bar{t}) \cdot \sigma_t^{-1}]$	$P(t) = e^{-[(t-c)a^{-1}]^b}$

Вирази для непараметричний методу розрахунку показників надійності по результатах експлуатаційних спостережень наведено в табл. 4.19.

**Таблиця 4.8. Вирази точкових оцінок показників надійності непараметричним методом**

Плани спостережень	Середні значення показників (ресурса, строку служби, напрацювання до відмови, часу відновлення)	Гама-відсоткові показники (ресурса, строку служби, строку зберігання)	Імовірність	
			Безвідмовної роботи	Відновлення (відмови) в заданий час
[NUN]	$\frac{\left( \sum_i^N t_i \right)}{N}$	$\frac{\max t_i \text{ при } [n(t_i) + 1]}{N} \leq 1 - \frac{\gamma}{100}$	$\frac{[N - n(t_i)]}{N}$	$\frac{n(t)}{N}$
[NUR]	$\frac{\left[ \sum_{i=1}^r t_i + (N - r) \cdot t_r \right]}{r}$	$\frac{\max t_i \text{ при } [n(t_i) + 1]}{N} \leq 1 - \frac{\gamma}{100}$	$\frac{[N - n(t_i)]}{N}$	$\frac{n(t)}{N}$
[NUT]	—	—	$t < t_r$	$t < t_r$

Примітка:  $r$  – число відмов (граничних станів) за час спостережень;  $n(t_i)$  – число членів варіаційного ряду, передуючих значенню  $t_i$ ;  $t_i$  – значення показника у варіаційному ряді  $t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq \dots \leq t_i \leq t_r$ .



#### 4.8. Методи оцінки надійності по результатах завершених випробувань

Відомо, що при оцінці надійності техніки можуть бути використані різні способи обробки результатів випробувань, які залежать від їх виду (стендові, полігонні та експлуатаційні), прийнятого плану випробувань (ГОСТ 27.002-83) та обсягу одержаної інформації (завершені та незавершені випробування).

Для обробки результатів стендових випробувань; поданих рядом випадкових напрацювань до відмови досліджуваного виробу (елемента), можуть бути використані методи: аналітичний (методи моментів, квантилей, максимальної правдоподібності) та графо-аналітичні (метод імовірних сіток та інші).

Розглянемо сутність основних методів оцінки надійності по результатах завершених випробувань.

*Метод моментів.* Цей метод часто пропонується для обробки результатів випробувань за планом [NUN]. За даними про відмови передусім обчислюють емпіричні моменти, прирівнюють їх до теоретичних і, розв'язуючи систему рівнянь, зв'язуючих параметри та моменти, одержують оцінки відповідних теоретичних параметрів.

Суть методу полягає в тому, що моменти розподілу, які залежать від невідомих параметрів, прирівнюються до їх емпіричних моментів, які самі обчислюють по окремих виразах.

Враховуючи, що початковий (емпіричний) момент  $k$ -го порядку визначається за виразом:

$$\mu_k = \int_{-\infty}^{+\infty} t^k \cdot f(t) \cdot dt, \quad (4.22)$$

а центральний момент – за виразом:

$$M_k = \int_{-\infty}^{+\infty} (t - \bar{t})^k \cdot f(t) \cdot dt, \quad (4.23)$$

де для функції розподілу визначають стільки моментів, скільки невідомих

параметрів, та прирівнюють їх до виразів, які відповідають емпіричним моментам (рівнянь складають стільки, скільки є невідомих параметрів розподілу). Так, для експоненціального розподілу достатньо одного рівняння, для нормального (гаусівського) розподілу та гама-розподілу необхідно два рівняння.

Емпіричні моменти обчислюють за відомими формулами:

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}, \text{ та } \sigma(t) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}.$$

Вид розподілу в цьому випадку має бути відомим.

Основними недоліками методу моментів є: по-перше, неможливість використання його для опрацювання зрізаних та багаторазово зрізаних вибірок, оскільки емпіричні моменти визначаються тільки для повних вибірок; по-друге, для деяких законів розподілу оцінки параметрів не є найкращими з точки зору їх ефективності.

*Метод квантилей.* Цей метод в основному використовується для обробки результатів випробувань, які проводяться за планом [NUN].

При цьому методі квантиль теоретичного розподілу дорівнює емпіричній квантилі. Значення емпіричної інтегральної функції при обсягу вибірки з 20...50 визначають за виразом:

$$\hat{F}(t_i) = 1 - \hat{P}(t) = \frac{i}{N+1}, \quad (4.24)$$

де "i" позначають кількість елементів, що відмовили на проміжку часу  $t_i$  ( $i=1,2,\dots,N$ ). У випадку  $N>20\dots50$  пропонується застосувати групування даних про відмови. Інтервал  $(t_{\max}-t_{\min})$  розбивають на  $k$  рівних інтервалів. Число відмов в  $j$ -ому інтервалі позначають через  $m_j$ .

Після групування результатів досліджень емпіричну функцію розподілу в точках, що знаходяться на середині  $j$ -ого інтервалу, обчислюють за виразом:

$$\hat{F}\left(\frac{t_{j-1} + t_j}{2}\right) = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_j}{N} \quad (j = 1, 2, \dots, k). \quad (4.25)$$

Підстановка дослідних значень  $\hat{P}(t_i)$  та  $t_i$  у вираз для визначення імовірності безвідмовної роботи на інтервалі часу дає можливість отримати рівняння, які дозволяють провести оцінку шуканих параметрів розподілу.

Вид розподілу в цьому випадку має бути відомим. Якщо відомі значення другого емпіричного показника надійності (щільність імовірності, інтенсивності відмов, гама-відсотковий ресурс), то можна одержати оцінки параметрів розподілу, прирівнявши їх до відповідних теоретичних значень.

Вирази для визначення точкових оцінок показників надійності для основних розподілів наведені в ГОСТ 27.503-81 (СТ СЄВ 2836-81).

Використаємо метод для функції розподілу Вейбулла-Гнеденка.

Для цього виберемо два напрацювання:  $t_1$  та  $t_2$  ( $t_1 < t_2$ ), які відповідають накопиченим частотам  $m_1$  та  $m_2$ . Шукані рівняння (дві теоретичних квантилі) подано у вигляді:

$$\begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\frac{t_1}{a}\right)^b\right] = \frac{m_1}{N}, \\ 1 - \exp\left[-\left(\frac{t_2}{a}\right)^b\right] = \frac{m_2}{N}. \end{cases} \quad (4.26)$$

Із системи рівнянь (4.26) можна знайти основні параметри розподілу Вейбулла-Гнеденка:

$$\begin{cases} b = \frac{\ln \cdot \ln\left(1 - \frac{m_1}{N}\right)^{-1} - \ln \cdot \ln\left(1 - \frac{m_2}{N}\right)^{-1}}{\ln t_1 - \ln t_2}, \\ \ln a = \frac{1}{b} \ln \cdot \ln\left(1 - \frac{m_1}{N}\right) - \ln t_1. \end{cases} \quad (4.27)$$

Метод квантилей по точності аналогічний методу моментів. Але по методу квантилей можна визначити параметри розподілу у випадку зрізаної вибірки, при цьому вибрані частоти  $m_1$  та  $m_2$  повинні бути меншими за числа об'єктів  $n$ , що відмовили, тобто  $m_1 < m_2 < n$ .

*Метод максимальної правдоподібності (ММП)* є найбільш загальним методом оцінки параметрів розподілу по елементах вибірки при різних планах

випробувань. Закон розподілу має бути відомий в цьому випадку до проведення випробувань.

Припустимо, що в процесі спостережень одержана вибірка відмов  $t_1, t_2, \dots, t_N$ . Оточимо кожну точку  $t_i$ ; зоною  $\varepsilon$ , тоді одержимо деякий набір інтервалів. Ймовірність того, що перше спостереження попадає в перший інтервал, друге – в другий, і т.д., дорівнює добутку імовірностей:

$$P = f(t_1) \cdot \varepsilon \cdot f(t_2) \cdot \varepsilon \dots f(t_n) \cdot \varepsilon = \prod_{i=1}^N f(t_i) \cdot \varepsilon^N. \quad (4.28)$$

Якщо відомий тільки загальний вид щільності  $f(t)$ , а параметри розподілу невідомі, то їх необхідно вибирати такими, щоб імовірність  $P$  була максимальною. Замість ймовірності  $P$  розглядають функцію:

$$L = \ln \frac{P}{\varepsilon^N} = \sum_{i=1}^N \ln f(t_i), \quad (4.29)$$

яка називається функцією правдоподібності. При цьому використовується той факт, що ймовірність  $P$  та функція  $L$  мають максимуми при одних і тих же значеннях розшукуваних параметрів. Якщо визначені параметри позначити через "а", "в" ... (як у випадку розподілу Вейбулла-Гнеденка), то для їх знаходження необхідно розв'язати систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial a} = 0; \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0. \end{cases} \quad (4.30)$$

Розглянемо, наприклад, експоненціальний розподіл. При цьому функція щільності імовірності має вигляд:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}. \quad (4.31)$$

Якщо дослідним шляхом одержані напрацювання до відмови  $t_1, t_2, \dots, t_N$  то функція правдоподібності буде мати вигляд:

$$L = \ln \left[ (\lambda \cdot e^{-\lambda t_1}) \cdot (\lambda \cdot e^{-\lambda t_2}) \cdot \dots \cdot (\lambda \cdot e^{-\lambda t_N}) \right] = \ln \left[ \lambda^N \cdot \prod_{i=1}^N e^{-\lambda t_i} \right].$$

Після логарифмування маємо:

$$L = N \cdot \ln \lambda \cdot \sum_{i=1}^N \lambda \cdot t_i. \quad (4.32)$$

Диференціюючи останній вираз по  $\lambda$  та прирівнюючи результат до нуля, одержуємо рівняння

$$\frac{N}{\lambda} - \sum_{i=1}^N t_i = 0, \quad (4.33)$$

звідки

$$\lambda = \frac{N}{\sum_1^N t_i}. \quad (4.34)$$

Для всіх основних планів випробувань [NUN], [NUR], [NUT], [NRr], [NRT] рівняння для одержання точкових та інтервальних оцінок параметрів основних розподілів одержані і наведені в нормуючих документах. Для двопараметричних законів розподілу рівняння одержані після перетворень, є трансцендентними. Вони вирішуються методом ітерації, а також графічним способом на ЕОМ.

Визначається, що метод найбільшої правдоподібності є найбільш сильним методом одержання незміщених, спроможних та ефективних оцінок параметрів розподілу. ММП дозволяє також одержати оцінки параметрів для зрізаної вибірки. До недоліків методу необхідно віднести складність одержаних розрахункових залежностей для деяких законів розподілу.

*Метод імовірних сіток.* Цим методом користуються для графічного визначення оцінок параметрів і перевірки узгодження емпіричного розподілу з теоретичним. Імовірна сітка являє собою прямокутну систему координат, на якій масштаб вибраний таким чином, що графік інтегральної функції цього розподілу являє собою пряму лінію. Наближення дослідних точок до прямої свідчить про відповідність їх вибраному розподілу. Параметри прямої визначають шукані оцінки параметрів розподілу. В подальшому  $S_x$  будемо позначати абсцису (відповідно  $S_y$ -ординату) точки, яка відповідає значенню аргументу  $x=t$ , або  $x=\ln t$  та функції  $y=F(t)$ .

Відношення  $S_x/x$  називають коефіцієнтом масштабу і позначають  $K_x$  (відповідно  $K_y$ ). Коефіцієнт масштабу  $K_x(K_y)$  обчислюють заздалегідь як відношення обраної ширини графіка  $H$  (довжина графіка по осі ординат " $L$ ") до розмаху величини  $x(y)$ , який дорівнює  $(t_{\max}-t_{\min})$ , або  $\ln t_{\max}-\ln t_{\min}$  відповідно  $(y_{\max}-y_{\min})$ . Впровадження коефіцієнтів масштабу  $K_x(K_y)$  дозволяє прискорити побудову графіків та підвищити точність оцінок (табл.4.20).

**Таблиця 4.9. Метод ймовірностних сіток**

Закон розподілу		Нормальний	Вейбулла	Експоненціальний
Величина коефіцієнту масштаба	$K_x$	$K_x = \frac{L}{t_{\max} - t_{\min}}$	$K_x = \frac{L}{(\ln t_{\max} - \ln t_{\min})}$	$K_x = \frac{L}{t_{\max} - t_{\min}}$
	$K_y$	$F_{\min}=0,001$ $F_{\max}=0,999$ $y_{\min}= -3,1$ $y_{\max}= 3,1$ $K_y = \frac{H}{6,18}$	$F_{\min}=0,001$ $F_{\max}=0,999$ $y_{\min}= -6,9$ $y_{\max}= 1,93$ $K_y = \frac{H}{8,81}$	$F_{\min}=0$ $F_{\max}=0,999$ $y_{\min}= 0$ $y_{\max}= 6,91$ $K_y = \frac{H}{6,91}$
Величина обрана як	аргумент	$t_i$	$\ln t_i$	$t_i$
	функція	$y_i = U[F_0(t_i)]$	$y_i = \ln \{- \ln [1 - \widehat{F}(t_i)]\}$	$y_i = -\ln [1 - \widehat{F}(t_i)]$
Величини, викладені по осях	Абсцис $S_t$	$S_{t_i} = k_x \cdot t_i$	$S_{t_i} = k_x \cdot \ln t_i$	$S_{t_i} = k_x \cdot t_i$
	Ордината $S_y$	$S_{y_i} = k_y \cdot y_i$	$S_{y_i} = k_y \cdot y_i$	$S_{y_i} = k_y \cdot y_i$
Величина шуканих оцінок		$\bar{t} = \frac{OA}{k_x}$ $\bar{\sigma} = \frac{k_y}{k_x} \cdot \frac{1}{q}$	$\hat{b} = \frac{k_x \cdot 8,84}{H} \cdot q$ $k_x \cdot \ln a = OA$	$\hat{\lambda} = \frac{k_x}{H} \cdot 6,91q$

Наочність розглянутого методу ілюструється таким чином. Прологарифмуючи рівняння імовірності безвідмовної роботи для експоненціального закону, одержуємо:

$$\ln [1 - F(t)] = \ln P(t) = -\lambda t. \quad (4.35)$$

Якщо на горизонтальній осі графіка будемо відкладати час  $t$  за  $x$ , а на вертикальній –  $y = -\ln [1 - \widehat{F}(t_i)]$  або  $y = -\ln \widehat{P}(t_i)$ , то цілком ясно, що якщо

моменти відмов підкоряються експоненціальному закону, то графік одержимо у вигляді прямої лінії, яка проходить через початок координат, тангенс кута нахилу якої визначає інтенсивність відмов  $\lambda$ .

Для розподілу Вейбулла-Гнеденка подвійне логарифмування інтегральної функції приводить до рівняння прямої:

$$\ln[-\ln\{1 - F(t)\}] = b \cdot \ln t - b \cdot \ln a, \quad (4.36)$$

де

$$y = [-\ln\{1 - F(t)\}]; \quad x = \ln t; \quad b = A;$$

$$-b \cdot \ln a = B; \quad y = A \cdot x + B.$$

У випадку нормального розподілу ймовірність безвідмовної роботи дорівнює:

$$P(t) = F_0\left(\frac{\bar{t} - t}{\sigma}\right) = 1 - F_0\left(\frac{t - \bar{t}}{\sigma}\right), \quad (4.37)$$

де  $F_0(y)$  – значення нормованої центрованої функції нормального розподілу;  $y = U(F)$  – квантиль нормального розподілу, яка відповідає значенню  $F$ , при чому  $y = \frac{\bar{t} - t}{\sigma}$ .

Знаючи дослідні значення  $\hat{P}(t_i)$  або  $\hat{F}(t_i)$  і використовуючи таблицю нормованої центрованої функції нормального розподілу, можна знайти відповідні значення  $y_i$ .

Побудувавши на графіку точки  $t_i, y_i$  можна, виходячи з положення яке вони займають, дати оцінку допустимості в даному випадку нормального закону, а також про значення його параметрів.

Опрацювання по методу ймовірностних сіток може бути значно полегшено при використанні табл. 4.20, де наведені всі використані розрахункові співвідношення для деяких безперервних розподілів. При цьому прийняті позначення:  $O$  – початок координат,  $A$  – точка перетину одержаної прямої з віссю абсцис,  $q$  – кутовий коефіцієнт одержаної прямої.

#### 4.9. Методи оцінки надійності по результатах незавершених (зрізаних) випробувань

При незавершених випробуваннях зустрічається типове явище, коли на момент їх припинення відмовила тільки частина взятих під нагляд виробів, інші є або працездатними, або раніше були зняті з випробувань з різних причин (проведення ТО та поточного ремонту, неспівпадання початку експлуатації і т.д.).

В цих та інших аналогічних випадках має місце так зване "припинення" випробувань частини виробів. Оцінка надійності тільки по виробках, що відмовили, без врахування напрацювань припинених виробів приводить до втрати частини інформації. Такі випробування будемо називати, зрізаними або незавершеними. Результати зрізаних випробувань наведені двома рядами випадкових напрацювань  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_i, \dots, t_n$  до заміни елемента, що відмовив, та  $t'_1, t'_2, \dots, t'_j, \dots, t'_m$  до припинення випробувань.

Для такої інформації можна використати наступні методи її обробки: максимальної обробки правдоподібності; метод Джонсона, метод Нельсона та ін. Розглянемо їх особливості.

**Метод максимальної правдоподібності.** Припустимо, що при обробці результатів зрізаних випробувань функція щільності імовірності та інтегральна функція розподілу напрацювань до відмови дорівнюють  $f(t)$  та  $F(t)$ , тоді функцію правдоподібності можна представити у вигляді:

$$L = \ln \left\{ \prod_{i=1}^n f(t_i) \cdot \prod_{j=1}^m [1 - F(t'_j)] \right\}. \quad (4.38)$$

Якщо розподіл напрацювань до відмови підпорядковується експоненціальному закону, то

$$f(t_i) = \lambda \cdot e^{-\lambda t_i}; \quad (4.39)$$

$$1 - F(t_i) = e^{-\lambda t_i}. \quad (4.40)$$

Підставляючи вираз (4.39) та (4.40) у вираз (4.38), маємо:



$$L = \ln \left\{ \prod_{i=1}^n (\lambda \cdot e^{-\lambda t_i}) \cdot \prod_{j=1}^m (\lambda \cdot e^{-\lambda t'_j}) \right\} = n \cdot \ln \lambda - \sum_{i=1}^n \lambda \cdot t_i - \sum_{j=1}^m \lambda \cdot t'_j. \quad (4.41)$$

Диференціюючи вираз (4.41) по  $\lambda$  та прирівнюючи результат до нуля одержимо рівняння  $\frac{n}{\lambda} - \sum_{i=1}^n t_i - \sum_{j=1}^m t'_j = 0$ , звідки:

$$\lambda = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{j=1}^m t'_j}. \quad (4.42)$$

По групованому способу представлення результатів спостережень вихідні дані розташовуються відповідно табл. 4.21.

**Таблиця 4.10. Групування наведених результатів спостережень**

Інтервал напрацювання	$\Delta t_1$	$\Delta t_2$	...	$\Delta t_k$
Середина інтервалу напрацювання	$t_1$	$t_2$	...	$t_k$
Число виробів, що відмовили, в даному інтервалі	$n_1$	$n_2$	...	$n_k$
Число припинення випробувань виробів в даному інтервалі	$m_1$	$m_2$	...	$m_k$

Для інтервального ряду оцінка параметра експоненціального закону розподілу визначається за виразом:

$$\lambda = n / \left[ \sum_{i=1}^k (n_i + m_i) \cdot t_i \right]. \quad (4.43)$$

*Метод Джонсона.* Ідея метода Джонсона полягає в прогнозуванні кількості виробів, що відмовили, на основі незавершених випробувань.

При цьому припускають, що кожний припинений виріб відмовляє, якщо будуть продовжені випробування, і тим самим збільшиться загальна кількість відмов порівняно з початковими даними.

Обробку результатів спостережень проводять в такому порядку. Складають варіаційний ряд, в кожному інтервалі якого фіксують кількість виробів  $n_i$ , що відмовили, та припинених  $m_i$ .

Далі визначають приріст середнього порядкового номеру виробу, що відмовив, розташованого між сусідніми групами припинених:

$$D_i = \frac{N+1-r_{i-1}}{N+1-N_i}, \quad (4.44)$$

де  $N$  – обсяг вибірки ( $m+n$ );  $r_{i-1}$  – середній порядковий номер попереднього виробу, що відмовив;  $N_i = \sum_{j=1}^{i-1} (m_j + n_j) + m_i = \sum_{j=1}^{i-1} (m_j + n_{j-1})$  – загальна кількість виробів, що відмовили, від першого до  $(i-1)$  інтервалу, підсумоване з загальною кількістю припинених виробів від першого до  $i$ -го інтервалу включно.

Якщо варіаційний ряд починається з одного або групи виробів, що відмовили, то їх середні порядкові номери дорівнюють відповідно  $r_1=1$  до першої заміни,  $r_2=2$  – для другої і т.д. Якщо ряд починається з припинених виробів, то при розрахунку першого приросту  $\Delta_1$  середній порядковий номер  $r_{i-1}=0$ .

Новий приріст обчислюють кожний раз, коли у варіаційному ряді з'явиться виріб, що відмовляє.

Далі знаходять середній порядковий номер  $i$ -го виробу, що відмовив:

$$r_i = r_{i+1} + \Delta_i. \quad (4.45)$$

Якщо в розглянутому інтервалі розміщена група виробів  $n_i$ , що відмовили, то підраховують середній порядковий номер останнього заміненого виробу:

$$r_i = r_{i+1} + \Delta_i \cdot n_i. \quad (4.46)$$

Виконані перетворення дозволяють визначити експериментальні значення дослідного розподілу  $F(t)$ , відповідаючі напрацюванню  $t_i$  виробів, що відмовили:

$$\hat{F}(t_i) = \frac{r_i}{N+1}. \quad (4.47)$$

В інтервалі, де відсутні вироби, що відмовили, значення  $\hat{F}(t_i)$  не підраховують. В цьому випадку не можна приймати  $\hat{F}(t_i)=0$  або  $\hat{F}(t_i)=\hat{F}(t_{i-1})$ . По знайденим значенням  $\hat{F}(t_i)$ , що відповідають  $t_i$  графічним шляхом, використовуючи метод ймовірних сіток, перевіряють відповідність

теоретичного розподілу емпіричному та знаходять оцінки параметрів розподілу.

*Метод Нельсона.* Графо-аналітичний метод Нельсона використовують для оцінки параметрів розподілу, а також для перевірки відповідності теоретичного розподілу дослідним даним, коли в досліджуваній партії виробів відмовило не менше трьох виробів.

Метод Нельсона базується на оцінці функції інтенсивності відмов. На підставі загальною виразу закону надійності будь-який розподіл можна записати у вигляді:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) \cdot dt\right], \quad (4.48)$$

де  $\lambda(t)$  – функція інтенсивності відмов.

Інтегральна функція замін визначається виразом:

$$A(t) = \int_0^t \lambda(t) \cdot dt = -\ln[1 - F(t)]. \quad (4.49)$$

Із цього рівняння видно зв'язок функції  $F(t)$  з інтегральною функцією замін. Отже, якщо знайдено спосіб одержання за дослідними даними значенням оцінок для  $A(t)$ , то формула (4.49) може бути використана для визначення параметрів розподілу.

Розглянемо спосіб знаходження параметрів на прикладі розподілу Вейбулла-Гнеденка, для якого справедливе  $A(t) = \left(\frac{t}{a}\right)^b$ .

Виконаємо логарифмування виразу:

$$\ln A(t) = b(\lg t - \lg a), \quad (4.50)$$

тобто логарифм  $A(t)$  є лінійною функцією від логарифму  $t$ .

Цю властивість розподілу Вейбулла-Гнеденка використовують для побудови сіток інтенсивності аналогічно імовірнісним сіткам. Розрахунок виконують у наступному порядку. Нумерують напрацювання виробів в зворотному порядку, тобто виробу, що відмовив, або припиненому першому виробу присвоюють номер  $\rho_1=N$ , другому  $\rho_2=N-1$  і т.д. Напрацювання

останнього виробу у варіаційному ряді повинно дорівнювати  $\rho_N=1$  (де  $N=m+n$  – об'єм вибірки). Далі обчислюють значення інтенсивності відмов у відсотках в точках  $t_i$ :

$$\lambda(t_i) = \frac{100}{\rho_i}, \quad (4.51)$$

та визначають накопичену (інтегральну) інтенсивність відмов:

$$A(t_i) = \sum_j^i \lambda(t_j). \quad (4.52)$$

Схема проведення розрахунків показана в табл. 4.22.

**Таблиця 4.11. Визначення функції інтенсивності заміні**

№ п/п	Напрацювання виробів до		Значення	Інтенсивність відмов	Інтегральна інтенсивність відмов $\sum \lambda(t_i)\%$
	відмови	Припинення випробувань			
1	–	$t'_1$	$N$	–	–
2	$t_1$	–	$N-1$	$\lambda_1 = \lambda(t_1)$	$\lambda_1$
3	$t_2$	–	$N-2$	$\lambda_2 = \lambda(t_2)$	$\lambda_1 + \lambda_2$
–	–	–	–	–	–
–	–	–	–	–	–
$N-r$	$t_n$	–	$r+1$	$\lambda_n = \lambda(t_n)$	$\sum_{j=1}^r \lambda_j$
–	–	–	–	–	–
–	–	$t'_m$	1	–	–

Для визначення параметрів розподілу одержані пари значень  $t_i, \lambda(t_i)$ , наносять на сітку інтенсивності, для якої масштаби вибирають у відповідності з рівняннями (4.49) та (4.50). Для розподілу Вейбулла-Гнеденка зручно використати сітку, яка має логарифмічні шкали по осях абсцис та ординат, або використати в якості аргумента функції логарифми відповідних величин.

При відповідності вибраного типу сітки інтенсивності дійсному розподілу експериментальні точки розташовуються близько до прямої лінії.

Для розрахунку емпіричної функції розподілу при незавершених випробуваннях в якості аналога варіаційного ряду може бути використана ранжована діаграма реалізацій. Ця діаграма являє собою ряд, в якому реалізації,

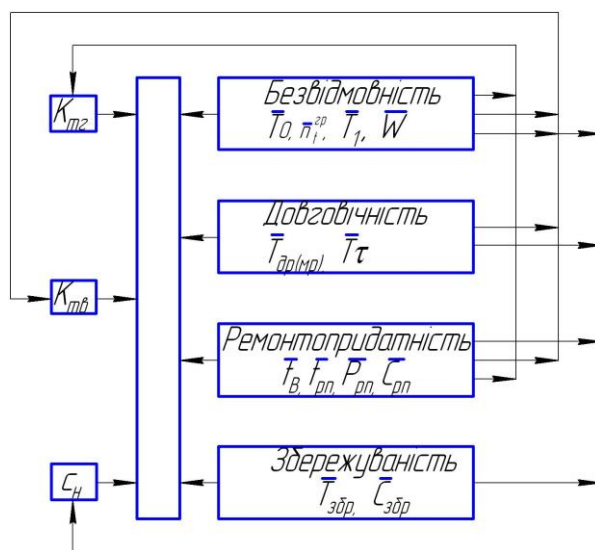
характеризуючи напрацювання елементів, що відмовили, розташовані в порядку зростання, а потім напрацювання припинених в порядку зменшення.

Значення емпіричної функції розподілу визначають, як і раніше, за виразом  $F(t_i) = \frac{i}{N+1}$ .

При цьому  $i$  – число елементів, що відмовили до та в розглянутий момент часу  $t_i$ ,  $N_i$  – загальне число працюючих в даний момент та відмовлених раніш елементів. Очевидно, що  $N_i$  відповідає різниці загального числа випробуваних елементів  $N$  та числа працездатних виробів, випробування яких було припинено до розглянутого моменту часу  $t_i$ .

Таким чином розглянуті методи дають можливість обчислення надійності виробу по дослідних даних про їх відмови. Але у даний час немає достатньо обґрунтованих рекомендацій по використанню того чи іншого методу. Тому доцільно використовувати одночасно різні методи і користуватися оцінками, які призводять до найгірших показників надійності.

Отже надійність машин неможливо оцінити однією величиною, оскільки це комплексний показник і характеризується він безвідмовністю, довговічністю, ремонтпридатністю, збереженістю (рис. 4.4).



**Рис.4.4. Структура показників надійності машин:**  $\bar{T}_0$ ,  $\bar{n}_t^{gp}$ ,  $\bar{T}_1$ ,  $\bar{W}$  – відповідно середнє напрацювання на відмову, середня кількість відмов, 1, 2, 3 групи складності за час  $T$ , напрацювання до першої відмови, середній параметр потоку відмов;

$\bar{T}_{др(мр)}$ ,  $\bar{T}_\gamma$  – відповідно середній доремонтний (міжремонтний) ресурс, гамма-процентний ресурс;  $\bar{t}_в$ ,  $\bar{t}_{рп}$ ,  $\bar{P}_{рп}$  і  $\bar{C}_{рп}$  – відповідно середній для відновлення відмови, середні питомі витрати часу, праці і коштів на підтримання ремонтпридатності;  $\bar{T}_{збр}$ ,  $\bar{C}_{збр}$  – відповідно середній строк збережуваності і середні питомі витрати на збереженість

У загальному виді надійність визначається коефіцієнтами технічної готовності  $K_{гг}$ , технічного використання  $K_{тв}$  і питомою вартістю надійності  $C_n$ .

Коефіцієнт технічної готовності  $K_{гг}$  характеризує неплановий ремонт (усунення відмов), а його величина залежить від показників безвідмовності і ремонтпридатності. Визначається цей показник за виразом:

$$K_{гг} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N t_i + \sum_{i=1}^N t_{прi}^{об}}; \quad (4.53)$$

де  $t_i$ , напрацювання за час випробувань  $i$ -ої машини;  $t_{пр}^{об}$ ,  $t_{пр}$  – тривалість пошуку і усунення відмов  $i$ -ої машини за час випробувань;

Коефіцієнт технічного використання  $K_{тв}$ , крім сумарних витрат на усунення відмов, додатково враховує затрати часу на плановий ремонт і технічне обслуговування. Оцінюється показник за виразом:

$$K_{тв} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N t_i + \sum_{i=1}^N t_{прi}^{об} + \sum_{i=1}^N t_{тоi}^{об}}, \quad (4.54)$$

де  $t_{то}^{об}$  – тривалість проведення технічного обслуговування  $i$ -ої машини за час випробувань з урахуванням організаційного й оперативного часу.

Цей коефіцієнт визначається показниками безвідмовності, ремонтоздатності і довговічності.

Найповніше надійність машин може бути оцінена її питомою вартістю  $C_n$ . Питоме вартість надійності – це комплексний економічний показник, який характеризує витрати на виробництво, технічне обслуговування, ремонт, а також втрати від простою машин через відмови:

$$\bar{C}_H = \frac{\bar{C}_M}{\bar{T}} + \left( \frac{\sum_{i=1}^N \bar{C}_{рп_i}}{\sum_{i=1}^N \bar{T}_i} + \frac{\sum_{i=1}^N \bar{C}_{зрб_i}}{\sum_{i=1}^N \bar{T}_i} + \frac{\sum_{i=1}^N \bar{C}_{пр_i}}{\sum_{i=1}^N \bar{T}_i} \right), \quad (4.55)$$

де  $\bar{C}_M$  – вартість нової машини, грн.;  $\bar{C}_{рп_i}$  і  $\bar{C}_{зрб_i}$  – витрати на технічне обслуговування, ремонт, усунення відмов і зберігання  $i$ -ої машини за час випробувань, грн.;  $\bar{C}_{пр_i}$  – втрати від простоїв  $i$ -ої машини, грн.;  $\bar{T}_i$  – ресурс  $i$ -ої машини; мото-год;  $\bar{T}$  – середній ресурс мото-год.

Повна й об'єктивна оцінка надійності машин, крім комплексних, потребує визначення одиничних показників, які окремо характеризують її властивості: безвідмовність, довговічність, ремонтопридатність і збереженість.

Визначення перерахованих показників можливе лише на основі проведення експлуатаційних випробувань, які потребують значної кількості машин і тривалих строків (6...8 років), повних і достовірних даних стосовно машиновикористання. Такі випробування проводять у науково-дослідних інститутах, а їх результати застосовують не стільки для підвищення надійності існуючих машин, скільки для розробки їх нових (перспективних) конструкцій та обґрунтування (уточнення) нормативів.

Надійність сільськогосподарської техніки оцінюється на стадіях:

- технічного завдання, коли показники надійності визначаються розрахунковим методом;
- розробки технічного проекту, коли показники надійності уточнюються розрахунковим методом з використанням даних по машинах-аналогах;
- першого етапу попередніх (заводських) випробувань, коли експериментальним методом дається попередня оцінка надійності машин та їх складових частин;
- другого етапу попередніх (відомчих) випробувань, коли визначається готовність до приймальних (державних, міжвідомчих) випробувань;
- приймальних (державних, міжвідомчих) контрольних випробувань, коли перевіряється відповідність фактичних показників надійності встановленим нормативам.

#### **4.10. Загальна характеристика методів прискорених випробувань сільськогосподарської техніки на надійність**

Прискорені випробування техніки на надійність одержали широке визнання в Україні та за рубежом. Прискорені випробування СГТ проводять всіма провідними зарубіжними фірмами на спеціалізованих випробувальних центрах та полігонах. Багатий досвід прискорених випробувань накопичений відділом сільськогосподарського машинобудування університету штату Небраска (США), французьким науково-експериментальним центром СНЕЕМА, фірмами "Форд", "Масей-Ферпосон", "Олівер" (США), фірмою "Ганомаг (ФРН) та ін.

До сільськогосподарської техніки, яка виробляється в Японії, ставляться вимоги, щоб вона повністю відповідала регіональним умовам експлуатації. Випробування на міцність в Японії поділяють на польові та стендові. Від випробувань вимагається задавання раціональних режимів прискорених випробувань та визначення ефективних значень діючих навантажень, враховуючи тривалість використання машин по видах робіт в експлуатації. В процесі прискорених випробувань створюються і використовуються спеціальні пристрої, які відтворюють навантаження. Ці пристрої дозволяють проводити ресурсні випробування сільськогосподарської техніки. Вони використовуються в лабораторіях та на полігонах НВО "НАТІ", КубНДІТІМа, ЦМВС, Володимирському, Харківському та Мінському тракторних заводах, ВА"ПМЗ", ВІСГОМА, ВНВО "Ремдеталь" та ін.

В Україні ці випробування здійснюються Українським Центром випробування та прогнозування техніки та технологій для сільськогосподарського виробництва, Одеським науково-дослідним інститутом по тракторній техніці, заводами-виробниками техніки та іншими НДІ.

Але оцінка надійності капітально відремонтованої сільськогосподарської техніки суттєво відрізняється від оцінки надійності нової техніки. Перевірка надійності відремонтованих об'єктів шляхом їх випробувань на машино-



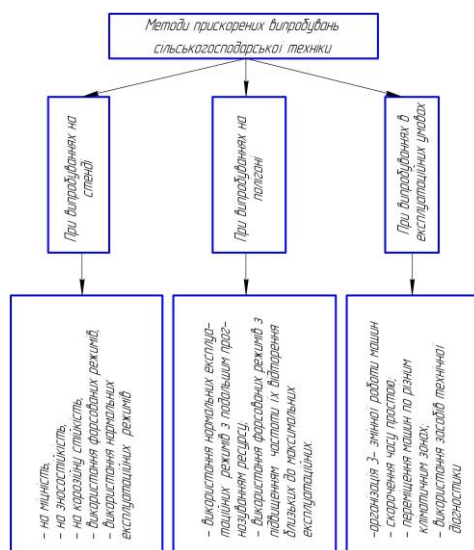
дослідних станціях (МДС), коли випробувані об'єкти в процесі експлуатації старанно контролюються, дає більш вірогідну інформацію про показники їх надійності. Але МДС від ремонтних виробництв можуть прийняти надто обмежену кількість об'єктів.

Основний недолік прийнятої системи випробувань на надійність – великі витрати часу на одержання відомостей про показники надійності капітально відремонтованих виробів. Тому цю проблему можна вирішити тільки шляхом впровадження методів прискореної оцінки показників надійності цієї техніки.

При стендових випробуваннях оцінюють експлуатаційні характеристики двигунів, відпрацьовують на надійність основні агрегати та вузли машин. Проводиться велика робота в Україні й за кордоном по відтворенню в лабораторних умовах реальних експлуатаційних режимів з метою проведення прискорених випробувань машин та їх складових частин на надійність протягом всього року.

