

Міністерство освіти і науки України  
Миколаївський національний аграрний університет  
Інженерно-енергетичний факультет  
Кафедра загальнотехнічних дисциплін

Г. О. Іванов  
В. І. Гавриш  
П. М. Полянський  
О. В. Гольдшмідт

## **НАДІЙНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ**

Курс лекцій для студентів  
денної та заочної форм навчання спеціальності:  
7.10010203 «Механізація сільського господарства»

Миколаїв  
2015

УДК 631.36:621.3

ББК 34+30.10

Н17

#### Автори:

- Г. О. Іванов – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін, Миколаївський національний аграрний університет.
- В. І. Гавриш – д-р екон. наук, професор, в. о. завідувача кафедри тракторів та сільськогосподарських машин, експлуатації і технічного сервісу, Миколаївський національний аграрний університет.
- П. М. Полянський – канд. екон. наук, в. о. зав. кафедри загальнотехнічних дисциплін, Миколаївський національний аграрний університет.
- О. В. Гольдшмідт – канд. техн. наук, доцент.

Друкується за рішенням науково-методичної комісії інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 28 травня 2015 р., протокол № 9.

#### Рецензенти:

- О. А. Горбенко – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри механізації та електрифікації сільськогосподарського виробництва, Миколаївський національний аграрний університет.
- К. В. Дубовенко – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електротехнологій та електропостачання Миколаївського національного аграрного університету.

#### Іванов Г. О.

- Н17 Надійність технологічних систем : курс лекцій / Г. О. Іванов, В. І. Гавриш, П. М. Полянський, О. В. Гольдшмідт. – Миколаїв : МНАУ, 2015. – 40 с.

У курсі лекцій викладено основні поняття і положення теорії надійності, математичні основи розрахунку і кількісні характеристики надійності автомобільної і тракторної техніки, дана методика розрахунку довговічності машин і показників надійності.

УДК 631.36:621.3

ББК 34+30.10

© Миколаївський національний аграрний університет, 2015

© Іванов Г. О., Гавриш В. І., Полянський П. М., Гольдшмідт О. В., 2015

## ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА .....	4
1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ .....	5
1.1. Об'єкти, що розглядаються в теорії надійності .....	5
1.2. Основні поняття і визначення, прийняті в теорії надійності .....	5
1.3. Класифікація відмов .....	6
1.4. Зовнішні і внутрішні чинники, що впливають на надійність техніки .....	7
1.5. Фізична природа виникнення відмов .....	7
1.6. Закономірності зношування .....	8
1.7. Відмови вібраційного походження і інші чинники, що впливають на надійність машин .....	9
2. МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ .....	10
2.1. Короткі відомості із теорії вірогідності .....	10
2.2. Основні задачі математичної статистики .....	11
2.3. Обчислення параметрів емпіричного розподілу випадкової величини .....	12
2.4. Короткі відомості про закони розподілу випадкової величини .....	12
2.5. Порівняння емпіричних і теоретичних функцій розподілу частот по критеріях згоди .....	13
2.6. Об'єм вибірки і оцінка точності отриманих результатів .....	14
3. КІЛЬКІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДІЙНОСТІ .....	15
3.1. Кількісні характеристики надійності об'єктів, що не підлягають ремонту .....	15
3.2. Залежність основних характеристик надійності від дії певного закону розподілу .....	17
3.3. Характеристики надійності ремонтованих об'єктів .....	18
4. МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ МАШИН НА НАДІЙНІСТЬ .....	21
4.1. Основні види і плани випробувань .....	21
4.2. Методи прискорених випробувань .....	23
4.3. Випробування матеріалів на зносостійкість .....	24
4.4. Контроль надійності виробів .....	25
4.5. Контрольна обкатка об'єктів .....	26
5. ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА, ПРОГНОЗУВАННЯ .....	26
5.1. Короткі відомості про технічну діагностику .....	26
5.2. Визначення граничного стану деталей, сполучень і механізмів машин .....	28
5.3. Теоретичне обґрунтування граничних станів посадок в сполученнях .....	28
6. ОСНОВНІ ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ І РЕМОНТОПРИДАТНОСТІ МАШИН .....	33
6.1. Шляхи підвищення надійності автотранспорту .....	33
6.2. Визначення оптимального міжремонтного ресурсу об'єктів .....	36
6.3. Оптимальні періоди обслуговування і ремонту машин .....	37
Список використаної літератури .....	38

## ПЕРЕДМОВА

Курс лекцій написаний за програмою курсу «Надійність технологічних систем» для інженерних спеціальностей вищих аграрних навчальних закладів України III-IV рівнів акредитації.

Курс лекцій дає можливість самостійно забезпечити підготовку студентів по дисципліні «Надійність сільськогосподарської техніки». В ньому приведені основні поняття надійності автомобільної і тракторної техніки, дана методика розрахунку довговічності машин і показників надійності.

У нашій країні автотракторна техніка створюється на основі рекомендацій, включених до системи машин, що розробляється на певний період часу зусиллями науково-дослідних та проектно-технологічних інститутів, конструкторських бюро, а також машинобудівельних відомств з урахуванням запитів виробництва.

Організаційна перебудова і відповідне технічне переоснащення машинотракторного парку потребують удосконалення технологічного обладнання, підвищення якості машин і механізмів, їх надійності та довговічності. Стосовно механізації транспортних робіт особливо важливе значення мають підвищення економічності машин та обладнання, здешевлення їх проектування і виробництва, використання стандартних та уніфікованих вузлів і деталей, зниження маси і зменшення габаритів машини, потужності привода.

Вирішення перелічених завдань і вимог можливе лише на основі спеціальних знань що надає дисципліна «Надійність сільськогосподарської техніки». При викладенні матеріалу прийнято до уваги, що дисципліна «Надійність сільськогосподарської техніки» ґрунтується на знаннях курсів: теоретичної механіки, механіки матеріалів і конструкцій, теорії механізмів та машин, деталі машин і основи конструювання; взаємозамінності, стандартизації та технічних вимірювань та ін.

Мета дисципліни – надання майбутнім інженерам-механікам знання та практичних навиків по розрахунку показників надійності, набуток студентами знань по тематиці, яка вивчається та завершує їх підготовку по спеціальним дисциплінам.

# 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ПОЛОЖЕННЯ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ

## 1.1. Об'єкти, що розглядаються в теорії надійності

1.1.1. В даний час замість вузького поняття «виріб» як предмету, виготовленого на підприємстві, в теорії надійності використовують більш узагальнююче поняття «об'єкт». Під об'єктом розуміється предмет певного цільового призначення, що розглядається в періоди проектування, виробництва, експлуатації, досліджень і випробувань на надійність. Об'єктами можуть бути вироби, системи і їх елементи, зокрема, споруди, установки, пристрої, машини, апарати, прилади і їх частини, агрегати і окремі деталі .

Об'єкти підрозділяють на «неремонтуючі» і «ремонтуючі». До числа перших належать такі, які при виникненні відмови не можуть бути відновлені в процесі експлуатації. Наприклад, вальниці кочення, пасі вентилятора, фрикційні накладки гальм і зчеплення, поршневі кільця, різні електролампи і ін.

1.1.2. Машина (агрегат, вузол), що поступила на спеціалізоване ремонтне підприємство, практично як би перестає існувати, перетворюючись на висхідний матеріал для виготовлення «нової машини» (агрегату, вузла) вторинного виробництва, якій має новий рівень надійності. Таке «знищення» і «відродження» машин (агрегатів, вузлів) як первинного, так і вторинного виробництва може відбуватися і відбувається багато разів аж до їх морального зносу. Заміна унаслідок морального зносу стає доцільною, коли собівартість одиниці продукції, вироблюваною старою моделлю, виявиться вище собівартості тієї ж продукції, вироблюваною машиною (агрегатом, вузлом) нової моделі, тобто коли

$$C \geq C_1 + E_H \cdot K,$$

де  $C$  – собівартість одиниці продукції, вироблюваною машиною (агрегатом, вузлом) старої моделі;

$C_1$  – собівартість одиниці продукції, машиною (агрегатом, вузлом) нової моделі, що виготовляється;

$K$  – капітальні витрати на одиницю продукції в рік, вироблюваною машиною (агрегатом, вузлом) нової моделі;

$E_H$  – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних витрат,  $E_H = 1/T_H$ ;

$T_H$  – нормативний термін окупності капітальних витрат, років.

1.1.3. Таким чином, при визначенні характеристик надійності ми матимемо дві основні групи об'єктів – первинного і вторинного виробництва. Розподіл на первинне і вторинне виробництво при визначенні характеристик надійності необхідне, оскільки їх кількісні характеристики мають різні значення для одних і тих же моделей машин (агрегатів, вузлів, деталей), які експлуатуються в однакових умовах.

## 1.2. Основні поняття і визначення, прийняті в теорії надійності

1.2.1. Надійність – ця «властивість об'єкту виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення встановлених експлуатаційних показників в заданих межах, відповідних заданим режимам і умовам використання, технічного обслуговування, ремонтів, зберігання і транспортування».

З погляду теорії надійності об'єкт може знаходитися в стані справності, несправності, працездатності і непрацездатності.

1.2.2. **Справність** – стан об'єкту, при якому він відповідає всім вимогам, встановленим нормативно-технічною документацією.

**Несправність** – стан об'єкту, при якому він не відповідає хоча б одній з вимог, встановлених нормативно-технічною документацією.

**Працездатність** – стан об'єкту, при якому він здатний виконувати задані функції, зберігаючи значення заданих параметрів в межах, встановлених нормативно-технічною документацією.

**Непрацездатність** – стан об'єкту, при якому значення, хоча б одного заданого параметра, що характеризує здатність виконувати задані функції, не відповідає вимогам, встановленим нормативно-технічною документацією.

1.2.3. **Безвідмовність** – властивість об'єкту безперервно зберігати працездатність протягом деякого часу або деякого напрацювання.

**Ремонтоздатність** – властивість об'єкту, що полягає в пристосованості до попередження і виявлення причин виникнення його відмов, пошкоджень і усунення їх наслідків шляхом проведення ремонтів і технічного обслуговування.

**Відмова** – подія, що полягає в порушенні працездатності об'єкту.

**Сохраняємість** – властивість об'єкту безперервно зберігати справний і працездатний стан в течію і після зберігання або транспортування.

**Довговічність** – властивість об'єкту зберігати працездатність до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонтів.

**Граничний стан** – стан об'єкту, при якому його подальша експлуатація повинна бути припинений через неусувне порушення вимог безпеки або неусувного відходу заданих параметрів за встановлені межі, або неусувного зниження ефективності експлуатації нижче допустимій, або необхідності проведення середнього або капітального ремонту.

1.2.4. **Напрацювання** – тривалість або об'єм роботи об'єкту, що вимірюється в одиницях часу, довжини, площі, об'єму і інших одиницях.

**Гарантійне напрацювання** – напрацювання об'єкту, до завершення якого гарантується і забезпечується виконання певних вимог до об'єкту за умови дотримання споживачем правил експлуатації, у тому числі правил зберігання і транспортування.

**Термін служби** – календарна тривалість експлуатації об'єкту від її початку або відновлення після середнього або капітального ремонту до настання граничного стану.

**Гамма-процентний термін служби** – календарна тривалість експлуатації, протягом якої об'єкт не досягає граничного стану із заданою вірогідністю у відсотків.

**Середній термін служби** – математичне очікування терміну служби.

### **1.3. Класифікація відмов**

1.3.1. Поняття «відмова» є центральним в теорії надійності і безпосередньо пов'язане з поняттям «працездатність». Ознаки (критерії) відмов встановлюються нормативно-технічною документацією на даний об'єкт.

1.3.2. Конструкційні відмови. Виникають унаслідок помилок конструктора або недосконалості методів конструювання (недостатня міцність елементів конструкції, незахищеність найвідповідальніших частин механізмів від дії абразивів, вологи, температури і т. д.). В цьому випадку при аналізі і розрахунку надійності слід враховувати, що недосконалість конструкції буде властива всім екземплярам даної моделі (серії) машини (агрегату, вузла, деталі).

1.3.3. Виробничі відмови. Виникають в результаті порушення або недосконалості технології виготовлення (ремонт) машини. Якість деталей, вузлів, агрегатів в цілому не буває однаковим. Незначні зміни якості не позначаються скільки-небудь помітно на надійності об'єкту.

1.3.4. Експлуатаційні відмови. Виникають в результаті порушення правил експлуатації або впливу непередбачених правил зовнішніх дій, що приводить до передчасних відмов, тобто прискорює передчасне старіння машини. Звичайно такі порушення торкаються лише частини експлуатованих машин.