Велика увага приділяється вибору та впровадженням матеріалів деталей, перевірці правильності конструктивних розрахунків по дійсних характеристиках завантаженості, визначених під час стендових та польових випробувань аналізу причин відмов при випробуваннях.

Класифікація методів прискорених випробувань СГТ наведена на рис.4.5.



**Рис. 4.5. Класифікація методів прискорених випробувань сільськогосподарської техніки**

#### **4.11. Технічні засоби для прискорення випробувань сільськогосподарських машин**

Найпоширеніші при проведенні прискорених випробувань спеціальні стенди, де прискорення досягається за рахунок використання замість натуральних середовищ їх штучних замінників (імітаторів) і відповідно – ущільнення часу роботи без інтенсифікації робочих процесів.

Прискорені імітаційні випробування із застосуванням замінників технологічних матеріалів виконують, як правило, за замкнутим циклом.

Основне завдання при проведенні таких випробувань – забезпечити достатню адекватність навантажень і фізичних процесів за рахунок таких матеріалів, які б повністю імітували реальне технологічне середовище.

Оскільки у процесі випробувань за замкнутим циклом технологічний матеріал подрібнюється і перетирається, то як імітаційні широко застосовують різні синтетичні матеріали, відходи гумо-технічної і шкіряної промисловості, полімери, які не втрачають своїх властивостей тривалий час, тощо.

За замкнутим циклом випробовується значна кількість машин, в яких матеріал не піддається інтенсивній переробці (кормороздавальним, транспортери, дозатори, насоси, доїльні установки та ін.). В якості зерна в таких стендах рекомендується використовувати капронову крихту; соломи – відходи шкіряної промисловості; сіна – різні синтетичні волокна. Фізико-механічні властивості цих матеріалів близькі до натуральних технологічних середовищ, а за зносостійкістю – перевищують їх у сотні разів.

Вибір режимів роботи стендів (машин) при таких випробуваннях здійснюється шляхом секундного подавання у машину певної кількості імітатора (відповідно до її номінальної продуктивності в умовах експлуатації). Оскільки в період випробувань частина матеріалу-імітатора часто руйнується, подрібнюється і втрачається, здійснюється постійний контроль за його станом і наявністю. При зменшенні і, певних втратах імітатора його додають відповідними порціями в бункер машини.

В УкрЦВТ розроблений і використовується стенд для прискорення випробувань автокормовозів, норії шнекових транспортерів і бункерів. Як заміник технологічних матеріалів застосовуються капронова крихта, а також вибраковане насіння цукрових буряків. Стенд складається з автокормовоза і бункера, об'єднаних в одну лінію.

Для випробування гноєзбиральних транспортерів використовується стенд, розроблений Прибалтійською МВС. У його складі: привод, натяжний гідравлічний пристрій, жолоб для ланцюга; все змонтоване на рамі. Гідравлічний пристрій, який здійснює силове навантаження транспортера, складається з редуктора, масляного насоса, дроселя, охолодника з вентилятором і масляного бака. У жолоб стенда завантажуються імітатор (тирса або торф, змочений аміачною водою).

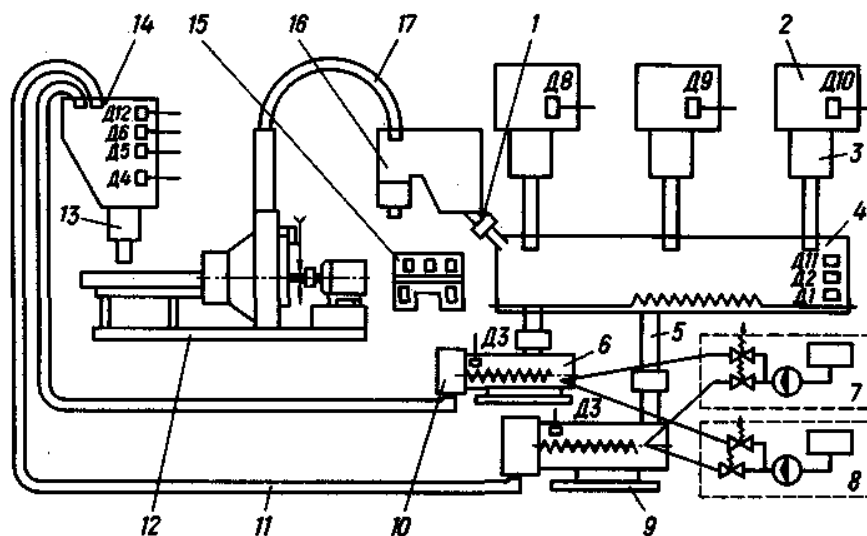
Потрібне навантаження ланцюга (12 кН) досягається натяжним пристроєм з вантажами із застосуванням гідравлічного пристрою. Скорочення довжини ланцюга і зірочок транспортера, які працюють у звичайних швидкісних режимах, досягається за рахунок збільшення перегинів ланцюга на стенді, довжина якого значно менша за довжину ланцюга у корівнику (7 м замість 160 м), а також більшої продуктивності роботи стенда за добу (10...16 год замість 1...2 год в умовах ферми).

Західною МВС у співдружності з Інститутом проблем надійності і довговічності машин АН Білорусі розроблено стенд для круглорічних випробувань кормозбиральних машин типу КСК-100 протягом усього року, що дозволяє сполучати випробування технологічні і на пробіг. Завантаження робочих органів машин здійснюється за замкнутим циклом. Для цього перед машиною встановлюється бункер-дозатор, а силосопровід спрямовується так, щоб імітатор технологічної маси (відходи шкіряної промисловості) після проходження між ножами і протирижучою пластиною знову потрапляв до бункера. Щоб зменшити витрати імітатора і забезпечити завантаження трансмісії, до приводу подрібнюючого барабана приєднується завантажувальний пристрій (електробалансирна гальмівна машина), яка

з'єднується через коробку передач з маточинами ведучих коліс машини.

Західною МВС, Інститутом проблем надійності АН Білорусі і заводом "Гомсільмаш" розроблено гідравлічний навантажувач ріжучих апаратів збиральних машин, який дозволяє моделювати у механізмах приводу навантаження від сил різання стеблової маси. Навантажувач виконаний як гідроциліндр, два його нагнітальних канали обладнані дроселями, а два радіальне розташованих перепускних клапана зв'язані з загальним оливним баком. У поршні гідроциліндра є дві порожнини, розташовані симетрично до його торців. Порожнини поршня пов'язані поздовжніми каналами з порожнинами гідроциліндра. При цьому довжина кожного каналу відповідає ходу поршня під навантаженням (хід у процесі різання). Ширина порожнини відповідає вільному ходу поршня (хід ножа, на якому здійснюється різання), а відстань між радіальними перепускними каналами – сумарному ходу поршня (перебіг ножа).

Стенд для прискорених випробувань подрібнювачів грубих кормів конструкції УкрЦВТ складається з платформи, на якій розміщуються випробувальні машини, змішувач, прес-гранулятор, дозатори, бункери і транспортери (рис. 4.6).



**Рис. 4.6. Схема стенда для прискорених випробувань на надійність подрібнювачів грубих кормів:** 1 – транспортер; 2 – бункер; 3 – дозатор; 4 – змішувач; 5 – транспортер-дозатор; 6 – живильник; 7 – система зволоження суміші; 8 – система

подавання масла; 9 – платформа; 10 – прес-гранулятор; 11 – транспортер; 12 – платформа; 13 – дозатор; 14 – бункер-живильник; 15 – пульт керування; 16 – розвантажувальний пристрій; 17 – рукав; Д1, Д2... Д12 – датчики для керування роботою стенда

У процесі роботи у змішувач 4 за допомогою дозаторів 3 з накопичувальних бункерів 2 подаються різні компоненти, які змішуються, утворюючи однорідну суміш. Зі змішувача суміш за допомогою транспортерів подається у живильник одного з двох прес-грануляторів 10, куди подається за допомогою системи 7 вода і 8 – масло. У живильниках суміш зволожується водою і маслом та подається у камери пресування.

У прес-грануляторах імітаційний матеріал пресується і подається за допомогою транспортера 11 у бункер-живильник 14, оснащений дозатором 13. Дозатор спрямовує гранули на приймальний транспортер подрібнювана грубих кормів, встановлений на платформі 12.

Подрібнений матеріал-імітатор за допомогою рукава 17, розвантажувального пристрою 16 і транспортера 1 спрямовується у змішувач.

Як імітатор кормів використовується суміш з об'ємною масою  $30 \text{ г/см}^3$ , яка складається з піску (27%), глини (47%), тирси (25%), води (8%) і масла (2%). На стенді забезпечується прискорене випробування у 30 і більше разів.

Для прискорення зносних випробувань кормодробарок застосовується спеціальний стенд УкрЦВТ, подібний до стенда для подрібнення грубих кормів. Від попереднього він відрізняється конструктивним виконанням деяких агрегатів і введенням у конструкцію масовимірювального пристрою для визначення продуктивності дробарок.

Склад матеріалу-імітатора подібний тому, що застосовується при випробуваннях подрібнювачів грубих кормів. Коефіцієнт прискорення випробувань кормодробарок на цьому стенді досягає 20.

Імітаційні випробування обладнання для переробки рідкого гною виконуються у, спеціальному цеху, розробленому і створеному в УкрЦВТ. Основні його складові: пункт підготовки технологічного матеріалу; пункт очищення подачі технологічного матеріалу у випробувальні машини; дозуючий

пристрій; майданчик для встановлення випробувальних машин; лінія змішування і повернення маси у пункт підготовки.

Для імітаційних випробувань молокоохолоджуючого обладнання використовується комплекс технічних засобів, розроблений Прибалтійською МВС.

Комплекс складається із стенда для підігрівання й автоматичного підтримання встановленої температури води (молока); блока подачі води (молока); системи автоматичного підтримання заданої температури у приміщенні; комплекту технічних засобів для випробування резервуарів-охолодників молока; теплового навантажувача джерел холоду. На основі цих технічних засобів, використання елементів автоматики, молокоохолоджувального обладнання і допоміжних елементів можна створити кілька схем випробування різних машин. Технічні засоби дозволяють прискорити лабораторні та експлуатаційні випробування джерел холоду у 2...5, молокоохолодників – у 2...4 рази.

Мобільні сільськогосподарські машини випробовують на полігонах, які є комплексом споруд і засобів для виконання різноманітних видів досліджень, зокрема випробувань на надійність несучих елементів сільськогосподарських машин. Сучасні вітчизняні і зарубіжні полігони оснащуються трасами великої протяжності, ділянки яких обладнані різними перешкодами, що дозволяє підібрати для несучих систем машин режими випробувань, близькі до експлуатаційних. В основному на полігонах моделюються удари з перешкодами, згинальні та крутильні деформації рам, інерційні навантаження від великих махових мас (транспортерів, заповнених бункерів та ін.).

Полігони як споруди коштують досить дорого. Досягти на них зносових і втомлюючих руйнувань несучих конструкцій машин можливо тільки через відносно тривалий час. Під час полігонних випробувань пружні властивості підвіски і пружних елементів (шини, ресори, гумові буфери та ін.) фільтрують навантаження, внаслідок чого деякі агрегати ніби захищаються від деформацій, а інші, навпаки, – передчасно виходять з ладу.

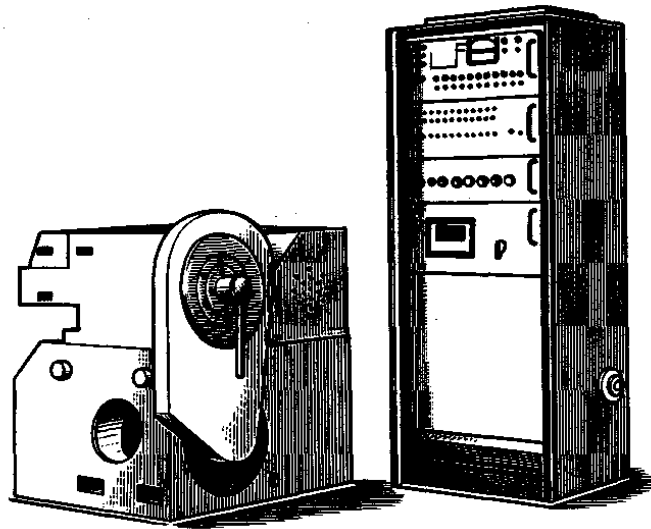
Коефіцієнт прискорення випробувань не перевищує 3...5, тому останнім часом у практику випробувань несучих систем машин інтенсивно впроваджуються спеціальні стенди.

Відомо, що величина ресурсу машин пов'язана переважно з накопиченням пошкоджень у деталях і агрегатах та втратою ними працездатності. У значній кількості сільськогосподарських машин ці пошкодження мають не тільки механічний (втомленість, знос, накопичення пластичних деформацій), але й фізико-хімічний характер (корозія, біологічні пошкодження та ін.). Методичною основою прискорених випробувань на надійність є гіпотеза про автомобільність процесу накопичення пошкоджень. Розроблені методи стендових випробувань ґрунтуються на моделюванні циклових процесів, які зумовлюють руйнування їх складових і машини у цілому.

Основною причиною зміни властивостей машини, яка призводить до суттєвого зростання динамічності навантаження трансмісії машин, зміни параметрів їх працездатності є втомленісні руйнування рамних конструкцій, що спостерігаються при великій кількості циклічних навантажень.

Для проведення випробувань на втому несучих конструкцій сільськогосподарських машин УкрЦВТ разом з Інститутом механіки НАН України розроблено універсальну установку "Цикл", яка складається зі збудника динамічних навантажень, варіатора, електродвигуна, маховика і пульта керування. За допомогою установки проводять програмні випробування несучих систем в автоматичному режимі і здійснюють до 12 ступеней навантажень (рис. 4.9). Монтаж установки "Цикл" на універсальних силових полях забезпечує можливість швидкого переналагодження стендів для організації прискорених випробувань на утому різних конструкцій. Для цього встановлюються спеціальні кріпильні пристрої, які дозволяють виконати потрібну схему навантаження конструкції. Випробування несучих систем виконуються, як правило, біля резонансної зони з використанням ефекту динамічного підсилення (зниження динамічної жорсткості металоконструкцій в

області резонансних частот).



**Рис.4.7. Установа "Цикл"**

На установках "Цикл", крім виявлення параметрів надійності машин, можливе вивчення зміни цілого ряду не контрольованих раніше параметрів: збільшення тріщин, зміни жорсткості несучої системи, зростання рівня динамічності крутних моментів залежно від частоти збудження і деформування рам, механізму руйнування конструкцій та інших фізичних явищ. При цьому, згідно робочих методик, реалізуються різні схеми і комбінації навантаження несучих систем: вигин, крутіння, вигин з крутінням.

При проведенні поелементних випробувань базових агрегатів машин забезпечуються коефіцієнти прискорення у 100...250, а повнокомплектних машин – у 2,5...10 разів.

Внаслідок цього протягом 20...30 днів можна визначити ресурсні відмови, які відповідають строку служби машини.

Значним ресурсом підвищення ефективності прискорених випробувань трансмісій і робочих органів машин є форсування у допустимих межах навантажень шляхом прискореного відтворення пускових навантажень і підвищення частоти обертання приводних валів вище за номінальні. Для відтворення перехідних пускових навантажень можна використати розроблену



УкрЦВТ установку "Пуск", яка забезпечує автоматичний запуск і зупинку трансмісії для вмикання до 2 разів за хвилину. Установка "Пуск" застосовується для випробувань трансмісії дробарок і кормозбиральних машин, у яких великі махові моменти обертальних частин.

Динамічне навантаження несучих систем кормозбиральних машин доцільно сполучати із застосуванням заміників технологічного матеріалу (соломи, зерна та ін.), що підвищує комплексність випробувань за рахунок відтворення зносу робочих органів ланцюгових конвеєрів та інших механізмів машин, особливо при використанні абразивних добавок, які підвищують інтенсивність зносу.

Стенд для комплексних прискорених випробувань самохідних кормозбиральних машин, розроблений в УкрЦВТ, дозволяє сполучати їх імітаційні, пробігові й експлуатаційні випробування.

На стенді відтворюються і контролюються крутний момент на ведучих колесах, частота навантажень, деформування і коливання рами самохідної машини, Конструкція стенда не потребує джерел енергії, крім самої випробувальної машини. Навантаження ведучого моста здійснюється пневмокидачем, одночасно відбувається транспортування імітаційного матеріалу за замкненим циклом. Одночасно відтворюється деформація рамної конструкції і навантаження трансмісії суттєво впливає на динамічну навантаженість машини. Особлива увага приділяється вивченню форми загальних деформацій конструкції. Застосування при стендових випробуваннях однієї з фіксованих частот обов'язково викликає резонансні явища якогось одного елемента машини і, як наслідок, порушення картини відмов. Тому на стенді застосовується метод "плаваючої частоти", яка забезпечується за рахунок бігових барабанів з різними діаметрами спеціальних накладок (перешкод), вони дозволяють плавно регулювати величину збудовуючих дій і чергувати досить довільно згинальні і крутні навантаження на несучу систему. Розміри барабанів

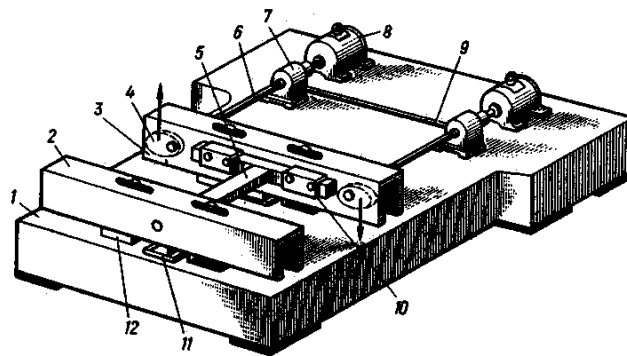
і перешкод підбираються так, щоб забезпечувати можливість створення режимів, близьких до екстремальних в експлуатації (у діапазоні 0,5...0,7 від максимальних).

Внаслідок цього відтворюється реалізація випадкового процесу, яка відповідає руху комбайна на ділянці шляху до 100 м і багаторазово повторюється.

Застосування прискорених методів випробувань повнокомплектних машин дозволяє у 8...10 разів скоротити строки випробувань і здобути інформацію для оперативної доводки конструкцій, оцінити ресурс основних агрегатів і машин у цілому.

Для випробування розгалужених трансмісій кормозбиральних та інших машин застосовується метод "замкнутої потужності".

Стенд складається з випробувальної і навантажувальної трансмісій, з'єднаних ланцюговими передачами, електродвигуна, навантажувального і запобіжного пристроїв (рис. 4.10).



**Рис.4.8. Схема стенда для прискорення випробувань трансмісій кормозбиральних машин:** 1–програмно-задавальний пристрій; 2 – датчик; 3 – контрольний динамометр; 4 – трос; 5, 7, 12, 13 – зірочки; 6 – диск; 8 – навантажувальна трансмісія; 9 – електродвигун приводу верстата; 10 – передача приводу; 11 – випробувальна трансмісія; 14 – вертлюг; 15 – демпферна пружина; 16–механізм навантаження

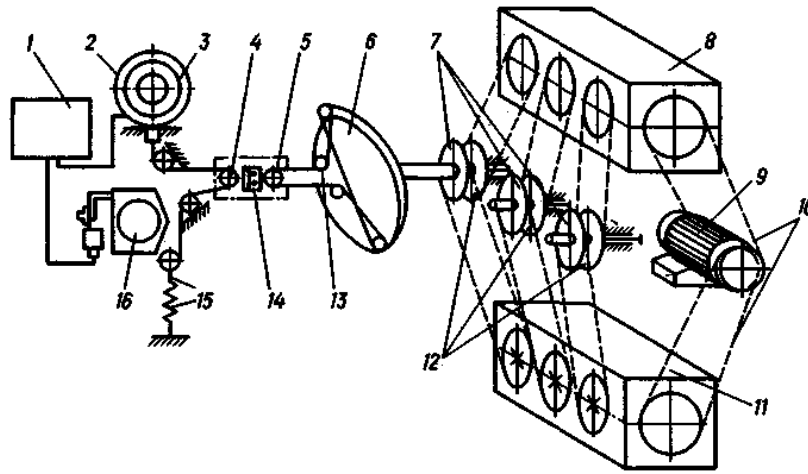
Навантажувальний пристрій включає програмно-задавальну блоктросову систему, виконуючий механізм і контрольний динамометр 3.

Випробувальна 11 і навантажувальна 8 трансмісії з'єднуються між собою за замкнутою схемою ланцюговими передачами. Навантаження на вихідних валах трансмісії створюються за допомогою блоктросового пристрою, програмно-задавальною системою 1 якою зчитує з введеної програми величину зусилля натягнення троса 4 у даний момент часу і передає сигнал на виконуючий механізм навантаження 16. Цей механізм намотує (або розмотує) трос на барабан, створюючи в ньому потрібне зусилля.

Це зусилля за допомогою блока і вертлюга 14 передається на трос 4. За допомогою блоків і диска 6 загвинчує важіль 13 із зірочкою відносно диска і з'єднаною з ним зірочкою 7, створюючи навантаження на вихідному валу випробувальної трансмісії. Вертлюг використовується для роз'єднання частини навантажувального пристрою, що обертається від його нерухомої частини. Величина зусилля натягнення троса контролюється датчиком 2 і передається у блок порівняння програмно-задавальної системи, здійснюючи зворотний зв'язок. У цьому блоці порівнюються величини фактичного зусилля натягнення троса із заданим у випадку їх різнобіжностей, тоді видається команда на виконуючий механізм і процес повторюється. Демпферна пружина 15 "гасить" коливання системи у процесі роботи стенда. При різкому зменшенні (обрив троса) або збільшенні (заклинювання трансмісії) зусилля натягнення троса запобіжного пристрою вимикає електродвигун 9 приводу верстата, зберігаючи картину пошкодження для проведення аналізу.

Стенд змонтований на силовій підлозі, що дозволяє міняти розміри кінематичних зв'язків між основними агрегатами і механізмами, швидко переналагоджувати його на випробування різних трансмісій.

Для визначення працездатності відремонтованих рамних конструкцій використовують вібраційний стенд (рис. 4.11), розроблений у Державному науково-дослідному технологічному інституті (ДержНДТІ).



**Рис.4.9. Схема вібраційного станда випробувань елементів рамних конструкцій на утому:** 1 – станина; 2, 3 – траверси; 4 – механічні вібратори; 5 – випробуваний зразок; 6 – вал; 7 – редуктор; 8 – привідний електродвигун; 9 – тяга; 10 – болти; 11 – самовстановні опори; 12 –вантажі

Основними елементами станда є зварювальна станина 1 із траверсами 2 і 3, які розміщуються на самовстановних опорах 11 і нежорстких пружинах, а також механічні вібратори з приводом.

При проведенні ресурсних випробувань машин тваринницьких ферм необхідно враховувати також дію на них агресивних середовищ. В УкрЦВТ розроблено методики, які дозволяють врахувати дію агресивних середовищ на показники їх надійності.

У цьому ж інституті разом з Інститутом кібернетики НАН України розроблено систему "Сектор" з автоматизованим керуванням випробувань сільськогосподарських машин, реєстрацією і попередньою обробкою результатів випробувань і наступним їх записом на магнітофон.

Крім перерахованих технічних засобів для випробування герметичних закритих зубчастих передач рекомендується застосовувати випробувальні спеціальні стенди для визначення їх ресурсу, а також стенди для випробування ременів, які працюють за принципом циркуляції енергії.

Для випробування силових передач від двигуна використовують гальмівні стенди. Для цього ведучі колеса машин замінюють гальмами, розробленими з урахуванням частоти обертання і величини крутного моменту.

Гальмівний момент регулюється, а випробування проводяться в автоматичному режимі.

Для випробування шасі сільськогосподарських машин застосовується спеціальний стенд, обладнаний двома стрічками довжиною 19,5 і 20,0 м, шириною – 0,9 м. Стрічки пересуваються по ведучому і веденому барабанах. На стрічках змонтовані сталеві сегменти-перешкоди, які дозволяють імітувати реальні умови руху шасі. Однакові комбінації перешкод трапляються через 660 м перебігу, що дозволяє створити комплекс навантажень на шасі, відповідний умовам експлуатації. Взаємне розташування стрічок регулюється, тому випробовуються шасі з різною колією передніх і задніх коліс. Стенд працює від електродвигуна постійного струму з безступеневим регулюванням частоти обертання і розрахований на навантаження 20 кН (при максимальному на одну вісь 120 кН).

Профіль перешкод розроблений на основі тривалих шляхово-полігонних досліджень.

Прискорення залежить від умов випробування машини і становить 1:3...1:15.

Для випробувань гумово-технічних деталей доїльних установок соскової гуми, трубок, патрубків, шлангів і мембран в УкрЦВТ розроблений спеціальний стенд, який забезпечує прискорення випробувань у 30 разів. Скорочення строків випробування досягається за рахунок цілодобової роботи стенда та зростання частоти і величини деформування деталей у місцях їх руйнування при експлуатаційних випробуваннях.

#### **4.12. Методи та програми прискорених випробувань техніки на надійність**

Особливість прискорених стендових випробувань полягає в тому, що при їх проведенні дуже важко забезпечити однакове форсування та відтворення всіх факторів, що впливають на показники довговічності та безвідмовності. Тому

при прискорених випробуваннях форсують та відтворюють, як правило, не всі, а тільки основні фактори, при чому і їх форсують на різному рівні. Особливість також полягає і в тому, що прискорені стендові випробування проводять, як правило, при суворому додержанні режимів роботи виробу, тобто при значно меншому розсіюванні навантажень, швидкостей та інших умов, ніж в експлуатації.

Розрізняють прискорені випробування в нормальному та форсованих режимах.

Прискорені випробування в нормальному режимі досягаються ущільненням робочих циклів або екстраполяцією по напрацюванню.

Для використання принципу ущільнення робочих циклів необхідно включати вплив перерв в роботі на інтенсивність процесів, які приводять до відмов.

Прискорення випробувань в форсованому режимі досягається інтенсифікацією деградаційних процесів. Розрізняють дві групи принципів формувань випробувань, які відрізняються способом перерахунку їх результатів на нормальні умови:

- принципи, які вимагають попереднього визначення коефіцієнта перерахунку;
- принципи які дозволяють оцінювати результати випробувань без попереднього визначення коефіцієнта перерахунку.

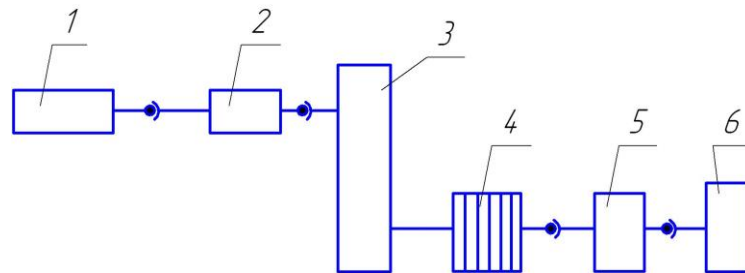
До групи принципів, вимагаючих попереднього визначення коефіцієнта перерахунку, відносять зрізання спектру навантажень; підвищення швидкості прикладання навантажень та принцип порівняння.

Зрізання спектру навантажень полягає у виключенні частини навантажень, не викликаючих значної пошкоджуючої дії (в чому необхідно завчасно переконатись) на об'єкт випробувань, що призводить до підвищення середнього рівня навантажень і, отже, більш швидкого вичерпання ресурса.

Частковим випадком зрізання спектру навантажень є виключення стаціонарної частини робочого циклу (проведення досліджень режимів "пуск-зупинка", "розгін-гальмування" та інші), тобто робота в нестационарному

режимі.

По цьому принципу побудовані стенди для прискорених досліджень автотракторних муфт зчеплення для напрацювання сумарної роботи буксування (рис.4.15).



**Рис.4.10. Схема стенда для випробувань муфти зчеплення та її деталей:** 1– привід-динамометр ДС 1036-4/N; 2 – дослідна муфта зчеплення; 3 – редуктор; 4 – інерційний навантажувач; 5 – гідравлічне гальмо (Е-4); 6 – зупинчне гальмо

Об'єкти випробувань можуть бути нова та відремонтованих серійна або дослідні муфти зчеплення. Випробування муфт зчеплення проводиться в режимі розгону інерційних мас (4). Для навантаження муфти зчеплення моментом опору використовується гідрогальмо Е-4 (5).

Контрольно-вимірювальна апаратура для визначення завантаженості муфти зчеплення забезпечувала синхронний запис крутного моменту на валу муфти зчеплення, часу буксування, частоти обертання ведучої та веденої частини муфти, а також температур натискного диску та маховика.

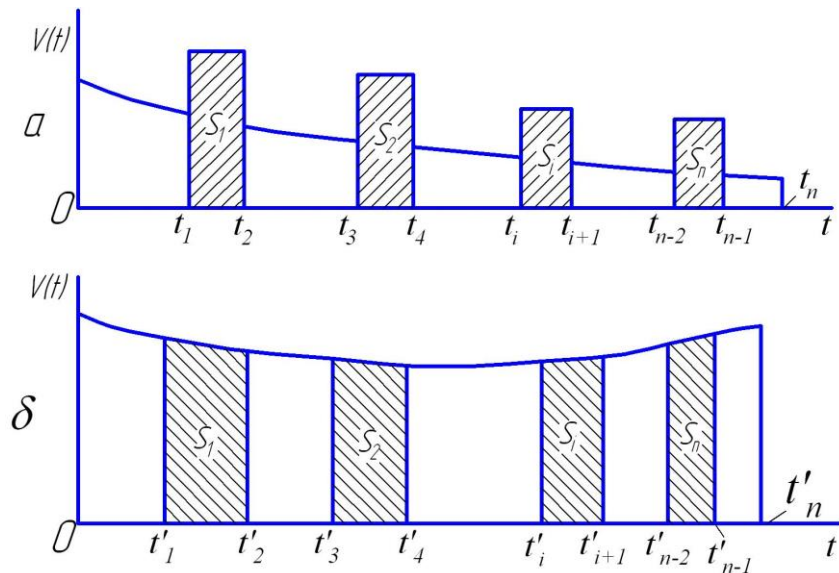
Включення та виключення муфти зчеплення через певні проміжки часу на стенді виконується автоматично за допомогою спеціального механізму з пневмокамерою.

В експлуатаційних умовах фрикційні елементи муфти зчеплення також працюють у повторно-короткочасному режимі, навантажуючись моментом інерції МТА та моментом опору ведучих коліс. Тому довговічність муфти зчеплення, в основному, визначається ресурсом фрикційних накладок. Навантаженість муфти зчеплення визначають роботою буксування на протязі часу експлуатації трактора. Ця робота залежить від швидкості руху, до якої необхідно розігнати тракторний агрегат, від опору руху, маси тракторного агрегату та кількості включень муфти зчеплення за строк служби трактора.

Підвищення швидкості прикладання навантажень здійснюється на основі збільшення частоти циклічного навантаження або швидкості руху під навантаженням. Перш за все необхідно переконатися, що збільшення частоти навантаження (втома) або швидкість ковзання (спрацювання) не спотворюють природу відмов.

До групи принципів, які не потребують попереднього визначення коефіцієнта перерахунку, відносять екстраполяцію по навантаженню; принцип "доламування" та принцип "запитів".

Так, метод "запитів", який інколи називають також методом багатоступінчатого форсування, полягає в тому, що випробування проводять з ступінчатим чергуванням навантаження – нормального та форсованого по результатах випробувань між часом накопичення однакової величини спрацювання на кожному інтервалі форсованого та нормального режимів (рис.4.17).



**Рис. 4.11. Суть методу багатоступінчатого форсування випробувань на надійність**

Беручи до уваги, що спрацювання в інтервалі форсованого режиму:

$$S_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} V(t) dt, \quad (4.57)$$

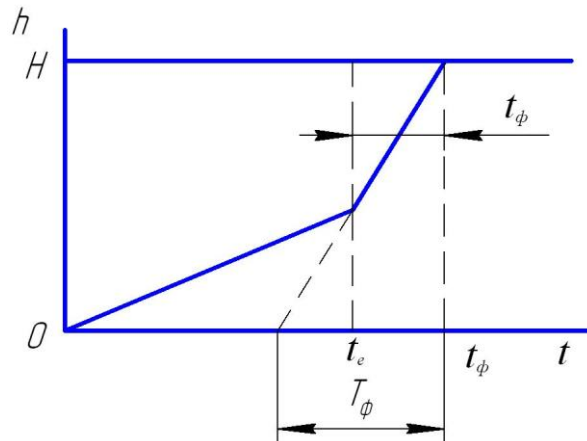
є величина відома, то для еквівалентного інтервалу часу одержуємо:

$$\Delta t_i^1 = 2S_i / (V(t_i^1) + V(t_{i+1})), \quad (4.58)$$



де  $V(t)$  – швидкість спрацювання від тертя.

Досвід проведення зносних випробувань, по методу "доламування" базується на теорії накопичення пошкоджень, розроблений проф. В.Я. Аніловичем. Випробування проводяться по одноступінчатому циклу навантаження. Об'єкт протягом тривалого часу працює при експлуатаційному навантаженні, а потім доводиться до граничного стану при роботі на форсованому режимі (рис.4.18).



**Рис.4.12. Визначення ресурсу зношеної деталі методом "доламування"**

Експлуатаційний ресурс в даному випадку знаходять з виразу:

$$T_e = \frac{t_e}{1 - t_\phi / T_\phi}, \quad (4.59)$$

де  $t_e$ ,  $t_\phi$  – тривалість напрацювання об'єкта у експлуатаційному та форсованому режимах;  $T_\phi$  – тривалість роботи об'єкта до відмови тільки у форсованому режимі.

Найбільше використання цей метод дістав при випробуваннях робочих органів простих сільськогосподарських машин. Збільшення навантаження, потужності та температурного режиму може змінити характер пошкоджень порівняно з експлуатаційним режимом. При такому способі форсування необхідно враховувати, що значне збільшення навантажувального та температурного режимів викликає зміни властивостей використовуваних мастил, що в свою чергу, призводить до зміни виду тертя в спряженнях

випробуваного об'єкту.

Крім цього, збільшення навантажень завжди приводить до збільшення деформації, особливо при випробуваннях агрегатів транспортних машин.

Останнім часом широко для форсованих випробувань на спрацювання використовують метод штучного забруднення робочої рідини.

Наприклад, при проведенні стендових випробувань двигуна внутрішнього згорання на зносостійкість скорочення часу випробувань досягається за рахунок введення в двигун абразивного пилю. Загальна довговічність випробувань автомобільних двигунів в даному випадку по спеціальній методиці дорівнювала біля 150 годин. По результатах випробувань визначають приведені спрацювання:

$$I = \frac{u}{g}, \quad (4.60)$$

де  $u$  – вимірне спрацювання деталей або приріст зазору в спряженні в мкм;  $g$  – сумарна маса пилю, яка введена у двигун з мастилом і повітрям.

Одержавши значення приведених спрацювань основних деталей та спряжень серійного та дослідного двигуна, співставленням цих зносів можна встановити рівень якості дослідної конструкції.

Коефіцієнти прискорення для незалежних параметрів виробів можуть бути різними, а для залежних – тільки однаковими, оскільки в цьому випадку більш швидка зміна одного параметра приводить до зміни другого. Досягти однакових значень коефіцієнтів прискорення для всіх вихідних параметрів неможливо. Для елементів виробу, який випробується в декількох різних нормальних і форсованих режимах (наприклад, для забезпечення "синхронності" накопичення пошкоджень) "середній" коефіцієнт перерахунку показників надійності визначають за формулою:

$$K_e = \sqrt{\frac{\sum_j a_j \cdot K_j}{\sum_i a_i \cdot K_i}} = \sqrt{\frac{\sum_j a_j / (\sum_i a_i \cdot k_{ij})}{\sum_i a_i / (\sum_j a_j \cdot k_{ji})}}, \quad (4.61)$$

де  $a_i, a_j$  – частка напрацювання відповідно в  $i$ -му нормальному та  $j$  –

форсованому режимам;  $K_{ji}=K_{ij}$  – коефіцієнт перерахунку від  $j$ -го форсованого режиму до  $i$ -го нормального;  $K_i$  – коефіцієнт перерахунку від комплексного форсованого режиму до  $i$ -го нормального;  $K_j$  – коефіцієнт перерахунку від  $j$ -го форсованого режиму до комплексного нормального.