1.3.5. Відмови, що виникають в результаті старіння (зносу) машини. Пов'язані з процесами експлуатації і зберігання, унаслідок чого в машині і її елементах відбуваються необоротні зміни, що виражаються в порушенні міцності, координації і взаємодії елементів.

#### **1.4. Зовнішні і внутрішні чинники, що впливають на надійність техніки**

1.4.1. Всі процеси, що відбуваються в машині, можна представити як оборотні і необоротні. Оборотні – це такі, які носять тимчасовий характер (явище пружної деформації і деякі інші). До необоротних відносяться процеси, в результаті яких з часом необоротно погіршуються технічні характеристики об'єкту. Це виражається в різних видах зношування, перерозподілі внутрішніх напружень, коливанні і т.д.

1.4.2. Всяке відхилення робочих характеристик від норми свідчить про ту або іншу несправність, яка виникла через те, що машина не підготовлена для виконання певного виду робіт. Це часто відбувається унаслідок змін у вузлах і деталях, що сполучаються, що у свою чергу обумовлюється порушенням посадок. Так, наприклад, падіння потужності двигуна може бути слідством збільшення зазорів в деталях поршневої групи. Порушення посадки може бути пов'язано із зміною форми і розмірів деталей, якості їх поверхні, а також невідповідністю хімічного складу, структури і механічних властивостей матеріалу, з якого вони виготовлені.

1.4.3. Надійність машин (агрегатів, вузлів) в найбільшій мірі визначає природне їх зношування.

#### **1.5. Фізична природа виникнення відмов**

1.5.1. Причини, що обумовлюють появу відмов, пов'язані з опре діленими фізичними і фізико-хімічними процесами, що відбуваються в матеріалах і конструкціях на різних етапах їх «життя». Відмови, що впливають на надійність автотракторної техніки, можуть бути поступовий і раптовий.

1.5.2. Найпоширеніший вид несправностей деталей (сполучень) – знос. Він з'являється в результаті зношування, відшаровування або залишкової деформації

матеріалу» виробу. Як правило, пошкодження деталей відбуваються в результаті недотримання правил експлуатації і технічного обслуговування машин і лише в окремих випадках утомленості металу або його прихованих дефектів (тріщин, раковин і т. д.). При дотриманні правил експлуатації знос зв'язаних деталей росте поступово, в прямій залежності від часу їх роботи. Статистичні дані свідчать про те, що більше 80% деталей машин виходять з ладу в результаті зносу

1.5.2. За законом Амонтона сила тертя  $F$  пропорційна вазі вантажу  $G$  і не залежить від величини площ торкання, тобто  $F = f \cdot G$  ( $f$  – коефіцієнт тертя). Звідси  $f = F/G$ . Ейлер, на підставі експериментальних досліджень ковзання тіла по похилій площині, вивів наступне рівняння для визначення коефіцієнта тертя:

$$f = \operatorname{tg} \alpha - \frac{2L}{g \cdot t^2 \cdot \cos \alpha},$$

де  $\alpha$  – кут нахилу площини;

$L$  – шлях, пройдений тілом по площині;

$g$  – прискорення вільного падіння;

$t$  – час переміщення тіла на відстань  $L$ .

Залежність сил тертя ковзання і кочення, виникаючих в парах, що труть, по Кулону, виражається як

$$F_C = A + f \cdot N; F_K = k \cdot N / R_K.$$

Тут  $F_C$  і  $F_K$  – відповідно сили тертя при ковзанні і коченні;

$A$  – величина, що враховує опір при терті поверхонь;

$f$  – коефіцієнт тертя ковзання;

$k$  – коефіцієнт тертя кочення;

$N$  – нормальна сила;

$R_K$  – радіус катка.

1.5.3. Зношування в результаті окислення відбувається при терті ковзання і кочення і супроводиться пластичною деформацією мікроскопічних об'ємів поверхневих шарів деталей і дифузією кисню повітря в шари, що деформуються. На першій стадії окислення відбувається в невеликих об'ємах металу, що знаходяться на поверхні ковзання. На другій стадії окислення захоплює великі об'єми поверхневих шарів.

1.5.4. Зношування, що відбувається під впливом твердих абразивних частинок, має мікропластичні деформації і зрізи поверхневих шарів деталей, що труть. Його характер буде однаковим незалежно від того, чи потрапляють ці частинки ззовні, містяться в одному з тіл (в чавунних деталях, або утворюються в процесі тертя (при другій стадії окислення). Проте він залежить від матеріалу і механічних властивостей деталей, від ріжучих властивостей абразивних частинок, питомого тиску і швидкості ковзання поверхонь, що труть.

## 1.6. Закономірності зношування

1.6.1. В умовах роботи всі види зношування деталей машин в тій чи іншій мірі виявляються одночасно. Причому причини їх виникнення і характер наростання надзвичайно багатоманітні. З метою спрощення що зустрічаються в



робочих механізмах будь-яких машин види зносу і дефекти можуть бути підрозділений на дві основні групи:

- природний знос, який наростає в процесі тривалої дії сил тертя, високих температур і інших чинників за нормальних умов експлуатації, тобто коли дотримуються правила догляду за даним механізмом;
- аварійний знос, який наростає навіть після нетривалої роботи механізму, що є слідством неправильного догляду (або рідко) результатом дефектів, допущених при виготовленні

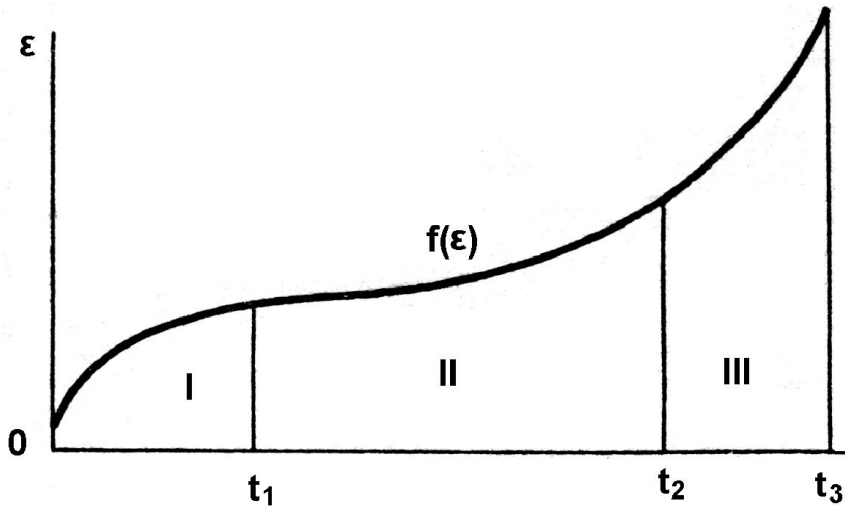


Рис. 1. Крива наростання зносу

1.6.2. Крива наростання зносу має вигляд (рис.1):

I — ділянка прироблення,  
 II — ділянка нормальної роботи,  
 III — ділянка інтенсивного зношування.

Швидкість зношування визначається по формулах:

— в перший період,

$$V_{\varepsilon 1} = \frac{df_{\varepsilon 1}}{dt} = a_1 \cdot b_1 \cdot t_{0,t_1}^{b_1-1};$$

— в другий період  $V_{\varepsilon 2} = \frac{df_{\varepsilon 2}}{dt} = a_2;$

— в третій період  $V_{\varepsilon 3} = \frac{df_{\varepsilon 3}}{dt} = a_3 \cdot b_3^{t_3-t_2} \cdot \ln b_3.$

1.6.3. Середня швидкість зношування знаходиться за виразами:

— на першій ділянці  $V_{\varepsilon 1 \text{ cp}} = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} V_{\varepsilon 1} dt = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} a_1 \cdot b_1 \cdot t_{0,t_1}^{b_1-1} dt;$

— на другій ділянці  $V_{\varepsilon 2 \text{ cp}} = a_2;$

— на третій  $V_{\varepsilon 3 \text{ cp}} = \frac{1}{t_3 - t_2} \int_{t_2}^{t_3} V_{\varepsilon 3} dt = \frac{1}{t_3 - t_2} \int_{t_2}^{t_3} a_3 \cdot b_3^{t_3-t_2} \ln b_3 dt.$

## 1.7. Відмови вібраційного походження і інші чинники, що впливають на надійність машин

1.7.1. Надійність машин (агрегатів, вузлів, деталей), значною мірою залежить від величини вібрації, якої вони піддаються при роботі деталей, що швидко обертаються, — карданних і колінчастих валів, маховиків, шківів, дисків зчеплення, коліс і ін. Крім того, під час ремонту і при заміні окремих деталей порушується їх балансування, що приводить до вібрацій рам машин. Вібрація, що ви-

никає в процесі роботи деталей, створює додаткові навантаження на різні деталі, у тому числі і на вальниці, внаслідок чого виникають відмови.

1.7.2. Утомленість матеріалу. Багато деталей, з яких складається вузол (агрегат), під час роботи машини піддаються високим знакозмінним навантаженням. Це приводить до втрати ними залишкової деформації і пошкодженню.

1.7.3. Пластичні деформації. Частина деталей в процесі роботи піддається достатньо великим температурним і силовим діям, внаслідок чого на окремих їх ділянках виникає напруга, значно перевищуюче межу пружності матеріалу, відбувається пластична деформація, що, безумовно, приводить до інтенсивного зношування. Деякі деталі, не змінюючи своїх геометричних розмірів і форм, втрачають властивості пружності (пружини, ресори і т. п.).

1.7.4. Втрата намагніченості. В результаті нагріву, ударів, дії електричних магнітних полів деталі електроустаткування (ротори генераторів, магнето і ін.), зберігаючи геометричні розміри, втрачають працездатність через втрату магнітних властивостей.

1.7.5. Утворення накипу. Іноді на поверхнях деталей, агрегатів, вузлів відкладається накип, що приводить до втрати їх працездатності. Шар накипу є відкладеннями слаботорозчинних у воді солей і різних механічних домішок. Подібне спостерігається в системі охолодження автотракторних двигунів, коли з'являється накип після використання води, солі, що містить.

1.7.6. Нагар. Утворюється в результаті дії на поверхню деталей сильно нагрітих газів і продуктів згоряє палива і мастила. Нагар порушує нормальний процес теплопередачі, що в більшості випадків приводить до перегріву деталей, а іноді до утворення тріщин

1.7.7. Корозія. При експлуатації різних технічних пристроїв спостерігаються різноманітні типи корозійних пошкоджень металевих виробів. До хімічної корозії відносять пошкодження, викликані дією на метали сухих газів. Електрохімічна корозія (ржавить, розчинення металу в кислоті) відбувається під дією електролізу. Цьому виду пошкодження найбільш схильні крила, облицьовування, капоти і кабіни автомобілів, тракторів, і інших машин. Найбільш небезпечні для деталей, що випробовують силове навантаження, локальні (місцеві) пошкодження поверхні.

1.7.8. Електроерозійні пошкодження. Ряд деталей автотракторного обладнання працює в умовах, при яких періодично проскакують іскрові розряди. Електроерозійному зношуванню піддаються електроди свічок, контакти електричних приладів (переривники, магнето, розподільники, реле-регулятори і ін.), а також щітки і колектори генераторів і стартерів.

## **2. МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ**

### **2.1. Короткі відомості із теорії вірогідності**

2.1.1. Вірогідність події. Вірогідністю події називається відношення числа випадків, що сприяють настанню даної події, до всього числа несумісних, єдино можливих і рівно можливих. Воно виражається формулою

$$P(A) = m/N,$$

де  $P(A)$  – вірогідність події  $A$ ;

$m$  – число випадків, що сприяють настанню події  $A$ ;

$N$  – загальне число випадків, тобто число несумісних, єдино можливих, рівно можливих подій.

Оскільки число сприятливих випадків завжди укладено між 0 і  $N$  (0 – для неможливого і  $N$  – для достовірної події), то вірогідність події завжди є раціональний правильний дріб

$$0 \leq P(A) \leq 1.$$

2.1.2. Випадкова величина Однією з основних в теорії вірогідності є поняття випадкової величини. Випадковою називається величина, яка в результаті досвіду може прийняти те або інше значення, невідоме наперед. Сукупність, що містить всі досліджувані об'єкти, називається генеральною. Вибрані з неї  $N$  об'єкти утворюють вибірку  $N$  об'єму.