Спостерігаються два окремі випадки:  $\bar{K} = \sum_j a_j \cdot k_j$ , коли нормальний режим один, а форсованих декілька, і коли нормальних режимів декілька, а форсованих тільки один –  $K_H = 1 / \left( \sum_i a_i / k_i \right)$ .

Розглянуті принципи прискорення випробувань можуть бути використані як індивідуально, так і в будь-якому сполученні.

Коефіцієнт перерахунку показників надійності визначають за методом рівних імовірностей.

Прискорення випробувань, як правило, базується на використанні апріорних відомостей про надійність об'єкту випробувань. Для одержання цих відомостей необхідно провести попередні дослідження, які включають в загальному випадку такі етапи :

- дослідження умов роботи виробу ;
- дослідження експлуатаційної навантаженості виробу;
- дослідження надійності виробу в експлуатації;
- вивчення характеру та причин відмов;
- вибір принципу прискорення, умов та режимів випробувань;
- вибір, а при необхідності – розробка та створення випробувального устаткування;
- проведення прискорених випробувань на надійність;
- аналіз результатів попередніх досліджень, встановлення адекватності порівняння з результатами експлуатаційних спостережень, розробки моделі відмов та визначення функції перерахунку на нормальні умови.

Програма прискорених досліджень на надійність повинна містити наступне:

- об'єкт випробувань;
- категорія випробувань;
- мета випробувань;
- загальні положення;
- планування випробувань;
- умови та порядок проведення випробувань;
- матеріально-технічне забезпечення випробувань та звітність.

### **Контрольні запитання**

1. Розкрити сутність категорій випробувань техніки на надійність.
2. В чому полягає сутність планування та організації випробування сільськогосподарської техніки?
3. Як здійснюється планування випробувань методами багатофакторного експерименту?
4. Основні етапи обробки дослідної інформації.
5. Розкрити сутність методів оцінки надійності по результатам завершених випробувань.
6. Дати коротку характеристику основним методом оцінки надійності по результатах незавершених (зрізаних) випробувань.
7. Охарактеризувати методи прискорених випробувань сільськогосподарської техніки на надійність.
8. Які використовуються технічні засоби для прискорених випробувань сільськогосподарської техніки?
9. З'ясувати методи та програми прискорених випробувань сільськогосподарської техніки на надійність.

## **5. ОСНОВИ ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ МАШИН**

### **5.1. Мета і основні задачі прогнозування надійності машин**

Прогнозування очікуваного в експлуатації ресурсу елементів машин за інформацією на ранніх стадіях їх створення (при проектуванні, випробуваннях малих партій дослідних зразків на початку серійного випуску і т. д.) дозволяє багато в чому уникнути відмов машин при їх масовому виробництві і експлуатації, які завдають величезного збитку виробникові і споживачеві техніки. Серед напрямків, що дозволяють вирішити вказану проблему, найважливішим є уточнення і розробка ефективних математичних методів прогнозування експлуатаційного ресурсу за обмеженою інформацією.

Існуюча система забезпечення надійності включає елементи прогнозування. Так, при конструюванні машин виконують розрахунки на міцність і довговічність елементів, які традиційно розраховують для підшипників, валів, шестерень і деякі інші деталі. При цьому широко використовують метод напружень, що звичайно, недостатньо, оскільки не розраховується ресурс об'єкту, який є прямою характеристикою його надійності. При конструюванні широко використовують досвід створення попередніх конструкцій, їх випробувань і досліджень, що багато в чому сприяє створенню надійних машин. Враховують і можливості технології виготовлення на даному виробництві. Розглядають і аналізують можливі відхилення, перевантаження і екстремальні ситуації в умовах експлуатації машин, а також вимоги пристосованості до експлуатації, обслуговування, технічної діагностики та ремонту.

При конструюванні недостатня інформація про можливі режими навантажень, що діють, відхилення якості виготовлення і експлуатації машин, при випробуваннях – обмежено число об'єктів випробувань і тривалість їх роботи. Тому отримувані дані неточні, їх необхідно прогнозувати на більш тривалі терміни використання і на великі розміри партій аж до всього масиву

серійного випуску машин. При такому прогнозуванні виявляються лише найбільш "слабкі" місця машини.

Оцінки надійності, отримані за результатами випробувань і спостережень в процесі експлуатації, носять, як правило, характер констатації фактичного технічного стану машин в цілому або її окремих елементів. Тому у ряді випадків такі оцінки набувають прогноуючого характеру. Наприклад, на підставі результатів вибіркового випробування здійснюється прогноз про надійність партії виробів в експлуатації. Отже, прогнозуванням можна вирішити проблеми надійності, коли на ранніх стадіях створення машини стає можливим з необхідною мірою достовірності оцінити показники її надійності.

Основою прогнозування технічного стану машин є прогностика – наукова дисципліна, що вивчає поведінку одних систем (прогнозованих) залежно від зміни параметрів інших (що прогнозують) систем, щоб в імовірнісному плані передбачати, що відбуватиметься з системою-функцією, якщо відома поведінка системи-аргументу в даний час і в певній ситуації. Прогнозування виконують для оцінки технічного стану об'єкту (машини, складальної одиниці) і визначення закономірності його зміни в процесі роботи для керування надійністю.

Розрізняють три етапи прогнозування: ретроспекцію, діагностику і прогноз.

Перший етап полягає в дослідженні динаміки стану машини у минулому, виявленні і уточненні характеристик зміни параметрів стану її елементів. В результаті досліджень розробляють динамічну модель технічного стану машини.

На другому етапі встановлюють допустимі межі зміни параметрів стану елементів, розробляють або вибирають методи і засоби виміру, вимірюють параметри технічного стану, вибирають методи прогнозування, а також способи оцінки достовірності прогнозу.

На третьому етапі прогнозують зміни різних параметрів стану елементів, синтезують прогнози, узагальнюючи їх і роблячи висновок про технічний стан або рівні надійності всієї машини.

Таким чином, етап ретроспекції направлений в минуле; етап діагностики – в сьогодення; етап прогнозу – в майбутнє, причому майбутнє у впливає прогнозу повертається до сьогодення (впливає на нього). З цього витікає можливість використання теорії прогнозування для управління надійністю машин.

У експлуатації надійністю машин можна керувати встановленням технічних умов на технологічні операції, що проводяться під час обслуговування і ремонту машин. Звужуючи або розширюючи діапазони допустимих значень параметрів машини (розмірів деталей, зазорів в сполученнях, зусиль на важелях управління і ін.) при проведенні регулювальних або ремонтних робіт, можна задавати певний рівень безвідмовності і довговічності, що дозволяє планувати витрату запасних частин, потребу в мастильних матеріалах, періодичність проведення заходів технічного обслуговування і ремонту.

Використання методів теорії прогнозування при розробці технічного завдання на виготовлення елементів машин дозволяє управляти надійністю машин на стадії проектування.

Основні задачі прогнозування надійності машин можна сформулювати таким чином:

1. Передбачення закономірності зміни надійності деякого класу виробів у зв'язку з перспективами розвитку виробництва, впровадженням нових матеріалів, підвищенням міцності деталей технологічними і конструктивними заходами (новим видом обробки деталей, більш раціональними конструктивними схемами та ін.). Таке прогнозування необхідне при плануванні заходів щодо підтримки працездатності машин в експлуатації і розробці рекомендацій по підвищенню надійності машин. Воно базується на аналізі статистичних даних про надійність машин в експлуатації з урахуванням

перспектив розвитку виробництва, і виконують його методами моделювання і розрахунків.

2. Оцінка надійності проектного виробу (деталі, складальної одиниці) до того, як воно буде виготовлено. Ця задача виникає на стадії проектування і полягає у виборі найбільш раціональної конструктивної схеми, розробці комплектуючих виробів, підборі матеріалів деталей та ін. Надійність в цьому випадку можна прогнозувати за допомогою аналітичних методів або шляхом фізико-математичного моделювання.

3. Прогнозування надійності конкретного виробу (деталі, складальної одиниці) на підставі результатів вимірювання його параметрів. На відміну від попередніх задач в даному випадку об'єктом дослідження є цілком визначений виріб. Попередньо вибирають прогнозуючі параметри, тобто такі, по зміні яких можна зробити висновок про зміну надійності. Після того, як прогнозуючі параметри вибрані, досліджують закономірності їх зміни в часі. На основі отриманих закономірностей прогнозують надійність виробу на заданий період часу і оцінюють показники надійності виробу.

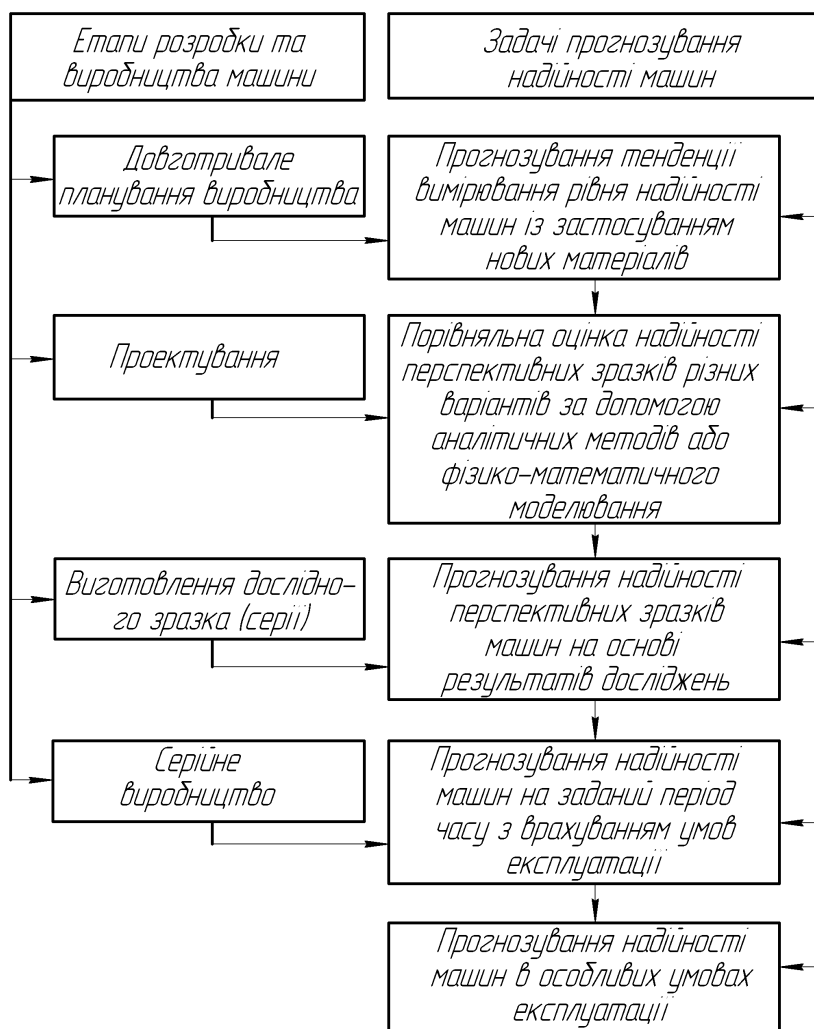
4. Прогнозування надійності деякої сукупності виробів за результатами дослідження обмеженої кількості дослідних зразків. Із задачами такого типу доводиться стикатися, як правило, на етапі виробництва машин. В даному випадку надійність прогнозують на підставі результатів досліджень закономірності зміни технічного стану декількох виробів при експлуатації. В результаті чого вдається отримати оцінку надійності машин на заданий період часу з урахуванням впливу умов експлуатації.

Остання задача за формою близька до традиційної задачі оцінки надійності генеральної сукупності виробів за результатами дослідження вибірки. Різниця лише в тому, що тут потрібно не лише визначити показник надійності сукупності виробів по показнику надійності вибірки на деякий фіксований момент часу, але і висловити припущення про майбутній рівень надійності генеральної сукупності з урахуванням впливу кліматичних умов,



характеру використання машин, прийнятої стратегії технічного обслуговування і ремонту.

5. Прогнозування надійності машини в особливих умовах експлуатації. Так, наприклад, може бути поставлена задача оцінити показники надійності машини за умови, що температура і вологість навколишнього середовища перевершують їх допустимі значення. Очевидно, що для ефективного керування надійністю машин необхідно на різних етапах розробки і виробництва машин вирішувати всі перераховані завдання (рис.5.1).



**Рис.5.1. Етапи і задачі прогнозування надійності машин**

## **5.2. Методи прогнозування надійності машин**

В інженерній практиці для визначення техніко-економічних показників машин, у тому числі і показників надійності, найбільш ефективними є методи

прогнозування. Їх широко використовують при обґрунтуванні показників надійності створюваних машин під час розробки технічних вимог або технічного завдання; при визначенні залишкового ресурсу за результатами діагностування; проведенні оцінки показників роботи машин по роках експлуатації і ін.

Подібні задачі вимагають опис зміни параметрів (характеристик) об'єктів в різні моменти часу або їх залежність від основних параметрів (маси, потужності, числа машин в агрегаті і так далі), що характеризують конструкцію.

Розробка і застосування методів прогнозування надійності машин дає великий економічний ефект, оскільки, по-перше, ще на стадії проектування буде можливий вибір оптимального, з погляду надійності, конструктивного рішення; по-друге, скоротяться витрати часу і засобів на тривалі і трудомісткі випробування і, по-третє, стає можливим більш раціональне використання потенційної довговічності машини за рахунок правильної побудови системи технічного обслуговування і ремонту.

Останнім часом прогнозування надійності машин перетворилося на самостійну наукову область зі своїми методами і методиками рішеннями. У загальному випадку сучасні методи прогнозування за характером початкової інформації можуть бути поділені на три основні групи:

- методи експертних оцінок;
- методи моделювання, що включають фізичні, фізико-математичні і інформаційні моделі;
- статистичні методи прогнозування, що базуються на інтерполяції або екстраполяції даних, отриманих в результаті попередніх досліджень, кореляційний і регресійний аналіз та ін.

Залежно від тривалості прогнозованого періоду розрізняють прогнози: короткострокові (до 5 років), середньострокові (5...15 років) і довгострокові (понад 15 років).

Глибину ретроспективного аналізу інформації про технічний об'єкт визначають тривалістю періоду. При цьому вважається, що чим більший прогнозований період, тим більший термін необхідний для аналізу закономірності зміни надійності об'єкту у минулому. Тому ретроспективний період повинен перевищувати прогнозований, приблизно в 2...3 рази.

Специфіка галузі сільськогосподарського машинобудування передбачає точність розв'язання задач прогнозування з похибкою не більше 10...15% і використання достатньо простих методів прогнозування, що дозволяють отримати розв'язок задачі в найкоротші терміни.

Методи прогнозування надійності машин обирають з урахуванням задач прогнозування; кількості і якості початкової інформації, отриманої в результаті досліджень надійності машин; характеру реального процесу зміни показника надійності або прогнозованого параметра (рис.5.2).



**Рис.5.2. Схема алгоритму прогнозування надійності машин**

Обробка і аналіз вихідної інформації дозволяють побудувати математичну модель об'єкта прогнозування. При цьому характер отриманої

моделі показує, який з існуючих методів прогнозування може бути використаний для вирішення поставлених задач. Так, при розв'язанні задач першого і другого класів застосовують експертні методи (метод Дельфі, мозкового штурму, метод FBME і ін.). Рівень надійності і технічного стану конкретного об'єкту або партії виробів прогнозують методами екстраполяції і моделювання.

### **5.3. Методи експертних оцінок**

Методи експертних оцінок застосовують в основному для вибору раціональних шляхів підвищення надійності конкретних видів машин, спираючись на досвід і кваліфікацію експертів. Сутність цих методів полягає в узагальненні, статичній обробці і аналізі думок фахівців щодо перспектив розвитку даної області.

При оцінці надійності машин і їх елементів експертні методи використовують для вирішення задач двох типів:

- визначення значень показників надійності в умовах, коли застосування інших методів неможливе або не доцільно за економічним міркуванням;
- ранжування випадкових величин (показників надійності; факторів, що визначають надійність виробів; елементів, що лімітують надійність машин та ін.) у порядку значущості.

Методи експертної оцінки найчастіше використовують в ситуаціях, коли достовірність початкової інформації не велика. Ці методи є імовірнісними. В їх основі лежить здатність фахівця давати корисну інформацію в умовах невизначеності. Невідома кількісна характеристика – чинник, що визначає процеси тертя і зношування, – розглядається в таких умовах як випадкова величина, відображення закону розподілу якої є індивідуальна оцінка достовірності або значущості тієї або іншої події. Коли такі оцінки отримані від групи експертів, передбачається, що "дійсне" значення досліджуваної характеристики знаходиться усередині діапазону оцінок і що "узагальнена" колективна думка є найбільш достовірною.

Виявлення характеру розподілу оцінок, отриманих від групи експертів, є важким завданням унаслідок того, що, по-перше, таких оцінок зазвичай мало, і, по-друге, складно вибирати критерій, необхідний для порівняння отриманого напрацювання з генеральною сукупністю.

Тому найчастіше для аналізу групової думки використовують різні параметри сукупності: середні значення (середнє арифметичне, медіана, мода і т. д.), і показники амплітуди коливань індивідуальних оцінок відносно цієї величини (середнє абсолютне відхилення, середнє квадратичне відхилення, дисперсія та ін.):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad - \quad \text{середня проста оцінка;}$$

або

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i v_i}{\sum_{i=1}^n v_i} \quad - \quad \text{середня зважена оцінка,}$$
(5.1)

де  $v_i$  – ваги оцінок при  $i=1, 2, \dots, n$ ;  $n$  – число експертів.

Оцінки, отримані від експертів, можуть бути розташовані в порядку зростання або спадання показника. Якщо необхідно встановити значення показника, яке знаходиться в середині впорядкованого ряду, розраховують медіану. Медіані можна віддати перевагу середньому арифметичному, оскільки на неї менше впливають крайні точки ряду. Саме тому медіану застосовують у випадках, коли існують значні коливання в оцінках, отриманих від різних експертів.

При аналізі експертних оцінок особливо важлива варіація значень біля середньої, оскільки, чим менше розсіяні оцінки, тим точніше середні відобразатимуть групову думку.

Для наближеної характеристики варіації ряду може бути обчислений статистичний розмах:

$$R = x_{\max} - x_{\min} .$$
(5.2)

Для впорядкованого ряду можуть бути розраховані квартили, тобто значення ознаки в розподілі ( $Q_1$ ,  $Q_2$  і  $Q_3$ ), вибрані так, що 25% оцінок виявляється нижчими  $Q_1$  (менше його), 25% поміщені між  $Q_1$  і  $Q_2$ , 25% – між  $Q_2$  і  $Q_3$ , а останні 25% перевершують  $Q_3$ . Якщо величини квартилей наближаються до медіани, то це означає, що розподіл оцінок характеризується малим розсіюванням. Отже, за показник варіації береться відхилення квартилей від медіани.

При організації опитування експертів важливо по можливості зменшити психологічний вплив причин, що знижують ефективність експертних рішень (взаємне переконання, вплив авторитетів і тому подібне).

Організацію процедури опитування, як правило, проводять в такій послідовності: підбір фахівців-експертів; розробка способу і процедури опитування експертів; проведення опитування; аналіз інформації, отриманої від експертів; синтез об'єктивної (статистичною) і суб'єктивної інформації з метою підготовки оцінок, необхідних для прийняття рішення.

На першому етапі організації опитування складається список осіб, компетентних в даних питаннях. Рациональне число фахівців, що залучаються до ранжування, складає від 6 до 15. При цьому якщо ймовірність правильної думки кожного фахівця  $P=0,7$ , то ймовірність того, що всі фахівці позитивно оцінять це рішення, складає: при п'яти фахівцях  $P=0,525$ , при семи фахівцях  $P=0,647$ , при десяти фахівцях  $P=0,650$ .

Таким чином, при зростанні числа фахівців від 7 до 10 ймовірність прийняття певного рішення всіма фахівцями незначно збільшується.

Кандидатам в експертну групу пропонується заповнити анкети. Відповідь на кожне з поставлених в анкеті питань дається в короткий термін (5...10 хв.). Крім того, робиться "самооцінка" своїх знань в даній області по 5...10 – бальній системі. Подібні анкети дозволяють судити як про дійсні знання експерта, так і про його здатність критично оцінити власні можливості.

Існує декілька способів проведення опитування експертів. Один з них, метод узгодження, полягає в тому, що кожен експерт дає оцінку незалежно від

інших, а потім, за допомогою якого-небудь прийому, ці оцінки об'єднуються в одну узагальнену (узгоджену).

Другий спосіб (груповий) заснований на спільній роботі експертів і отриманні сумарної оцінки від всієї групи в цілому.

При третьому способі (метод Делфі) узгодження індивідуальних оцінок поєднується з послідовним ознайомленням кожного експерта з оцінками останніх.

Найбільш поширеним є опитування групи експертів по методу узгодження оцінок. В цьому випадку узагальнена оцінка визначається за виразом:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i / n. \quad (5.3)$$

Тоді, середня зважена оцінка дорівнює:

$$P_B = \sum_{i=1}^n P_i v_i / \sum_{i=1}^n v_i, \quad (5.4)$$

де  $P_i$  – оцінка  $i$ -го експерта;  $n$  – число експертів;  $v_i$  – вага думки, що приписується  $i$ -му експертові;  $P_i$  – оцінка  $i$ -го експерта.

Вага думки кожного експерта визначається або на основі оцінок попередньої діяльності експерта, наприклад, ступеня надійності, або з урахуванням кваліфікації, ерудиції, посади або академічного звання експерта.

Опитування можна проводити заочно, коли особистий контакт аналітиків з експертами відсутній, або очний, коли заповнення анкети здійснюється при особистій бесіді з експертом. Перевагами заочного опитування є його відносна простота і низька вартість, проте в цьому випадку можливі помилки при заповненні анкет. При особистій бесіді цей недолік виключається, але потрібні значні витрати праці і часу. Крім того, аналітик, що проводить особисте опитування, може свідомо або мимоволі впливати на відповіді експерта.

При заповненні анкет певну роль відіграє порядок постановки питань і їх формулювання фразеологізму. Встановлено, що спочатку краще вимагати відповіді на найбільш складні і узагальнені питання, а потім поступово

переходити до більш простих і часткових. При цьому слід формулювати питання так, щоб виключити можливість подвійного тлумачення (двозначність).

Інколи рекомендується проводити опитування експертів в декілька етапів. Це дозволяє експертам "зважити" свої думки з урахуванням відповідей і доводів колег і додаткової інформації, яка не була врахована в попередньому етапі.

Методика обробки результатів експертної оцінки надійності залежить від типу вирішуваних завдань. Якщо в результаті експертної оцінки проводиться ранжування показників для визначення їх відносної значущості (наприклад, завдання розташування елементів машин в порядку спадання числових значень одного з показників надійності), дані, отримані в результаті експертної оцінки значущості показників (чинників), обробляють в такій послідовності:

1. Обчислюють суму рангів  $\sum_{i=1}^m r_i$  для кожного показника (чинника).

2. Визначають середнє значення суми рангів по всіх чинниках і для всіх експертів:

$$L_r = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^k r_{ij} . \quad (5.5)$$

3. Обчислюють відхилення суми рангів кожного чинника від спільного середнього рангу:

$$\Delta_i = \sum_{i=1}^k r_i - L_r . \quad (5.6)$$

4. Визначають суму квадратів відхилень:

$$S = \sum_{i=1}^m (\Delta_i)^2 = \sum_{i=1}^m (r_i - L_r)^2 . \quad (5.7)$$

5. Залежно від суми рангів кожному показнику привласнюють спільний ранг.

6. Перевіряють ступінь узгодженості думок експертів за допомогою критерію Кендалла, тобто коефіцієнта конкордації ( $W$ -статистики):



$$W = \frac{S}{\frac{1}{2}m^2(K^3 - K) - m \sum_{i=1}^k \beta_i}, \quad (5.8)$$

де  $W$  – число експертів;  $K$  – число чинників, що ранжується;  $\beta_i$  – коефіцієнт, що залежний від компетенції фахівців:

$$\beta_i = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^k (n_{ij}^3 - n_{ij}), \quad (5.9)$$

де  $n_{ij}$  – число показників, яким  $i$ -й експерт надав однаковий ранг.

Коефіцієнт конкордації підкоряється  $\chi^2$ -розподілу (закон розподілу Спірмена). Гіпотезу про наявність узгодженості думок фахівців приймають при виконанні умови:

$$m(K-1)W > \chi_\alpha^2(K-1),$$

де  $\chi_\alpha^2(K-1)$  – квантиль  $\chi^2$ -розподілу, що відповідає рівню значущості  $\alpha$  і числу степені вільності  $(K-1)$ . На підставі результатів ранжування отримуємо математичну модель:

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_ix_i + b_nx_n + \xi, \quad (5.10)$$

де  $b_i$  – коефіцієнт, що характеризує рівень значущості чинника;  $x_i$  – чинник, вплив якого на зміну ознаки  $y$  є істотним;  $\xi$  – величина, що характеризує сукупність впливу несуттєвих ознак (шумове поле):

$$\xi = \sum_j a_j x_j + \varepsilon,$$

де  $\varepsilon$  – похибка результатів.

Алгоритм визначення коефіцієнтів  $b_1$  полягає в наступному:

1. Обчислюють відносний рівень значущості чинників (факторів):

$$m_e = \frac{\sum_{i=1}^m r_i}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k r_{ij}}. \quad (5.11)$$

2. Визначають питому вагу кожного чинника (фактора):

$$q_i = 1 - m_e \cdot 100. \quad (5.12)$$

3. Обчислюють коефіцієнт значущості кожного чинника (фактора) за формулою:

$$b_i = \frac{q}{\sum_{j=1}^k q_{ij}} \cdot 100. \quad (5.13)$$

При визначенні значень показників надійності результати експертної оцінки обробляють звичайним порядком. Використання експертних методів допомагає формалізувати процедуру збору, узагальнення і аналізу думок фахівців для перетворення їх у форму, найбільш зручнішу для прийняття обґрунтованого рішення.

Найбільш важливою проблемою вдосконалення експертних методів є підвищення їх надійності (достовірності результатів оцінки). Вирішення цієї проблеми вимагає великої експериментальної і аналітичної роботи, результатами якої мають бути: з'ясування відповідності між питаннями і оцінками; виявлення можливих "прихованих" чинників, що впливають на думку експертів; дослідження форм зворотного зв'язку між експертами і аналітиками; створення методів, що дозволяють об'єктивно оцінити ступінь обґрунтованості відповідей експертів.

#### **5.4. Методи моделювання**

Методи моделювання базуються на основних положеннях теорії подібності. Вони є основними методами прогнозування надійності. Процедура прогнозування з використанням моделювання полягає в наступному.

На підставі подібності показників модифікації *A* машини, рівень надійності якої досліджений раніше, і деяких властивостей модифікації *B* тієї ж машини, рівень надійності якої необхідно оцінити, прогнозуються показники надійності *B* на певний період часу. В цьому випадку оцінка поведінки системи і зміни її характеристик в процесі тривалої експлуатації здійснюється шляхом побудови і вивчення моделей об'єкту (оригіналу). В основному це математичні (аналітичні) моделі, які називають динамічними, оскільки вони описують зміну

стану системи в часі. Модель повинна описувати і відображати основні властивості об'єкту, а також забезпечити ідентифікацію оригінала і моделі.

Метод моделювання складається з трьох етапів:

*I* етап – формування моделі об'єкту дослідження;

*II* етап – проведення експериментальних досліджень;

*III* етап – перерахунок набутих значень з моделі на натурний об'єкт.

Крім того, в основу прогнозування надійності машин і елементів можуть бути покладені фізичні і математичні методи прогнозування. При цьому завдання полягає у визначенні умов, при яких модель набуває прогностичної функції, припущень і обмежень, що накладаються на сферу застосування моделі і період прогнозування.

Прогнозування відрізняється від розрахунку тим, що вирішується імовірнісна задача, коли про поведінку складної системи в майбутньому можна говорити лише з тією або іншою мірою достовірності і оцінювати ймовірність її знаходження в певному стані в різних умовах експлуатації.

Застосування методів моделювання для прогнозування надійності машин має свою специфіку. В цьому випадку необхідно визначити необоротну зміну в часі областей станів вихідних параметрів, дати їй імовірнісну характеристику залежно від передбачуваних умов роботи машини і на цій основі зробити прогноз про можливі зміни показників початкового рівня надійності.

## **5.5. Статистичні методи прогнозування**

Найбільшого поширення в даний час на практиці набули методи прогнозування, засновані на екстраполяції значень прогнозованого параметра.

### **5.5.1. Методи екстраполяції**

Дані методи засновані на використанні інформації про поведінку системи у минулому для того, щоб оцінити можливі зміни її характеристик в майбутньому. Процедура екстраполяції в математиці розуміють таким чином. Якщо відоме значення функції в точках  $x_0 < x_1 < \dots < x_n$ , що лежать усередині

інтервалу  $(x_0; x_n)$ , то процедуру встановлення значення функції  $f(x)$  в точках  $x$ , що знаходяться поза інтервалом, називають екстраполяцією.

В залежності від процедури побудови моделей методи прогнозування, засновані на екстраполяції, поділяються на наступні види: пряма екстраполяція, адаптивна екстраполяція, кореляційна екстраполяція, метод огинаючих кривих; параметричні методи. Як правило найчастіше на практиці використовують методи прямої екстраполяції.

Вони достатньо широко застосовуються для прогнозування розвитку техніки і інших аналогічних задач. Їх використання для оцінки зміни параметрів машини в результаті старіння, як правило, потребує достатньо великого обсягу статистичної інформації і, головне, тривалого часу для спостереження за функціонуванням вже створеної машини. Слід також мати на увазі, що при оцінці вірогідності безвідмовної роботи функцію  $P(t)$  в загальному випадку не можна екстраполювати, оскільки вона визначена на якійсь ділянці, то за її межами нічого про функцію  $P(t)$  сказати не можна.

В основі прогнозування надійності методами екстраполяції лежать закономірності зміни прогнозованих параметрів надійності машин в часі. При цьому процедура прогнозування складається з декількох етапів:

- аналізу початкових даних і побудова графіка, що ілюструє зміну прогнозованого параметра в часі;
- визначення аналітичного виразу (математичній моделі), що описує закономірність зміни прогнозованого параметра в часі;
- екстраполяції отриманого рівняння і прогнозування показників надійності на заданий період.

Після побудови графіків за результатами випробувань або досліджень в експлуатації, що відображають зв'язок між змінними, підбирають аналітичну функцію. Підбір функції складає важливу частину прогнозування. Вибір кривої визначається суб'єктивними чинниками, і тут велике значення має правильне логічне пояснення залежності аналізованих параметрів з урахуванням їх розвитку у минулому. Тому необхідно прагнути по можливості підбирати найбільш прості аналітичні функції з мінімальним числом змінних.

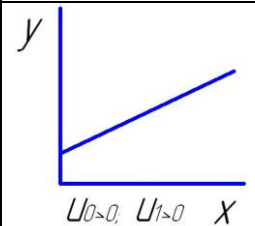
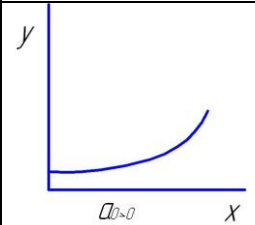
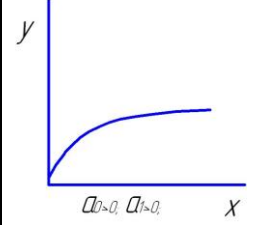
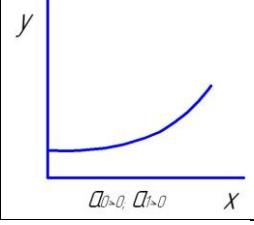
В загальному вигляді функція зміни параметра технічного стану (показника надійності) має наступний вигляд:

$$f(x) = a \cdot x^\alpha, \quad (5.14)$$

де  $\alpha$  – показник степеня, що характеризує зміну параметра  $x$ .

Основні аналітичні залежності, що найчастіше використовуються при прогнозуванні надійності машин і їх елементів, а також формули для визначення постійних параметрів функцій представлені в таблиці 5.1.

**Таблиця 5.1. Аналітичні залежності, що використовуються при прогнозуванні надійності машин**

Аналітичні залежності	Формули для визначення параметрів залежностей	Графіки функцій
$y = a_0 x_0 + a_1$	$a_0 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2};$ $a_1 = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}.$	
$y = a_0 x^2 + a_1 x + a_2$	$a_0 \sum x_i^4 + a_1 \sum x_i^3 + a_2 \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i;$ $a_0 \sum x_i^3 + a_1 \sum x_i^2 + a_2 \sum x_i = \sum x_i y_i;$ $a_0 \sum x_i^2 + a_1 \sum x_i + a_2 n = \sum y_i.$	
$y = a_0 x^{a_1}$	$\sum y_i x_i^{a_1} - a_0 \sum x_i^{2a_1} = 0;$ $\sum y_i x_i^{a_1} \ln x_i - a_0 \sum x_i^{2a_1} \ln x_i = 0.$	
$y = a_0 e^{a_1 x}$	$\sum y_i e^{a_1 x_i} - a_0 \sum e^{2a_1 x_i} = 0;$ $\sum y_i x_i e^{a_1 x_i} - \sum a_0 x_i e^{2a_1 x_i} = 0.$	

Існує ряд методів визначення постійних параметрів емпіричних формул: метод вибраних точок; метод середніх; метод найменших квадратів та ін. Розглянемо більш детально кожний з них.

### 5.5.2. Методи вибраних точок

Нехай в результаті спостережень отримана система дослідних даних:  $M_i(x_i, y_i)$  при  $i = 1, 2, \dots, n$ . Необхідно визначити параметри функції  $y = \varphi(x, a_1, a_2, \dots, a_m)$ . На координатну площину  $XOY$  наносять точки і проводять плавну криву, що по можливості примикає до точок  $M_i$ . На кривій вибирають систему  $m$  (по числу параметрів) точок з координатами  $\tilde{x}_j$  і  $\tilde{y}_j$  при  $j = 1, 2, \dots, m$ . Вибрані точки мають бути рівномірно розподілені по всій кривій.

Для зручності беруть абсциси  $\tilde{x}_j$  цих точок, що співпадають з крупними поділками осі  $OX$  координатної сітки. Далі вимірюють ординати вибраних точок  $\tilde{y}_j$ . Параметри  $a_1, a_2, \dots, a_m$  в загальному випадку визначають з системи  $m$  рівнянь при  $j = 1, 2, \dots, m$ :

$$\tilde{y}_j = \tilde{\varphi}(\tilde{x}_j, a_1, a_2, \dots, a_m). \quad (5.15)$$

Для визначення параметрів лінійної залежності вирішують систему рівнянь вигляду:

$$\begin{cases} \tilde{y}_1 = a_0 \tilde{x}_1 + a_1; \\ \tilde{y}_2 = a_0 \tilde{x}_2 + a_1. \end{cases} \quad (5.16)$$

Для випадку квадратичної залежності  $y = a_0 x^2 + a_1 x + a_2$  коефіцієнти  $a_0, a_1$  і  $a_2$  визначають з системи трьох рівнянь:

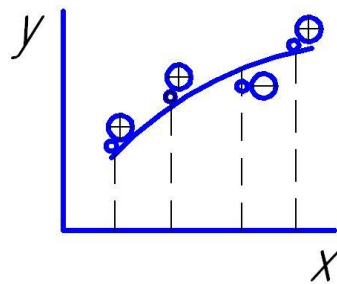
$$\begin{cases} \tilde{y}_1 = a_0 \tilde{x}_1^2 + a_1 \tilde{x}_1 + a_2; \\ \tilde{y}_2 = a_0 \tilde{x}_2^2 + a_1 \tilde{x}_2 + a_2; \\ \tilde{y}_3 = a_0 \tilde{x}_3^2 + a_1 \tilde{x}_3 + a_2. \end{cases} \quad (5.17)$$

Метод вибраних точок є простим і достатньо наочним, але володіє малою точністю.

### 5.5.3. Метод середніх

Якщо нанести на графік експериментальні точки і провести усереднюючу криву (рис. 5.3), то координати ряду експериментальних точок при  $i = 1, 2, \dots, n$  будуть відрізнятися від відповідних точок кривої:

$$\varphi(x_i, a_1, a_2, \dots, a_m) - y_i = \varepsilon_i. \quad (5.18)$$



**Рис.5.3. Побудова усереднюючої кривої по експериментальних значеннях**

Якщо узяти ординати точок, що лежать вище за усередненої кривої із знаком "плюс", а ординати точок під кривою із знаком "мінус", то для якнайкращого положення кривої буде справедливим є вираз:

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_j = 0. \quad (5.19)$$

Для визначення параметрів функції  $a_1, a_2, \dots, a_m$  по методу середніх всі відхилення  $\varepsilon_i$ , розбивають на  $m$  груп, що містять наближено однакове число відхилень. Прирівнюючи до нуля алгебраїчну суму відхилень, що входять до кожної групи, отримаємо систему з  $m$  рівнянь. Розв'язання системи рівнянь дасть шукані параметри  $a_1, a_2, \dots, a_m$  функції  $y = \varphi(x)$ . Якщо аналітичний вираз, отриманий одним з приведених методів, недостатньо точно описує досліджувану залежність, то його уточнюють методом найменших квадратів.

#### **5.5.4. Метод найменших квадратів**

Якщо всі значення функції  $y_1, y_2, \dots, y_n$  визначені з однаковою точністю, то оцінки параметрів  $a_1, a_2, \dots, a_m$  знаходять виходячи з умови, що сума квадратів відхилень вимірних значень  $y_i$ , від розрахункових, тобто величина

$$S = \sum_{i=1}^n [y_i - \varphi(x, a_1, a_2, \dots, a_m)]^2 \quad (5.20)$$

набуває найменшого значення.

Якщо виміри виконані з різною точністю, то оцінки параметрів  $a_1, a_2, \dots, a_m$  визначають з умови:

$$S = \sum_{i=1}^n [y_i - \varphi(x, a_1, a_2, \dots, a_m)]^2 \omega_i, \quad (5.21)$$

де  $\omega_i$  – вагові коефіцієнти вимірів:

$$\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n = \frac{1}{\sigma_1^2}, \frac{1}{\sigma_2^2}, \dots, \frac{1}{\sigma_n^2}, \quad (5.22)$$

де  $\sigma_i^2$  – дисперсія оцінок.

Для знаходження значень параметрів  $a_1, a_2, \dots, a_m$ , що визначають мінімум функції,  $S = \psi(a_1, a_2, \dots, a_m)$ , розв'язується система рівнянь:

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = 0, \frac{\partial S}{\partial a_2} = 0, \dots, \frac{\partial S}{\partial a_m} = 0. \quad (5.23)$$

При прогнозуванні надійності машин і їх елементів найчастіше використовують такі залежності, як лінійна і квадратична функції.

Загальний вид лінійної функції виражений формулою:

$$y = a_0 + a_1 x, \quad (5.24)$$

де  $a_0$  і  $a_1$  – постійні коефіцієнти.

Коефіцієнт  $a_1$  визначає кут нахилу прямої до осі абсцис. Для знаходження значення  $a_1$  використовують вираз:

$$a_1 = \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (5.25)$$

Екстраполяцію в цьому випадку виконують по інтерполяційній залежності:

$$y = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{h} (x - x_0), \quad (5.26)$$

де  $h$  – крок зміни чинника (фактора).

Загальний вид квадратичної функції подано формулою  $y = a_1 x^2 + a_2 x + a_3$ . Графіком квадратичної функції є парабола. Екстраполяцію виконують за допомогою формули Ньютона для рівновіддалених точок:

$$x_i = x_0 + th; \quad (5.27)$$



$$N(x) = (x_n + th) = y_n + \frac{t}{1!} \Delta y_{n-1} + \frac{t(t+1)}{2!} \Delta^2 y_{n-2} + \dots + \frac{t(t+1)\dots(t+K-1)}{K!} \Delta^K y_{n-K} + \dots + \frac{t(t+1)\dots(t+n-1)}{n!} \Delta^n y_0, \quad (5.28)$$

де  $\Delta^K$  – різниця  $K$ -го порядку при  $K = 1, 2, \dots, n$ .

$$\Delta^K y_i = \Delta^{K-1} y_{i+1} - \Delta^{K-1} y_i; \quad (5.29)$$

$$t = \frac{x - x_n}{n} > 0, \quad x > x_n. \quad (5.30)$$

Помилка у визначенні  $f(x)$  не повинна перевищувати:

$$Mh^{n+1} = \frac{t(t+1)\dots(t+n)}{(n+1)!}, \quad (5.31)$$

де  $M$  – максимум абсолютної величини  $(n+1)$ -ої похідної функції  $f(x)$  усередині інтервалу  $(x_0, x_n)$ .

## 5.6. Приклади вирішення задач прогнозування

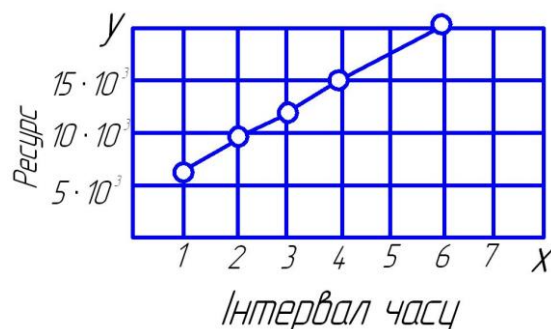
**Приклад 5.1.** Розрахувати ресурс двигуна дорожно-будівельної машини до першого капітального ремонту на період 2008...2010 р.р. В результаті збору і обробки інформації про надійність двигуна отримані наступні дані (табл.5.2).

**Таблиця 5.2** Статистичних даних про надійність двигуна

Рік	1998	2000	2002	2004	2006	2008
$\Delta t$ (інтервал часу)	1	2	3	4	5	6
$T$ (ресурс), тис. мото-год	7	10	12	15	–	20

**Розв’язок:**

1. Будуємо графік функції  $y = f(x)$  (див. рис.5.4).



**Рис.5.4.** Графік зміни прогнозованого параметра в часі

2. Вибираємо лінійну модель прогнозування  $y = a_0 + a_1x$ .

3. По аналітичних залежностях (табл. 5.1) визначаємо параметри  $a_0 = 4,54 \cdot 10^3$  і  $a_1 = 2,6 \cdot 10^3$ .

Тоді, лінійна модель прогнозу з урахуванням розрахованих її параметрів набере наступного вигляду:  $y = 4,54 \cdot 10^3 + 2,6 \cdot 10^3 x$ .

4. Обчислюємо теоретичний динамічний ряд:

$$\tilde{y}_1 = 4,54 \cdot 10^3 + 2,6 \cdot 10^3 \cdot 1 = 7,14 \text{ (тис. мото-год);}$$

$$\tilde{y}_2 = 4,54 \cdot 10^3 + 2,6 \cdot 10^3 \cdot 2 = 9,74 \text{ (тис. мото-год);}$$

$$\tilde{y}_3 = 4,54 \cdot 10^3 + 2,6 \cdot 10^3 \cdot 3 = 12,34 \text{ (тис. мото-год);}$$

$$\tilde{y}_4 = 14,94 \text{ тис. мото-год;}$$

$$\tilde{y}_6 = 20,14 \text{ тис. мото-год.}$$

5. Прогноз на один інтервал вперед (на 2010 р.):

$$\tilde{y}_7 = 4,54 \cdot 10^3 + 2,6 \cdot 10^3 \cdot 7 = 22,74 \text{ (тис. мото-год).}$$

Прогноз на два інтервали вперед (на 2012 р.):

$$\tilde{y}_8 = 4,54 \cdot 10^3 + 2,6 \cdot 10^3 \cdot 8 = 25,34 \cdot 10^3 \text{ (год).}$$

Прогноз на три інтервали вперед (на 2014 р.):

$$\tilde{y}_9 = 27,94 \text{ тис. мото-год.}$$

6. Обчислюємо помилку прогнозу за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2}{n}} = \sqrt{\frac{(y_1 - \tilde{y}_1)^2 + (y_2 - \tilde{y}_2)^2 + \dots + (y_6 - \tilde{y}_6)^2}{6}} = 0,21 \text{ тис. мото-год.}$$

7. З імовірністю 0,68.

$$y_7^* = y_7 \pm \sigma = 22,74 \pm 0,21 \text{ (тис. мото-год);}$$

$$y_8^* = 25,34 \cdot \pm 0,21 \text{ (тис. мото-год);}$$

$$y_9^* = 27,94 \pm 0,21 \text{ (тис. мото-год).}$$

8. З імовірністю 0,95:

$$y_7^* = y_7 \pm 2\sigma = 22,74 \pm 0,42 \text{ (тис. мото-год);}$$

$$y_8^* = 25,34 \pm 0,42 \text{ (тис. мото-год);}$$

$$y_9^* = 27,94 \pm 0,42 \text{ (тис. мото-год).}$$

9. З імовірністю 0,997:

$$y_7^* = y_7 \pm 3\sigma = 22,74 \pm 0,63 \text{ (тис. мото-год);}$$

$$y_8^* = 25,34 \pm 0,63 \text{ (тис. мото-год);}$$

$$y_9^* = 27,94 \pm 0,63 \text{ (тис. мото-год).}$$

Таким чином, ресурс двигуна машини з імовірністю 0,95 складе:

– у 2010 році –  $T_1 = 22,74 \pm 0,42$  (тис. мото-год);

– у 2012 році –  $T_2 = 25,34 \pm 0,42$  (тис. мото-год);

– у 2014 році –  $T_3 = 27,94 \pm 0,42$  (тис. мото-год).

**Приклад 5.2.** Знаючи нормативну тривалість щоденного (щозмінного) технічного обслуговування (ЩО) для існуючих базових колісних тракторів, необхідно визначити витрати часу на ЩО для трактора потужністю 300 кВт. При цьому довідкові дані узяті: з різних літературних джерел і приведені в таблиці 5.3.

**Таблиця 5.3. Початкові дані для визначення залежності часу на ЩО базових колісних тракторів від номінальної потужності**

№ п.п.	Марка трактора	Номінальна потужність, кВт	Тривалість ЩО, хв.
1	Т-25А, Т-16М	18,4	16
2	Т-30А-80, ВТЗ-30СШ	22,1	16
3	ЛТЗ-55	36,8	18
4	МТЗ-572	44,1	18
5	МТЗ-82Д	57,4	18
6	ЛТЗ-155, МТЗ-1221	88,0	20
7	ХТЗ-17221, Т-151К	121,0	24
8	К-701М	224,0	30

**Розв'язок:** Введемо позначення:  $x$  – номінальна потужність двигуна трактора;  $y$  – тривалість ЩО. Оцінимо рівень статистичного взаємозв'язку між даними величинами. Для цього необхідно розрахувати коефіцієнт парної кореляції:

$$r_{xy} = \frac{K_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y}, \quad (5.32)$$

де  $K_{xy}$  – кореляційний момент;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  – відповідно середні квадратичні відхилення даних величин.

Визначимо середні значення  $\bar{x}$  і  $\bar{y}$  по формулах:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum x_i = \frac{611,8}{8} = 76,5 \text{ (кВт)};$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum y_i = \frac{160}{8} = 20 \text{ (хв.)}$$

Проведемо розрахунки, і подамо їх в таблиці 5.4.

**Таблиця 5.4 Розрахунок коефіцієнта парної кореляції**

$N$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$
1	-58,1	-4	232,4	3375,61	16
2	-54,4	-4	217,6	2959,36	16
3	-39,7	-2	79,4	1576,09	4
4	-32,4	-2	64,8	1049,76	4
5	-19,1	-2	38,2	364,81	4
6	11,5	0	0	132,25	0
7	44,5	4	178,0	1980,25	16
8	147,5	10	1475,0	21756,25	100
$\Sigma$	-	-	2285,4	33194,38	160

Обчислимо середні квадратичні відхилення:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{33194,38}{8-1}} = 68,86 \text{ (кВт)};$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (y_i - \bar{y})^2} = \sqrt{\frac{160}{8-1}} = 4,78 \text{ (хв.)}$$

Визначимо кореляційний момент:

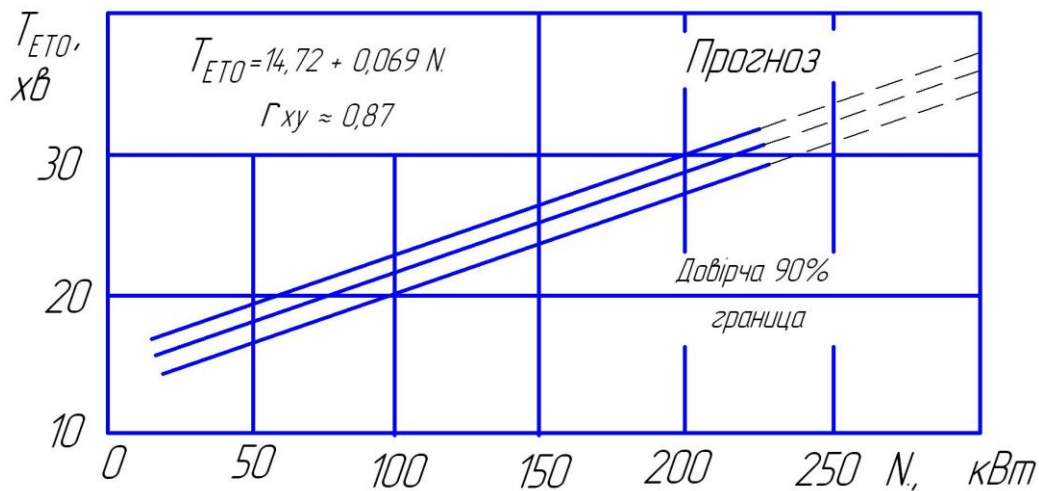
$$K_{xy} = \frac{1}{N} \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \frac{2285,4}{8} = 285,67 \text{ (кВт}\cdot\text{хв)}$$

По формулі (5.32) знайдемо коефіцієнт парної кореляції:

$$r_{xy} = \frac{K_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y} = \frac{285,67}{68,86 \cdot 4,78} \approx 0,87.$$

Значення коефіцієнта парної кореляції дорівнює  $r_{xy} \approx 0,87$ . На практиці значення коефіцієнта  $r_{xy} > (0,7..0,8)$  говорять про високий ступінь статистичного взаємозв'язку між даними величинами. При цьому для практичних розрахунків  $r_{xy}$  доцільно використовувати пакети прикладних програм на ПЕОМ.

Дані прикладу нанесемо дані на графік (рис.5.5) і виберемо вид залежності для опису заданої закономірності.



**Рис. 5.5. Залежність часу на ЩО колісних тракторів від номінальної потужності**

З урахуванням розташування точок на графіку вибираємо лінійну залежність, що описується рівнянням вигляду  $y = a + bx$ . Невідомими в цьому рівнянні є значення коефіцієнтів  $a$  і  $b$ , що визначаються по статистичній інформації методом найменших квадратів. Для цього необхідно розв'язати систему рівнянь (5.33) відносно  $a$  і  $b$ :

$$\begin{cases} Na + \sum x_i b = \sum y_i; \\ \sum x_i a + \sum x_i^2 b = \sum y_i x_i. \end{cases} \quad (5.33)$$

Значення коефіцієнтів системи рівнянь розраховуємо по залежностях, приведених в таблиці 5.5.

**Таблиця 5.5. Розрахунок коефіцієнтів системи рівнянь і залишкової дисперсії**

$N$	$x_i, \text{кВт}$	$y_i, \text{хв.}$	$x_i y_i, \text{кВт} \cdot \text{хв.}$	$x_i^2, \text{кВт}^2$	$\hat{y}_i, \text{хв.}$	$(\hat{y}_i - y_i)^2 \cdot 10^3, \text{хв.}^2$
1	18,4	16	294,4	338,6	15,98	0,4
2	22,1	16	353,6	488,4	16,24	57,6
3	36,8	18	662,4	1354,2	17,26	547,6
4	44,1	18	793,8	1944,8	17,76	57,6
5	57,4	18	1033,2	3294,8	18,68	462,4
6	88,0	20	1760,0	7744,0	20,79	624,1
7	121,0	24	2904,0	14641,0	23,07	864,9
8	224,0	30	6720,0	50176,0	30,18	32,4
$\Sigma$	611,8	160	14521,4	79981,8	—	2647,0

З урахуванням результатів розрахунку система рівнянні (5.33) набере наступного вигляду:

$$\begin{cases} 8a + 611,8b = 160; \\ 611,8a + 79981,8b = 14521,4. \end{cases}$$

В ході розв'язання системи отримаємо:  $a = 14,72$  і  $b = 0,069$ . Графік залежності показаний на рис. 5.5 суцільною лінією, а прогнозовані значення – пунктиром. Так, для  $x_i = 300$  кВт прогнозоване значення  $y_i = 35,42$  хв.

Залишкову дисперсію, що характеризує розкид даних відносно отриманого рівняння (функції), визначають по формулі:

$$S_{\text{зал}}^2 = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2 = 2,647 \text{ (хв}^2\text{)}$$

де  $\hat{y}_i$  – розрахункові значення параметра, що визначаються з рівняння  $\hat{y}_i = 14,72 + 0,069 \cdot x_i$ .

Стандартну похибку визначають по формулі:

$$S_r = \sqrt{\frac{1}{N-2} S_{\text{зал}}^2} = \sqrt{\frac{2,647}{8-2}} = 0,664 \text{ (хв)}.$$

Стандартну похибку прогнозу для  $x_i = 300$  визначають таким чином:

$$S_{\hat{y}} = S_r \sqrt{1 + \frac{1}{N} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}} = 0,664 \sqrt{1 + \frac{1}{8} + \frac{(300 - 76,5)^2}{33194,38}} \approx 1,077 \text{ (хв)}.$$

Відхилення від середнього значення знаходять з урахуванням довірчої імовірності  $\pm t_{\beta} S_{\hat{y}}$ . Для даної задачі при рівні довірчої імовірності  $\beta = 0,9$  значення тривалості на ЩО знаходитиметься в інтервалі  $T_{\text{ЩО}} = 35,42 \pm 1,90 \cdot 1,077$  або  $T_{\text{ЩО}} = 35,42 \pm 2,05$  (хв).

### 5.7. Оцінка якості прогнозування надійності машин

Якість прогнозування надійності машин і їх елементів може бути оцінена сукупністю показників, основними з яких є:

1. Похибка прогнозування.
2. Відношення тривалості прогнозованого періоду до глибини ретроспективного аналізу.
3. Повнота прогнозування.
4. Економічна оцінка прогнозування.
5. Показник ефективності прогнозування.
6. Розміри області, в якій із заданою імовірністю знаходитиметься значення показника.

Розглянемо більш детально кожний із показників прогнозування.

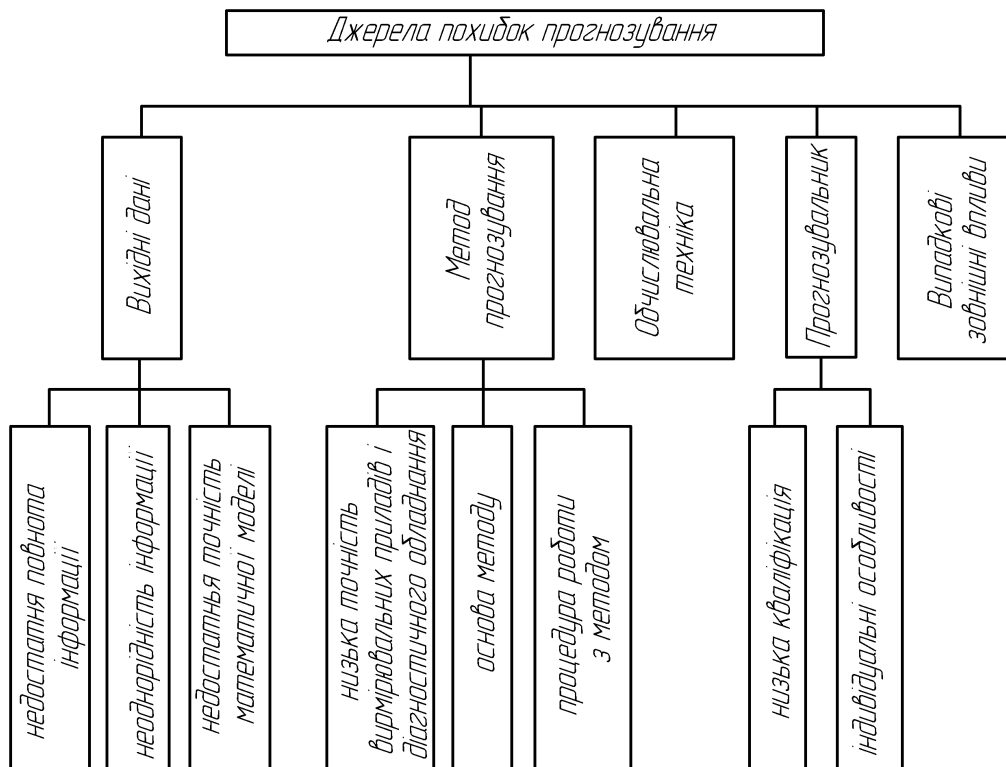
*Похибка прогнозування.* Є відношенням модуля різниці дійсного значення прогнозованого параметра  $x$  і його оцінки  $\tilde{x}$ , отриманої в результаті досліджень, до величини  $\tilde{x}$ :

$$\varepsilon = \frac{|x - \tilde{x}|}{\tilde{x}}. \quad (5.34)$$

При оцінці достовірності прогнозування приймають  $\varepsilon \leq \varepsilon_0$ , де  $\varepsilon_0$  – деяке заперед задане позитивне число, що встановлюється з практичних міркувань

на підставі результатів раніше проведених аналогічних досліджень з урахуванням необхідної точності розв'язання поставленої задачі.

Класифікація основних джерел похибки прогнозування приведена на рис. 5.6.



**Рис. 5.6. Класифікація основних джерел похибок прогнозування**

Специфіка прогнозування така, що остаточний висновок про його достовірність можна зробити тільки після здійснення прогнозованої події. Проте якщо очікувати реалізацію прогнозу для визначення достовірності і можливості його використання, то прогнозування втрачає сенс. Тому виникає необхідність оцінки достовірності прогнозів в процесі дослідження.

Як вже наголошувалося раніше, прогнозування базується, перш за все, на результатах дослідження процесу зміни прогнозованого параметра у минулому і теперішньому часі. Тому точність розв'язання задачі прогнозування залежатиме від якості вихідної інформації.

Похибку прогнозування, обумовлену недостатньою повнотою, неоднорідністю і низькою точністю вихідних даних, позначимо  $\varepsilon_{II}$ . Процедура розв'язання задачі прогнозування полягає у виконанні ряду арифметичних,



логічних та інших операцій, послідовність і зміст яких визначаються вибраним методом прогнозування. Це вносить додаткову похибку до розв'язання задачі, яку умовно можна назвати похибкою методу  $\varepsilon_m$ . Значення цієї похибки визначається точністю математичної моделі, використовуваної при прогнозуванні. Наближеність розв'язання задачі прогнозування визначається також характером обчислювальних операцій і способом їх проведення (традиційним або за допомогою ПЕОМ).

Необхідність округлення результатів обчислень, особливо коли доводиться оперувати ірраціональними числами вигляду  $\pi$ ,  $e$ ,  $\sqrt{2}$  і тому подібне, приводить до неточностей обчислень. Похибка, яка з'являється у зв'язку з цим в остаточному результаті прогнозування, є похибкою обчислень  $\varepsilon_o$ . При цьому значення цієї похибки визначається точністю обчислювальної техніки, використовуваної при розв'язанні задач.

Останній вид похибки викликаний можливістю появи яких-небудь випадкових зовнішніх дій, здатних вплинути на характер зміни прогнозованого параметра. Пов'язану з цим похибку назвемо випадковою і позначимо  $\varepsilon_b$ . Таким чином, повна похибка прогнозування визначається як сума похибки вихідних даних  $\varepsilon_n$ , похибки методу  $\varepsilon_m$ , похибки обчислень  $\varepsilon_o$  і випадкової похибки  $\varepsilon_b$ :

$$\varepsilon = \varepsilon_n + \varepsilon_m + \varepsilon_o + \varepsilon_b. \quad (5.35)$$

Оскільки частка кожної похибки в повну похибку різний, то останній вираз можна записати таким чином:

$$\varepsilon = a_1 \cdot \varepsilon_n + a_2 \cdot \varepsilon_m + a_3 \cdot \varepsilon_o + a_4 \cdot \varepsilon_b, \quad (5.36)$$

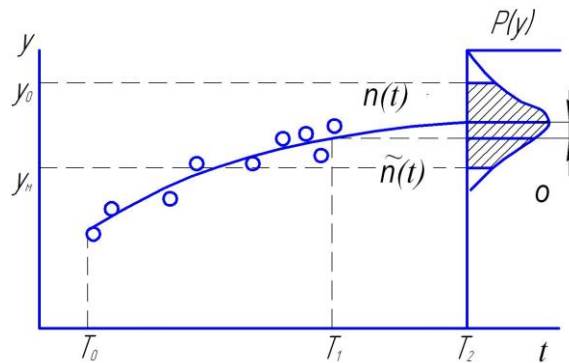
$$\text{де } \sum_i a_i = 1.$$

Допустимі межі похибки встановлюються виходячи з необхідної точності вирішення завдань.

Відношення тривалості прогнозованого періоду до глибини ретроспективного аналізу. Є важливим показником, що визначає якість прогнозування (рис.5.7):

$$K_B = \frac{T_2}{T_1}, \quad (5.37)$$

де  $T_2$  – тривалість прогнозованого періоду;  $T_1$  – час, що характеризує глибину ретроспективного аналізу.



**Рис. 5.7. Графічна модель прогнозування**

Для забезпечення достатньої достовірності результатів прогнозування рекомендується дотримуватися значень коефіцієнта  $K_B \leq 0,3 \dots 0,5$ .

На рис. 5.7 функція  $\varphi(t)$  характеризує дійсну закономірність зміни прогнозованого параметра машини. Функцію  $\tilde{\varphi}(t)$  визначають за результатами досліджень, і вона є робочою моделлю при прогнозуванні. При цьому помилку прогнозування визначають величиною  $\varepsilon$ , а ступінь розсіяння значень прогнозованого параметра – імовірністю  $P(y)$ . Межі інтервалу значень прогнозованого параметра визначаються величинами  $y_B$  і  $y_H$ .

Якість прогнозування визначається в значній мірі числом чинників  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , що враховуються при побудові робочої моделі, співвідношенням періодів  $T_2$  і  $T_1$  і варіації значень прогнозованого показника  $y$ .

*Повнота прогнозування.* Оцінюється показником  $K_{\Pi}$ , який є відношенням числа  $n$  прогнозованих параметрів до спільного числа  $N$  параметрів, що характеризують працездатність виробу:

$$K_{\pi} = \frac{n}{N}. \quad (5.38)$$

*Економічна оцінка прогнозування.* Проводиться за допомогою показника  $K_e$ , який є відношенням витрат матеріальних засобів на проведення необхідних досліджень до періоду прогнозування:

$$K_e = \frac{Ц + З}{T_2}, \quad (5.39)$$

де  $Ц$  – вартість контрольно-експериментальних приладів і діагностичного устаткування, грн.;  $З$  – заробітна плата робітників і інженерно-технічного персоналу, провідного необхідні дослідження, грн.

Даний показник може бути використаний для порівняльної оцінки різних методів прогнозування по критерію питомих приведених витрат на проведення процедури прогнозування.

*Показник ефективності прогнозування.* Дозволяє оцінити, наскільки покращали експлуатаційні характеристики досліджуваного виробу після проведення заходів, рекомендованих за результатами прогнозування. Показником ефективності  $K_{\text{еф}}$  прогнозування машин і їх елементів може служити зміна показника надійності в результаті проведення заходу. У окремому випадку це може бути відносна зміна коефіцієнта готовності:

$$K_{\text{еф}} = \frac{K_{\Gamma 2} \cdot K_{\Gamma 1}}{K_{\Gamma 1}}, \quad K_{\Gamma} = \frac{t_0}{t_0 + t_{\text{в}}}. \quad (5.40)$$

Час відновлення  $t_{\text{в}}$  може бути істотно скорочене на підставі результатів прогнозування, що приводить до збільшення  $K_{\Gamma}$ .

Розміри області, в якій із заданою імовірністю знаходитиметься значення показника, характеризують якість прогнозування надійності. При визначенні інтервалу, в якому буде із заданою імовірністю знаходитися значення прогнозованого параметра, необхідно встановити закон розподілу похибок

прогнозованого параметра і його основні статистичні характеристики (наприклад, для нормального закону – математичне очікування і дисперсію).

У теорії надійності машин головним завданням є її оцінка, здійснювана різними методами прогнозування і на основі спеціальних випробувань.

Найбільш прийнятним методом прогнозування через свою універсальність є статистичне моделювання, коли початкова інформація про закони розподілу випадкових аргументів не пов'язана з чинником часу.

### **Контрольні запитання**

1. Сформулювати мету і основні задачі.
2. Які основні етапи прогнозування надійності машин?
3. Розкрити сутність методу експертних оцінок.
4. В якій послідовності оброблюють результати експертного опитування?
5. Як методи моделювання використовують для прогнозування надійності?
6. Дати загальну характеристику статистичним методам прогнозування.
7. Процедура здійснення методів екстраполяції.
8. Як проводиться оцінка якості прогнозування надійності машин?

## **6. МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ І ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ**

### **6.1. Керування надійністю машин на всіх стадіях їх життєвого циклу**

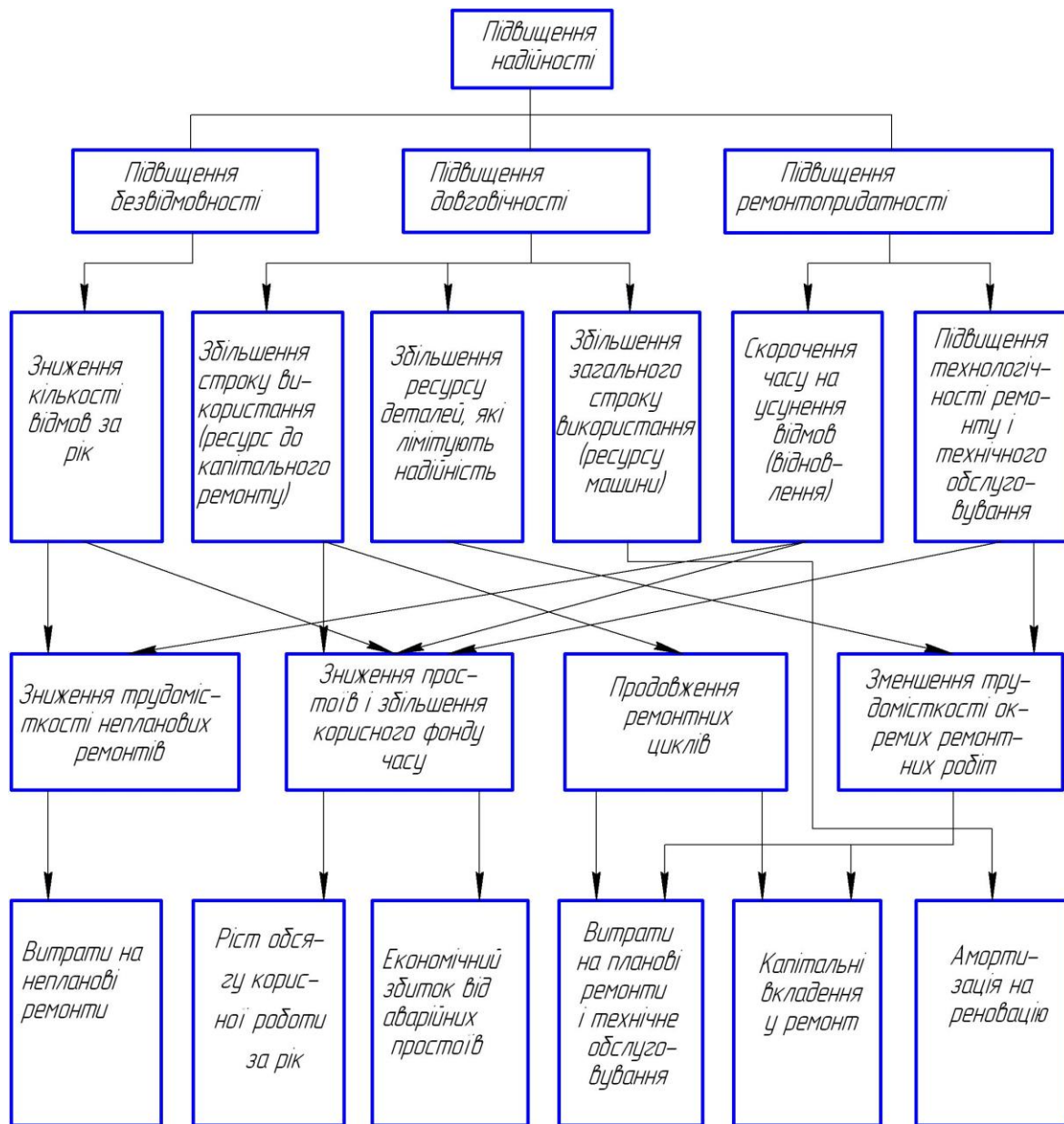
Керування надійністю машин – це встановлення, забезпечення і підтримання її заданого рівня, який здійснюється шляхом систематичного контролю і цілеспрямованої дії на умови та фактори, що впливають на надійність. Принциповою є заміна окремих і розрізнених заходів їх комплексом, який забезпечує заданий рівень надійності машини на всіх стадіях її життєвого циклу, тобто при проектуванні, виготовленні та експлуатації.

Надійність виробів машинобудування закладається на стадії конструювання. Характер зміни технічного стану елементів машин та їх надійність залежать від конструкцій, застосованих матеріалів, захисних покриттів, мастила та ін.

Надійність машин забезпечується на стадії виробництва. Важливими заходами при цьому є технологічні методи підвищення надійності деталей та вузлів машини.

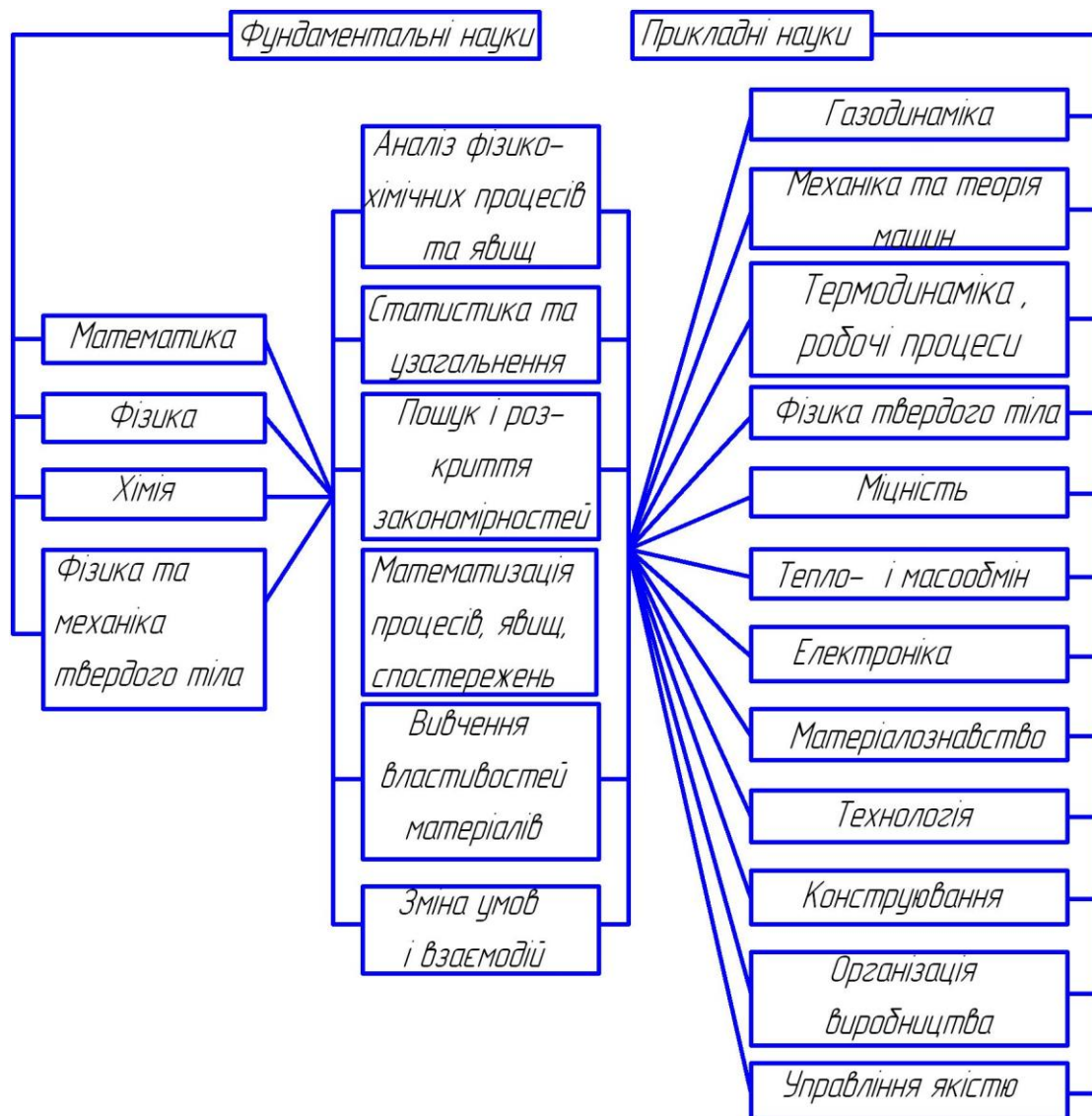
Реалізується надійність виробів в експлуатації. Наскільки повно виявляється закладена у машині надійність у процесі роботи, визначається прийнятою системою, якістю технічного обслуговування і ремонту, кваліфікацією обслуговуючого персоналу, впливом зовнішнього середовища тощо.