2.1.3. Щільність розподілу випадкової величини

Похідна безперервної функції розподілу випадкової величини – функція густини розподілу, тобто  $F'(t) = f(t)$ , де  $f(t)$  – похідна функції розподілу.

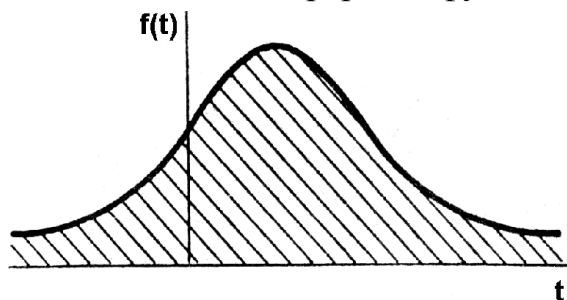


Рис. 2. Крива щільності розподілу значень випадкової величини  $T$

Криву, щільність розподілу випадкової величини, що зображає, називають кривою розподілу (рис. 2). Щільність розподілу – одна з форм закону розподілу, існуюча тільки для безперервних випадкових величин. Основні її властивості виражаються в наступному:

– густина розподілу – не від'ємна функція,

оскільки функція розподілу  $F(t)$  – неубуваюча  $f(t) \geq 0$ ;

– інтеграл в нескінченних межах від щільності розподілу буде

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) dt = 1 \text{ оскільки } F(+\infty) = 1;$$

– крива розподілу розташована не нижче осі абсцис;

– розмірність густини розподілу  $f(t)$  – величина зворотна розмірності випадкової величини. При будь-якому значенні  $t$  буде витримана умова  $0 < F(t) < 1$ .

## 2.2. Основні задачі математичної статистики

Основні задачі математичної статистики, що зустрічаються в практиці, полягають в наступному:

– встановлення законів розподілу випадкових змінних на основі статистичних даних. Закономірності масових випадкових явищ виявляються тим виразніше, чим більше об'єм статистичного матеріалу;

– рішення проблем, які висуває перевірка статистичних гіпотез. Оскільки дослідник, як правило, не має великого об'єму даних, виникає необхідність прийняти певну гіпотезу про характер статистичної закономірності, яка виявляється в дослі-

джуваному явищі, і перевірити її за допомогою наявного матеріалу;  
– оцінка невідомих параметрів різних розподілів і визначення її точності.

### 2.3. Обчислення параметрів емпіричного розподілу випадкової величини

2.3.1. Методика обчислення параметрів вибірки залежить від кількості цифр, якими виражаються значення випадкової величини, а також від об'єму вибірки. Значення вибірки, виражені трох- і більш значними числами. Об'єм вибірки  $N > 25$ . Розрахунок параметрів доцільно виконувати шляхом введення нової випадкової величини  $t'_i = \frac{t_i - t_0}{\Delta t}$ ,

$$t'_i = \frac{t_i - t_0}{\Delta t},$$

де  $t'_i$  – нова випадкова величина;

$\Delta t$  – величина інтервалу;

$t_0$  – деяке початкове значення (звичайно приймають середину середніх значень  $t_i$ );

$t_i$  – середнє значення інтервалу.

2.3.2. Середнє значення випадкової величини  $T$  складе  $\bar{t} = t_0 + a_1 \cdot \Delta t$ .

2.3.3. Середній квадратичний відхил складе  $\sigma = \Delta t \cdot \sqrt{a_2 - a_1^2}$ .

2.3.4. Величини допоміжних коефіцієнтів  $a_1$  і  $a_2$  визначаються по форму-

лах: 
$$a_1 = \frac{\sum m_i \cdot t'_i}{m_i}, \quad a_2 = \frac{\sum m_i \cdot (t'_i)^2}{m_i}.$$

### 2.4. Короткі відомості про закони розподілу випадкової величини

2.4.1. Закон нормального розподілу. Закон нормального розподілу характеризується густиною вірогідності наступного вигляду:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t_i - \bar{t})^2}{2\sigma^2}},$$

де  $e$  – підстава натуральних логарифмів;

$\bar{t}$  і  $\sigma^2$  – відповідно середнє значення і дисперсія випадкової величини.

2.4.2. Випадкова величина розподілена за законом Пуассона, якщо вірогідність її частот при певних значеннях  $m$  може бути представлений рівнянням

$$P_m = \frac{a^m}{m!} \cdot e^{-a}.$$

Тут  $m$  – випадкова величина, яка може приймати позитивні значення, включаючи нуль;

$a$  – деяка позитивна величина, звана параметром закону Пуассона.

2.4.3. Експоненціальний закон розподілу. Випадкова величина  $T$  розподілена по експоненціальному закону, якщо щільність розподілу вірогідності або диференціальна функція при  $t \geq 0$  має вигляд

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t}.$$

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

Інтегральна функція в цьому випадку може бути представлений виразом

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt = 1 - e^{-\lambda t}.$$

Математичне очікування і середнє квадратичне відхилення випадкової величини буде  $\bar{t} = 1/\lambda = \sigma$

#### 2.4.4. Закон розподілу Вейбулла–Гнеденка

Якщо розподіл випадкової величини підкоряється закону Вейбулла–Гнеденка, то диференціальна функція такого розподілу виразиться рівнянням

$$f(t) = \frac{b}{a} \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}$$

Інтегральну функцію розподілу можна представити як

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}$$

де  $a$  і  $b$  – параметри розподілу Вейбулла–Гнеденка, які визначаються на підставі інформації, отриманої в процесі дослідів. В цьому випадку можна рекомендувати декілька методів визначення параметрів по табульованим значенням, при певних величинах  $v$ , методом максимальної правдоподібності, графоаналітичним і методом моментів.

2.4.5. Закон розподілу Релея. В цьому випадку при розподілі моментів виникнення відмов густина вірогідності матиме вигляд

$$f(t) = \frac{t}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}.$$

Закон розподілу Релея застосовується при визначенні довговічності елементів (виробів) з вираженим ефектом старіння (наприклад, механічного устаткування).

### 2.5. Порівняння емпіричних і теоретичних функцій розподілу частот по критеріях згоди

2.5.1. Критерій згоди Персона. Критерій згоди Пірсона при великому числі спостережень зводить помилки до мінімуму, ніж вигідно відрізняється від інших критеріїв згоди. Визначається він з виразу:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(m_i - m'_i)^2}{m'_i},$$

де  $m_i$  – досвідчена частота (кількість випадків) в  $i$ -м інтервалі статистичного ряду;

$m$  – прийнята кількість інтервалів;

$m'_i = N[F(t_{i+1}) - F(t_i)]$  – теоретична частота в  $i$ -м інтервалі статистичного ряду.

Після знаходження  $\chi$  визначається число ступенів свободи:

$$k = n_1 - r - 1/$$

Тут  $k$  – число ступенів свободи;

$n_1$  – число порівнюваних частот (з'єднані частоти на кінцях приймаються за одну частоту);

$r$  – число параметрів теоретичної функції розподілу.

2.5.2. Критерій згоди Колмогорова  $\lambda$ , визначається з виразу

$$\lambda = D_{\max} \cdot \sqrt{N},$$

де  $D_{\max} = \frac{(m_i - m'_i)_{\max}}{N}$

Використовуючи вирази  $\lambda$ , знаходиться  $P(\lambda)$  – вірогідність згоди. Якщо  $\lambda \leq 1,0$ , то вважають, що згода між емпіричним і теоретичним законом розподілу добра.

## 2.6. Об'єм вибірки і оцінка точності отриманих результатів

2.6.1. Показники надійності визначаються методом вибірки. Її об'єм залежить від встановленої точності  $\epsilon$  і довірчої вірогідності отриманих результатів, що задовольняють прийнятий закон розподілу. Якщо емпіричні дані апроксимуються за законом нормального розподілу, то для визначення мінімального об'єму вибірки при заданій довірчій вірогідності можна скористатися теоремою Муавра—Лапласа (закон великих чисел):

$$\alpha \left\{ -t_p \leq \frac{W_n - P}{\sqrt{\frac{P \cdot q}{N}}} \leq +t_p \right\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-t_p}^{+t_p} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \Phi(t_p),$$

де  $\alpha$  – вірогідність отримання результату із заданою точністю висновку;

$t_p$  – розрахунковий коефіцієнт, визначуваний по таблицях залежно від заданої довірчої вірогідності  $\alpha$ ;

$P$  – теоретична вірогідність здійснення даної події;

$N$  – необхідна кількість спостережень;

$q$  – теоретична вірогідність того, що подія не здійсниться,  $q = 1 - P$ ;

$W_n$  – фактично отримана емпірична вірогідність події (частотність);

$\epsilon$  – точність висновку, тобто різниця між фактичним результатом  $W_n$  і теоретичним (вірогідністю)  $\alpha$ ,  $\epsilon = W_n - P$ ;

$\Phi(t_p)$  – нормована функція Лапласа

2.6.2. Для вирішення поставленої задачі теорема Муавра—Лапласа може

бути перетворений і виражений формулою  $\epsilon = W_n - P = \pm \sqrt{\frac{t_p^2 \cdot \sigma^2}{N}}$ , звідки

$$N = \frac{t_p^2 \cdot \sigma^2}{\epsilon^2}$$

2.6.3. Об'єм вибірки при дії нормального закону розподілу можна знайти, використовуючи коефіцієнт варіації  $v$ , з виразу:

$$N = \frac{t_p^2 \cdot v^2}{\epsilon_1^2}.$$

Тут  $\epsilon_1$  – точність обчислення, яка знаходиться в межах  $0,3 \leq \epsilon_1 \leq 0,2$ .

### 3. КІЛЬКІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДІЙНОСТІ

При рішенні практичних задач, пов'язаних з надійністю об'єктів (машин, агрегатів, вузлів, деталей) недостатньо знати тільки якісну оцінку, необхідно мати свій в розпорядженні також оцінку кількісної. Її визначення пов'язано з рядом специфічних труднощів, основними з яких є: велика кількість змінних чинників, що впливають на надійність, і недостатність відомостей про них, відносна складність їх експериментального визначення, оскільки випробування об'єктів (машин, агрегатів, вузлів, деталей) на надійність пов'язано з великими витратами часу і частковим або повним їх руйнуванням.

Кількісні характеристики надійності носять характер вірогідності. Оцінювати і аналізувати їх слідуює залежно від того закону розподілу, якому підкоряються досліджувані величини.

#### 3.1. Кількісні характеристики надійності об'єктів, що не підлягають ремонту

3.1.1. Математично вірогідність безвідмовної роботи протягом напрацювання  $t$  можна представити як вірогідність того, що об'єкт (машина, агрегат, вузол, деталь) напрацює з початку експлуатації  $T$  більше деякого заданого  $t$ , т. т.:

$$P(T) = P(T > t)$$

За статистичними даними вірогідність безвідмовної роботи протягом напрацювання від 0 до  $t$  визначається відношенням числа об'єктів, що пропрацювали безвідмовно до моменту часу  $t$ , до числа працездатних в початковий момент часу  $t = 0$ :

$$P = \frac{N_0 - n}{N_0},$$

де  $N_0$  – початкове число працюючих об'єктів (машин, агрегатів, вузлів, деталей);

$n$  – число об'єктів, що відмовили, до кінця напрацювання.

Із збільшенням числа дослідів  $P$  наближається до  $P(t)$ , тобто істинна вірогідність  $P$  визначається як межа

$$P(t) = \lim_{N_0 \rightarrow \infty} \frac{N_0 - n}{N_0}.$$

Для визначення величини вірогідності безвідмовної роботи, як правило, використовують дані, отримані в процесі експлуатації; разом з тим надійність об'єктів можна визначити і по величині вірогідності відмов. При цьому вірогідність безвідмовної роботи і відмови є протилежними випадковими подіями. Вірогідність відмови  $q(t)$  можна визначити з виразу

$$q(t) = 1 - P(t).$$

Очевидно, що  $q(t)$  на відміну від  $P(t)$  визначається напрацюванням повністю машини (агрегату, вузла, деталі), меншого деякого напрацювання  $t$ :

$$q(t) = P(T < t)$$

Подібну функцію називають функцією розподілу випадкової величини (рис. 3).

3.1.2. Щільність розподілу відмов. Під щільністю розподілу відмов слід розуміти відношення числа об'єктів, що відмовили, за одиницю часу до первинної їх кількості за умови, що всі що вийшли з ладу об'єкти не відновлюються, тобто їх число під час випробувань зменшується. Щільність розподілу відмов одержуємо після диференціювання  $q(t)$ :

$$f(t) = \frac{dq(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt} = -P'(t).$$

За статистичними даними ця величина визначається з формули

$$f(t) = \frac{n(t)}{N_0 \cdot \Delta t},$$

де  $n(t)$  – число виробів, що відмовили, за час  $\Delta t$ ;  
 $N_0$  – первинне число випробовуваних виробів;  
 $\Delta t$  – інтервал часу.