Комплексний підхід до проблеми керування надійністю машин відображено в єдності і взаємозв'язку технічних, економічних, соціальних та організаційних заходів, які забезпечують потрібну надійність машин (рис. 6.1). При цьому важливе значення має використання для цієї мети досягнень фундаментальних і прикладних наук. Схема структури наукового забезпечення надійності машин наведена на рис. 6.2.



**Рис. 6.1. Схема впливу підвищення надійності на зміни техніко-економічних показників використання машин**

Керування надійністю машин здійснюється через їх основні комплексні показники безвідмовності, довговічності, збережуваності та ремонтпридатності. Поліпшення показників надійності призводить до економії матеріальних, трудових і енергетичних ресурсів при використанні машин.



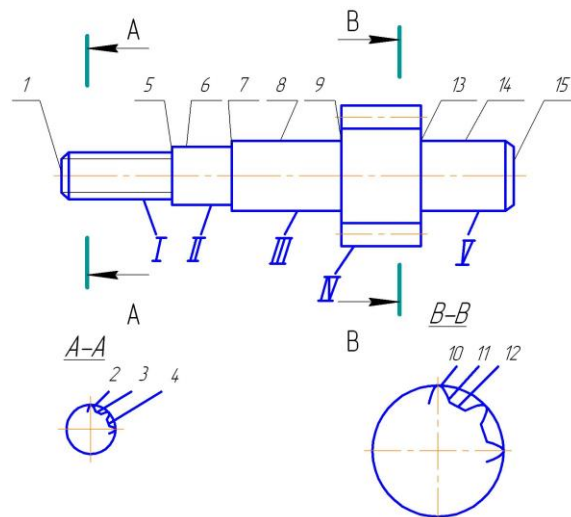
## 6.2. Схема наукового забезпечення надійності машин

Кожна машина складається з певних агрегатів і механізмів, які, в свою чергу, – з вузлів, складальних одиниць і деталей. Тому для вирішення проблеми надійності машини потрібний системний підхід, який є методологічною орієнтацією її вивчення, що ґрунтується на розгляді об'єктів як систем, тобто сукупності елементів, пов'язаних взаємодією, і в силу цього виступають як єдине ціле відносно оточуючого середовища.

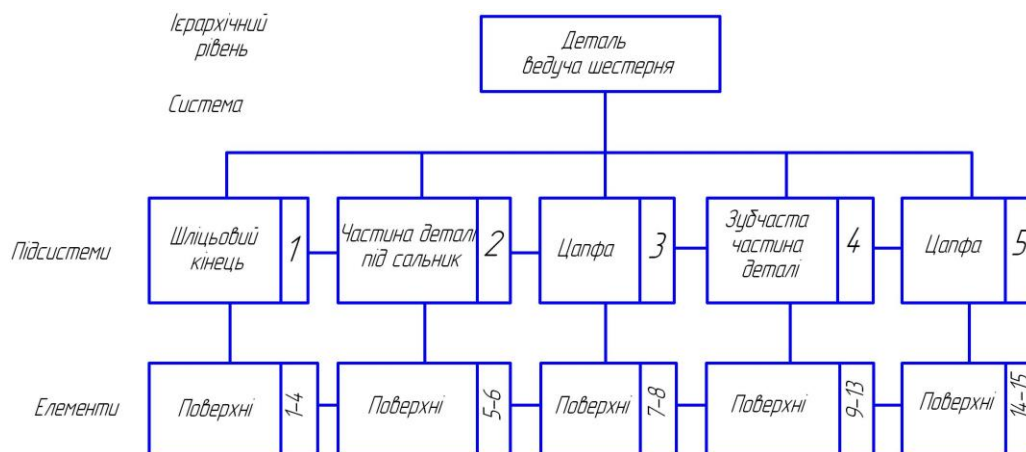
Наприклад, трактор можна розглядати як систему, яка складається з підсистем: двигуна, трансмісії, несучої системи, ходової частини, механізмів керування і контролю, допоміжного обладнання.

Безумовно, надійність машини у цілому залежить від надійності її

складових, насамперед від надійності деталей. З одного боку деталь – це елементарна частина машини, з іншого – множина, система з усіма її властивостями. Вона є цілісною і складається з взаємозв'язаних частин. Функціональні і структурні її частини можна розглядати як підсистеми, а поверхні – як елементи (тертьові, опорні, привалкові, кріпильні і зв'язуючі, між якими існують певні співвідношення). Число структурних складових залежить від типу і складності конструкції деталі, її призначення, тобто деталь як система може поділятися на підсистеми або тільки на елементи. Приклад ієрархічної структури деталі (ведучої шестерні гідронасоса) наведено на рис. 6.3 і 6.4. Кожна поверхня деталі також має складну будову.



**Рис. 6.3. Структура конструкції деталі:** I–V – функціональні структурні частини деталі; 1–15 – поверхні деталі



**Рис. 6.4. Схема ієрархічної структури деталі (позначення на рис. 6.3)**

Таким чином, вирішення проблеми забезпечення і підвищення надійності



сільськогосподарської техніки слід починати з нижчого ієрархічного рівня – поверхні деталі, а потім, рухаючись по ланцюгу (деталь – з'єднання – складальна одиниця – вузол – агрегат – машина – парк машин), розробляти заходи щодо надійності виробів на всіх етапах їх життєвого циклу.

Всі заходи стосовно їх забезпечення поділяють на: конструкторські, технологічні, експлуатаційні, організаційні. Крім того, є багато змішаних заходів: конструкторсько-технологічних, організаційно-технологічних та ін. Це пояснюється тим, що, наприклад, часто конструктивні зміни спричинюють технологічні, а це приводить і до змін в організації виробництва.

## **6.2. Забезпечення надійності машин на стадії проектування**

### **Основні шляхи забезпечення надійності на стадії проектування.**

*Структурна схема надійності машини.* Схема виробу повинна бути вибрана так, щоб число його елементів було по можливості найменшим, а поява відмов, у крайньому разі типових, відомих з практики, виключалась або зводилась до мінімуму.

Для аналізу надійності машини складають її структурну схему. Ця схема дає змогу уявити машину як умовне графічне зображення з основними її складовими частинами та елементами і забезпечує нормальне функціонування та зв'язки, які існують між ними. У процесі структурного аналізу машини визначаються усі функціонально важливі елементи і робиться висновок про вплив здатності різних механізмів й елементів на працездатність машини у цілому. Структурний аналіз включає: опис функціонування – машини як об'єкта дослідження з позицій надійності; її складу з оцінкою конструктивних особливостей; встановлення впливу на працездатність машини, відмови будь-якого з основних її елементів.

Надійність певної системи, яка складається із заданої кількості елементів, залежить не тільки від надійності кожного з них, але й від способу їх з'єднання. Наприклад, для системи з трьох елементів може існувати цілий ряд можливих

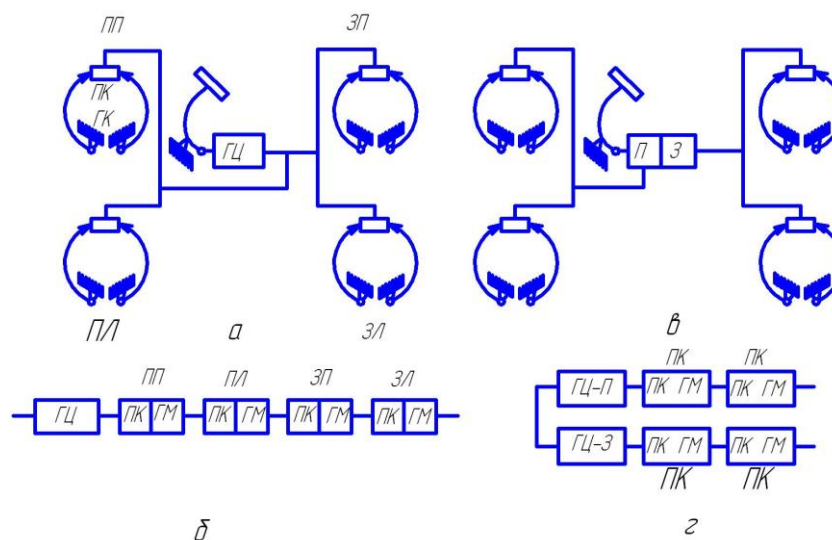
схем з'єднання. Користуючись теоремами і формулами теорії ймовірностей, можна визначити надійність (ймовірність безвідмовної роботи) для різних схем з'єднань елементів у механічних системах. Проте завжди є два граничні випадки: мінімальної ймовірності безвідмовної роботи – послідовне з'єднання, яке забезпечує лише один працездатний стан; максимальної ймовірності безвідмовної роботи – паралельне з'єднання, що забезпечує  $n-1$  працездатних станів (лише один непрацездатний стан). Інші випадки (проміжні) відповідають змішаному способу з'єднання елементів. Чим більше працездатних станів системи, тим вища її надійність.

Ймовірність працездатного стану послідовного з'єднання елементів "гірше гіршого", тобто менше надійності найненадійнішого елемента.

Ймовірність працездатного стану паралельно з'єднаних елементів "краще кращого", тобто вища за ймовірність, працездатного стану найнадійнішого елемента. Цей висновок має велике практичне значення, оскільки паралельним з'єднанням менш надійних елементів можна отримувати надійнішу систему. У всіх випадках, крім послідовного та паралельного з'єднань, надійність системи змінюється залежно від розташування елементів у системі.

В якості прикладу розглянемо гальмівну систему автомобіля з гідравлічним приводом.

Функціональну схему системи наведено на рис. 6.5, а.



**Рис. 6.5. Гальмівна система з гідравлічним приводом:** а – функціональна

схема звичайної системи; б – структурна схема надійності звичайної системи; в, г – відповідно функціональна та структурна схеми надійності системи з роздільним приводом до передніх і задніх гальм

Система складається з таких елементів: головного гальмівного циліндра (ГЦ) з ймовірністю безвідмовної роботи  $P_{ГЦ}$  і чотирьох гальм Т (ймовірність безвідмовної роботи  $P_T$ ), кожний з яких має гальмівний механізм (ГМ) (ймовірність безвідмовної роботи  $P_{ГМ}$ ) і приводу до колеса ПК (ймовірність безвідмовної роботи  $P_{ПК}$ ).

Важливою особливістю гальмівної системи є її повна відмова при місцевій відмові (ГЦ або Т). Тому вважають, що всі елементи системи вмикають послідовно. При цьому застосовують структурну схему надійності системи (рис. 6.5, б).

Щоб зменшити наслідки місцевої (локальної) відмови, схему змінюють і для підвищення надійності системи вводять головний циліндр для створення двох роздільних контурів – передніх і задніх гальм (рис. 6.5, в). Тепер при будь-якій місцевій відмові вся система не буде виходити з ладу, а два колеса залишаться гальмівними.

Небезпечну повну відмову замінено частковою з прийнятними результатами. Відповідна структурна схема безвідмовності має дві паралельно пов'язані вітки гальмівних контурів передніх і задніх коліс (рис. 6.5, г).

Користуючись структурними схемами надійності (рис. 6.5, б і 6.5, г), можна дати кількісну оцінку підвищенню надійності гальмівних систем порівняно з рис. 6.5, а.

Для звичайної гальмівної системи (див. рис. 6.5, б) ймовірність безвідмовної роботи дорівнює:

$$R = P_{ГЦ} P_T^4 = P_{ГЦ} P_{ПК}^4 P_{ГМ}^4, \quad (6.1)$$

а для гальмівної системи з автономним приводом до передніх і задніх коліс (рис. 6.5, г):

$$R = 1(1 - P_{ГЦ} P_T^2)^2. \quad (6.2)$$

*Надійність кожного елемента.* Відомо, що навіть виготовлені у промислових умовах однакові елементи, як правило, мають неоднакову надійність. За рахунок відбору можна одержати елементи підвищеної надійності. Однак при цьому їх вартість зростає, оскільки вартість забракованих при контролі елементів переноситься на відібрані кращі за якістю елементи партії. Тому такий метод ефективний, якщо виріб містить невелику кількість елементів, критичних за надійністю або з обмеженою довговічністю.

*Якість, зокрема стабільність характеристик матеріалів і комплектуючих виробів.* Завдання ускладнюється для характеристик витривалості, де відношення значень граничних меж витривалості (максимальних до мінімальних) може бути у кілька разів більшим, ніж у характеристик статичної міцності. Звуження границь зміни характеристик матеріалу – один із шляхів забезпечення точності розрахунків. Це стосується і готових виробів, і вузлів, одержаних від постачальників (комплектуючі вироби).

*Використання уніфікованих і стандартизованих елементів.* Такі елементи є звичайно надійнішими, особливо при виготовленні на спеціалізованих підприємствах.

*Захист від шкідливих впливів та зовнішнього середовища.* Як показує досвід, вироби, виконані за однією схемою і складені з однакових елементів, можуть значно відрізнятись за надійністю залежно від того, наскільки вони захищені, наприклад, від вібрації, високих або низьких температур, дії зовнішнього або окислювального середовища.

*Правильний вибір режиму (умов) роботи виробу,* залежить від багатьох причин. Наприклад, навантаженість агрегатів трансмісії автомобіля залежить від вибору коефіцієнта запасу зчеплення  $\beta > 1$ . Якщо  $M_d$  – крутний момент двигуна, то при вмиканні зчеплення за рахунок інерційних навантажень трансмісії передається момент  $\beta M_d$ , який і визначає навантаженість її агрегатів та їх довговічність. У конструкціях зчеплень, де сила пружин не регулюється, коефіцієнт  $\beta$  вибирають зі значним запасом ( $\beta = 2,0 \dots 2,3$ ), тому умова  $\beta > 1$

зберігається, не зважаючи на значне спрацювання накладок ведених дисків. Умову  $\beta > 1$  можна підтримувати і при зменшеному запасі ( $\beta = 1,5 \dots 1,8$ ) за рахунок додаткового регулювання, яке відновлює силу пружин, тобто компенсує спрацювання фрикційних накладок. Режим роботи агрегатів трансмісії внаслідок цього полегшується.

*Розширення допустимих граничних меж для параметрів, які визначають працездатність виробів.* Наприклад, ефективність гальмівного механізму залежить від зазору між колодками і гальмівним барабаном, отже, від ступеня спрацювання гальмівних накладок. Якщо зазор встановлюють вручну і величину його в експлуатації не перевіряють вчасно, то надійність гальмівного механізму знижується. Якщо ж передбачено автоматичне підтримання величини зазору в експлуатації, то працездатність гальмівного механізму зберігається при спрацюванні накладок до граничного стану, тобто надійність гальмівного механізму підвищується.

*Уточнення методів розрахунку, зокрема ймовірнісна оцінка умов зовнішнього впливу і параметрів самого виробу.* Ряд елементів, з яких він складається, в умовах масового виробництва можуть мати приховані дефекти. Тому можливі критичні комбінації впливів (механічних, теплових, електричних та ін.) і самих дефектів, які зумовлюють відмову. Чим точніше враховані ці випадкові явища у процесі проектування, і, зокрема, при розрахунках, тим надійніше буде виріб, економніше і швидше буде забезпечено належний рівень надійності.

*Вдосконалення методів випробувань, зменшення їх тривалості та обсягу.* Рішення про вибір шляхів забезпечення надійності агрегату або системи прийматиме конструктор, виходячи з пред'явлених вимог і особливостей робочого процесу вузла або агрегату.

У конструктора на початковому етапі недостатньо інформації про надійність спроектованого виробу. Докладна інформація про виріб з'явиться через тривалий час, після достатньо тривалої експлуатації. На стадії проектування проводять попередні випробування: спочатку матеріалів і

елементів виробу, а потім дослідних зразків, намагаючись точніше змоделювати реальні умови експлуатації.

*Резервування* – це метод підвищення надійності об’єкта введенням надлишковості, тобто додаткових засобів і можливостей над мінімально необхідними для виконання об’єктом заданих функцій. Завдяки резервуванню з менш надійних елементів створюють надійніші вироби.

У сільськогосподарському машинобудуванні використовують навантажувальне, структурне і функціональне резервування.

Наприклад, стрижень розтягується силою  $F$ . Відмова – це руйнування стрижня. Його надійність оцінюється ймовірністю неруйнування, яка визначається співвідношенням напруження  $\sigma_{нт}$  від зовнішнього навантаження і напруження  $\sigma_{пр}$ , пов’язаного зі стійкістю металу проти руйнування. Для збільшення надійності можна вмикати другий стрижень паралельно першому. Це і є структурне резервування. Оскільки другий стрижень зайвий у структурі, такий же результат буде, якщо залишити один стрижень, збільшивши його площу вдвічі, зменшити навантаження, але підвищивши міцність матеріалу стрижня до  $\sigma'_{пр} = 2\sigma_{пр}$ . Ці три випадки належать до навантажувального резервування: за робочим напруженням, навантаженням і граничним напруженням.

У розглянутих випадках надійність визначається ймовірністю неруйнування:

$$R = P(\sigma_{пр} > \sigma_{нт}) = P[(\sigma_{пр} > \sigma_{нт}) > 0]. \quad (6.3)$$

Аналогічні міркування можуть бути перенесені на величини, які визначають зносостійкість, теплостійкість та інші властивості, від яких залежить виникнення відмов різного виду.

Структурне резервування відрізняється режимом роботи і способом вмикання, метою, наслідками відмови основного елемента.

Структурне резервування передбачає звичайно застосування резервних елементів, паралельно основним. Резервні елементи можуть бути

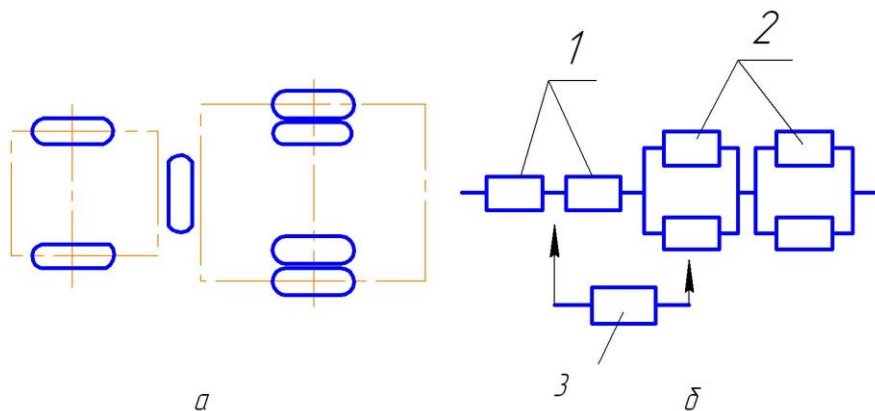
навантаженими (постійно ввімкнені), ненавантаженими, працюючими у полегшеному режимі, зі змішаним включенням.

Але паралельне з'єднання не завжди може забезпечити необхідне резервування. Якщо будь-який елемент об'єкта (системи) підлягає різним за своєю фізичною природою відмовам, то залежно від характеру відмови резервний елемент необхідно вмикати послідовно або паралельно.

Кожне з перерахованих вмикань окремо забезпечить лише часткове резервування.

За метою резервування буває загальним і роздільним.

У разі відмови основного елемента і перемиканні на резервний працездатність виробу знижується або залишається без змін. Наприклад, шини звичайного вантажного автомобіля можна вважати включеними (рис. 6.6).



**Рис. 6.6. Розташування шин вантажного автомобіля:** а – функціональна схема; б – структурна схема надійності; 1, 2, 3 – колеса відповідно передні, задні і запасне

Можна вважати запасне колесо ненавантаженим резервом, а інші шини на задніх колесах – навантаженим резервом, оскільки при відмові однієї – двох шин задніх колес рух автомобіля можливий, хоч і зі зниженими навантаженнями. Відмова основного елемента найчастіше знижує працездатність виробу. Але у даному прикладі використання запасного колеса замість того, що відмовило, не знижує основних параметрів автомобіля. Якщо ж відмовляє одна з шин задніх колес, то вантажопідйомність автомобіля зменшується і відбувається часткова відмова. Подібний випадок можна вважати

резервуванням, якщо зменшення працездатності виробу залишається у допустимих межах.

Введення структурної надлишковості приводить до збільшення ваги, об'єму і вартості виробу.

При функціональному резервуванні один з елементів системи здатний виконувати додаткові функції. Наприклад, ручне гальмо за основним призначенням є стоянковим, але може використовуватися і під час руху.

Щоб виконати увесь обсяг сільськогосподарських робіт, враховуючи можливість виходу з ладу машин, господарства повинні мати резервну сільськогосподарську техніку. Обмінний фонд запасних складальних одиниць й агрегатів, запас деталей на складі (або безпосередньо на машині) саме для цього призначений і дозволяє швидко замінити елементи, що відмовили, справними.

Резервування, підвищуючи надійність систем, приводить до їх ускладнення і зростання вартості.

Резервування методом введення запасних частин, обмінних агрегатів підвищує вартість експлуатації машин, часто створює їх запаси. Тому доцільність резервування у кожному випадку повинна оцінюватися з урахуванням його економічної ефективності, а також вимог, які пред'являються до об'єкта з точки зору безвідмовності.

**Конструкторські методи забезпечення надійності** машин при їх проектуванні поділяють на чотири основних напрями (рис. 6.7): удосконалення конструкції та матеріалів, що застосовуються; використання пристроїв для підвищення надійності; підвищення ремонтпридатності й трибологічні заходи. При цьому використання суто конструкторських прийомів має поєднуватися з використанням сучасних методів оптимального проектування машин і конструкцій, створенням нових методів й засобів розрахунку деталей та вузлів машин.

*Зменшення концентрації напружень при виборі форми та розмірів деталі.* Особливу увагу необхідно звернути на це в місцях галтелей, надрізів, канавок та інших видів поверхні, а також деталей, що піддаються динамічним і



циклічним навантаженням.

*Підвищення піддатливості деталей.* Піддатливість деталі, загальна або місцева, (локальна) дозволяє її робочій поверхні компенсувати деформацію спряженої деталі та пристосуватися до неточностей геометричної форми. Найчастіше у з'єднаннях з регульованою піддатливістю використовуються гумометалеві вкладки, гумові деталі та вкладки з пластмаси і м'яких покриттів.

Висока деформованість гуми сприяє більш рівномірному розподілу тиску по довжині вкладки в умовах змішаного та рідинного тертя, наприклад, при водяному мащенні абразивні частинки, що є у воді, ще й вминаються у м'яку поверхню гуми, перекочуються по ній без різальної дії і виносяться водою у змащувальну канавку. Піддатливість підшипників зі свинцевим покриттям вкладок характеризується незначним опором пластичній деформації. Пластмаси, як і гума, здатні рівномірніше розподіляти навантаження за довжиною вкладки та за інших рівнозначних умов забезпечувати більшу вантажопідйомність змащувального шару порівняно з антифрикційними металами.

Підвищення піддатливості деталей сприяє збільшенню їхньої зносостійкості. Наприклад, при роботі двигуна внутрішнього згорання внаслідок нерівномірної деформації циліндрів можуть виникнути значні місцеві навантаження на юбку поршня. Щоб запобігти заклинюванню поршня на юбці виконують прорізи Т- або П-подібної форми.

Конструкцію підвісного або пружного сідла випускного клапана двигуна наведено на рис. 6.8. Сідло і клапан випуску працюють в умовах високих температур і значних ударних навантажень.

При жорсткій посадці сідла випускних клапанів воно викривляється через нерівномірну деформацію головки, що призводить до порушення співвісності з клапаном. Між фасками клапана і сідла подекуди з'являються проміжки, через які при закритому клапані виходять гази, зумовлюючи місцеве перегрівання і прогоряння фасок та зниження їх довговічності. Для підвищення довговічності підвісне сідло виготовляється подовженим і кріпиться до циліндра тільки

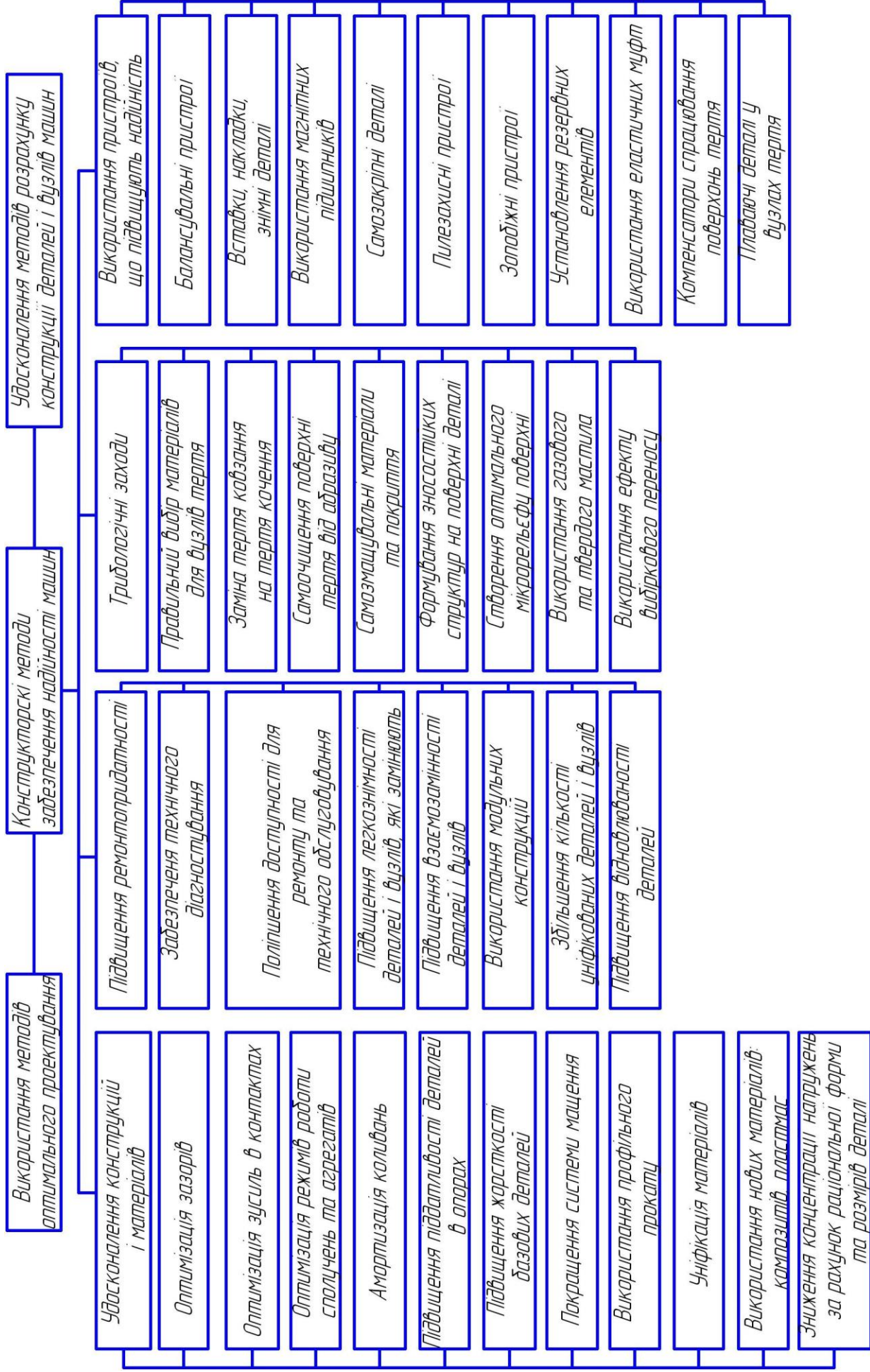
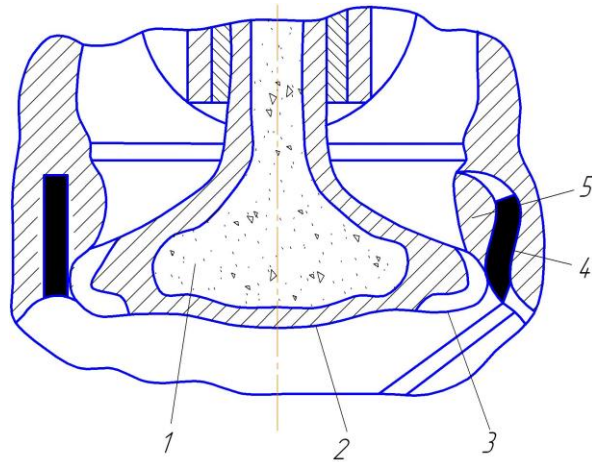


Рис. 6.7. Класифікація конструкторських методів забезпечення надійності машин



**Рис. 6.8. Клапан і сідло клапану двигуна:** 1 – металевий натрій; 2 – випускний клапан; 3 – наплавка із твердого сплаву; 4 – стопорне кільце; 5 – сідло клапана

шляхом розвальцювання тонкого верхнього поясу.

Така конструкція з невеликою жорсткістю дозволяє сідлу займати правильне положення і забезпечує тим самим кращий взаємний контакт при закритому клапані.

*Підвищення жорсткості конструкцій.* У сучасних машин, які відрізняються підвищеними швидкостями, навантаженнями і вимогами до точності робочих характеристик, вимоги до жорсткості підвищуються.

Жорсткість деталей впливає на ймовірність їх руйнування за критеріями статистичної міцності та міцності від втомленості, на вібростійкість (здатність системи та її елементів нормально існувати в умовах вібрації). Недостатня жорсткість одних деталей може викликати перевантаження і втрату працездатності інших (наприклад недостатня жорсткість рам і станин призводить до порушення центрування з'єднаних агрегатів та вузлів).

Шляхом добору необхідної жорсткості можна уникнути попадання у сферу резонансу при змушених коливаннях і в умовах автоколивань. В той же час не завжди слід прагнути підвищенню жорсткості, оскільки ударні навантаження краще сприймаються не абсолютно жорсткими тілами, а контактні пружні деформації приводять до вирівнювання розподілу навантаження і збільшення контактної площі.

Модуль пружності у більшості матеріалів має незначні відмінності, тому необхідну жорсткість забезпечують, оптимізуючи форму і розміри деталі та конструкції.

Основні напрямки підвищення загальної жорсткості машин і власне жорсткості деталей:

- виключення елементів більшої піддатливості, якщо у цілому до системи ставляться вимоги загальної жорсткості (недоцільно виконувати жорсткі деталі корпусу, якщо, вони закріплені слабкими болтами на тонких фланцях);

- якщо є вибір, то використовувати деталі, що працюють на розтяг та стиск, замість деталей, працюючих на вигин та кручення; .

- вибір раціональних форм перерізів (для кручення – тонкі кільцеві перерізи, для згинання – переріз з максимальним відхиленням площі від нейтральної осі);

- зменшення місцевих деформацій за рахунок установки пере городок;

- раціональний вибір опор (перехід від шарнірних до защемлених) та оптимальне їх розташування по довжині.

Основні напрямки підвищення контактної жорсткості: зменшення жорсткості поверхні, створення попереднього натягу (у підшипниках), оптимізація форми контактуючих поверхонь.

*Застосування нових матеріалів.* Технічний прогрес зумовлює появу нових матеріалів, оскільки людство зіткнулося з проблемою – матеріали "старого" типу вичерпали себе. Підвищення надійності роботи різних машин та пристроїв тривалий час досягалося шляхом виготовлення деталей з міцних металів та сплавів. При цьому найчастіше пасивні елементи отримували зайвий запас міцності, а активні працювали на межі характеристик.

Сучасні вимоги до властивостей матеріалів стали вкрай різноманітними, оскільки умови експлуатації матеріалів стали жорсткішими і складнішими. В якості прикладу можна розглядати такі властивості матеріалів як міцність, жорсткість, пластичність, корозійна стійкість, зносостійкість, жаростійкість та ін. Тобто, звичайними матеріалами складно задовольнити перераховані вимоги.

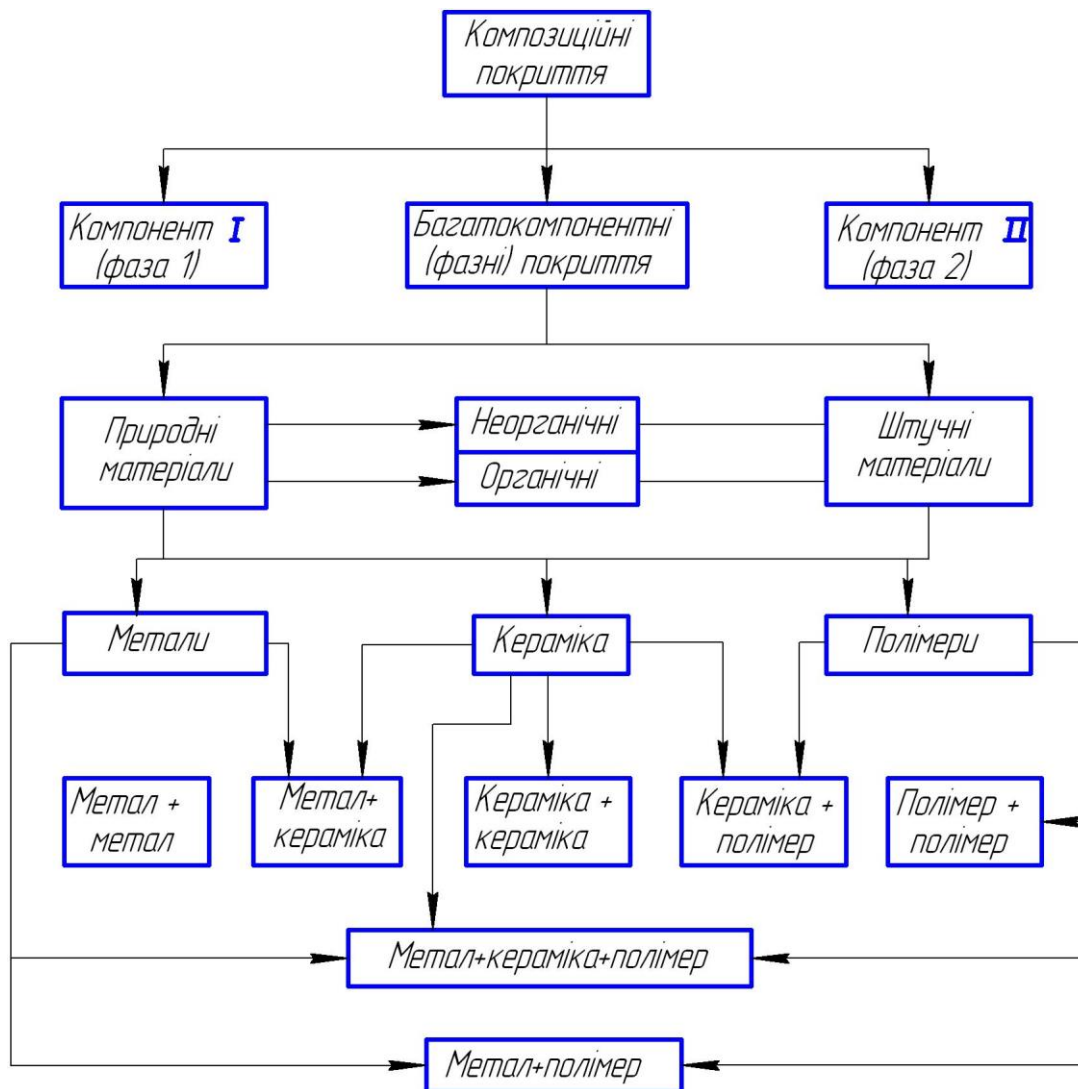
Усунення розриву між вимогами сучасної техніки до конструкційних матеріалів і можливостями класичних сплавів досягається шляхом створення і застосування композиційних матеріалів (КМ).

Створення КМ ґрунтується на сполученні матеріалів основних класів, з різними вихідними властивостями – метал, кераміка, полімер (рис. 6.9). Залежно від матриці всі КМ поділяють на наступні типи: з металевою матрицею – металеві композиційні матеріали; з полімерною – полімерні композиційні, матеріали; з керамічною матрицею – керамічні композиційні матеріали.

Найперспективнішими є волокнисті композиційні матеріали. Це композиції з волокон підвищеної міцності у м'якій основі (матриці). Основне навантаження сприймають волокна, а матриця забезпечує їх рівномірне навантаження. У перспективі вважається можливим підвищити питому міцність конструкційних композиційних матеріалів порівняно з сучасними матеріалами та сплавами до 10 разів.

Ефективність композиційних матеріалів обумовлюють:

- висока міцність матеріалів у малих перерізах, наприклад, границя міцності металевого дроту може досягати 4,50ГПа;
- можливість використання нитковидних кристалів (вусів) з міцністю, близькою до теоретичної;
- невелика чутливість до концентрації напружень, пов'язана зі структурою.



**Рис. 6.9. Сполучення основних класів матеріалів при створенні композиційних покриттів**

Металокерамічні матеріали виготовляють з металевих порошків шляхом пресування під тиском з наступним спіканням при високій температурі. Ці матеріали використовують як антифрикційні підшипникові і фрикційні гальмівні. Вони економічно вигідні при достатній серійності виробництва.

Металокерамічні вкладки використовують, коли неможливо забезпечити достатнє мащення. Широке застосування мають залізо-графітні втулки (1,5 % графіту, решта – залізо), які працюють при швидкості до 4 м/с. У відповідальніших вузлах встановлюють залізо-мідно-графітові втулки (1,5 % графіту, 2,5 % міді). Використовують також втулки з дорожчих пористих антифрикційних матеріалів на основі міді (87% міді, 10 % олова, 3 % графіту).

Дослідження показують, що несуча здатність залізграфітних підшипників при мащенні неочищеними олівами у 1,5...2,0 рази вища ніж при мащенні очищеними дистиляційними.

За останні десятиліття швидко зростає виробництво і використання пластичних мас. Це пояснюється, з одного боку, позитивними технологічними властивостями пластмас, з іншого – різноманітністю їх корисних експлуатаційних властивостей.

Для зниження енергоємності оранки перспективним є використання полімерних полиць з фторопластів. Дослідженнями встановлено, що фторопластові полиці забезпечують зниження опору плуга на 20 %. За кордоном є позитивний досвід використання фторопластових полиць на плугах загального призначення. Так, японська фірма "Сунгамо" випускає три-, п'ятикорпусні плуги з полімерними фторопластовими полицями. В Угорщині також використовують полімерні полиці на плугах загального призначення.

*Забезпечення заданих температурних режимів роботи з'єднань деталей, вузлів та агрегатів.* У сучасних машинах температурний режим має велике значення для підвищення їх довговічності. У ряді праць зазначено, що температурні умови процесу впливають, передусім, на спрацювання деталей і форму спрацювання. За даними професора Б. І. Костецького, залежно від температури тертя спостерігаються різні умови спрацювання: до 100 °С – спрацювання схоплювання I-го роду; до 500 °С – окислювальне; понад 500 °С – теплове. Особлива увага приділяється тепловому режиму деталей двигунів, ущільнювальних і гальмівних пристроїв.

Температура у вузлах тертя і нагрівання деталей двигунів регулюється шляхом охолодження водою (або повітрям) і картерним мастилом, утворенням теплоізолюючих прорізів (у головках блоків та на поршнях), встановленням у бобишках поршнів пластинок з інвару, а також заповненням пустотілих впускних клапанів рідким натрієм.

Застосування у сучасних двигунах передпускових підігрівників (рідинних або електрофакельних) суттєво зменшує спрацювання їх деталей при

запусканні взимку.

*Забезпечення надійних умов мащення поверхонь тертя деталей.* Всі основні робочі з'єднання сучасних автотракторних та комбайнових двигунів, як правило, змащуються під тиском. Подача мастила під тиском та його фільтрація все ширше застосовується у вузлах тертя трансмісій. Частину провідних вузлів ходової частини гусеничних тракторів також переведено з консистентного мащення на рідинне (втулки цапф рам, підшипники опорних котків та ін.).

*Покращання герметизації вузлів агрегатів.* Конструкція і матеріали ущільнення пристроїв сільськогосподарської техніки мають велике значення для підвищення її довговічності, оскільки трактори та інші машини тривалий час працюють в атмосфері, насиченій абразивними частинками. Потрапляючи у внутрішні порожнини двигунів, агрегатів трансмісії та ходової частини, вони зумовлюють прискорене спрацювання їх деталей.

У сучасних тракторах використовуються різні типи ущільнень: радіальні, самопідтискні, гумові, каркасні, кільця-сальники, напівгрубошерсті, торцеві з набивкою, лабіринтні.

Застосування лабіринтних ущільнень значно зменшує кількість абразивних частинок, які проникають у зону тертя. Наприклад, лабіринтні ущільнення у шарнірах литої гусениці підвищили зносостійкість пальців і втулок у 2,5 рази. Лабіринтне ущільнення у цьому шарнірі утворюється в результаті того, що кінці середньої втулки (довшої за вушко ланцюга) входять на 9...10 мм у крайні вушка суміжної ланки ланцюга. Крім цього, рекомендується на поверхнях тертя прорізати канавки, які об'єднуються загальним каналом у кожному з тіл пари тертя. Абразивні частинки із зони тертя через цю систему отворів можуть бути виведені промиванням або продуванням. Періодичний збіг канавок обох деталей може спричинити пульсацію змащувальної плівки, а це буде сприяти відокремленню абразивних частинок від поверхонь тертя.

Більш надійні манжети примусової або гідродинамічної дії, в яких олива, що витікає, повертається в ущільнювальну площину за рахунок гвинтової лінії



або спеціальних ребристих виступів біля контактної кромки.

Для покращання герметизації вузлів і агрегатів заводи-виробники використовують прокладні матеріали (фторкачуки, силіконові гуми), еластомери, герметизуючі пасти та клеї.

*Застосування плаваючих деталей.* У вузлах тертя ковзання ці деталі зустрічаються у вигляді плаваючих пальців, втулок та шайб.

Поршневий палець з'єднує, як відомо, поршень із шатуном. Можливі такі способи з'єднання: установка пальця, закріпленого у бобишках поршня або у малій шатунній голівці; установка пальця, що вільно повертається у бобишках і у шатунній голівці. Палець такої конструкції називають плаваючим.

При роботі механізму плаваючий палець під дією сил тертя з боку шатуна повертається. Оскільки довільне кутове переміщення шатуна у коливному русі складається із кутового переміщення відносно пальця і провороту пальця у бобишках, то колова швидкість у кожному з цих двох відносних кутових переміщеннях пальця майже вдвічі менша ніж при закріпленому пальці; у стільки ж разів зменшується тепловиділення в кожному зі з'єднань пальця. Спрацювання пальця і втулок зменшується, але по поверхні розподіляється рівномірно. Найважливіша перевага плаваючого пальця – його велика надійність: завислий палець у шатуні може разом з цим коливатися у бобишках поршня, а зафіксований у бобишках – не перешкоджає коливанню шатуна.

Плаваючі елементи у вузлах машин необхідні також для компенсації теплових деформацій. Наприклад, якщо підшипники коливання закріпити жорстко на валу і в корпусі, то подовження вала при підвищенні температури вузла в процесі його роботи зумовить спочатку зменшення осьової "гри" в підшипниках, а потім призведе до защемлення тіл коливання між кільцями, чим зменшить довговічність підшипників. Небезпека усувається застосуванням плаваючих опор. У цьому випадку тільки один з підшипників жорстко закріплюється на валу і в корпусі, фіксуючи вал по довжині осі, інші встановлюються в корпусі, розточеному за калібром так, що при жорсткому закріпленні на валу вони мають можливість вільно переміщуватися (плавати) в

осьовому напрямі. Для полегшення плавання при двох опорах як плаваючу обирають менш навантажену, в багатоопорному валу жорстко закріплюють у корпусі найбільш навантажену опору.

*Підвищення ремонтоздатності.* При розробці конструкції і технології виробництва запроектованої або модернізованої машини повинна відпрацьовуватися ремонтоздатність машини. Наприклад, блочна конструкція має перевагу, що полягає у скороченні циклу виготовлення складальних одиниць і агрегатів машин та тривалості загального складання. Одночасно скорочується період на огляд та ремонт машини. Гусениці тракторів складаються з ланок, які об'єднуються послідовно одна з одною за допомогою пальців, що входять в отвори ланок із зазором. Пальці після посадки в отворі шплінтують з підкладеними під шплінти шайбами. Ланки виконують литими з високомарганцевистої аустенітної сталі, які погано піддаються механічній обробці. Пальці виконують з маловуглецевої сталі з цементацією і гартуванням до HRC 54...62. Гусениці цієї конструкції мають просту технологію і відносно невелику масу, але їх основний недолік – неможливість ремонту.

Одне з конструктивних рішень було знайдено у посадці в ланках розрізних втулок, які утримуються в отворах силами пружності. Після спрацювання втулки замінюють; виготовляють їх шляхом розрізання трубчастої заготовки на частини по довжині.

Вимоги ремонтної технологічності часто не виконуються при проектуванні шліцьових валів, коли діаметри шийок приймають рівними зовнішнім діаметрам консольних шліцьових кінців. При незначному спрацюванні шийок виникають складності щодо відновлення вала. Проточування шийок потребує зменшення внутрішнього діаметра втулок для збереження зазору, але враховуючи нероз'ємність підшипників (наприклад, деяких валів екскаваторів), він за умовами монтажу не може бути меншим від зовнішнього діаметра шліцьової частини вала. Проточування ж шліців зовні потребує відповідної зміни розмірів з'єднаних деталей. Тому ця конструкція вала буде технологічною в основному виробництві, але не є технологічною в

умовах ремонту. Технологічною вона може стати, якщо діаметр шийок буде більшим від номінального зовнішнього діаметра шліців.

**Трибологічні заходи підвищення надійності.** *Вибір матеріалів пар тертя.* Деталі, що труться, залежно від призначення, виготовляють з конструкційних, фрикційних, зносостійких й антифрикційних матеріалів широкої номенклатури.

У багатьох випадках на конструкційний матеріал наносять зносостійкі покриття, плівки та ін.

З конструкційних сталей виготовляють деталі, які повинні задовольняти вимогам високої міцності, жорсткості або піддатливості, а також мати поверхні тертя.

Це деталі типу валів, пальців, болтів, шарнірів, зубчастих коліс тощо. Із сталі, а також чавуну виготовляють силові циліндри, поршні, плунжери, поршневі кільця. Чавун широко розповсюджений як матеріал для станин, столів, кареток, повзунів, напрямні яких піддаються тертю; область застосування його розширюється.

Фрикційні – це матеріали, які у контакті з металевою поверхнею мають високий більш-менш стабільний коефіцієнт тертя. Матеріали, що використовуються у гальмах і фрикційних муфтах валів, поділяються на органічні (дерево, шкіра, пробка, повсть), металеві (чавун, сталі У6, У7, марганцевиста сталь та ін.), азбесто-текстоліт, фібра, спечені на мідній та залізній основі.

Зносостійкими називають матеріали, які при терті навіть у важких умовах навантаження порівняно мало зношуються. До елементів конструкцій, матеріали яких повинні мати високу зносостійкість, належать плунжерні пари, зубці ковшів екскаваторів, навантажувачів, лемеші плугів та робочі поверхні більшості технологічних машин (скребки, ланцюги, риштаки, штампи та ін). Тобто ці елементи входять або не входять до складу пар тертя. Як зносостійкі матеріали застосовують конструкційні сталі, зміцнені по усьому об'єму або по робочих поверхнях, спеціальні сталі, чавуни, спечені матеріали, гуму,

пластмаси.

З усіх пар тертя найбільші труднощі виникали під час забезпечення тривалої нормальної роботи підшипників ковзання в умовах, високих питомих навантажень при порівняно великих швидкостях ковзання. З метою покращання роботи підшипників ковзання було розроблено антифрикційні сплави з низьким коефіцієнтом тертя (при роботі у парі зі стальним валом). Надалі антифрикційними матеріалами стали називати будь-який підшипниковий матеріал, металевий і неметалевий, твердість якого менша від твердості з'єднаної деталі.

Поняття "антифрикційність" – це певний комплекс властивостей, яким повинен задовольняти підшипниковий матеріал, а саме достатня статична та динамічна міцність при підвищених температурах; здатність утворювати міцний граничний шар мастил і швидко відновлювати його у місцях, де він зруйнувався; низький коефіцієнт тертя при граничному змащуванні; відсутність заїдання на валу, якщо мастило не подається; високі теплопровідність, теплоємність, припрацювання, зносостійкість з'єднання; недефіцитність матеріалу та висока технологічність.

Підшипникових матеріалів, які б задовольняли усі ці вимоги, практично немає. Так, міцність олов'яних бабітів різко знижується з підвищенням температури, обмежуючи їх застосування у важких умовах роботи; припрацювання певних антифрикційних бронз незадовільне; неметалеві антифрикційні матеріали характеризуються низькою теплопровідністю. Кожний підшипниковий матеріал при певних режимах тертя має антифрикційні властивості. Антифрикційність будь-якого матеріалу визначається за його коефіцієнтом тертя з деталлю з'єднання в умовах граничного змащення або іншого режиму тертя за інших тотожних умов, за обсягом пошкоджень поверхонь тертя, температурою цих поверхонь та ймовірності заїдання чи налипання матеріалу тощо. Підходячи до антифрикційності із загальних позицій, у парах тертя важко відрізнити антифрикційні матеріали від зносостійких. Пара "поршневе кільце – циліндр" повинна бути зносостійкою, з

низьким коефіцієнтом тертя і добре припрацьовуватись, а кільце мати високу пружність. При підборі матеріалу кільця за показником високої зносостійкості пари завжди враховують й антифрикційність.

Вичерпні, безапеляційні рекомендації щодо вибору матеріалів для деталей, що труться, неможливі.

Тільки на основі ретельного порівняння умов роботи деталей, що труться, вихідних властивостей матеріалів і змін, яких вони зазнають на поверхнях тертя, з урахуванням інших обставин можна підібрати у кожному випадку матеріал, який найбільше підходить.

Зазначимо деякі рекомендації для вибору матеріалів пар тертя ковзання:

1. З'єднувати твердий матеріал з м'яким, температура кристалізації якого нижча за середню температуру поверхні тертя. Така пара матеріалів добре протистоїть заїданню і характеризується високою надійністю. Позитивні результати дають пари хром-гума при змащуванні мінеральним маслом і водою, хром-бронза при пластичних мастильних матеріалах.

2. З'єднувати твердий матеріал з твердим (утворення пар з азотованої хромованої та загартованої сталей). Такі трибоелементи мають високу зносостійкість через взаємне заглиблення їхніх поверхонь. Нанесення покриттів для припрацювання підвищує надійність у найнебезпечніший період роботи – під час припрацювання. Застосування цих трибоелементів обмежується швидкостями ковзання.

3. Уникати поєднань м'якого матеріалу з м'яким, а також пар з однакових матеріалів (незагартована сталь по незагартованій сталі, алюмінієвий сплав по нікелевому сплаву, мідний – по алюмінієвому, хром по хрому, хром по алюмінію, нікель по нікелю, пластмаса по пластмасі), за винятком політетрафторетилену та поліетилену. Подібні пари мають низьку зносостійкість і ненадійні у роботі. При незначних перевантаженнях в парах виникають джерела захоплення і відбувається глибоке виривання матеріалів з налипанням на поверхні тертя.

4. Застосовувати у важкодоступних для змащування конструкціях пористі спечені матеріали та антифрикційні сплави.

5. Застосовувати як фрикційні матеріали пластичні маси. У багатьох випадках вони не тільки підвищують надійність і строк служби вузла тертя, але й зменшують масу конструкції і витрату дефіцитних кольорових металів, а також зменшують і поліпшують акустичні властивості машин.

6. Прагнути шляхом вибору матеріалів трибоелементів, мастильних матеріалів або присадок до них створювати під час роботи пари умови реалізації режиму вибіркового переносу при терті.

Для пари, утвореної ковзними поверхнями і з різними твердістю та розмірами площин тертя, можна встановити такі дві умови:

$$1) H_1 > H_2, S_1 < S_2.$$

$$2) H_1 < H_2, S_1 < S_2,$$

де  $H_1, H_2$  – твердості поверхонь тертя;  $S_1, S_2$  – відповідні площі поверхонь тертя.

Пару з розміщенням матеріалів, яка задовольняє першій умові, називають "прямою парою тертя", другій умові – "зворотною парою". У випадку прямої пари тертя по більшій поверхні ковзає твердіше тіло, а у випадку зворотної пари – м'якше тіло; переважає зворотна пара.

*Заміна у вузлах машин тертя ковзання тертям кочення.* Така заміна у багатьох випадках доцільна з точки зору надійності роботи деталей та економічності машин. Кожному виду опор (ковзання та кочення) притаманні як позитивні, так і негативні властивості. Підшипники кочення мають такі переваги:

1. Зменшуються витрати на тертя порівняно з витратами підшипників ковзання, які працюють при граничному або рідинному змащуванні. Використання підшипників кочення, як правило, підвищує ККД машини. Коефіцієнт тертя підшипника кочення порівняно мало змінюється у великому діапазоні навантажень та колових швидкостей. Статичний момент підшипника тільки на 30...35 % перевищує момент тертя при встановленому русі, у підшипниках ковзання він у 15 разів більший. Тому доцільно встановлювати опори кочення у вузлах машин, які працюють з частими пусками й зупинками.

2. Спостерігається значна економія кольорових металів – міді, олова, свинцю, на виготовлення вкладишів підшипників ковзання.

3. Зменшуються витрати мастильних матеріалів.

4. Відпадає потреба примусового охолодження.

5. Спрощується догляд.

6. У валів при правильно визначених, посадках майже не спрацьовуються шийки, і вони не потребують відновлення.

7. Шарико- та роликопідшипники стандартизовані, що спрощує конструювання підшипникового вузла. Наявність підшипників кочення, у вигляді готового комплекту, прискорює виготовлення та монтаж машини.

8. Використання підшипників кочення зменшує вартість машини.

9. Перераховані переваги підшипників кочення обумовили їх значне поширення.

*Формування зносостійких структур поверхонь тертя.* Швидкість зношування перебуває в оберненій залежності від якості поверхневого шару деталі, а якість цього шару – у прямій залежності від хімічної природи матеріалу, його мікро- і субмікроструктури.

На основі сучасних уявлень теорії тертя та зношування сформульовано фундаментальні трибологічні принципи, які є теоретичною основою створення зносостійких матеріалів та покриттів:

1. Структура матеріалу повинна бути гетерогенною і складатись із твердих зерен, рівномірно розподілених у пружнопластичній матриці. У цьому випадку прикладене навантаження діє в основному на включення твердої фази, а у матриці відбувається релаксація напружень.

2. Структура матеріалу не повинна істотно змінюватись у процесі тертя або повинна перебудовуватись у структуру, вигідну з точки зору тертя та зношування:

3. Поверхневий шар матеріалів, в процесі тертя повинен мати меншу міцність ніж шари, розташовані нижче (правило позитивного градієнта).

4. Поверхневий шар не повинен наклепуватись у процесі тертя.

5. Під впливом навколишнього середовища в матеріалі не повинні відбуватись структурні зміни, погіршення характеристик міцності та пластичності.

6. До складу матеріалу рекомендується вводити речовини, здатні працювати як тверде мастило.

7. Між структурними складовими матеріалу повинен існувати адгезійний зв'язок.

8. Протизадирні домішки не повинні істотно знижувати міцність матеріалу.

Очевидно, що створення в одному матеріалі цілого комплексу, на перший погляд суперечливих, фізико-механічних та інших властивостей (наприклад, висока твердість і висока пластичність тощо), практично неможливе в однофазному одно- чи багатоконпонентному сплаві, але можливе у гетерогенному, тобто ідеальний триботехнічний матеріал може бути тільки композиційним.

Класичним методом створення зносостійкої структури матеріалу є підвищення об'ємної міцності, що на рівні субмікроструктури досягається створенням бездефектної структури або підвищенням щільності бар'єрів (у тому числі і дислокацій), які ускладнюють рух дислокацій.

Розрізняють технічну міцність, що визначається значеннями отриманих механічних властивостей ( $\sigma_T$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_b$ ,  $E$  та ін.), та теоретичну.

Остання – це опір деформації та руйнуванню, які повинні були б мати матеріали згідно з фізичними розрахунками та з урахуванням сил міжатомної взаємодії кристалічних тіл. Теоретичну міцність металів визначають за формулою:

$$\sigma_T = \frac{G}{2\pi},$$

де  $\sigma_T$  – модуль зсуву, тобто коефіцієнт пропорційності між дотичним напруженням  $\tau$  і відносним зсувом  $\gamma$ , ( $\tau = \sigma\gamma$ ). Сучасні кристали, що практично не містять дислокацій, називаються "вусами" або нитковидними (довжиною



2...10 мм і товщиною 0,5...2,0 мкм), мають міцність, близьку до теоретичної. Межа міцності нитковидних кристалів заліза, міді та цинку відповідно становить 13,0, 30 і 2,25 ГПа. Малі розміри нитковидних кристалів і висока чутливість їх поверхневих дефектів обмежує масове виробництво та використання у техніці.

Теоретичне значення міцності у 100...1000 разів більше за технічну міцність. Це пов'язано з дефектами у кристалічній побудові і перш за все – з наявністю дислокацій. Зниження міцності металу супроводжується певним ущільненням цих дислокацій ( $\rho_a=10^6...10^8 \text{ см}^{-2}$ ), після чого із збільшенням щільності недосконалостей відбувається зміцнення металу. Ця залежність має такий вигляд:

$$\sigma_T = \sigma_0 + K_1 G_b \sqrt{\rho_a}, \quad (6.4)$$

де  $\sigma_0$  – напруження зсуву до деформації (після відпалювання);  $b$  – вектор Бюргерса;  $K_1$  – коефіцієнт зміцнення, який залежить від природи металу, його кристалічної ґратки і структури (визначається внеском різних механізмів гальмування дислокацій у загальному зміцненні і має значення порядку  $10^{-1}$ ).

При густині дислокацій, яка перевищує ( $\rho_a=10^{12}...10^{13} \text{ см}^{-2}$ , у металі утворюються тріщини, а тому ця величина густини дислокацій є граничною.

Усі методи зміцнення металу, які застосовуються – ППД (холодне наклепування), легування (створення різних сплавів), термічна й термомеханічна обробка та ін. (швидкісна електротермічна ЕТМО та ін.) ґрунтуються на принципі гальмування руху дислокацій. У всіх випадках відбувається гальмування руху дислокацій внаслідок збільшення їх густини; збільшення сил тертя при рухові дислокацій за рахунок пружної взаємодії з атомами легуючих елементів; утворення на дислокаціях домішкових атмосфер; подрібнення блоків (субзерен), тобто збільшення при цьому малокутових меж, утворенням дисперсних частинок другої фази (карбідів, нітридів, різних хімічних з'єднань тощо).

Із збільшенням ступеня холодної (нижче 0,15...0,2 температури плавлення) поверхнево-пластичної деформації (ППД) властивості, які

характеризують опір деформації ( $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$ , HRC та ін.), поліпшуються, а здатність до пластичної деформації – пластичність ( $\delta$ ,  $\Psi$ ) зменшується. Це явище зростання міцності називають наклепуванням. Зміцнення металу в процесі наклепування пояснюється збільшенням дефектів кристалічної будови (дислокацій, вакансій, міжвузлових атомів). Вже з початку пластичної деформації відбувається зміцнення металу, яке пов'язане із скупчення дислокацій біля границь. Проте основне зміцнення визначається характером множинного ковзання у кожному зерні. Границя текучості при наклепуванні може досягти  $\sigma_T = 10^{-3} \dots 10^{-2} G$  ( $\rho_a = 10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ).

При легуванні й термічній обробці зміцнення пов'язано з утворенням твердого розчину, гетерогенних структур різної дисперсності або метастабільних структур, наприклад мартенситу.

Найбільше характеристики міцності ( $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$ ) підвищуються при створенні у сплавах високодисперсної гетерофазної структури за допомогою гартування і через старіння.

Ефективний бар'єр для руху дислокацій у металах – міжзеренна границя. Це пояснюється тим, що дислокація не може перейти границю зерна, оскільки у новому зерні площини ковзання не співпадають з площиною руху цієї дислокації у попередньому зерні.

Тому, чим дрібніше зерно (більший протяг границь), тим вища міцність металу.

Підвищення міцності при подрібненні зерна не обумовлює зростання крихкості металу.

Розвиток фізичного матеріалознавства дає надію що в найближчий час будуть розроблені сплави з границею міцності 3,50...6,0 ГПа, це 50 % від їх теоретичної міцності.

Будова металів і сплавів на всіх структурних рівнях (макро- і мікро-) зумовлюється хімічною природою матеріалу і законами симетрії. Макробудова деталей залежить від способу формоутворення і виду технологій обробки. Далі макроструктура матеріалу деталей визначається способом його виробництва;

мікроструктура – способом зміцнюючої технології, субмікроструктура (субзерна, блоки, домени) – також визначається способом зміцнюючої технології, а міцність цієї структури насамперед залежить від розмірів субзерен та кута їх розорієнтації (від 10...15° до їх часток). Нарешті, йде ґратка з певним просторовим розташуванням атомів і видом зв'язку між ними (іонного, ковалентного, металевого, вандерваальсового).

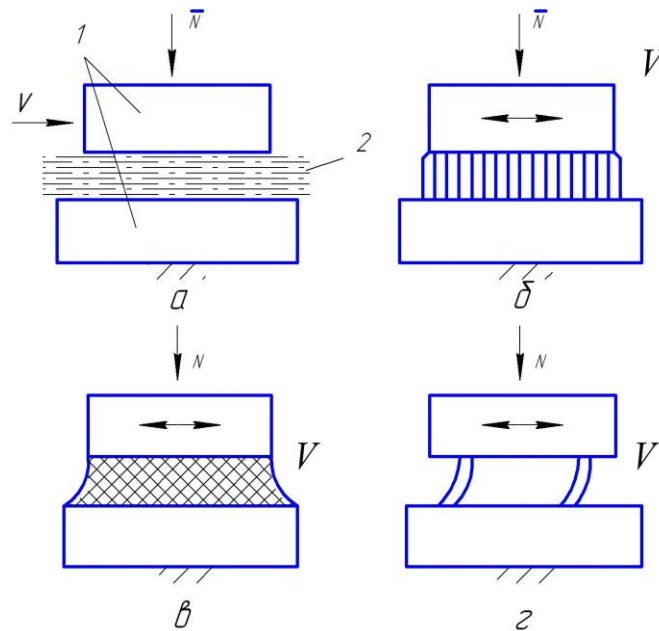
Атомні ґратки також можуть мати різний ступінь бездефектної будови. Все це необхідно враховувати при керуванні утворенням безносних структур.

Для різних умов служби деталей та їх сполучень можуть бути застосовані такі способи створення практично безносної структури (будови) металів і сплавів:

1. Створення об'ємної і бездефектної структури, тобто нитковидних кристалів.
2. Подрібнення зерна до розмірів 0,1...0,01 мкм.
3. Підвищення міцності дефектів кристалічної будови до значень щільності дислокацій  $10^{11}$ – $10^{13}$  см<sup>-2</sup>.
4. Подрібнення зерна та рівномірний розподіл вказаної щільності дислокацій.
5. Використання композитів із системи "метал – полімер", що змащуються самі.
6. Використання дисперсно-зміцнених композитів.
7. Переведення поверхневого шару з ґраткової (кристалічної) будови в аморфну.
8. Плакування поверхні тертя конденсованим шаром інтерметалідних з'єднань.
9. Плакування поверхні тертя бездефектними структурами.
10. Отримання поверхневого шару з принципово новою будовою, зі зміною геометрії та щільності упакування атомів та їх зв'язку у ґратці металу.

*Зменшення тертя.* Ідеальною конструкцією трибосистем є трибосистеми, де б усувалось контактування твердих рухомих деталей. Чотири основні

технічні рішення проблеми зменшення тертя схематично наведено на рис. 6.10.



**Рис. 6.10.** Схематичне зображення технічних рішень зменшення тертя: а – плівка рідини; б – магнітне поле; в – еластимери; г – гнучкі елементи; 1 – елементи пари тертя; 2 –мастило

Найбільш традиційною є перша схема (рис. 6.10, а). В умовах рідинного тертя, коли сполучені поверхні тертя відокремлені шаром мастила достатньої товщини, спрацювання відсутнє. Воно можливе тільки через дуже тонкі шари мастила.

Найуніверсальнішим, економічним та надійним засобом підвищення довговічності за зношуванням є забезпечення рідинного гідродинамічного тертя. Умови утворення гідродинамічного тертя:

- клиновидна форма зазору між поверхнями;
- підведення достатньої кількості мастила належної в'язкості;
- достатня швидкість ковзання.

При напружених режимах роботи необхідне охолодження. Із збільшенням швидкості обертання у гідродинамічних підшипниках зростає їх несуча здатність, але одночасно підвищується теплоутворення. Це вказує на доцільність переходу при великих швидкостях на малов'язкі мастила,

наприклад, газів. У звичайних умовах газовим мастилом є повітря. В'язкість повітря у 100 разів менша за в'язкість рідких мастил при кімнатній температурі. Мала в'язкість газового мастила заохочує використовувати його також для тихохідних опор, в яких необхідний найменший опір рухові.

Переваги газового мастила підшипників: практично необмежені швидкості; малий опір рухові, а тому й малі витрати потужності, не потрібні охолодуючі пристрої; висока точність у зв'язку з малими температурними деформаціями та вирівнюванням газовим шаром мікронерівностей; безшумна робота; можливість роботи у радіоактивному середовищі, яке розкладає звичайні мастила при високих та низьких температурах, оскільки в'язкість більшості газів мало змінюється залежно від температури; можливість змащування опор робочим газовим середовищем машин, зокрема, перегрітою робочою парою; відсутність небезпеки забруднення мастилом продукції, що випускається, та навколишнього повітря; економія на мастилі, пристроях для його подачі, очищення та охолодження, а також на ущільненнях.

Недоліки газових підшипників: неприпустимі навіть короточасні значні динамічні перевантаження, що суттєво обмежує їх впровадження; небезпека динамічної нестабільності; необхідність високої точності виготовлення.

Трибологічні системи, в яких для розділення рухомих поверхонь використовуються принципи магнетизму, відносять до двох класів:

1. Системи, в яких несуча здатність утворюється течією рідин з провідною здатністю всередині магнітного поля (магнітодинамічні підшипники, або МГД).

2. Системи без мастила, несуча здатність яких утворюється притягуванням та відштовхуванням магнітних полів (магнітні підвісні підшипники).

При використанні МГД змащування тиском, що виникає при течії електропровідної рідини у магнітному полі, може перевищувати звичайний гідродинамічний тиск.

За теоретичними розробками можливості МГД-підшипників великі, але

відсутність магніту та значні габарити відповідного устаткування обмежують їх використання. Інший клас магнітних підшипників взагалі не потребує мастила, їх несуча здатність утворюється притягуванням та відштовхуванням магнітних полів. Механічні сили, які утворюються постійними магнітами або електромагнітами, можна застосовувати для вільного підвішування рухомого елемента підшипника.

Завдяки вигідній трибологічній структурі (відсутній контакт твердих тіл, не потребує мащення, мале тертя) магнітні підшипники можуть працювати у широкому спектрі робочих умов.

*Використання ефекту вибіркового переносу.* Продукти спрацювання звичайно виносяться мастилами, при цьому поверхні тертя змінюють свою форму та розміри. Але можна забезпечити умови, при яких частинки, відокремлюючись при спрацюванні, схоплювалися б з тією ж поверхнею або переносилися на з'єднану, тоді винесення металів мастилом та зношування різко зменшуються (на 1...2 порядки) або практично відсутні.

Для цього необхідні такі умови: частинки, що відокремлюються при зношуванні, мають бути малі, пластичні та здатні схоплюватися з поверхнями тертя; не повинно бути окисних плівок; матеріал не повинен наклепуватись, щоб не спричинити глибинного виривання.

Для зменшення сил тертя та зношування важливо, щоб заглиблення виступів поверхонь тертя було мінімальним і адгезійні зв'язки на площі контакту мали низьку міцність. Тому тіла, що труться, повинні бути з тонкими пластичними прошарками на твердій основі.

Матеріалом, що найбільше підходить для застосування у парах, які не здатні зношуватись, вважається мідь, оскільки вона при відповідному мастилi є достатньо стійкою проти окислення та не наклепується, легко відновлюється з окислів та добре адсорбує мастило. Відповідно фрикційною парою є сталь-бронза. Мастило має бути відновним стосовно окислів міді та окислювальним до інших компонентів бронзи. Оптимальним мастилом є гліцерин, який діє як слабка кислота, розчиняє цинк, свинець, залізо. При цьому поверхня

забезпечується міддю, яка переноситься на дотичну з'єднану поверхню, тобто перенос є вибіркоvim. Потім процес розчинення припиняється й відбувається безокислювальний стабільний процес тертя міді по міді з досить невисоким коефіцієнтом тертя (0,01...0,005). Прошарок міді зберігає здатність до схоплення з частинками зносу. Якщо мідь не схоплюється зі з'єднаною поверхнею, наприклад при покритті її електrolітичним хромом, то частинки зносу схоплюються з поверхнею бронзової деталі, при цьому зберігається описаний ефект.

Вибіркове перенесення може реалізуватися також у парах сталь-сталь шляхом введення у мастило мідних порошоків або із застосуванням бронзових вставок.

### **6.3. Забезпечення і підвищення надійності машин на стадії виробництва**

**Основні напрямки підвищення надійності машин на стадії виробництва.** Технологія виготовлення машин та їх деталей повинна забезпечувати:

- при виготовленні заготовок – потрібну внутрішню структуру і фізико-механічні властивості, усунення потенціальних джерел руйнування матеріалу;
- при обробці поверхні деталі – задані розміри, властивості міцності, антикорозійні, антифрикційні або фрикційні властивості, а також потрібний ступінь шорсткості;
- при виконанні з'єднань деталей (нерознімних і рознімних) – геометричну точність, герметичність і взаємозамінність;
- при складанні і випробуванні вузлів, агрегатів і машин – геометричну правильність, низький рівень монтажних напружень, припрацювання з'єднань, виявлення браку продукції.

Висока якість деталей сільськогосподарської техніки при її виробництві залежить від виконання таких основних технологічних заходів.

*Забезпечення точності виготовлення деталей.* У тракторах, автомобілях і сільськогосподарських машинах точність визначається умовами роботи деталей і рівнем металообробного обладнання, яке використовується, а оцінюється допусками на лінійні розміри робочих поверхонь деталей (діаметри шийок валів і отворів, розміри шліців і зубів шестерні тощо), а також на взаємне розташування цих поверхонь (перпендикулярність і паралельність осей деталей, міжцентрова відстань, радіуси кривошипів тощо). Проте, чим вища точність виготовлення деталі, тим більші витрати на її виробництво.

З підвищенням точності виготовлення деталей зменшуються початкові зазори у рухомих з'єднаннях і жорсткіше регламентуються натяги у нерухомих з'єднаннях, що забезпечує значне підвищення довговічності машин, їх доремонтного ресурсу.

*Забезпечення оптимальної якості робочих поверхонь деталей.*

У машинобудівному виробництві постійно підвищується якість робочих поверхонь (зменшення їх шорсткості і викривлення макрогеометрії). Разом з тим, у результаті досліджень встановлено, що при експлуатації машин у парах тертя залежно від режимів роботи, умов мащення, поєднання матеріалів та інших факторів встановлюється певна шорсткість, яку і слід забезпечувати при виготовленні деталей. Оптимальна шорсткість повинна відповідати і поверхням деталей з нерухомими посадками.

Чим менша шорсткість, тим більший опір поверхонь деталей до зношування через корозію.

Істотний вплив має шорсткість поверхні на циклічну і динамічну міцність деталей машин. Підвищення якості обробки деталей лімітується технологічними можливостями виробництва і вартістю робіт. Для нормування якості поверхні при виробництві машин використовують три основних показники: шорсткість поверхні або мікрогеометрію; відхилення форми і розташування (овальність, конусоподібність, огранка та ін.); макрогеометрію і хвилястість поверхні.