Тоді зв'язок між розглянутими характеристиками

$$q(t) = \int_0^t f(t)dt, \quad P(t) = 1 - q(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_t^{\infty} f(t)dt$$

Ці характеристики дозволяють судити про число об'єктів, які можуть вийти з ладу на якомусь проміжку часу.

Необхідна кількість запасних виробів визначиться як

$$n(t) = f(t) \cdot N_0 \cdot \Delta t.$$

На рис. 4. представлена крива зміни густини розподілу відмов. Ділянки від 0 до  $t_1$  і від  $t_1$  до  $t_2$  відповідають періодам прироблення і нормальної роботи. Ділянка, розташована після  $t_3$ , указує не на збільшення надійності елементів, а на незначну кількість справно працюючих до цього часу елементів

3.1.3. Інтенсивність відмов – умовна щільність вірогідності виникнення відмови невідновлюваного об'єкту, визначується в даний момент часу за умови, що до цього відмов не виникало. За статистичними даними, ця величина визначається з формули

$$\lambda = \frac{n(t)}{(N_0 - n_1) \cdot \Delta t}.$$

Тут  $n(t)$  – число відмов за час  $\Delta t$ ;

$N_0$  – початкове число випробовуваних виробів;

$n_1$  – число виробів, що відмовили, від початку випробувань до початку періоду  $\Delta t$ ;

$\Delta t$  – інтервал часу.

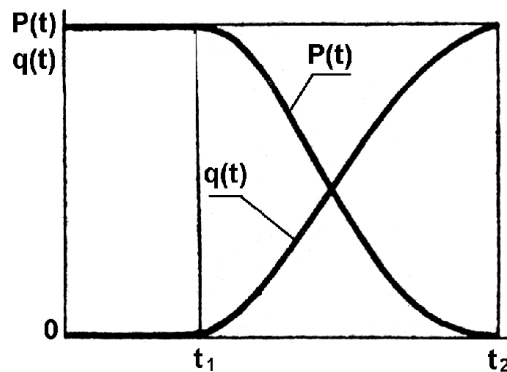


Рис. 3. Залежність вірогідності безвідмовної роботи і вірогідності відмов від часу

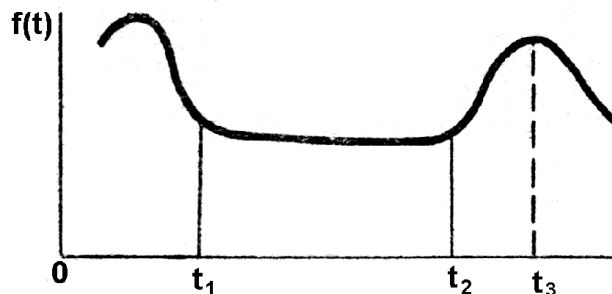


Рис. 4. Крива зміни щільності розподілу відмов машини (агрегату, вузла) в часі



Між частотою відмов і вірогідністю безвідмовної роботи існує наступний зв'язок:

$$\lambda^* = \frac{\frac{n(t)}{N_0 \cdot \Delta t}}{\frac{(N_0 - n_1) \cdot \Delta t}{N_0 \cdot \Delta t}} = \frac{f^*}{P^*}.$$

Зв'язок між вірогідністю безвідмовної роботи і інтенсивністю відмов можна визначити по виразах

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

На рис. 5 представлена крива зміни розподілу інтенсивності відмов залежно від часу роботи об'єкту.

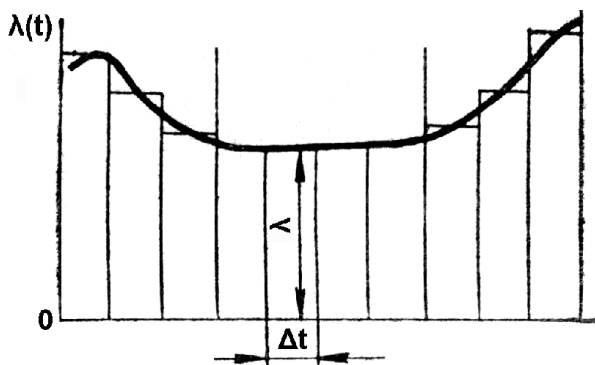


Рис.5. Крива зміни розподілу інтенсивності відмов

3.1.4. Середнє напруцювання на відмову. Надійність неремонтованих об'єктів може бути охарактеризований середнім напруцюванням на відмову, яка визначається при спостереженні за випробуванням  $N$  об'єктів в заданих умовах.

При використуванні статистичних даних середнє напруцювання на відмову об'єктів може бути визначено по формулі

$$t_{\text{сеп}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n},$$

де  $n$  – число відмов об'єктів за період  $t$ ;

$t_i$  – напруцювання  $i$ -го об'єкту до відмові.

Аналітично ця величина може бути представлений виразом

$$t_{\text{сеп}} = \int_{-\infty}^{+\infty} t f(t) dt.$$

Оскільки час негативним бути не може, після інтегрування можна визначити зв'язок  $t_{\text{сеп}}$  з вірогідністю безвідмовної роботи, т. е

$$t_{\text{сеп}} = \int_0^{+\infty} t f(t) dt = -\int_0^{\infty} t P'(t) dt = -tP(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t) dt /$$

## 3.2. Залежність основних характеристик надійності від дії певного закону розподілу

3.2.1. При законі нормального розподілу випадкової величини густина вірогідності має наступний вигляд:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma^2}}.$$

Вірогідність відмови  $q(t)$  визначається інтеграцією функції вірогідності, т. е

$$F(t) = q(t) = \int_0^t f(t) dt = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(t-\bar{t})^2}{2\sigma^2}} dt.$$

При  $\sigma = 1,0$  і  $\bar{t} = 0$  функція розподілу приймає вигляд

$$F_0(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

Середнє напрацювання на відмову визначається як  $t_{\text{сер}} = \int_0^{\infty} P(t) dt$ .

3.2.2. Залежність між основними характеристиками надійності при дії закону розподілу Вейбулла–Гнеденка можна представити наступними рівняннями:

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}, \quad q(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}, \quad P(t) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b} /$$

В даному випадку інтенсивність відмови виразиться як  $\lambda(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1}$ .

Середнє напрацювання на відмову можна записати в вигляді:  $t_{\text{сер}} = \frac{\sigma}{\nu}$ .

3.2.3. Залежності між основними кількісними характеристиками надійності при експоненціальному законі розподілу матиме вигляд

$$F(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t}, \quad P(t) = 1 - q(t) = e^{-\lambda \cdot t}, \quad t_{\text{сер}} = \frac{1}{\lambda}.$$

### 3.3. Характеристики надійності ремонтованих об'єктів

До ремонтованих (відновлюваних) відносяться такі об'єкти, які після ремонтів (відновлення) можуть знову виконувати свої функції. Показники їх надійності обчислюються по напрацюванню. Сумарне напрацювання до виникнення  $r$ -ої відмови можна представити як  $T_r = T^{(1)} + T^{(2)} + \dots + T^{(r)}$  ( $T_{(i)}$  – напрацювання між  $(i-1)$ -ої і  $i$ -ої відмовами).

При цьому час відновлення не враховується. В даному випадку можливі два шляхи оцінки надійності ремонтованих об'єктів: обчислення характеристик потоку відмов і умовних розподілів напрацювання між відмовами.

3.3.1. Математичне очікування числа відмов за інтервал часу  $t_1, t_2$  визначається по формулі  $Mr(t_1, t_2) = \Omega(t_2) - \Omega(t_1)$ ,  
 где  $r(t_1, t_2)$  – число відмов за інтервал часу  $(t_1, t_2)$ .

Проте частіше як показник надійності використовують параметр потоку відмов, який виражається відношенням числа об'єктів, що відмовили, за одиницю

часу до числа випробовуваних за умови, що всі що вийшли з ладу об'єкти замінюються справними (новими або відремонтованими):

$$\omega(t) = \frac{r(\Delta t)}{N\Delta(t)}.$$

де  $r(\Delta t)$  – число об'єктів, що відмовили, за інтервал часу  $\Delta t$ .

Потоки відмов є ординарними, тобто вірогідність появи в один і той же момент двох або більш відмов практично виключена. Якщо випадкові величини напрацювання між відмовами однаково розподілені і незалежні, то параметр потоку відмов пов'язаний з густиною розподілу напрацювання між відмовами  $f(t)$  інтегральним рівнянням Вольтерра другого роду

$$\omega(t) = f(t) + \int_0^t \omega(\tau)f(t - \tau)d\tau.$$

Середня кількість відмов (замін)  $r$  за інтервал  $(t, t + dt)$  пропорційно числу  $N$ , що знаходяться під спостереженням об'єктів і тривалості інтервалу напрацювання  $dt$ :

$$r = N \cdot \omega(t)dt = r_1 + r_2$$

де  $r_1$  — кількість відмов об'єктів з числа, що безвідмовно пропрацювали інтервал  $(0, t)$ ;

$r_2$  – кількість відмов об'єктів з числа тих, що відмовили раніше.

Загальна середня кількість відмов за інтервал  $(t, t + dt)$  складе

$$Ndt\omega(t) = Ndt \left[ f(t) + \int_0^t \omega(\tau)f(t - \tau)d\tau \right].$$

В деяких випадках зручно користуватися перетворенням Лапласа  $\omega(s) = \frac{f(s)}{1 - f(s)}$  звідки  $f(s) = \frac{\omega(s)}{1 + \omega(s)}$ , де  $\omega(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} \omega(t)dt$  перетворення Лапласа для функції  $\omega(t)$ , а  $f(s)$  – перетворення Лапласа для функції  $f(t)$

3.3.2. Напрацювання на відмову. Напрацювання на відмову – це середнє значення часу між відмовами. Вона визначається відношенням сумарного напрацювання відновлюваних об'єктів до сумарного числа їх відмов. Якщо на випробуванні знаходиться один об'єкт, то напрацювання на відмову визначається по формулі

$$t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^r t_i}{r}.$$

Тут  $t_i$  – час справної роботи об'єкту між  $(i - 1)$ -ої і  $i$ -ої відмовами;

$r$  – число відмов за деякий час  $t$ .

Якщо на випробуванні знаходиться  $N$  об'єктів протягом часу  $t$ , то

$$t_{сep} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N r_i}{N}.$$

При дії експоненціального закону розподілу напрацювання на відмову визначається по формулі  $t_{\text{сер}} = \frac{1}{\lambda}$ .

Параметр потоку відмов і напрацювання на відмову характеризують надійність ремонтного виробу, але не враховують час, необхідний на його відновлення. Для цієї мети вводяться додаткові критерії, такі як середній час відновлення, коефіцієнт технічного використання і ін.

3.3.3. Середній час відновлення. Середній час відновлення згідно статистичним даним визначається по формулі

$$T_B = \frac{\sum_{i=1}^m \tau_i}{m},$$

де  $\tau_i$  – тривалість відновлення (включаючи час пошуку);

$m$  – кількість відновлюваних об'єктів.

3.3.4. Коефіцієнт готовності. Згідно статистичним даним коефіцієнт готовності визначається по формулі

$$k_r = \frac{\sum_{i=1}^N \xi_i}{N \cdot T}.$$

Тут  $\xi_i$  – час перебування  $i$ -го об'єкту в працездатному стані ( $i = 1, 2 \dots$ );

$T$  – тривалість експлуатації, що складається з послідовних інтервалів часу роботи і відновлення.

Якщо початок відновлення відбувається негайно, то коефіцієнт готовності може бути визначений із співвідношення

$$k_r = \frac{T_0}{T_0 + T_B},$$

де  $T_0$  – напрацювання на відмову;  $T_B$  – середній час відновлення.

Для оцінки надійності об'єкту по економічних критеріях часто користуються коефіцієнтом річних експлуатаційних витрат

$$k_{\text{ге}} = \frac{C_{\text{ТО}} + C_p}{C_0}.$$

де  $C_{\text{ТО}}$ ,  $C_p$  – відповідно річні витрати на технічні огляди і ремонт об'єкту, грн.;  $C_0$  – вартість об'єкту.