Для досягнення високих геометричних характеристик якості поверхні



використовують різні методи та оснащення, а саме:

- зрізання нерівностей поверхні тонким шліфуванням, хонінгуванням, суперфінішуванням (доведенням) і поліруванням, особливо із застосуванням синтетичних алмазів (паст, брусків, стрічок), гексаніту-Р, ельбора та інших надтвердих матеріалів;

- знімання нерівностей за рахунок поверхневого пластичного деформування: обкатування, розвальцьовування, дорнування, алмазного вигладжування та віброобкатування алмазними або твердосплавними роликками (наконечниками) для отримання поверхонь з регулярними мікрорельєфами;

- створення нового мікропрофілю поверхні завдяки застосуванню електричних та електрофізичних методів обробки (електрохімічної, електромеханічної, обробки у магнітному полі).

Вибір раціонального виду обробки для різноманітних груп деталей та їх робочих поверхонь потребує поглибленої науково-виробничої перевірки. Найперспективнішими видами обробки є віброобкатування, доведення синтетичними алмазами та електрофізична обробка.

Обробні заключні операції необхідні не лише для поліпшення шорсткості, але й видалення тонкого дефектного поверхневого шару (часто зі знизеними фізико-механічними властивостями), особливо після шліфування.

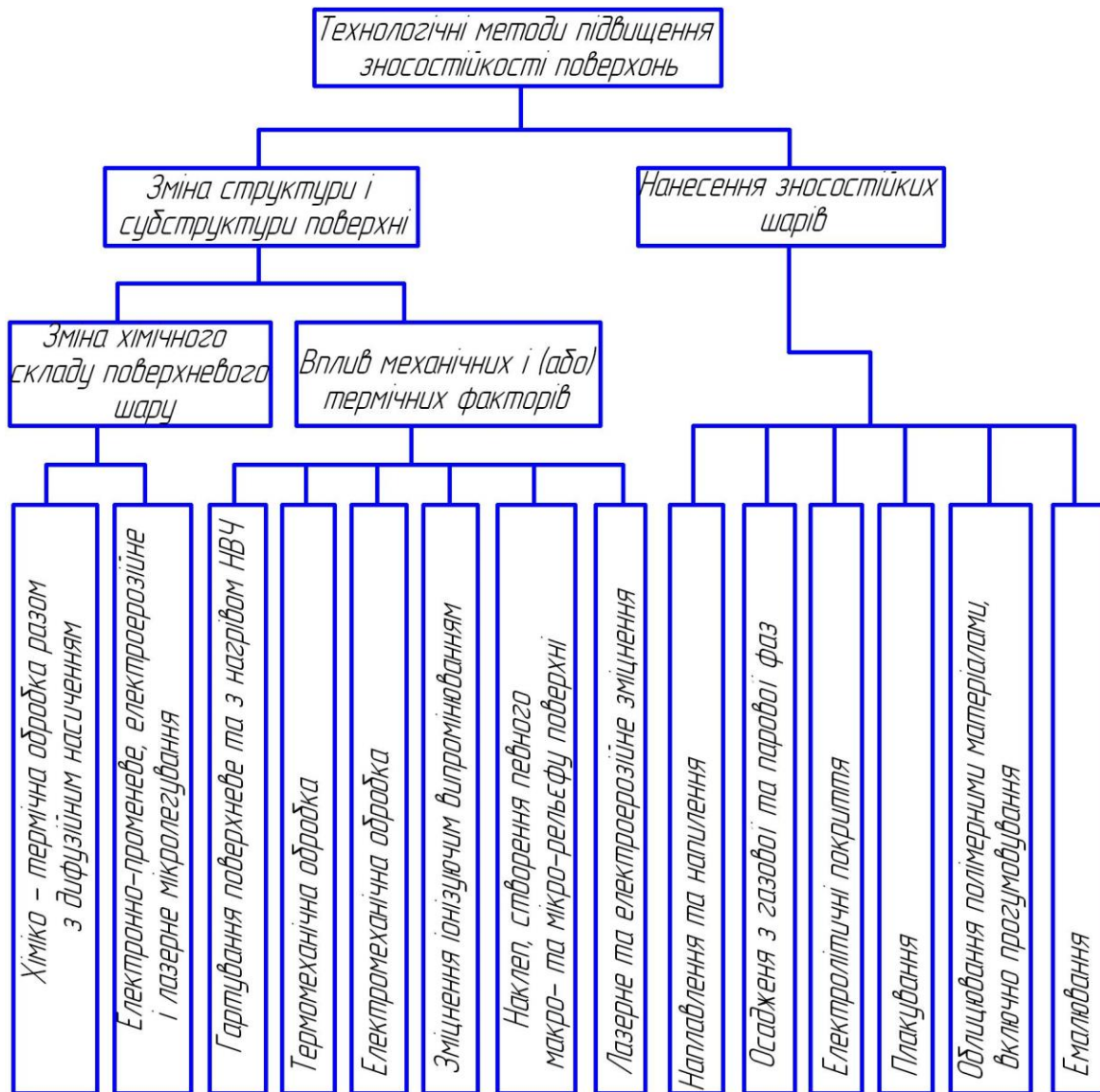
*Зміцнення деталей.* Накопичення досвіду, а також аналіз результатів багаторічних цілеспрямованих досліджень дозволили визначити основні шляхи зміцнення поверхонь:

- зміна хімічного складу поверхневих шарів шляхом внесення легуючих компонентів для утворення структур, які добре чинять опір процесам зношування;

- механічні та (або) теплові впливи на поверхневі шари металу, які приводять до структурних і субструктурних перетворень, що сприяють підвищенню стійкості при різних процесах руйнування;

- нанесення на поверхні деталей трибосполучень зносостійких шарів (покриттів).

Зазначене дозволяє класифікувати різноманітні технологічні методи зміцнення (рис. 6.11) з урахуванням того, що практично всі вони ґрунтуються на факторах хімічного, термічного і механічного впливів, які дозволяють істотно змінити поверхневі властивості деталей машин.



**Рис. 6.11. Класифікація основних методів зміцнення деталей машин.**

Кожен з технологічних методів зміцнення деталей має свої параметри та області застосування (табл. 6.1).

**Таблиця 6.1. Характеристики технологічних методів зміцнення деталей машин**

Методи обробки і способи нанесення покриттів	Матеріал, що обробляється	Шорсткість поверхні, $R_a$ , мкм	Товщина модифікованого шару, мм	Ступінь зміцнення, %	Твердість	Максимальні напруження, МПа	Призначення обробки
1	2	3	4	5	6	7	8
<u>Зміцнення поверхневим пластичним наклепуванням</u>							
Обробка дробом (сталйними кульками)	Чавуни, сталі, сплави	Погіршується, забезпечує 1,6...2,5	0,2...1,0	20...40	–	200...750	Підвищення опору втомленості
Ультразвукове поверхнєве пластичне деформування (сталйними кульками)	Те ж	Погіршується, забезпечує 1,25...0,32	0,05...0,3	10...40	–	200...500	Підвищення опору втомленості, зносостійкості
Відцентрове обкатування	– // –	Погіршується, забезпечує 0,63...0,16	0,05...0,3	10...40	–	200...500	Те ж
Поверхнєве обкатування	– // –	Забезпечує 1,25...0,04	0,1...0,5	20...50	–	500...700	– // –
Згладжування (алмазне)	– // –	Забезпечує 1,25...0,04	0,01...0,3	10...60	–	500...700	– // –
<u>Поверхнєва термічна обробка</u>							
Гартування з нагріванням струмами високої частоти (СВЧ)	Сталі	Не змінюється	0,2...10,0	–	HRC 40...70	300...800	Підвищення опору втомленості, зносостійкості
Гартування з нагріванням газовим полум'ям	Сталі, чавуни	Погіршується	0,5...10,0	–	HRC 40...70	300...800	Те ж
<u>Методи нанесення покриттів</u>							
Фізичні способи:							
плакування	Сталі, сплави, метали	Погіршується	$10...10^{-1}$	–	–	–	Підвищення опору корозії, зносостійкості
наплавлення	Чавуни, сталі, сплави	Те ж	$10...10^{-1}$	–	250...650HV	100...500	Те ж
детонаційне напилення	Чавуни, метали, сталі, сплави, кераміка	– // –	$1...10^{-1}$	–	–	–	Підвищення опору корозії, зносостійкості, жаростійкості та ерозії
газополум'яне напилення	Сталі, метали, сплави, чавуни, кераміка	– // –	$10...10^{-1}$	–	–	–	Те ж
вакуумно-плазмовє розпилення	Сталі, метали, сплави, кераміка	– // –	$10^{-4}...10^{-3}$	–	–	–	–

### Продовження таблиці 6.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Фізико-хімічні способи:							
1. Електрохімічне осадження з розчинів і розплавів:							
хромування	Метали, сталі, сплави, чавуни	Забезпечує 2,5...0,32	$1 \cdot 10^{-2}$	–	500...1200HV	200...600	Підвищення опору корозії, зносостійкості
нікелювання	Те ж	Забезпечує 2,5...0,32	$1 \cdot 10^{-2}$	–	550...650HV	–	Те ж
залізнення	– // –	Забезпечує 8...2	$1 \cdot 10^{-1}$	–	120...600HV	–	Підвищення зносостійкості
борування	Сталі, метали, сплави	Забезпечує 4,0...0,5	$1 \cdot 10^{-1}$	–	До 2200HV	–	Підвищення опору корозії, зносостійкості
оксидування	Алюміній та його сплави	Погіршується	$10^{-1} \dots 10^{-2}$	–	–	–	Те ж
<u>Хіміко-термічна обробка</u>							
2. Дифузійне насичення поверхневого шару:							
азотування	Метали, сталі, чавуни, сплави	Залишається незмінною	$1 \cdot 10^{-2}$	–	650...1100HV	400...800	Підвищення зносостійкості, опору корозії, жаростійкості
цементація	Маловуглецеві сталі, сплави, метали	Те ж	$1 \cdot 10^{-2}$	–	HRC 60...70	400...800	Підвищення зносостійкості
ціанування	Сталі	– // –	$1 \cdot 10^{-2}$	–	HRC 60...75	400...800	Те ж
борування	Сталі, метали, сплави	– // –	$0,35 \dots 10^{-3}$	–	225...325HV	–	Підвищення зносостійкості, опору корозії, ерозії, жаростійкості
силіцування	Те ж	– // –	0,2...0,05	–	100...125HV	–	Те ж
<u>Лазерна обробка</u>							
Термообробка	Метали, сталі, сплави	Погіршується	$1 \cdot 10^{-2}$	–	–	–	Підвищення опору корозії, ерозії, втомленості, жаростійкості, зносостійкості
Легування	Те ж	Те ж	$1 \cdot 10^{-1}$	–	–	–	Те ж

**Надійність технологічного процесу** – здатність забезпечувати у часі випуск деталей з установленими показниками якості при заданій продуктивності та прийнятих умовах. Надійність технологічного процесу характеризується працездатністю – станом, при якому він забезпечує виготовлення деталей у заданих умовах з показниками якості та ритмом випуску (продуктивністю), встановленими у нормативно-технічній документації.

Методи оцінки надійності технологічних процесів виготовлення визначають, виходячи з критеріїв відмови процесів (табл. 6.2).

**Таблиця 6.2. Критерії відмов технологічного процесу**

Критерії відмов за параметрами		
якості деталей	продуктивності	витрачених ресурсів
Вихід одного з показників якості за граничні відхилення	Зниження ритму випуску нижче допустимого рівня	Перевищення встановлених нормативів через трудомісткість виготовлення
Вихід параметрів режимів технологічного процесу (операцій) за встановлені межі	Невиконання заданого обсягу виробництва у встановлені строки	Перевищення встановлених норм витрати матеріалів, інструменту, енергоресурсів та ін. Перевищення ліміту чисельності робітників

Найважливіший показник надійності технологічного процесу – безвідмовність. У кількісному відношенні рівень надійності оцінюється ймовірністю безвідмовної роботи за встановлений проміжок часу  $P(t)$ .

Ймовірність виконання завдання за одним ( $i$ -м) параметром деталей, які виготовляються, – це ймовірність виконання вимог нормативно-технічної документації з цього параметра для одиниці продукції, отриманої у момент часу  $t$ :

$$P_i(t) = P\{X_{ни} \leq X_i(t) \leq X_{ви}\}, \quad (6.5)$$

де  $X_i(t)$ ,  $X_{ви}$ ,  $X_{ни}$  – фактичне верхнє і нижнє значення  $i$ -го контрольованого параметра якості.

Ймовірність виконання завдання за  $n$  параметрами якості деталей, які виготовляються, є ймовірністю виконання вимог нормативно-технічної документації одночасно за  $n$  параметрами для одиниці продукції, отриманої у

момент часу  $t$ :

$$P_{1\dots n}(t) = P\{x_{ni} \leq x_1(t) \leq x_{01} \dots x_{nn} \leq x_n(t) \leq x_{nn}\}. \quad (6.6)$$

Коефіцієнт виконання завдань за  $n$  параметрами якості виготовлених деталей визначають із залежності:

$$K_B(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i(t). \quad (6.7)$$

Найчастіше окремі параметри якості деталей, які виготовляються, пов'язані у функціональному відношенні послідовно, тобто поява відмови будь-якого з установлених показників якості призводить до появи відмови всього технологічного процесу. Тобто, ймовірність безвідмовної роботи технологічного процесу виготовлення, який складається з  $m$  операцій, у проміжку часу  $(0; t)$  визначається із залежності:

$$P_{1-m}(t) = P_1(t)P_2(t) \dots P_m(t). \quad (6.8)$$

Формування надійності процесу виготовлення відбувається на окремих технологічних операціях, які звичайно виконуються послідовно. З точки зору ймовірності безвідмовної роботи це означає, що рівень надійності технологій залежить, по-перше, від кількості операцій в процесі і вказує на недоцільність їх розширення, по-друге, – від надійності виконання кожної операції.

Але ймовірність безвідмовного здійснення технологічного процесу на всьому ланцюзі не дорівнює добутку відповідних ймовірностей  $P_i(t)$  для кожної операції через особливості формування вихідних параметрів усього технологічного процесу.

Основне формування вихідних параметрів відбувається на заключних операціях. Чим ближче операція до остаточного виготовлення деталі, тим більше її вплив на величини вихідних параметрів деталі. Винятком є вихідні характеристики матеріалу, які значно характеризують і його остаточні властивості. Деякі параметри заключних операцій впливають на попередні, тому частина вихідних параметрів заключної операції функціонально пов'язана з параметрами попередніх, проміжних операцій.

Оцінка надійності процесу враховує і можливості контрольних операцій,

які істотно підвищують надійність технологічного процесу. В цьому випадку у структурній схемі надійності контрольна операція – це резерв технологічного ланцюга, ймовірність підвищення надійності за її рахунок дорівнює  $P_k$ . Тому ймовірність безвідмовного здійснення технологічного процесу визначають із залежності:

$$P(t) = \prod_{m=1}^m [1 - (1 - P_{x_j})(1 - P_k)]. \quad (6.9)$$

При цьому для неконтрольованих параметрів  $P_k=0$ , а для абсолютно надійного контролю  $P_k=1$ .

Допустимі відхилення контрольованих показників якості (розмірів, фізико-механічних властивостей деталей) можуть визначатися дослідним розрахунковим або статистичним шляхом. При цьому обґрунтування їх величин повинно здійснюватись на техніко-економічній основі.

У загальному випадку ймовірність виконання завдання технологічної операції за  $i$ -м параметром якості деталей у фіксований момент часу  $t$  визначають із залежності:

$$P(t) = \int_{X_n}^{X_b} \varphi(x_i) dx, \quad (6.10)$$

де  $\varphi(x_i)$  – щільність розподілу  $i$ -го параметра у момент часу  $t$ ;  $X_b$ ,  $X_n$  – верхні і нижні граничні значення контрольованого параметра.

Показники якості деталей формуються протягом всього процесу виготовлення. Окремі їх характеристики можуть переходити від операцій до операцій, тобто наслідуватись. Це називається технологічною спадковістю.

Ступінь впливу кожного технологічного фактора на кінцеві показники якості деталей неоднакова. Деякі технологічні фактори впливають на всі операції, інші – тільки на одну з них.

Великий вплив на якість деталей мають заключні операції. Є операції, які виконують роль своєрідних "бар'єрів" для наслідування. Вплив одних технологічних факторів зникає після таких "бар'єрів", інші проходять крізь них, але їх вплив слабшає. Такими "бар'єрами" у процесі виготовлення можуть бути

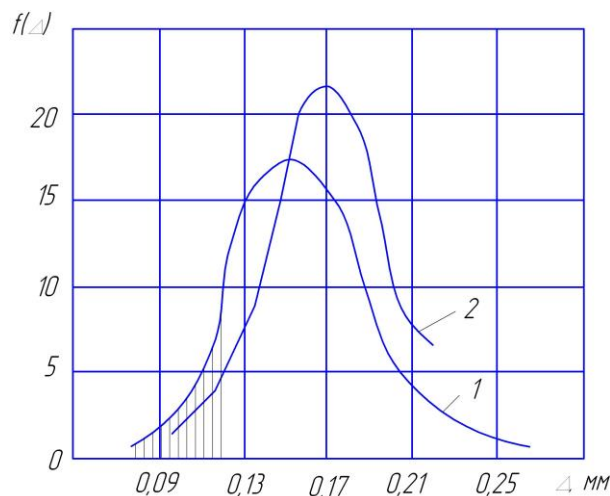
операції термічної (або зміцнюючої) обробки.

Для визначення впливу технологічної спадковості на зміну параметрів деталі застосовують залежність:

$$R_{\text{кін}} = aR_{\text{вих}}^b, \quad (6.11)$$

де  $R_{\text{кін}}$  – значення параметра якості для кінцевої операції;  $R_{\text{вих}}$  – значення того ж параметра для вихідної операції;  $a$  і  $b$  – коефіцієнти технологічної спадковості, які визначаються на основі багатофакторного аналізу і рівнянь регресії. Наприклад, при відновленні поршневих пальців тракторних двигунів прогресивним способом гідротермічного роздавання після шліфування у 30% деталей з'являється брак – почорніння на зовнішній циліндричній поверхні пальців. Причина дефекту – низька надійність попередньої операції – роздавання пальця. У результаті охолодження поршневих пальців прямим потоком після роздавання вони приймають корсетоподібну форму, і, як наслідок, утворюється нерівномірний припуск на шліфування.

При застосуванні більш досконалого способу охолодження (спрейерного) області розподілення приросту зовнішнього діаметра поршневого пальця зміщуються у бік збільшення приросту (рис. 6.12). Внаслідок цього надійність технологічного процесу відновлення збільшується.



**Рис. 6.12. Криві розподілу приросту зовнішніх діаметрів поршневих пальців двигуна СМД-14 при гідротермічному роздаванні: 1 – прямоточне охолодження; 2 – спрейерне охолодження (зону браку заштриховано)**



#### **6.4. Забезпечення надійності машин у процесі експлуатації і ремонту**

**Стратегії технічного обслуговування і ремонту машин.** Нова сільськогосподарська техніка має рівень надійності, величина якого визначається у процесі її випробувань за показниками безвідмовності, довговічності, ремонтоздатності, збереженості та комплексними показниками.

Цей початковий рівень надійності еквівалентний визначеному обсягу корисної роботи напрацювання, який виконується машиною у процесі, експлуатації. Зі збільшенням напрацювання рівень надійності машини знижується.

Тривалість періоду експлуатації машин до граничного стану (доремонтний ресурс) і величина виконаної машиною корисної роботи (сумарне доремонтне напрацювання) залежать від швидкості зниження її рівня надійності. В ідеальному випадку швидкість зниження рівня надійності машини повинна бути мінімальною, а виконаний машиною обсяг роботи за доремонтний ресурс повинен бути максимальним, тоді коефіцієнт використання надійності машини у доремонтний період її експлуатації буде близький до одиниці.

В умовах реальної експлуатації машин у сільському господарстві величина коефіцієнта використання надійності залежить від якості й періодичності використання операцій технічного обслуговування, дотримання режимів технічної експлуатації, своєчасного й якісного технічного діагностування машини та ремонту тих вузлів і агрегатів, ресурс яких вичерпаний.

Система технічного обслуговування й ремонту (ТО і Р), яка є сукупністю засобів, документації та виконавців, необхідних для приймання, підтримки та відновлення надійності й ефективності роботи машин, регламентована однаковими правилами, положеннями, рішеннями. Серед багатьох рішень є три основні, які називають стратегіями. Стратегії ТО і Р можуть бути:

I - за потребою після відмови;

II - регламентовані залежно від напрацювання (строку служби);

III - за станом, результатами періодичного діагностування та контролю.

При I стратегії ремонтно-обслуговуючі роботи виконують тільки після відмови. До такої стратегії відносять заміну, ремонт, регулювання складових частин після раптової відмови, а також відмови, усунення наслідків якої супроводжується відносно невеликими втратами (раптова відмова ламп, контрольних приладів, прокладок тощо).

При II стратегії роботи мають планово-попереджувальний характер й виконуються періодично протягом напрацювання (строку служби) незалежно від стану виробів. До цієї стратегії відносять періодичну заміну мастил у картерах машин, регулярне змащування підшипників кочення й ковзання та ін.

При III стратегії запобіжні роботи проводять залежно від стану виробу. Контроль (діагностування) у цьому випадку здійснюють у плановому порядку для його встановлення, за такою стратегією замінюють циліндро-поршкову групу, регулюють момент запалювання карбюраторного двигуна тощо.

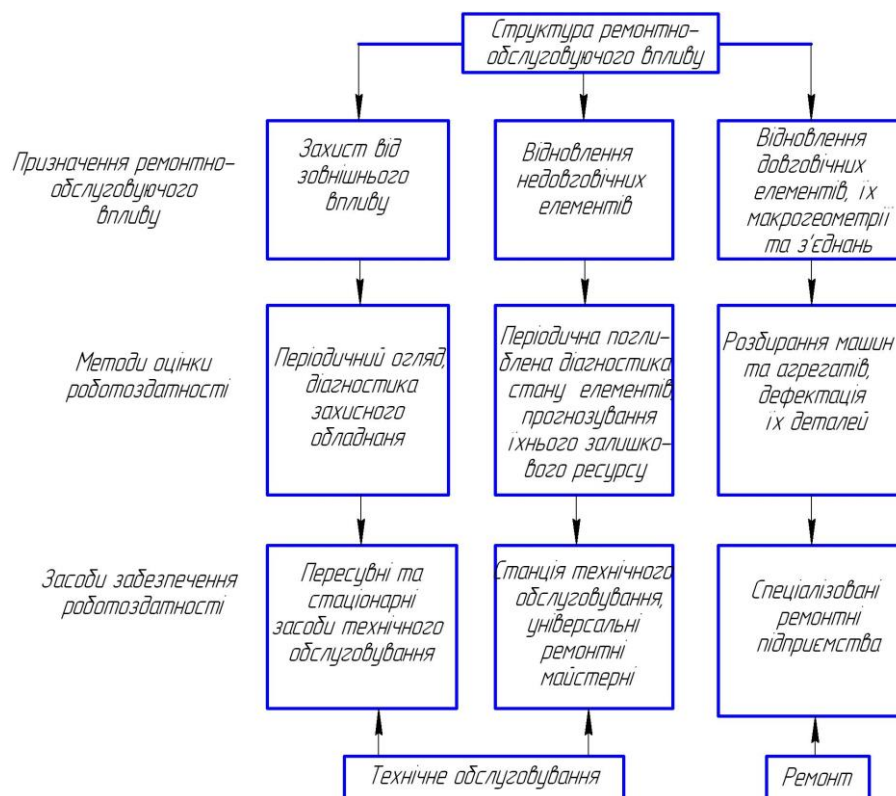
При ТО і Р складної машини у цілому використовують кілька стратегій, кожна – за певною складовою частиною. Наприклад, заміна лампи (фари) трактора здійснюється за I стратегією, заміна мастила у двигуні – за II, заміна циліндро-поршкової групи двигуна – за III.

З розвитком методів й засобів технічного діагностування галузь розповсюдження III стратегії поширюється.

Для сільськогосподарської техніки застосовують планово-попереджувальну систему ТО і Р за станом. До планових операцій належать: регламентоване періодичне ставлення машини на технічне обслуговування; плановий контроль (діагностування) стану машини; ставлення її на ремонт після вичерпання призначеного залишкового ресурсу. До запобіжних відносять роботи, спрямовані на запобігання відмов й несправностей машин. Складові частини регулюють, відновлюють і замінюють, щоб параметри їх технічного стану не перевищували у процесі експлуатації граничну величину, а агрегати не досягали граничного стану. Саме тому у нормативній технічній документації

використовують систему допусків на значення параметрів. Для цього прогнозують залишковий ресурс складових частин й машини в цілому.

Обґрунтування раціональної структури ремонтно-обслуговуючих робіт має істотне значення для організації технічного обслуговування і ремонту машин. Це дозволяє конкретизувати основний зміст ремонтно-обслуговуючих операцій для машин усіх видів у різні періоди їх зношування, залежно від ступеня зношування визначити методи цілеспрямованого керування працездатністю агрегатів машин. Наявність структури ремонтно-обслуговуючих операцій дає змогу вести розробку засобів забезпечення працездатності машин, завершити створення ремонтно-обслуговуючої бази з цільовим призначенням її ланок, що наведено на схемі (рис. 6.13).



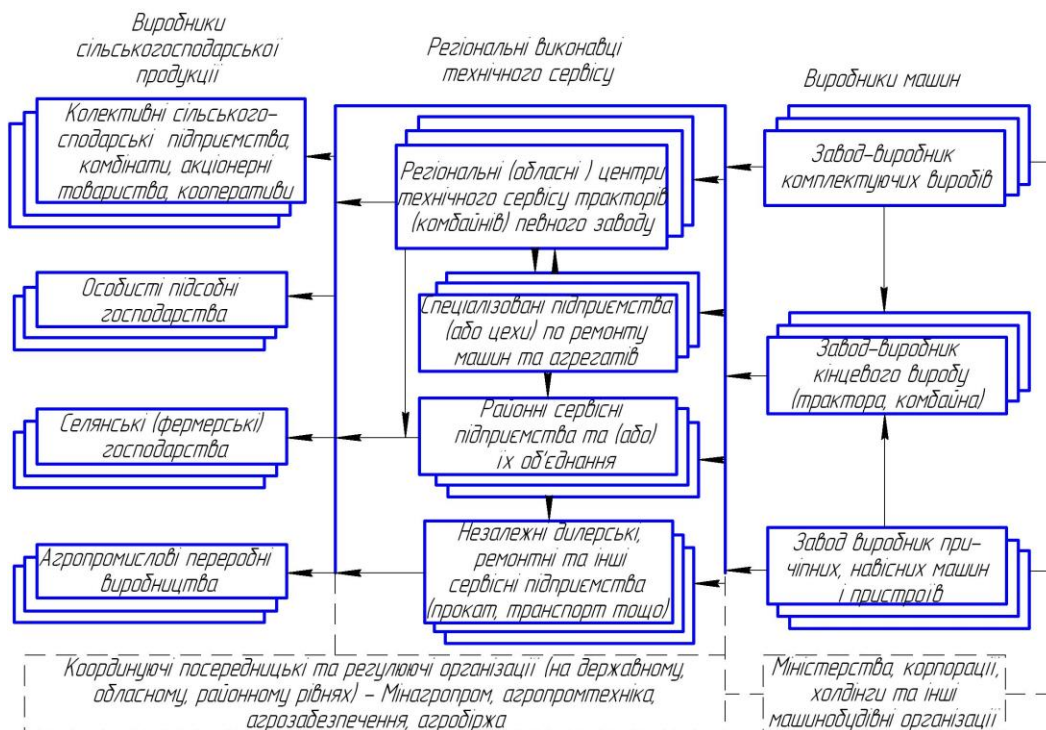
**Рис. 6.13. Структура ремонтно-обслуговуючих впливів для відновлення робоздатності машин**

**Структура ремонтно-обслуговуючої бази.** Крім підприємства-виробника (постачальника) машин, зацікавленого в якісному та своєчасному сервісі, пов'язаному з реалізацією та наступною ефективною експлуатацією

машин, основними виконавцями технічного сервісу є:

- ремонтно-обслуговуючі, постачально-збутові виробництва та служби сільськогосподарських підприємств і фермерських господарств;
- районні багатопільові, сервісні виробництва (об'єднання);
- регіональні головні центри технічного сервісу;
- спеціалізовані ремонтні виробництва і підприємства агропостачання;
- підприємства (об'єднання) та підрозділи у складі заводів-виробників, які часто називають головними центрами (базами) фірмового технічного сервісу.

Всі ці підприємства та формування надають послуги на комерційній основі. На рівні району, області та держави їхню діяльність координують територіальні адміністративні органи: районні та обласні управління сільського господарства. Міністерство аграрної політики України, (рис. 6.14).



**Рис. 6.14. Структура технічного сервісу в сільському господарстві**

**Експлуатаційні заходи щодо підтримки надійності машин.** Головні умови ефективного використання машин і забезпечення їхньої високої надійності:

- сталі кадри механізаторів і рівень їхньої кваліфікації;
- забезпечення високої зацікавленості у кінцевих результатах роботи та зберігання техніки;
- своєчасне проведення виробничої обкатки нових і відремонтованих машин у господарствах та підготовка їх до сільськогосподарських робіт;
- систематичне технічне обслуговування та діагностування машин;
- проведення періодичних технічних оглядів стану машин, агрегатів і вузлів;
- забезпечення нормального режиму роботи (особливо у зимовий період), тобто навантаження, швидкості, теплового режиму тощо;
- контроль і постійне забезпечення достатньої герметизації агрегатів, вузлів і систем, щоб запобігти потраплянню до них абразивів;
- виконання всіх рекомендацій заводів-виробників з обслуговування та використання палива, картерного та інших мастил відповідних марок;
- періодичне очищення двигунів й агрегатів трансмісій від продуктів спрацювання, нагару та абразиву;
- додержання встановлених правил зберігання;
- чітка організація праці інженерної та диспетчерської служб господарств та об'єднань.

*Обкатка нових (відремонтованих) машин на підприємствах.* Своєчасна обкатка закладає основи тривалої та безвідмовної роботи машин. Її потрібно проводити протягом 60 год при постійному підвищенні навантаження (відповідно до рекомендацій заводів-виробників або ремонтних підприємств).

Виробнича обкатка тракторів складається з перевірки роботи двигуна без навантаження (15...20 хв) і функціонування контрольних приладів; обкатки трактора без навантаження (5...7 год, по півгодини на кожній передачі); перевірки роботи гідросистеми (15...20 хв) та обкатки трактора на всіх передачах з поступовим підвищенням навантаження (7 год – 15–20% навантаження; 14 год – 30...40 % навантаження; 18 год – 50...60 % навантаження; 14 год – 75 % навантаження).

Обкатка тракторів з навантаженням поєднується з виконанням польових сільськогосподарських і транспортних робіт, які не вимагають значних тягових зусиль. Легкі транспортні роботи рекомендуються особливо для тракторів у перші 20–25 год. Під час обкатки необхідно постійно контролювати роботу двигуна і всіх агрегатів на відсутність підвищеного нагріву, шумів та стуків, витікання мастила тощо.

Після обкатки знімають обмеження потужності і проводять перше технічне обслуговування із заміною мастила у двигуні та всіх агрегатах і вузлах трансмісії та ходової частини. Перше технічне обслуговування необхідно закінчити досконалим контрольним оглядом машини з використанням сучасних засобів технічного діагностування.

Під час обкатки трактора у зимовий період рекомендується використовувати суміш картерних мастил із дизельним паливом (25 %).

Перші 50...60 год експлуатації після виробничої обкатки трактор перебуває під наглядом інженера, механіка або помічника бригадира тракторної бригади.

*Організація систематичного технічного обслуговування машин та їх діагностування.* Правильно організоване технічне обслуговування – основна умова забезпечення надійної, економічної і довготривалої роботи машин.

Система технічного обслуговування машин передбачає проведення щозмінних (через 8...10 год), сезонних (двічі на рік), і періодичних технічних обслуговувань. Для тракторів нових марок визначена така періодичність технічного обслуговування: ТО-1 – 125, ТО-2 – 500 і ТО-3 – 1000 мото-год.

Найвищої ефективності використання машинно-тракторного парку (МТП) і забезпечення надійної його роботи домагаються господарства з прогресивною формою обліку тривалості роботи тракторів і визначеними строками проведення технічних обслуговувань (жетонна система), а також де є стаціонарні пункти технічного обслуговування і створені ланки майстрів-наладчиків на бригадному підряді; з широким використанням необхідного для обслуговування мийного, змащувального, регулювального та діагностичного

обладнання, а також приладами, оснащенням і пересувними засобами механізації.

Для забезпечення високої надійності машин при їх діагностуванні слід приділяти особливу увагу контролю систем очистки повітря, палива, оливи відповідно до рекомендацій заводів-виготівників і практичного досвіду.

*Періодичні технічні огляди* – складова частина загальної системи технічного обслуговування машин. Проведення технічних оглядів значно, поліпшує діяльність інженерно-технічних служб господарств, підвищує надійність й ефективність сільськогосподарської техніки, яка використовується. Огляди проводять 1...2 рази на рік представники Держтехнагляду і Державтоінспекції.

*Забезпечення нормального режиму роботи.* Перевантаження машин (за навантаженням і швидкістю), неправильні зазори у підшипниках, з'єднаннях шестерен, шліцьових валів та інших деталей викликають порушення температурного режиму роботи поверхонь тертя і умов змащування деталей.

Найвищі питомі навантаження на деталі машин і погіршення умов їх мащення спостерігаються при початкових пусках двигунів і вмиканнях агрегатів трансмісій, особливо взимку (при температурі нижче +5 °С). Кілька хвилин такої роботи зумовлює знос, який міг би виникнути за десятки і навіть сотні годин нормальної експлуатації машин, а часто призводить до аварійних ситуацій.

Заходи, які забезпечують встановлений тепловий режим роботи двигунів (температура води і мастила 75...95 °С) і нормальні умови зимової експлуатації машин, такі:

- організація теплих стоянок;
- використання електричних підігрівників мастила;
- застосування систем повітряного і водяного підігрівання для машин, які знаходяться на відкритих майданчиках, за допомогою теплогенераторів і газових пальників;
- подача підігрітої води безпосередньо до машин, застосування

антифризів.

Негативно впливає на роботу машин, особливо автотракторних і комбайнових двигунів, їх перегрівання, яке може спостерігатися у спекотні літні місяці при погіршенні роботи вузлів системи охолодження (вентилятора, радіатора, водяного насоса і через накип), а також внаслідок перевантаження, ненормальної роботи паливної системи, неправильного регулювання та інших причин.

Перегрівання, як і охолодження двигунів, спричинює інтенсивне спрацювання деталей, особливо циліндро-поршневої групи, газорозподільного і кривошипно-шатунного механізмів, а у деяких випадках може привести до виникнення аварійних дефектів (обривів клапанів, тріщин у головках і блоках циліндрів тощо).

Основним заходом, що запобігає перегріванню двигуна, є усунення причин, що призводять до нього.

При низьких температурах поверхні циліндрів можуть також інтенсивно зношуватися через погіршення умов їх мащення та корозії.

*Контроль і постійне забезпечення достатньої герметизації агрегатів, вузлів і систем машин* для попередження потрапляння у них абразивів – важливий фактор підвищення довговічності сільськогосподарської техніки.

При експлуатації необхідно зважати на те, що деякі дизелі обладнані високоефективними системами очистки повітря, палива і оливи.

Висока трудомісткість обслуговування систем очистки повітря, палива і масла обумовлена тим, що не всі двигуни забезпечені фільтрами зі змінними фільтрувальними елементами і швидкознімними корпусами. Недостатній рівень забезпечення системи очистки контрольно-вимірювальними приладами і датчиками граничного стану, які дозволяють суттєво підвищити обґрунтованість проведення технічних обслуговувань, знизити їх кількість і усунути можливість роботи двигунів з гранично забрудненими агрегатами очистки.

У зв'язку з цим виникає гостра потреба у виконанні таких умов:



– при доставці, зберіганні і заправці тракторів і сільськогосподарських машин паливом і мастилом не допускати змішування нафтопродуктів, забруднення їх атмосферним пилом і опадами;

– ретельно додержуватись строків обслуговування систем очищення повітря, палива і мастила, оскільки їх порушення приводить до граничного забруднення фільтрів і внаслідок цього – до мащення деталей двигуна забрудненим мастилом через перепускний клапан, а також до проривання штори фільтрувального елемента;

– слідкувати за герметичністю впускного тракту після повітроочисника, особливо у двигунів з ежекторною системою очистки повітря, оскільки її порушення призводять до значного збільшення забрудненості повітря, яке надходить у циліндр двигуна, великими частинками пилу, найнебезпечнішими з точки зору зношування. Коефіцієнт очистки сучасних двигунів становить 99,9 %, тому надходження через нещільності у стиках впускного тракту всього 1 % повітря в 11 разів збільшує надходження пилу у двигун;

– не допускати підтікання палива і мастила, які підвищують загальну забрудненість двигуна та ймовірність додаткового забруднення палива і мастила при заправці та технічному обслуговуванні. Крім того, при підтіканні відбувається своєрідна "фільтрація", коли чисте мастило витікає із системи, а забруднюючі домішки залишаються. При дозаправленні свіжим мастилом у систему потрапляють забруднення.