3.3.5. Коефіцієнт технічного використання. Коефіцієнт технічного використання визначається відношенням сумарного часу перебування об'єктів в працездатному стані до добутку числа спостережуваних об'єктів при заданому часі експлуатації

$$k_{\text{ЕКС}} = \frac{\sum_{i=1}^N \xi_i}{N \cdot T_{\text{ЕКС}}},$$

де  $T_{\text{ЕКС}}$  – тривалість експлуатації, що складається з інтервалів часу роботи, технічного обслуговування і ремонтів.

Якщо заданий час експлуатації  $T_{\text{ЕКС}}$  для кожного виробу різний, то формула приймає вигляд

$$k_{\text{ЕКС}} = \frac{t_{\text{сум}}}{t_{\text{сум}} + t_{\text{рем}} + t_{\text{обс}}}$$

Тут  $t_{\text{сум}}$  – сумарне напрацювання всіх об'єктів;  $t_{\text{рем}}$  – сумарний час простоїв через планові і позапланові ремонти всіх об'єктів;  $t_{\text{обс}}$  – сумарний час простоїв через планове і позапланове технічне обслуговування всіх об'єктів.

Час простоїв із організаційних причин не враховується.

3.3.6. Гама - процентний ресурс. Якщо ресурс виробів розподілений з густиною вірогідності  $f(t)$ , то гама - процентний ресурс  $t$  знаходять з виразу  $P(t\gamma) = \gamma/100$ .

Коли відоме математичне очікування  $t$  (середнє значення) і середній квадратичний відхил  $\sigma$ , то залежно від закону розподілу можна запропонувати наступну схему визначення величини гама-процентного ресурсу  $t_\gamma$ .

–при дії закону нормального розподілу гама - процентний ресурс слід знаходити з виразу  $t_\gamma = \bar{t} = N_k \cdot \sigma$ ,

де  $N_k$  – величина, визначується по таблиці квантилей;

–при розподілі за законом Вейбулла–Гнеденка розрахунок величини гама - процентного ресурсу проводиться так само, як і для закону нормального розподілу, визначення квантилей  $N_k/a$  – згідно з таблицями статистичних довідників.

## 4. МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ МАШИН НА НАДІЙНІСТЬ

### 4.1. Основні види і плани випробувань

4.1.1. Основними видами випробувань об'єктів на надійність є визначальні і контрольні. Перші проводяться з метою знаходження кількісних показників надійності для одного з варіантів випробувань після освоєння знов розроблених або модернізованих машин (агрегатів, вузлів), виготовлених за технологією, прийнятою для даного підприємства. Результати цих випробувань служать підставою для оцінки відповідності фактичних показників надійності технічним умовам.

Контрольні випробування на надійність здійснюються з метою перевірки відповідності кількісних показників надійності вимогам стандартів або технічним умовам. Їх терміни передбачаються стандартами або технічними умовами на дані об'єкти.

4.1.2. Найбільше розповсюдження при випробуванні автотракторної техніки отримали плани спостережень  $N, U, N$ ;  $N, U, T$ ;  $N, U, r$ . Кількісні характеристики надійності для неремонтованих об'єктів визначаються при випробуваннях за планом  $N, U, N$ . План  $N, U, T$  використовують в тих випадках, коли тривалість випробування обмежується. В цьому випадку до граничного стану доводиться тільки частина випробовуваних виробів.

4.1.3. План випробувань  $N, U, N$ , при якому випробовуються  $N$  виробів. Спостереження ведуться до виникнення відмов або граничного стану у всіх виробів. Вироби, що відмовили, новими або відремонтованими не замінюються

(символ  $U$  вказує, що заміна виробів, що відмовили, або що досягли граничного стану не проводиться);

4.1.4. План випробувань  $N, U, T$  при якому випробовуються  $N$  виробів, спостереження ведуться протягом напрацювання  $T$ , вироби, що відмовили, не замінюються;

Оскільки напрацювання до граничного стану виробів має характер вірогідності, те визначення характеристик надійності слід проводити, виходячи з відповідного закону розподілу.

При законі нормального розподілу план  $N, U, T$ , показники надійності можна визначити з рівнянь

$$\bar{t} = k\sigma + T, \quad \sigma = \frac{T - \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i(m_i)}{\frac{N - N_0}{N_0} \cdot f(k) - k},$$

де  $T$  – встановлене напрацювання до кінця випробування;

$N$  – загальна кількість виробів, що знаходяться на випробуванні;

$N_0$  – число виробів, що відмовили, за напрацювання  $T$ ;

$t_i$  – напрацювання  $i$ -го виробу повністю або до граничного стану, або середнє значення напрацювання в прийнятому інтервалі;

$k$  – коефіцієнт;  $f(k)$  – функція коефіцієнта  $k$ .

Якщо діє закон розподілу Вейбулла–Гнеденка, то параметри  $a$  і  $b$  функції розподілу визначаються з рівнянь:

$$\left(\frac{N_0}{b}\right) + \sum_b \ln t_i \cdot \left[ \sum_{i=1}^{N_0} t_i^b + (N - N_0) \cdot T^b \right] -$$

параметр  $b$

$$N_0 \cdot \left[ \sum_{i=1}^{N_0} t_i^b \ln t_i + (N - N_0) \cdot T^b \ln T \right] = 0;$$

параметр  $a$

$$a = \sqrt[b]{\frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i^b + (N - N_0) \cdot T^b}{N_0}}. \text{ Потім знаходимо } \bar{t}, \sigma \text{ і } v.$$

4.1.5. План випробувань  $N, U, r$  при якому випробовуються  $N$  виробів, спостереження ведуться до виникнення  $r$  відмов або граничних станів, вироби, що відмовили, не замінюються;

При плані випробувань  $N, U, r$  коефіцієнт  $k$  і його функцію  $f(k)$  визначають методом послідовних підстановок з рівняння

$$\frac{\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r t_i^2 - \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r t_i\right)^2}{\left(t_r - \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r t_i\right)^2} = \frac{1 + \frac{N-r}{r} \cdot k \cdot f_1(k) - \left(\frac{N-r}{r}\right)^2 \cdot f_1^{2(k)}}{\left[\frac{N-r}{r} \cdot f_1(k) - k\right]^2}.$$

Тут  $r$  – число відмов, до отримання яких проводяться спостереження;

$t_r$  – напрацювання виробу до отримання  $r$  відмов.

4.1.6. Крім того при випробуванні на надійність використовуються плани  $N, R, T$  і  $N, R, r$ . При проведенні випробувань згідно плану  $N, R, T$  випробовуються  $N$  виробів, спостереження ведуться протягом напрацювання  $T$ , вироби, що відмовили, замінюються новими або ремонтуються і знову беруть участь у випробуванні. При використуванні лана  $N, R, r$  випробовуються  $N$  виробів, спостереження ведуться до виникнення  $r$  відмов або граничних станів, вироби, що відмовили, замінюються новими або ремонтуються і знову беруть участь у випробуванні.

## 4.2. Методи прискорених випробувань

4.2.1. Разом з визначальними і контрольними, широке застосування в практиці знаходять прискорені випробування, в процесі яких одержують своєчасні і достатньо достовірні дані. Оскільки прискорені випробування проводять різними методами, то для оцінки їх ефективності, незалежно від умов форсування, використовують коефіцієнт прискорення

$$K_y = \frac{t_n}{t_\phi},$$

де  $t_n$  – напрацювання виробу в нормальних умовах експлуатації до певного граничного стану;

$t_\phi$  – час випробування у форсованому режимі до того ж граничного стану.

4.2.2. Для виробів, які відмовляють унаслідок зносу, максимально допустимі значення навантаження  $P_{\max}$  і швидкості відносного ковзання  $V_{\max}$  слід встановлювати, виходячи з таких міркувань. При лінійній залежності зносу від  $P$  і  $V$  (абразивне зношування) коефіцієнт прискорення приймає вигляд

$$k_y = \frac{P_{\max} \cdot V_{\max}}{P_{\text{cp}} \cdot V_{\text{cp}}}.$$

Якщо ліквідовані холості ходи і простой, що дозволяє значно швидше досягти необхідних результатів, коефіцієнт прискорення можна визначити з вираження

$$k_y = \frac{t_p + t_x}{t_p}.$$

Тут  $t_p$  – час безперервної роботи;  $t_x$  – час холостих ходів.

Прискорені випробування, пов'язані з відмовами в результаті зносу, можна припинити, якщо встановлена функціональна залежність величини зносу від напрацювання.

4.2.3. Середні ресурси при експлуатації і прискорених випробуваннях є величинами випадковими, отже, коефіцієнт прискорення — випадкова величина. Тому точність його визначення залежить від об'єму випробувань при визначенні середніх ресурсів.

Для оцінки точності коефіцієнта прискорення можна скористатися виразом

$$k_n = \bar{k}_n \cdot (1 \pm t_\alpha \cdot \sigma_k) = \bar{k}_n \cdot (1 \pm t_\alpha) \cdot \sqrt{\frac{v_\alpha^2}{n_\alpha} + \frac{v_c^2}{n_c}},$$

$$\text{де } \bar{k}_n = \frac{t_3}{t_c}.$$

4.2.4. Якщо відомий середній час безвідмовної роботи виробу на стенді можна сподіватися отримати гарантований час експлуатації

$$t_{\text{э.гар}} = t_{c.\text{min}} \cdot k_{n.\text{min}} = \bar{t}_c \cdot \bar{k}_n \cdot \left(1 - t_\alpha \cdot \frac{v_3^2}{\sqrt{p_c}}\right) \cdot \left(1 - t_\alpha \cdot \sqrt{\frac{v_3^2}{n_3} + \frac{v_c^2}{n_c}}\right).$$

Для дотримання подібних стендових і експлуатаційних випробувань необхідно, щоб коефіцієнт прискорення був постійним для всіх значень  $t_c$  і  $t_3$  і дотримувалася рівність коефіцієнтів варіації безвідмовної роботи з урахуванням їх довірчих меж. При перекритті довірчих інтервалів вважають, що умови подібності дотримані.

### 4.3. Випробування матеріалів на зносостійкість

В загальній системі експериментальних досліджень механічних властивостей матеріалів виділяються своєю різноманітністю методи і засоби випробувань на зносостійкість. Слід зазначити, що практично склалися чотири категорії випробувань на износостойкость<sup>1</sup>. Вони відрізняються ступенем наближення до експлуатаційних умов, визначеністю і чистотою відтворення процесу зношування.

4.3.1. Перша категорія. Випробування проводяться в лабораторних умовах для виявлення окремих властивостей матеріалу при зношуванні (деформаційно - міцнісні властивості поверхневого шару, схильність до адгезії, взаємодія з мастилом, теплофізичні характеристики і т. п.). В цьому випадку матеріали випробовуються шляхом стирання їх об наждачне полотно (метали і їх сплави, мінерали, пластмаси, дерево, гумові композиції і ін.). При цьому навмисно виключають всі чинники, здатні викликати зміни властивостей матеріалу, і достовірно визначають той або інший процес руйнування поверхневого шару. Результати таких випробувань дозволяють оцінити міцнісні властивості поверхневого шару, які в деяких умовах абразивного зношування визначають зносостійкість матеріалу.

4.3.2. Друга категорія. Випробування проводяться в лабораторних умовах на зразках матеріалу, при цьому відтворюється певний вид зношування за рахунок регламентації умов зовнішньої дії і виключається вплив конструктивних чинників і яких-небудь побічних явищ. При таких випробуваннях можна отримати ряд зносостійкості, якісно відповідний експлуатаційним даним, якщо конструктивні чинники мало позначаються на зношуванні деталей.

4.3.3. Третя категорія. Випробування деталей і сполучень проводяться на стендах з метою оцінки показників зносостійкості з урахуванням виявлення конструктивних і технологічних чинників. Випробовуються практично будь-які деталі і вузли, а також спеціально виготовлені зразки, якщо при цьому виключається вплив на зносостійкість конструктивних чинників.

4.3.4. Четверта категорія – експлуатаційні випробування, які представляють заключну ланку в системі випробувань матеріалів і деталей на зносостійкість. Їх результати мають високий ступінь достовірності. Істотне підвищення точності до-



сягається при випробуваннях на спеціальних полігонах або добре підготовлених виробничих ділянках.

#### 4.4. Контроль надійності виробів

4.4.1. Якщо в результаті випробувань визначений один з показників надійності, наприклад, середній час безвідмовної роботи  $t_{\text{сер}}$ , і відоме нижнє нормативне значення  $t_n$ , то слід обчислити його інтервальну оцінку при довірчій вірогідності  $\alpha$ , використовуючи вираз  $t_{\text{сер.min}}^{\text{max}} = t_{\text{сер}} \pm \Delta t$ .