До інших експлуатаційних заходів, які підвищують довговічність машин за рахунок поліпшення герметизації їх вузлів, можуть бути рекомендовані: регулярне підтягування кріплень і контроль за можливим витіканням мастила; застосування рідких ущільнювальних прокладок; своєчасна заміна сальникових ущільнювачів, а також періодичне очищення внутрішніх порожнин картерів двигунів, вузлів й агрегатів трансмісії.

При експлуатації машин у важких умовах (підвищені запиленість і температура повітря) очищати повітроочисник необхідно через 25...30 год (замість 60 год), центрифугу – через 120 год (замість 240 год).

*Застосування палива, партерних та інших мастил і шляхи їх економії.*

Паливно-мастильні матеріали для відповідних-машин слід застосовувати відповідно до рекомендацій заводів-виробників з урахуванням періодів літньої та зимової експлуатації машин, а також ступеня зношування їх деталей.

Суттєве збільшення мастил з поліпшеною якістю підвищило витрати на паливно-мастильні матеріали при одночасному зростанні їх частки у загальних витратах на експлуатацію МТП, яка становить 22...28 % від загальних експлуатаційних витрат. Тому все важливішою стає проблема їх економії.

Зниження витрат моторних мастил у двигунах досягається скороченням регламентованих періодичних замінів, доливанням мастила для компенсації вигорання і витікання, нереліментованих (передчасних) замінів. Але особливо великі витрати моторних мастил бувають через нераціональне їх використання в гідросистемах тракторів, коли в них заливають те ж мастило, що і у двигун.

При заправці тракторів паливом і мастилом повинні застосовуватися заходи, що запобігають потраплянню разом з ними різних забруднювачів, особливо абразивних частинок, які прискорюють спрацювання.

В опорних котках і підтримуючих роликах: гусеничних тракторів використовуються трансмісійні масла.

Для скорочення витрат паливно-мастильних матеріалів необхідно впроваджувати енергозберігаючі технології, здійснювати постійний контроль за регулюванням паливної апаратури, енергетичних засобів, мастильної системи і гідравліки, а також за налагодженням робочих органів шлейфу машин; оснащати трактори, комбайни та інші машини автоматичними мікропроцесорними пристроями для оптимального завантаження МТП та його економічної роботи.

Аналіз роботи двигунів машин у господарствах різних зон свідчить, що 80...85 % їх мають середнє значення номінальної потужності нижче, а мінімальні витрати палива – вище за гарантовані заводами-виробниками. Так, неправильне регулювання форсунок машин збільшує витрати палива на 15...20 %, незадовільний стан циліндро-поршневої групи – на 10...15 % і більше,

а втрати потужності трансмісії і ходової частини – на 15...20 %. Ці порушення зменшують надійність машин.

*Правила зберігання сільськогосподарської техніки.* Щорічно біля 10 % металу втрачається від атмосферної корозії, яка викликає прискорене хімічне спрацювання сільськогосподарської техніки, особливо кузовів, кабін і обшивки тракторів, автомобілів, комбайнів, майже усіх деталей сільськогосподарських машин, і часто призводить до їх непридатності. Значного корозійного впливу в агресивних середовищах зазнають деталі машин, які використовуються для захисту рослин, внесення органічних і мінеральних добрив, меліорантів і консервантів для механізації тваринницьких ферм.

Основні експлуатаційні заходи, які забезпечують високу збережуваність сільськогосподарської техніки (особливо у неробочий осінньо-зимовий період): організація спеціальних приміщень, в тому числі поста консервації і майданчиків з твердим покриттям, використання різних підставок, очищення деталей машин від забруднення (одразу після закінчення відповідних сільськогосподарських робіт); нанесення на нефарбовані робочі та інші поверхні консерваційних матеріалів; своєчасне відновлення лакофарбових покриттів; зберігання електрообладнання, акумуляторів, гуми, приладів, робочих органів машин у закритих приміщеннях.

**Ремонтні заходи щодо відновлення надійності машин.** Ремонт машин – це важлива ланка у загальній системі підтримання їх у працездатному стані, оскільки сучасна техніка не може використовуватися без ремонтних заходів. При ремонті машин одночасно може здійснюватися їх модернізація з підвищенням довговічності.

Для поліпшення якості ремонту і подовження строку служби відремонтованих машин необхідні: передремонтне діагностування; збереження ремонтного фонду; розбірні роботи без пошкоджень деталей та розукомплектування пар; ефективне очищення деталей; ретельна дефектація деталей сучасними засобами та їх контроль; повне відновлення розмірів, геометричної форми і взаємного розташування робочих поверхонь деталей,

особливо базових; вхідний контроль нових деталей; забезпечення регламентованих посадок, зусиль затяжки різьбових з'єднань та інших вимог до складання машин; удосконалення обкатки відремонтованих агрегатів.

Надійність відремонтованої машини залежить від надійності окремих деталей, а це визначається якістю відновлення спрацьованих деталей.

Систему технологічного формування показників якості відновлених деталей при ремонті машин наведено на рис. 6.15.

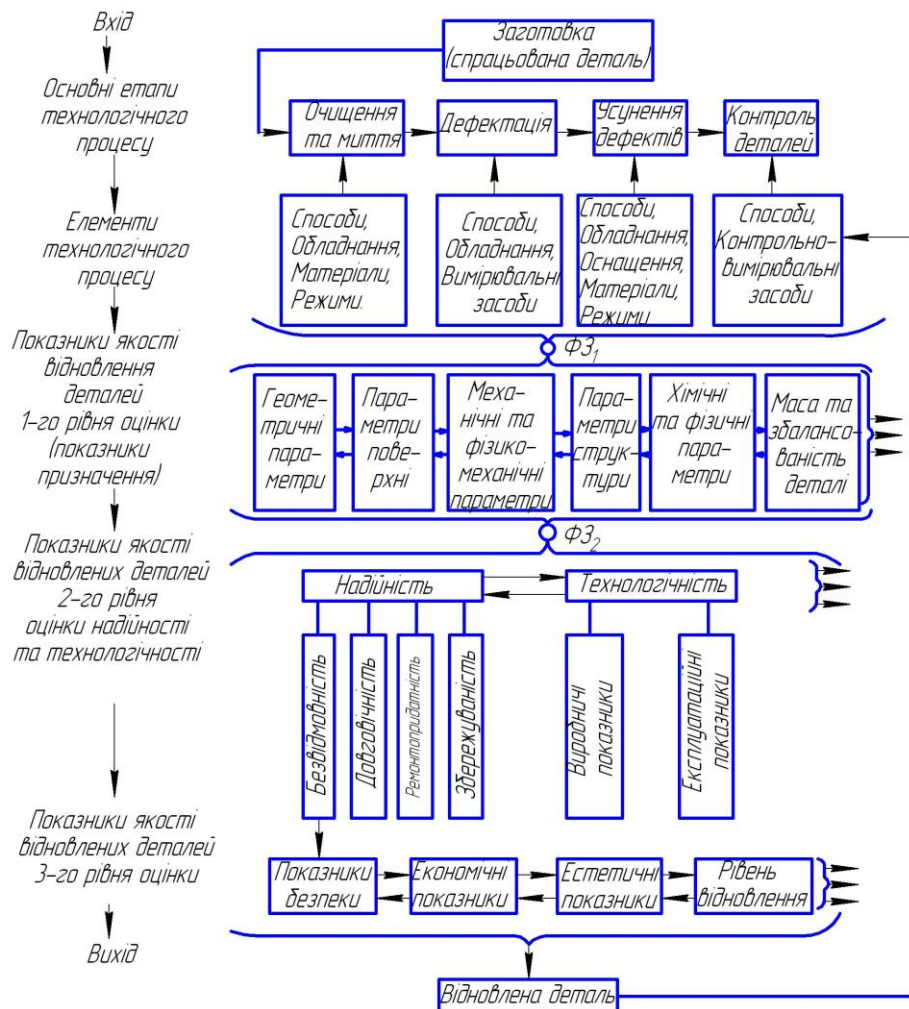
Основний важіль керування системою і забезпечення необхідних показників якості деталей – це елементи технологічного процесу: способи, обладнання, матеріали, режими, оснащення та ін. За допомогою визначених способів очищення, дефектації, нарощування металу, механічної, термічної та зміцнюючої обробок, принципів базування, використання прогресивних матеріалів, раціональних режимів обробки, необхідного технологічного оснащення формуються насамперед показники якості відновлених деталей 1-го рівня оцінки (показники призначення). При цьому встановлюються функціональні зв'язки  $\Phi Z_1$ . Задані показники надійності та технологічності деталей отримують при встановленні складніших функціональних зв'язків  $\Phi Z_2$ , при цьому параметри показників призначення виступають як фактори. Шляхом цих зв'язків формуються показники якості 3-го рівня оцінки.

Крім суто технологічних заходів, до проблеми забезпечення надійності при ремонті машин належить також ряд питань методичного та організаційного плану.

*Нормування надійності відремонтованих машин.* Номенклатура нормованих показників надійності відремонтованих машин визначається на основі загальної оцінки експлуатації, в ролі якої може виступати економічний ефект. Для сільськогосподарської техніки нормуються такі показники: коефіцієнт готовності; гамма-процентний або середній ресурс; середні значення параметра потоку відмов або напрацювання на відмову за обумовлений ресурс.

Критерії граничного стану складних машин у цілому не визначені, показники довговічності нормуються для агрегатів, для машин – тільки

коефіцієнт готовності та показники безвідмовності за групами складності.



**Рис. 6.15. Система технологічного формування показників якості відновлених деталей**

Нормативи надійності розробляються для конкретних умов експлуатації (зон, районів) і наводяться в абсолютних показниках та відносних одиницях стосовно показників надійності нових машин, що експлуатуються у таких самих умовах.

Для забезпечення порівняльних оцінок показників надійності нових та відремонтованих машин, а також їхніх складових збирають інформацію; її опрацювання та розрахунок здійснюють за єдиною методикою.

*Обґрунтування і планування ремонту машин та його виконання.* Повна реалізація ресурсів машин можлива лише за умов правильного планування та

обґрунтованого призначення операцій ремонту. Машини необхідно ремонтувати у разі потреби, залежно від їх фактичного технічного стану.

Передчасне направлення машин на ремонт приводить до недовикористання ресурсу, підвищених витрат запасних частин та збільшених витрат на підтримання машин у роботоздатному стані.

Методи планування ремонту, які використовуються у сільському господарстві, ґрунтуються на середніх значеннях доремонтних та міжремонтних напрацювань машин без врахування їх розсіювання в умовах експлуатації, що приводить до помилок.

Обґрунтоване планування ремонтів можна здійснити тільки на фактичних показниках надійності об'єктів, що ремонтуються в конкретному господарстві при даних умовах експлуатації.

Для зменшення помилки при визначенні кількості ремонтів тракторів рекомендується проводити розрахунок з урахуванням розсіювання як запланованого напрацювання парку тракторів, так і їх напрацювання від останнього ремонту до початку планового періоду.

*Застосування оптимальних ремонтних впливів.* У процесі ремонту залежно від фактичних потреб елементи машин піддаються різним ремонтним впливам, які характеризуються неоднаковими матеріально-трудовими затратами і забезпечують різні показники надійності елементів, укомплектованих з них з'єднань і вузлів машин.

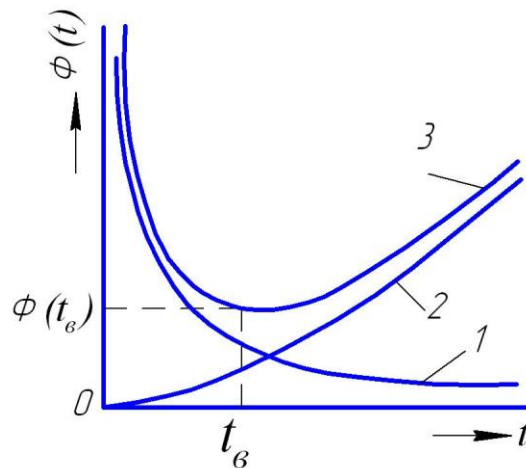
Для досягнення максимального ефекту необхідно забезпечити нормативні показники надійності відремонтованих вузлів та агрегатів і одночасно вимагати мінімальних затрат праці та засобів.

Найзагальнішим і найповнішим критерієм техніко-економічної оцінки відновлених деталей є сумарні питомі витрати на відновлення та експлуатацію деталей, які визначаються також цільовою функцією:

$$\Phi(t) = [B + U(t)]t = B/t + U(t)/t \rightarrow \min, \quad (6.14)$$

де  $B$  – витрати на відновлення деталей,  $U(t)$  – експлуатаційні витрати;  $t$  – напрацювання деталі.

Графічна інтерпретація функції наведена на рис. 6.16. Оптимальним є спосіб відновлення, при якому досягається найменше значення  $\Phi(t)$ , а момент  $t_0$  відповідає оптимальному моменту відновлення деталі.



**Рис. 6.16. Визначення оптимального моменту відновлення елементів машин:** 1 – витрати на відновлення; 2 – витрати на експлуатацію; 3 – сумарні витрати

**Модернізація машин у процесі ремонту.** У процесі відновлення та зміцнення деталі часто змінюються окремі її характеристики: геометричні, параметри, матеріал окремих поверхонь, фізико-механічні властивості та ін. Так, у машину встановлюється дещо інша деталь, ніж передбачена конструктором. Якщо відновлена деталь має показники якості вищі порівняно з серійною, правомірно говорити про її модернізацію.

**Модернізація** – часткове оновлення машин, при якому усувається експлуатаційне моральне зношування II роду окремих вузлів чи агрегатів машин і (або) підвищується довговічність і ремонтпридатність деталей. Це відбувається за рахунок внесення в конструкцію існуючих деталей необхідних змін і технічних удосконалень з урахуванням сучасних досягнень.

Ремонтна модернізація деталей має певні принципи відмінності від відновлення деталей у звичайній формі.

По-перше, модернізація – це удосконалення деталі, яке сприяє підвищенню якості роботи вузла, агрегату чи машини. Метою відновлення деталі є поновлення її початкових властивостей і показників.

По-друге, модернізація – один із засобів розширеного відтворення деталей, оскільки вона проводиться не просто для відновлення початкових властивостей, а для поліпшення їх порівняно з початковими (підвищення технічного ресурсу відновлених деталей рівнозначне збільшенню їх кількості).

По-третє, модернізація деталей в окремих випадках спрямована на підвищення технічного рівня виробів та усунення їх морального зношування II роду (відновлення деталей ліквідує тільки фізичне зношення машин).

Типи модернізації деталей машин у процесі відновлення наведено на рис. 6.17.

Часткова модернізація дозволяє підвищити якість відновлення деталей тільки в одному напрямі (наприклад, довговічність деталей підвищується шляхом зміни зносостійкості окремих поверхонь). У результаті комплексної модернізації можна поліпшити кілька властивостей та характеристик як самої деталі, так і вузла або агрегату, до яких ця деталь належить.

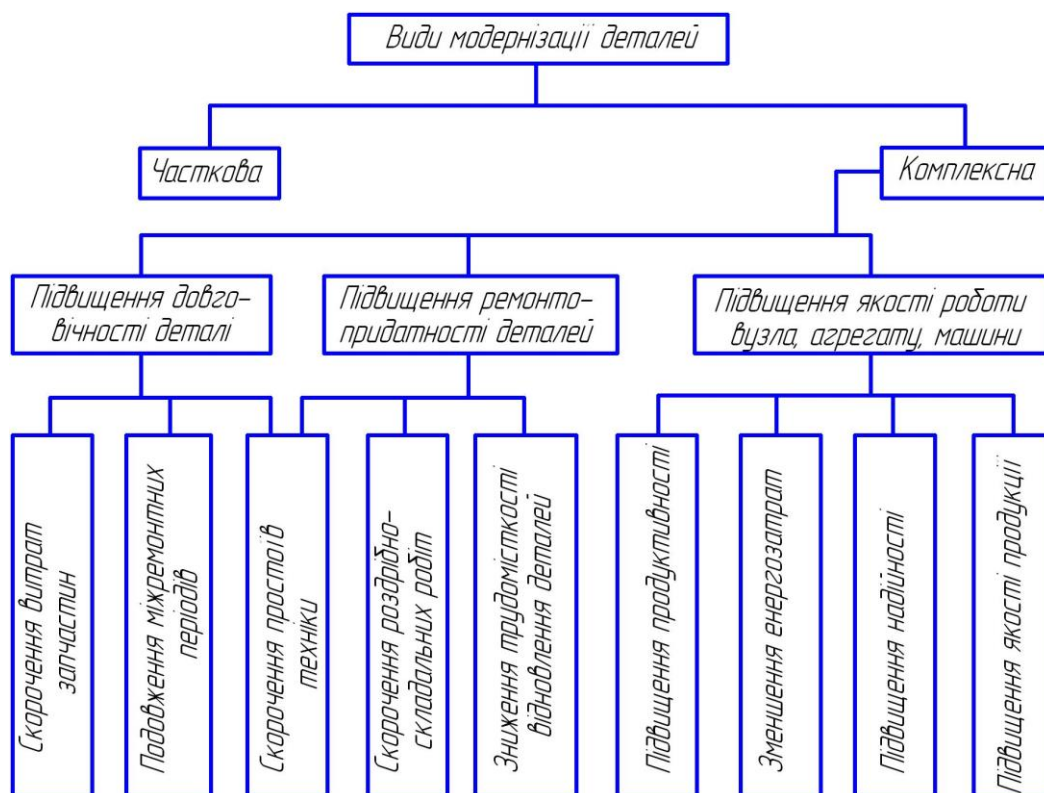


Рис. 6.17. Види модернізації деталей машин у процесі ремонту



Наприклад, об'ємна подача шестеренного гідронасосу становить:

$$Q = 2\pi b n (D^2 / 4 - r_{\text{п}}^2 - t_0^2 / 12), \quad (6.12)$$

де  $b$  – ширина шестерні насоса, мм;  $n$  – номінальна частота обертання шестерен,  $\text{хв}^{-1}$ ;  $D$  – діаметр шестерні, мм;  $r_{\text{п}}$  – радіус початкового кола, мм;  $t_0$  – основний крок шестерні, мм.

Так, основними параметрами, які впливають на експлуатаційний показник – подачу насоса, є ширина шестерень  $b$  та їх зовнішній діаметр  $D$ . Тобто, при розробці технології відновлення шестерень до цих величин та до їх відношення у першу чергу висуваються вимоги як до функціональних параметрів, а вже потім до геометричних параметрів-розмірів. Відновлювати параметри до номінальних можна електроімпульсним припіканням металевого порошку на вершини зубів та контактним приварюванням зубчастої пластини до торця шестерні, яка компенсує зношування зубів по довжині. Крім цього, припіканням порошку можна наростити висоту зуба шестерні до розмірів, що дещо перевищує її номінальний діаметр. Наприклад, конструкція гідронасосів НШ-32У, НШ-46У та НШ-50У дозволяє довести діаметр кола виступів шестерень до  $D = 55,5_{-0,070}^{-0,035}$  (при номіналі  $55,5_{-0,070}^{-0,035}$ ).

Збільшення функціонального параметру  $D$  для шестерень відносно серійних зразків (за умов доведення інших параметрів до номінальних) приводить до їх модернізації, оскільки суттєво зростає подача насосу.

### **Контрольні запитання.**

1. Які основні шляхи забезпечення надійності на стадії проектування?
2. Що таке резервування, його види?
3. Які конструкторські методи існують для підвищення надійності машин?
4. Які перспективні матеріали використовуються для підвищення надійності?
5. Які існують трибологічні заходи підвищення надійності?

6. Які основні технологічні методи підвищення надійності?
7. Що таке надійність технологічного процесу?
8. В чому суть експлуатаційних заходів підтримання надійності машин?
9. Як відновлюється надійність машин в процесі ремонту?
10. Що таке модернізація машин або деталей?



Інтегральна функція закону нормального розподілу  $F_0(t)$ 

$t = \frac{x - MX}{\sigma}$	Соті частки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,50	50	51	51	52	52	52	53	53	54
0,1	0,54	54	55	55	56	56	56	57	57	58
0,2	0,58	58	59	59	60	60	60	61	61	61
0,3	0,62	62	63	63	63	64	64	64	65	65
0,4	0,66	66	66	67	67	67	68	68	68	69
0,5	0,69	70	70	71	71	71	71	72	72	72
0,6	0,73	73	73	74	74	74	75	75	75	75
0,7	0,76	76	76	77	77	77	78	78	78	79
0,8	0,79	79	79	80	80	80	81	81	81	81
0,9	0,82	82	82	82	83	83	83	83	84	84
1,0	0,84	84	85	85	85	85	86	86	86	86
1,1	0,86	87	87	87	87	88	88	88	88	88
1,2	0,89	89	89	89	89	89	90	90	90	90
1,3	0,90	91	91	91	91	91	91	92	92	92
1,4	0,92	92	92	92	93	93	93	93	93	93
1,5	0,93	93	94	94	94	94	94	94	94	94
1,6	0,95	95	95	95	95	95	95	95	95	96
1,7	0,96	96	96	96	96	96	96	96	96	96
1,8	0,96	97	97	97	97	97	97	97	97	97
1,9	0,97	97	97	97	97	97	98	98	98	98
2,0	0,98	98	98	98	98	98	98	98	98	98
2,1	0,98	98	98	98	98	98	98	99	99	99
2,2	0,99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
2,3	0,99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
2,4	0,99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
2,5	0,99	99	99	99	99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Значення квантилей  $U_\alpha$  функції  $F_0(x)$ 

$F_0(x)=\alpha$	$U_\alpha$	$F_0(x)=\alpha$	$U_\alpha$	$F_0(x)=\alpha$	$U_\alpha$	$F_0(x)=\alpha$	$U_\alpha$
0,50	0	0,65	0,385	0,80	0,842	0,95	1,645
0,51	0,025	0,66	0,412	0,81	0,878	0,96	1,751
0,52	0,050	0,67	0,440	0,82	0,915	0,97	1,881
0,53	0,075	0,68	0,468	0,83	0,954	0,98	2,054
0,54	0,100	0,69	0,4%	0,84	0,994	0,99	2,326
0,55	0,126	0,70	0,524	0,85	1,036	0,991	2,366
0,56	0,151	0,71	0,553	0,86	1,080	0,992	2,409
0,57	0,176	0,72	0,583	0,87.	1,126	0,993	2,457
0,58	0,202	0,73	0,613	0,88	1,175	0,994	2,512
0,59	0,228	0,74	0,643	0,89	1,227	0,995	2,576
0,60	0,253	0,75	0,674	0,90	1,282	0,996	2,652
0,61	0,279	0,76	0,706	0,91	1,341	0,997	2,748
0,62	0,305	0,77.	0,739	0,92	1,405	0,998	2,878
0,63	0,332	0,78	0,772	0,93	1,476	0,999	3,090
0,64	0,358	0,79	0,806	0,94	1,555	0,999	3,719

Розподіл Пуассона  $P_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a}$ 

$m$	$a=0,1$	$a=0,2$	$a=0,3$	$a=0,4$	$a=0,5$	$a=0,6$	$a=0,7$	$a=0,8$	$a=0,9$
0	0,9048	0,8187	0,7403	0,6703	0,6065	0,5488	0,4966	0,4493	0,4066
1	0,0905	0,1638	0,2222	0,2681	0,3033	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	0,0494
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	0,0003

Значення  $P(\lambda)$  критерію Колмогорова

$\lambda$	$P(\lambda)$	$\lambda$	$P(\lambda)$	$\lambda$	$P(\lambda)$
0,0	1,000	0,7	0,711	1,4	0,040
0,1	1,000	0,8	0,544	1,5	0,022
0,2	1,000	0,9	0,393	1,6	0,012
0,3	1,000	1,0	0,270	1,7	0,006
0,4	0,997	1,1	0,178	1,8	0,003
0,5	0,967	1,2	0,112	1,9	0,002
0,6	0,864	1,3	0,068	2,0	0,001

Таблиця значень  $t\gamma(\gamma, k)$ 

$k$	$\gamma$			$k$	$\gamma$		
	0,95	0,99	0,999		0,95	0,99	0,999
5	2,78	4,60	8,61	20	2,093	2,861	3,883
6	2,57	4,03	6,86	25	2,064	2,797	3,745
7	2,45	3,71	5,96	30	2,045	2,756	3,659
8	2,37	3,50	5,41	35	2,032	2,720	3,600
9	2,31	3,36	5,04	40	2,023	2,708	3,558
10	2,26	3,25	4,78	45	2,016	2,692	3,527
11	2,23	3,17	4,59	50	2,009	2,679	3,502
12	2,20	3,11	4,44	60	2,001	2,662	3,464
13	2,18	3,06	4,32	70	1,996	2,649	3,439
14	2,16	3,01	4,22	80	1,001	2,640	3,418
15	2,15	2,98	4,14	90	1,987	2,633	3,403
16	2,13	2,95	4,07	100	1,984	2,627	3,392
17	2,12	2,92	4,02	120	1,980	2,617	3,374
18	2,11	2,90	3,97	$\infty$	1,960	2,576	3,291
19	2,10	2,88	3,92				

Значення функції  $e^{-x}$ 

$x$	$e^{-x}$	$\Delta$	$x$	$e^{-x}$	$\Delta$	$x$	$e^{-x}$	$\Delta$	$x$	$e^{-x}$	$\Delta$
0,00	1,000	10	0,40	0,670	7	0,80	0,449	4	3,00	0,050	5
0,01	0,990	10	0,41	0,664	7	0,81	0,445	5	3,10	0,045	4
02	980	10	42	657	7	82	440	4	3,20	41	4
03	970	9	43	650	6	83	436	4	3,30	37	4
04	961	10	44	644	6	84	432	5	3,40	33	3
05	951	9	45	638	7	85	427	4	3,50	30	3
06	942	10	46	631	6	86	423	4	3,60	27	2
07	932	9	47	625	6	87	419	4	3,70	25	3
08	823	9	48	619	6	88	415	4	3,80	22	2
09	914	9	49	613	7	89	411	4	3,90	20	2
0,10	0,905	9	0,50	0,606	6	0,90	0,407	4	4,00	0,0183	17
11	896	9	51	600	5	91	403	4	4,10	166	16
12	887	9	52	595	6	92	399	4	4,20	150	14
13	878	9	53	589	6	93	395	4	4,30	136	13
14	869	8	54	583	6	94	391	4	4,40	123	12
15	861	9	55	577	6	95	387	4	4,50	111	10
16	852	8	56	571	6	96	383	4	4,60	101	10
17	844	9	57	565	5	97	379	4	4,70	0,0091	9
18	835	8	58	560	6	98	375	3	4,80	82	8
19	827	8	59	554	5	99	372	4	4,90	74	7
0,20	0,819	8	0,60	0,549	6	1,00	0,368	35	5,00	0,0067	6
21	811	8	61	543	5	1,10	333	31	5,10	61	6
22	803	8	62	538	5	1,20	302	29	5,20,	55	5
23	795	8	63	533	6	1,30	273	26	5,30	50	5
24	787	8	64	527	5	1,40	247	24	5,40	45	4
25	779	8	65	522	5	1,50	223	21	5,50	41	4
26	771	8	66	517	5	1,60	202	19	5,60	37	4
27	763	7	67	512	5	1,70	183	18	5,70	33	3
28	756	8	68	507	5	1,80	165	15	5,80	30	3
29	748	7	69	502	5	1,90	150	15	5,90	27	2
0,30	0,741	8	0,70	0,497	5	2,00	0,135	13	6,00	0,0025	3
31	733	7	71	492	5	2,10	122	11	6,10	22	2
32	726	7	72	487	5	2,20	111	11	6,20	20	2
33	719	7	73	482	5	2,30	100	9	6,30	18	1
34	712	7	74	477	5	2,40	0,091	9	6,40	17	2
35	705	7	75	472	5	2,50	82	8	6,50	15	1
36	698	7	76	468	5	2,60	74	7	6,60	14	2
37	691	7	77	463	5	2,70	67	6	6,70	12	1
38	684	7	78	458	4	2,80	61	6	6,80	11	1
39	677	7	79	454	5	2,90	55	5	6,90	10	1
0,40	0,670		0,80	0,449		3,00	0,050		7,00	0,0009	

Значення критерію згоди  $\chi^2$  залежно від  $k$  і  $P$ 

$k/P$	0,99	0,98	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02
1	0,000	0,001	0,004	0,016	0,064	0,148	0,455	1,074	1,642	2,71	3,84	5,41
2	0,020	0,010	0,103	0,211	0,446	0,713	1,386	2,41	3,22	4,60	5,99	7,82
3	0,115	0,185	0,352	0,584	1,005	1,424	2,37	3,60	4,64	6,25	7,82	9,84
4	0,297	0,420	0,711	1,064	1,649	2,20	3,35	4,87	5,99	7,78	9,49	11,67
5	0,554	0,752	1,145	1,610	2,34	3,00	4,35	6,06	6,29	9,24	11,07	13,39
6	0,872	1,134	1,635	2,20	3,07	3,83	5,36	7,23	8,56	10,64	11,59	15,03
7	1,269	1,564	2,17	2,83	3,82	4,67	6,35	8,38	9,80	12,02	14,07	16,62
8	9,646	2,03	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34	9,52	11,03	13,36	15,51	18,17
9	2,09	2,53	3,32	4,17	5,38	6,39	8,34	10,66	12,24	14,68	16,92	19,68
10	2,56	3,06	3,94	4,86	6,18	7,27	9,34	11,78	13,44	15,99	18,31	21,2
11	3,05	3,61	4,58	5,58	6,99	8,15	10,34	12,90	14,63	17,28	19,68	22,6
12	3,57	4,18	5,23	6,30	7,81	9,03	11,34	14,01	15,81	18,55	21,0	24,1
13	4,11	4,76	5,89	7,04	8,63	9,93	12,34	15,12	16,98	19,81	22,4	25,5
14	4,66	5,37	6,57	7,79	9,47	10,82	13,34	16,22	18,16	21,1	23,7	26,9
15	5,23	5,98	7,26	8,55	10,31	11,72	14,34	17,32	19,31	22,3	25,0	28,3
16	5,81	6,61	7,96	9,31	11,15	12,62	15,34	18,42	20,5	23,5	26,3	29,6
17	6,41	7,26	8,67	10,08	12,00	13,53	16,34	19,51	21,6	24,8	27,6	34,0
18	7,02	7,91	9,30	10,86	12,86	14,44	17,34	20,6	22,8	26,0	28,9	32,3
19	7,63	8,57	10,11	11,65	13,72	15,35	18,34	21,7	23,9	27,2	30,1	33,7
20	8,26	9,24	10,85	12,44	14,58	16,27	19,34	22,8	25,0	28,4	31,4	35,0
21	8,90	9,02	11,59	13,24	15,44	17,18	29,3	23,9	26,2	29,6	32,7	36,3
22	9,54	10,60	11,34	14,04	16,31	18,10	21,3	24,9	27,3	30,8	33,9	37,7
23	10,20	11,29	13,09	14,85	17,18	19,02	22,3	29,0	28,4	32,0	35,2	39,0
24	10,86	11,99	13,85	15,66	18,06	19,94	23,3	27,1	29,6	33,2	36,4	40,3
25	11,52	12,70	14,61	16,47	18,94	20,9	24,3	28,2	30,7	34,4	37,7	41,7
26	12,20	13,41	15,38	17,29	19,82	21,8	25,3	29,2	31,8	35,6	38,9	42,9
27	12,88	14,12	16,15	18,11	20,7	22,7	26,3	30,3	32,9	36,7	40,1	44,1
28	13,56	14,85	16,93	18,94	21,6	23,6	27,3	31,4	34,0	37,9	41,3	45,4
29	14,26	15,57	17,71	19,77	22,5	24,6	28,3	32,5	35,1	39,1	42,6	46,7
30	14,95	16,31	18,49	20,6	23,4	25,5	29,3	33,5	36,2	40,3	43,8	48,0



Значення функції Лапласа  $\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$

$t$	$\Phi(t)$	$t$	$\Phi(t)$	$t$	$\Phi(t)$	$t$	$\Phi(t)$
0,10	0,0398	1,00	0,3413	1,45	0,4265	2,30	0,4893
0,12	0,0478	1,01	0,3438	1,46	0,4279	2,32	0,4898
0,14	0,0557	1,02	0,3461	1,47	0,4292	2,34	0,4904
0,16	0,0636	1,03	0,3485	1,48	0,4306	2,36	0,4909
0,18	0,0714	1,04	0,3508	1,49	0,4319	2,38	0,4913
0,20	0,0793	1,05	0,3531	1,50	0,4332	2,40	0,4918
0,22	0,0871	1,06	0,3554	1,52	0,4357	2,42	0,4922
0,24	0,0948	1,07	0,3574	1,54	0,4382	2,44	0,4927
0,26	0,1026	1,08	0,3599	1,56	0,4406	2,46	0,4931
0,28	0,1103	1,09	0,3621	1,58	0,4429	2,48	0,4934
0,30	0,1179	1,10	0,3643	1,60	0,4452	2,50	0,4938
0,32	0,1255	1,11	0,3665	1,62	0,4474	2,52	0,4941
0,34	0,1331	1,12	0,3686	1,64	0,4495	2,54	0,4945
0,36	0,1406	1,13	0,3708	1,66	0,4515	2,56	0,4948
0,38	0,1480	1,14	0,3729	1,68	0,4535	2,58	0,4951
0,40	0,1554	1,15	0,3749	1,70	0,4554	2,60	0,4953
0,42	0,1628	1,16	0,3770	1,72	0,4573	2,62	0,4956
0,44	0,1700	1,17	0,3790	1,74	0,4591	2,64	0,4959
0,46	0,1772	1,18	0,3810	1,76	0,4608	2,66	0,4961
0,48	0,1844	1,19	0,3830	1,78	0,4625	2,68	0,4963
0,50	0,1915	1,20	0,3849	1,80	0,4641	2,70	0,4965
0,52	0,1985	1,21	0,3869	1,82	0,4656	2,72	0,4967
0,54	0,2054	1,22	0,3883	1,84	0,4671	2,74	0,4969
0,56	0,2123	1,23	0,3907	1,86	0,4686	2,76	0,4971
0,58	0,2190	1,24	0,3925	1,88	0,4699	2,78	0,4973
0,60	0,2257	1,25	0,3944	1,90	0,4713	2,80	0,4974
0,62	0,2324	1,26	0,3962	1,92	0,4726	2,82	0,4976
0,64	0,2389	1,27	0,3980	1,94	0,4738	2,84	0,4977
0,66	0,2454	1,28	0,3997	1,96	0,4750	2,86	0,4979
0,68	0,2517	1,29	0,4015	1,98	0,4761	2,88	0,4980
0,70	0,2580	1,30	0,4032	2,00	0,4772	2,90	0,4981
0,72	0,2642	1,31	0,4049	2,02	0,4783	2,92	0,4982
0,74	0,2703	1,32	0,4066	2,04	0,4793	2,94	0,4984
0,76	0,2764	1,33	0,4082	2,06	0,4803	2,96	0,4985
0,78	0,2823	1,34	0,4099	2,08	0,4812	2,98	0,4986
0,80	0,2881	1,35	0,4115	2,10	0,4821	3,00	0,49865
0,82	0,2939	1,36	0,4131	2,12	0,4830	3,20	0,49931
0,84	0,2995	1,37	0,4147	2,14	0,4838	3,40	0,49966
0,86	0,3051	1,38	0,4162	2,16	0,4846	3,60	0,499841
0,88	0,3106	1,39	0,4177	2,18	0,4854	3,80	0,499928
0,90	0,3159	1,40	0,4192	2,20	0,4861	4,00	0,499968
0,92	0,3212	1,41	0,4207	2,22	0,4868	4,50	0,499997
0,94	0,3264	1,42	0,4222	2,24	0,4875	5,00	0,499997
0,96	0,3315	1,43	0,4236	2,26	0,4881		
0,98	0,3365	1,44	0,4251	2,28	0,4887		