Умову приймання виробу можна записати як

$$t_{\text{сер.min}} \geq t_n \text{ або } t_{\text{сер}} \geq t_n + \Delta t .$$

З останнього виразу виходить, що середнє значення надійності повинне бути «гарантовано», тобто більше нормативного.

Умову браку можна представити як

$$t_{\text{сер.max}} \leq t_n \text{ або } t_n \geq t_{\text{сер}} + \Delta t .$$

4.4.2. В практиці трапляється, що виріб не може бути прийнятий, але забракувати його не можна:  $t_n - \Delta t < t_{\text{сер}} < t_n + \Delta t$ .

Подібну ситуацію називають умовою продовження випробувань.

4.4.3. При законі нормального розподілу  $t_i$   $\Delta t = \frac{t_\alpha \cdot \sigma_t}{\sqrt{N}}$ , тоді

$$t_{\text{сер}} \geq t_n + \frac{t_\alpha \cdot \sigma_t}{\sqrt{N}} \text{ – умова прийняття виробу;}$$

$$t_{\text{сер}} \leq t_n - \frac{t_\alpha \cdot \sigma_t}{\sqrt{N}} \text{ – умова вибраковки виробу;}$$

$$t_n - \frac{t_\alpha \cdot \sigma_t}{\sqrt{N}} < t_{\text{сер}} < t_n + \frac{t_\alpha \cdot \sigma_t}{\sqrt{N}} \text{ – умова продовження випробувань.}$$

4.4.4. Якщо  $t_i$  розподілені за законом Вейбулла–Гнеденка, то умова прийняття виробу

$$t_{\text{сер}} \geq t_n + (t_{\text{сер}} \cdot \sqrt[b]{r_1} - t_{\text{сер}}) .$$

Умова браку

$$t_{\text{сер}} \leq t_n - (t_{\text{сер}} - t_{\text{сер}} \cdot \sqrt[b]{r_3})$$

Продовження випробування можна представити як

$$t_n - (t_{\text{сер}} - t_{\text{сер}} \cdot \sqrt[b]{r_3}) < t_{\text{сер}} < t_n + (t_{\text{сер}} \cdot \sqrt[b]{r_1} - t_{\text{сер}}) .$$

4.4.5. При необхідності продовження випробувань для ремонтваних виробів слід збільшити час їх проведення з метою отримання великого числа відмов, а для неремонтваних збільшити число зразків і провести додаткові випробування

Приведена методика дозволяє здійснювати контроль і таких показників надійності, як вірогідність безвідмовної роботи, середній час ремонту (відновлення), коефіцієнт готовності і ін.

## 4.5. Контрольна обкатка об'єктів

4.5.1. Для перевірки надійності об'єктів первинного і вторинного виробництва робиться обкатка, головне призначення якої полягає у визначенні дефектів відновлених (виготовлених) деталей і збірки в цілому.

Обкатка об'єктів вторинного виробництва має свої специфічні особливості, пов'язані з використанням при збірці деталей з номінальними і ремонтними розмірами і допустимим зносом. В цьому випадку в сполученнях можливі значні відхилення зазорів і натягу від номінальних величин, що усувається в процесі обкатки, якому попереджує прироблення деталей з метою виправлення погрешностей, допущених при збірці сполучень, вузлів і агрегатів.

В результаті прироблення досягається висока якість робочих поверхонь, стабілізуються коефіцієнт тертя, температура, з'являється стійкість механічного коефіцієнта корисної дії.

4.5.2. Якщо відома кількість об'єктів ( $N$ ), що знаходяться на випробуванні, і час настання відмов — для кожного об'єкту, то емпірична функція параметра потоку відмов може бути представлений виразом

$$\omega(t_i) = \frac{r_i}{N \cdot \Delta t} \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

де  $n$  – кількість відмов в інтервалі  $\Delta t$ .

При достатній кількості  $N$  даний вираз апроксимується функцією

$$\omega(t) = \omega_0 + \omega_1 \cdot e^{-\alpha t}.$$

де  $\omega_0$ ,  $\omega_1$ ,  $\alpha$  – параметри, визначені методом найменших квадратів.

4.5.3. Обкатку можна вважати закінченою у момент часу  $t_{об}$  при умові

$$\frac{\omega(t_{об}) - \omega_0}{\omega_0} \leq k,$$

де  $k \cong 0,03 \dots 0,05$ .

Оптимальний період обкатки об'єкту можна знайти з формули

$$t_{об} = -\frac{1}{\alpha} \cdot \ln k = \frac{3}{\alpha}.$$

## 5. ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА, ПРОГНОЗУВАННЯ

### 5.1. Короткі відомості про технічну діагностику

5.1.1. Оцінити надійність і працездатність об'єктів допомагає технічна діагностика – галузь науки про експлуатацію і ремонт машин, вивчаюча і встановлююча ознаки несправностей (відмов). Діагностика включає комплекс досліджень і логічний аналіз, визначаючих несправності і технічний стан машин. В діагностику входять методика визначення несправностей (методика збору і діагностична техніка), навчання о різних ознаках (симптомах), спостережуваних при появі несправностей або відмов механізмів (семіотики), методика логічних міркувань, суть якої полягає в критичній оцінці отриманих при дослідженні даних, на основі чого ставиться діагноз.

5.1.2. Розрізняють діагностику загальну і поелементну. При загальній діагностиці визначається працездатність машини в цілому або виявляються пошкодження, яким дається якісна характеристика. При діагностиці окремих елементів знаходять несправний вузол машини. Загальна діагностика майже у всіх випадках менш складна, ніж поелементна.

Технічну діагностику машин (агрегатів) можна розділити також на заводську і експлуатаційну. Мета першої полягає в перевірці в заводських умовах основних експлуатаційно-технічних якостей знов виготовлених або капітально відремонтованих машин. Друга включає методи періодичної перевірки надійності і технічної готовності агрегатів машини без їх розбирання, визначення відповідності характеристик і параметрів необхідним значенням, прогнозування надійності і встановлення переліку і об'єму робіт, виконуваних під час технічного обслуговування і поточного ремонту.

5.1.3. Технічна діагностика машин при агрегатно-вузловому методі ремонту дозволяє значно підвищити якість і понизити трудомісткість робіт, пов'язаних з технічним обслуговуванням машинно-тракторного парку. Потреба в технічному обслуговуванні не може бути визначений однозначно ресурсом того або іншого агрегату. Кожному періоду часу відповідає не одне, а ціла безліч різних станів. Діагностика ставить своєю задачею усунути цю невизначеність і виявити з безлічі станів єдине, в якому в даний момент знаходиться агрегат (вузол) машини.

5.1.4. Практичний інтерес для діагностики технічного стану агрегатів і вузлів машин, що використовуються в автотракторному виробництві, без їх розбирання, представляє виброметрическа і акустична діагностика.

При виброакустичній діагностиці розрізняють два характерні імпульси пружних і звукових коливань: макроскопічний і мікроскопічний. Макроскопічні імпульси виникають при роботі машини або утворенні великих зазорів (спалахи в циліндрах двигуна, удари клапанів при посадці, зубів шестерень при виході їх з того, що зачіпляє і т. д.). Поява мікроскопічних імпульсів пов'язана з дискретною природою сил тертя. Віддача енергії коливань (вібрацій) того або іншого джерела в основному залежить від механічного опору прилеглих частин. Частота вібрації залежить від частоти вимушених коливань (частоти зміни динамічного навантаження або зачіпляє) і власних коливань. Частота вимушених коливань, що виникає при певній кількості контактів зубів шестерні в секунду, визначається по формулі

$$\omega_v = \frac{n \cdot N}{60},$$

де  $n$  – число оборотів шестерні в хвилину;  $N$  – число зубів шестерні.

Частота власних коливань може бути знайдений з виразу

$$\omega_c = \frac{\psi}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Тут  $k$  – жорсткість зубів;

$m$  – приведена маса зубчастих коліс;

$\psi$  – коефіцієнт, що враховує розподіл мас і пружності в системі.

Якщо між двома зв'язаними деталями є максимальний зазор  $\delta$  і відносно переміщення відбувається згідно із законом  $\delta = \delta_0 \cdot \sin \omega t$ , то прискорення вібрації виразиться як  $\ddot{\delta} = -\delta_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t$ .

Кінетичну енергію вібрації в загальному вигляді можна представити як

$$E = \frac{m \cdot v^2}{2} = m \cdot \delta \cdot \ddot{\delta} = P \cdot \delta$$

Отже, енергія вібрації пропорційна зазору і квадрату частоти коливань; вона може бути визначений за допомогою приладів, реєструючих прискорення вібрації

## **5.2. Визначення граничного стану деталей, сполучень, вузлів і механізмів машин**

5.2.1. Зміна розмірів і геометричної форми деталей, якщо вони є робочими органами машини, як правило, приводить до погіршення якості її роботи, тобто до збільшення витрат потужності, витрати експлуатаційних матеріалів на одиницю вироблюваної роботи, до більш швидкого зношування механізмів.

Для визначення граничних величин зносу деталей або сполучень використовуються технічний, технологічний (якість роботи) і економічний критерії. Необхідно відзначити, що, хоча кожний з названих показників у принципі прийнятний для встановлення граничної величини зносу будь-якої деталі (сполучення), проте основним критерієм залежно від призначення тієї або іншої деталі може бути тільки один. Інші або не можуть бути використані практично, або матимуть допоміжне контрольне значення.

5.2.2. Достатньо надійний спосіб визначення ресурсу деталей – мікрометрирование після окремих періодів роботи машини (агрегату, вузла, сполучення), яке дозволяє отримати дані для подальшої обробки методами математичної статистики з метою знаходження статистичних характеристик зносу – математичного очікування (середнього арифметичного значення), дисперсії, моди, медіани, емпіричних кривих розподілу і відповідності їх закону розподілу. В цьому випадку необхідно враховувати основні чинники, що роблять вирішальний вплив на достовірність і величину міжремонтного ресурсу, у тому числі ресурсу початкових зразків.

5.2.3. При встановленні величини зносу, коли деталі не можна застосовувати в подальшій роботі без відповідного відновлення, необхідно знайти граничну величину зносу і спотворення геометричної форми.

## **5.3. Теоретичне обґрунтування граничних станів посадок в сполученнях**

5.3.1. Будь-яке сполучення деталей в механізмі характеризується посадкою, вибір якої проводиться з урахуванням забезпечення надійної роботи сполучення. Для зменшення тертя і зношування робочі поверхні покривають змащувальним шаром, який в деяких випадках є засобом ущільнення.

Витрата рідини виражається наступною залежністю (рис. 6.):

$$q = b \cdot s \cdot \frac{v}{2} - \frac{b \cdot s^2}{12\eta} \frac{dk}{dx},$$

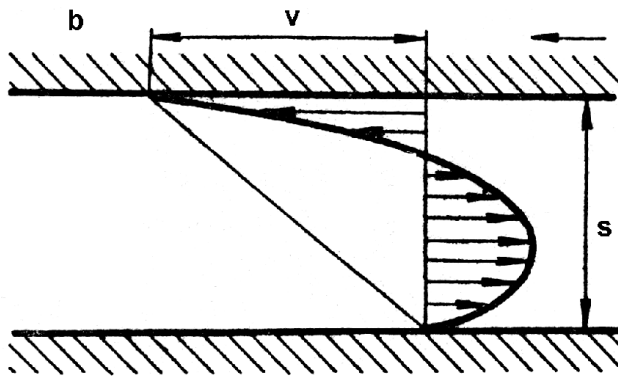


Рис. 6. Профіль швидкостей масляних шарів, що рухаються під тиском між рухомою і нерухомою площинами

де  $q$  – витрата рідини;  
 $b$  – ширина каналу;  
 $s$  – висота каналу (зазор);  
 $v$  – швидкість переміщення однієї площини щодо іншої;  
 $\eta$  – абсолютна в'язкість масла;  
 $dk/dx$  – зміна тиску у напрямі потоку

Може виявитися, що в результаті зносу деталей сполучення і збільшення зазору між ними мастило під робочим тиском витече, нормальна робота буде порушена. Такий зазор

вважається граничним.

5.3.2. При визначенні граничних значень зазору в з'єднаннях типу вал-вальниця, працюючих в умовах рідинного тертя, ва основу приймається гідродинамічна теорія мастила

Для знаходження питомого навантаження на вальницю запропонована залежність

$$k = \frac{\eta \cdot \omega}{\psi^2} \cdot f$$

Тут  $k$  – питоме навантаження на вальницю;

$\omega$  – кутова швидкість;

$\psi$  – відносний зазор (відношення абсолютного зазору до діаметра вала;

$f$  – емпіричне рівняння, яке справедливо для значення  $\lambda$  в межах від 0,5 до 0,95,  $f = 1,04/(1 - \lambda)$ ;

$\lambda$  – відносний ексцентриситет (відношення абсолютного ексцентриситету до половини зазору).

Оптимальна величина зазору складе

$$s_{\text{опт}} = 0,467d \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot n}{k \cdot C}}$$

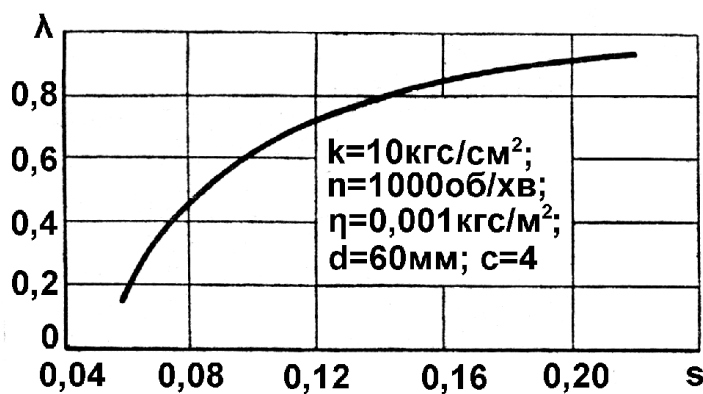


Рис. 7. Зміна відносного ексцентриситету  $\lambda$  із збільшенням зазору ( $s$ )

На підставі цього рівняння можна побудувати графічну залежність між зазором і відносним ексцентриситетом, вважаючи решту величин постійною (рис. 7).

Граничне значення розширення зазору в з'єднаннях вал – вальниця при роботі з постійним навантаженням складе

$$S_{\text{max}} = 13,6 \cdot \frac{\eta \cdot n \cdot d^2}{C \cdot k}$$

Найменший допустимий

зазор

$$s_{\text{нд}} = 0,3d \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot n}{k \cdot C}}$$

У ряді з'єднань надмірне зростання зазору може викликати ударні навантаження (поршневий палець-втулка шатуна). В даному випадку розширення зазору можна визначити по формулі

$$s_{\text{max}} = 21,5 \cdot l \cdot \sqrt{\frac{\eta}{k \cdot t}}$$

де  $l$  – довжина опорної частини втулки;

$k$  – середній питомий тиск в тактах стиснення і розширення;

$t$  – час, протягом якого діє питомий тиск;

$\eta$  – абсолютна в'язкість мастила,

Сила удару змінюється пропорційно кубічному кореню з величини зазору в четвертому ступені, тобто  $T = a \cdot \sqrt[3]{s^4}$ . Тут  $a = \frac{1,78 \cdot m \cdot u^2}{\sqrt[3]{R^4}} = \text{const}$ ;  $u$  – постійна швидкість обертання пальця кривошипа;  $m$  – маса комплекту поршня;  $R$  – радіус кривошипа.

Дана залежність показує, що сила удару інтенсивно росте при збільшенні зазору.

5.3.3. Граничний зазор між гільзою і плунжером паливного насоса дизельного двигуна слід оцінювати по тиску, під дією якого протягом певного часу витікає певний об'єм палива. Якщо прийняти ущільнюючу довжину плунжера при його ході у втулці за постійну величину, то витрату палива можна знайти з виразу

$$q = \frac{b \cdot s^3 \cdot k}{12\eta \cdot l_{\text{п}}}$$

де  $l_{\text{п}}$  – довжина ущільнюючої частини плунжера.

Цей вираз показує, що  $k = f(s)$  і має гіперболічну залежність (рис. 8),  $b \cdot s^3 = \text{const}$ . Крива залежності  $b \cdot s^3 = \text{const}$  (рис. 8) характеризує різке падіння тиску при зростанні зазору в початковий період. Встановити граничний зазор по технічному критерію не представляється можливим, це досягається при використуванні економічного показника. Із зростанням зазору між гільзою і плунжером порушується нормальна подача палива, що негативно впливає на потужність двигуна і економічність його роботи.

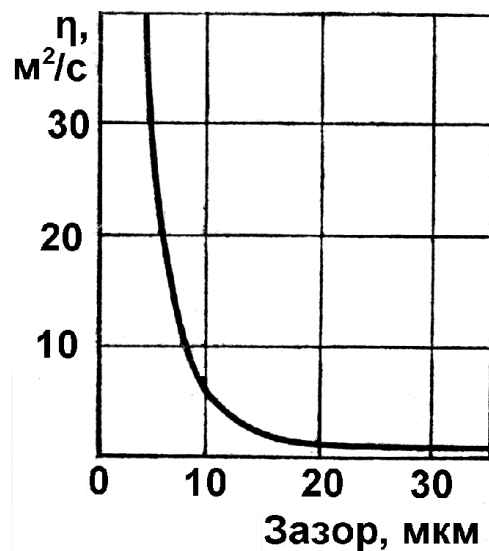


Рис.8. Крива залежності  $b \cdot s^3 = \text{const}$

5.3.4. З'єднання поршень – циліндр двигуна внутрішнього згоряє регламентується параметрами посадки поршня в циліндрі. Характеристикою ущільнення тут може служити вираз

$$q = b \cdot s \cdot \frac{v}{2} \pm \frac{b \cdot h^3}{12\eta} \frac{dk}{dx}$$

Найбільший тиск газів, що видують мастило, спостерігається, коли поршень проходить мертву крапку ( $i = 0$ ). Отже, у верхній частині поршня зазор збільшується. За допомогою поршневих кілець цей недолік усувається. Необхідно помітити, що потужність і витрата палива в двигуні змінюються трохи навіть при великих зазорах в сполученнях циліндро-поршневої групи. Проте збільшення зазору викликає підвищену витрату масла, оскільки із зносом поршневих кілець росте їх насосна дія і посилюється подача масла в камеру згорання. Граючи роль додаткового палива, воно згоряє і призводить до того, що витрата палива майже не змінюється. У зв'язку з цим не вдається відзначити і різкого падіння потужності. От чому граничний зазор в сполученнях деталей циліндро - поршневої групи рекомендується встановлювати по витраті масла.

5.3.5 З'єднання робочих елементів вальниць кочення характеризуються наявністю радіальних зазорів  $S_r$ , зазорів в осьовому напрямі  $S_o$  (осьова гра) і кутовим зсувом  $\beta$  (кут повороту вальниці навкруги його центру в площині, що перетинає вісь) – рис. 9.

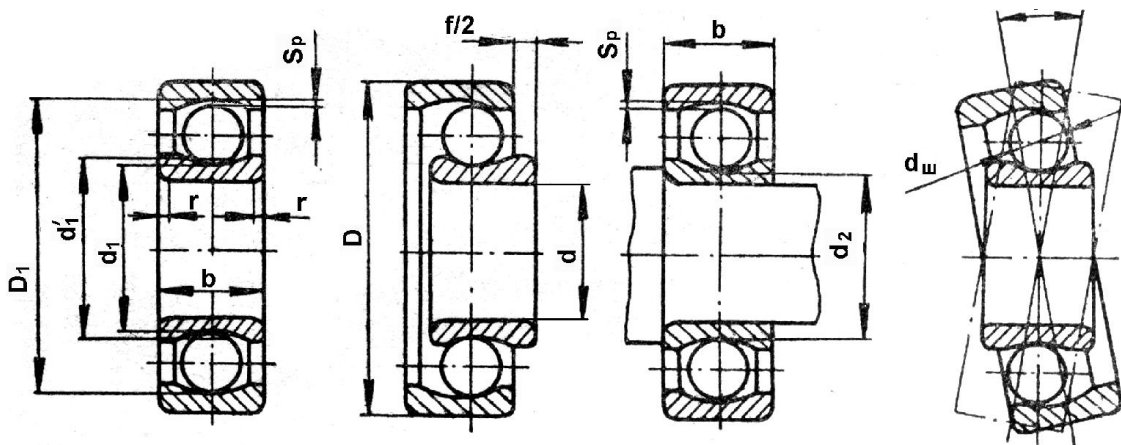


Рис. 9. Види зазорів в вальницях кочення

Радіальний робочий зазор підшипника  $S_p$ , як правило, менше ніж на кресленку і визначається по формулі

$$S_p = S_r - (S_1 + S_t),$$

де  $S_r$  – зазор на кресленку;

$S_1$  – зазор, що виникає в результаті розширення внутрішнього кільця від натягу або зменшення зовнішнього кільця, яке запресоване в корпус;

$S_t$  – зазор, що утворюється в результаті різниці температур при нагріві кілець.

У свою чергу  $S_t = \alpha \cdot d_1' \cdot (t_2 - t_1)$ , де  $\alpha$  – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу кільця, рівний 0,00011;  $d_1'$  – приведений зовнішній діаметр внутрішнього кільця вальниці.

$$\left( d'_1 = d + \frac{D-d}{4} \right); t_2 - t_1 \approx 5 \dots 10 \text{ C}^\circ.$$

Збільшення зовнішнього діаметра «приведеного кільця» з прямокутним перетином (площа, а також ширина його і кільця вальниці однакові) знаходиться з виразу

$$\Delta d'_1 = s \cdot H \cdot \frac{d}{d + 5,85(1 - s^2)},$$

де  $s$  – відношення  $d/d'_1$ ;

$H$  – ефективний натяг, що приймається в середньому рівним 0,8 від величини натягу, що утворюється в посадці;

$d$  – внутрішній діаметр кільця.

Найхарактерніші ознаки порушення нормального стану поверхонь вальниць кочення – поява на них тріщин, фарбування, відшаровування, лущення, раковин, подряпин, глибоких рисок, слідів затискання і заїдання. При перерахованих дефектах в деталях, незалежно від ступеня збільшення зазорів в підшипниках, їх стан слідую вважати граничним.

5.3.6. Зі всіх різновидів шпонкових з'єднань в автотракторному машинобудуванні найширше застосування отримали призматичні і сегментні.

Пошкодження шпонки може відбуватися через зім'яте, вигин або зріз бічних граней, в небезпечному перетині  $a - a$  (рис. 10). Для попередження руйнування бічних граней на її робочих ділянках повинна дотримуватися умова, що

$$P \leq \frac{h}{2} \cdot l \cdot \sigma_{зм}.$$

Тут  $l$  – розрахункова довжина шпонки;

$\sigma_{зм}$  – допустима напруга на зм'яття.

Поставимо замість  $P$  значення оберտального

$$M_{об}, \text{ отримаємо: } l = \frac{4M_{об}}{h \cdot d \cdot [\sigma]_{см}}.$$

Міцність шпонки на зріз (в небезпечному перетині  $a - a$ ) дотримується при

$$\text{умові } l = \frac{2M_{об}}{b \cdot d \cdot [\tau]_{зр}},$$

де  $[\tau]_{зр}$  – допустима напруга матеріалу на зріз.

В автомобілях і тракторах застосовуються евольвентні і прямобочные шліцові з'єднання. Оскільки змінання розмірів шліців відбувається головним чином через змяття матеріалу, з якого вони виготовлені, основним критерієм надійності їх з'єднання є величина виникаючого в них напруження  $[\sigma]_{зм}$ . Відсутність змяття в шліцовому з'єднанні можна представити залежністю

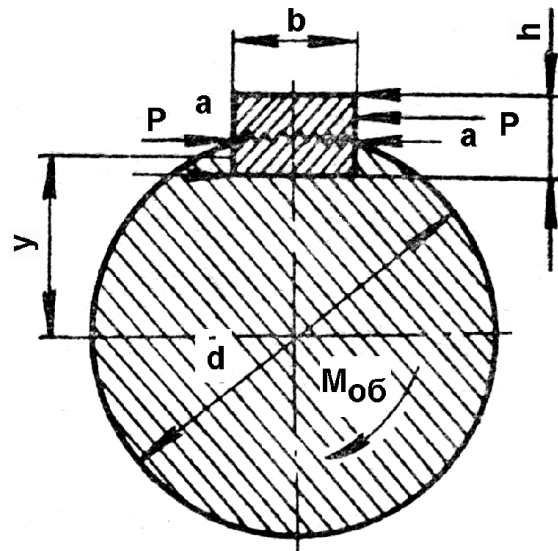


Рис. 10. Розрахункова схема шпонкового з'єднання



$$\sigma_{зм} = \frac{M_{об}}{\psi \cdot l_3 \cdot R_{cp} \cdot F \cdot z} \leq [\sigma]_{зм},$$

де  $M_{об}$  – обертальний момент;

$\psi$  – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу навантаження по робочих поверхнях зубів;

$l_3$  – робоча довжина зуба, однакова з довжиною маточини;

$R_{cp}$  – середній радіус зуба.

Приведені розрахункові рекомендації є необхідними при перевірочному аналізі, що проводиться з метою визначення можливості повторного використання деталей з шліцьовими елементами. Такий аналіз дозволяє судити про зміну міцності характеристик в зубах шліцьових з'єднань.

## 6. ОСНОВНІ ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ І РЕМОНТОПРИДАТНОСТІ МАШИН

### 1.1. Шляхи підвищення надійності автотранспорту

5.1.1. Надійність машин повинна забезпечуватися на всіх стадіях їх створіння і експлуатації. З цією метою складаються конструктивні, технологічні і експлуатаційні заходи.

В загальному вигляді названі чинники можна представити таким чином:

$$N_{П} = N_{ПР} \geq N_{Э}, N_{П} < N_{ПР} \geq N_{Э}$$

де  $N_{П}$  – надійність при проектуванні;  $N_{ПР}$  – виробничий рівень надійності;  $N_{Э}$  – надійність при експлуатації.

Виробничий (технологічний) і експлуатаційний (кожний окремо) рівні надійності машин (агрегатів, вузлів, деталей, є багатозначними, тобто характеризуються значними коливаннями по величині. Це спостерігається навіть у тому випадку, коли машини (агрегати, вузли, деталі) однієї марки експлуатуються в однакових умовах. Природно, рівень надійності буде великим або меншим, якщо є відмінності в умовах експлуатації. Тому на кожному етапі, починаючи проектуванням і кінчаючи ремонтом машин (агрегатів, вузлів, деталей), необхідно здійснювати конкретні заходи щодо підвищення їх надійності.

6.1.2. При проектуванні і створенні нових машин (агрегатів, вузлів, деталей) конструктор повинен орієнтуватися на такі геометричні форми, розміри деталей і умови їх роботи, при яких швидкість зношування буде мінімальною.

Істотний вплив на надійність створюваних машин надають оптимізація навантаження і швидкості ковзання деталей, вибір найраціональніших посадок в сполученнях, пристроїв для змащування поверхонь, що труть, і т.д. Тому при проектуванні слід комплектувати виріб надійними деталями, що раніше виявилися в експлуатації, застосовувати нові, прогресивні матеріали, враховувати оптимальну технологічність конструкції, простоту і дешевизну збірки, розбирання і ремонту, застосування уніфікованих і стандартних деталей, вузлів і механізмів.

Безвідмовність роботи машин багато в чому залежить від співвідношення середніх значень діючих сил і несучої здатності (граничного навантаження), їх можливих відхилень в процесі експлуатації. Отже, при проектуванні нових машин

конструктор на основі техніко-економічних даних повинен встановити певний запас міцності.

Для ухвалення оптимального рішення цікавий математичний метод, запропонований Я. Ю. Шацем. Єство методу полягає в тому, що варіант, що задовольняє оптимальним вимогам, вибирається за допомогою обчислювальної техніки. В цьому випадку гарантується повна об'єктивність у виборі конструкції.

6.1.3. Технологічні методи підвищення надійності машин полягають, в першу чергу, в застосуванні для виготовлення деталей матеріалів з поліпшеними властивостями, отриманими в процесі відливання, зварки, обробки тиском і механічним шляхом. Тому важливим в підвищенні надійності є вибір матеріалу і якість виконання всіх подальших операцій.

Підвищення надійності деталей машини при їх виготовленні здійснюється і шляхом застосування різних методів хіміко-термічної обробки, які дозволяють підвищити міцність вуглецевих сталей в два, а легованих — в три рази. Останнім часом широко застосовується нанесення зносостійких матеріалів на поверхні тертя деталей шляхом наплавлення, напилення, хромування, твердого нікелювання, і т.д. Велике розповсюдження в підвищенні втомної міцності деталей отримав метод поверхневого наклепу, в результаті якого значно знижується вплив шкідливих концентратів напружень.

Велике значення на надійність деталей, вузлів, агрегатів надає також статичне і динамічне балансування. Відомо, що збільшення дисбалансу викликає різке підвищення зносу. Тому невірноваженість, що викликається неспівпадінням центру тяжкості з віссю обертання деталі, усувають статичним балансуванням.

При зсуві центру ваги деталі з осі її обертання виникає невірноважена відцентрова сила, що викликає вібрацію. Величина відцентрової сили може бути визначений з виразу

$$J = m \cdot r \cdot \omega^2 = \frac{Q \cdot r}{g} \left( \frac{\pi \cdot n}{30} \right)^2,$$

де  $m$  – невірноважена маса;

$r$  – зсув центру тяжкості деталі;

$Q$  – вага деталі, що обертається;

$n$  – частота обертання деталі, об/с.

Величина динамічної невірноваженості буде тим більше, чим більше довжина плеча обурюючої пари сил. Обурюючий момент ( $M$ ) можна представити виразом

$$M = I \cdot L = \frac{Q \cdot r \cdot L \cdot \omega^2}{2g}.$$

Таким чином, динамічне балансування полягає в створенні додаткової пари сил за допомогою врівноважуючих вантажів.

6.1.5. Як правило, машина (агрегат), створена конструкторами технологами і заводськими робітниками, здається в експлуатацію з достатньо високим рівнем надійності. Проте її ефективне використання, як би добре вона не була сконструйована і виготовлена, виявиться можливим тільки при доброму підході і нормальному режимі роботи. Тому правильно організований процес експлуатації в

значній мірі впливає на збільшення надійності машин. Сюди ж слід віднести і організаційно-технічні заходи, сприяючі реалізації системи технічного обслуговування машинно-тракторного парку за рахунок спеціалізованих ланок майстрів-налагоджників.

Важливим є здійснення систематичного спостереження за зносом зв'язаних деталей, для якого використовуються засоби технічної діагностики. Для забезпечення і збереження надійності сільськогосподарської техніки велике значення має правильна організація місця її зберігання, а також зберігання паливно-мастильних матеріалів. Робиться це з метою скорочення непродуктивних простоїв машин і витрат на їх ремонт і експлуатацію.

І, нарешті, вельми ефективним в продовженні ресурсу машин є дотримання оптимальних режимів експлуатації, виключаючих перевантаження агрегатів і механізмів.

6.1.6. До числа основних чинників, визначаючих ремонтпридатність, слід віднести доступність до об'єктів обслуговування, можливість їх контролю, взаємозамінність, спадкоємність контрольно-перевірочного обладнання, уніфікацію систем, вузлів, агрегатів машин.

Для оцінки доступності користуються коефіцієнтом  $k_d = \frac{T_{\text{осн}}}{T_{\text{осн}} + T_{\text{доп}}}$ ,

де  $T_{\text{осн}}$  – основна трудомісткість робіт при ремонті і обслуговуванні;

$T_{\text{доп}}$  – трудомісткість додаткових робіт при ремонті і обслуговуванні.

Звичайно коефіцієнт доступності знаходиться в межах 0,5...0,6.

Для комплексної оцінки технічного обслуговування і ремонту використовується коефіцієнт ремонтпридатності

$$k_p = \frac{T_a}{T_a + T_b},$$

де  $T_a$  – активна частина трудомісткості, що затрачується на відновлення і збереження працездатності;

$T_b$  – баластна частина трудомісткості обслуговування за експлуатації (наприклад, до виходу на вторинне виробництво).

До основних показників надійності стосовно ремонтпридатності слід віднести: вірогідність відновлення, час простою, середній час відновлення і інтенсивність відновлення. Як показник ремонтпридатності можна використовувати функцію часу виконання ремонту, отже при описі самої ремонтпридатності доводиться безпосередньо займатися тими конструктивними і технологічними особливостями машин (агрегатів, вузлів), які полегшують проведення ремонту.

6.1.7. Ефективність ремонту машин обумовлюється витратами, пов'язаними з реалізацією довговічності всіх деталей, яку закладають машинобудівники. Тому ремонтну службу потрібно розглядати як резерв збільшення виробництва машин з меншими суспільними витратами, що дозволяє підвищити темпи розвитку народного господарства.

Основні з них наступні:

–поломка деталей унаслідок великої втрати втомної міцності (наприклад, колінчастих валів автотракторних двигунів після вібродугового наплавлення);

–порушення нанесеного покриття заліза, нікелю і хрому на деталях, відновлених шляхом нанесення гальванічних покриттів;  
–виникнення підвищених шумів при порушенні попарного підбору деталей (у тому числі селективного) і ін.

Ці явища – результат порушення технологічного процесу відновлення деталей і збірки машин.

Надійність виробів при раптових відмовах математично можна визначити по експоненціальному закону. При цьому, як відомо, вірогідність безвідмовної роботи виражається залежністю  $P(t) = e^{-\lambda t}$ .

Якщо ж деталь використовувалася, має напрацювання і знос (як це буває у разі використання деталей з допустимим зносом), вірогідність безвідмовної роботи виразиться як

$$P_c(t) = t^{-\lambda t} \frac{P_H \cdot (t'+t)}{P_H(t')} \text{ при } t = 0, P_c(t) = 1.$$

При збірці вузла або агрегату з використанням великого числа деталей з допустимим зносом без належного підбору і комплектування загальна надійність об'єкту визначиться

$$P_c(t) = \exp\left[-\sum \lambda_i t\right] \prod_{i=1}^N \frac{P_i \cdot (t_i + t)}{P_i(t_i)}.$$

де  $t_i$  – напрацювання різних деталей.

## 6.2. Визначення оптимального міжремонтного ресурсу об'єктів

Для забезпечення певного рівня надійності об'єктів проводиться ряд заходів. Одне з них – вибір і обґрунтування принципів технічного обслуговування і ремонту, які багато в чому визначають ефективність використання об'єкту.

Для автомобільного транспорту і тракторів в настоящее время применяется принудительная система технического обслуживания, а ремонт производится с учетом технического состояния. При этом для объектов определенных назначения первичного и вторичного производства установлена единая периодичность выполнения данных мероприятий.

Величина оптимального технічного ресурсу – основа технічної документації, яка створюється при контроль-сортунні, на базі чого встановлюється допустимий при ремонті знос (зазор) елементів.

Збільшення технічного ресурсу викликає витрату запасних частин і значно підвищує вартість ремонту. Отже, вибір раціонального технічного ресурсу потрібно проводити з таким розрахунком, щоб питома вартість ремонту і технічного обслуговування за встановлений період експлуатації об'єкту була за різноманітних умов як найменшою. Такий ресурс називають оптимальним.

Науково обґрунтоване визначення оптимальної величини ресурсу дозволяє не тільки правильно оцінити якість продукції, що випускається, але і успішно вирішувати багато важливі для народного господарства задач, пов'язаних з перспективами розвитку ремонтного виробництва, розподілом обладнання і матеріалів між машинобудівними і ремонтними заводами, визначенням необхідної кількості запасних

частин для ремонту об'єкту, рівня концентрації і спеціалізації ремонтних підприємств і ін.

При встановленні оптимального ресурсу використовуються питомі витрати, віднесені на одиницю проведеної продукції. Сумарні питомі витрати на одиницю продукції можуть бути знайдені з наступної рівності :

$$C_z = C_1 + C_2 + C_3 = \sum_{i=1}^n C_i ,$$

де  $C_1$  – питомі приведені витрати на ремонт об'єкту;  $C_2$  – питомі експлуатаційні витрати;  $C_3$  – питомі витрати, пов'язані з усуненням випадкових відмов.

Для отримання оптимального міжремонтного ресурсу слід взяти похідну від сумарних питомих витрат по ресурсу і прирівняти її до нуля

$$\frac{dC_r}{dt} = -\frac{s-s_y + E \cdot k}{q_t \cdot t^2} + \frac{m \cdot t_{cp} \cdot W_0}{q_t} \cdot \left[ C_r \cdot \left( 1 + \frac{\beta + \gamma}{100} \right) + \frac{\Delta k}{T_\phi} \cdot E_1 \right] \cdot \frac{C \cdot e^{m-1}}{m+1} = 0 .$$

Тоді 
$$t_{opt} = \sqrt{\frac{(s-s_y + E \cdot k) \cdot (m+1)}{m \cdot t_{cp} \cdot W_0 \cdot C \cdot \left[ C_r \cdot \left( 1 + \frac{\beta + \gamma}{100} \right) + \frac{\Delta k}{T_\phi} \cdot E_1 \right]}} .$$

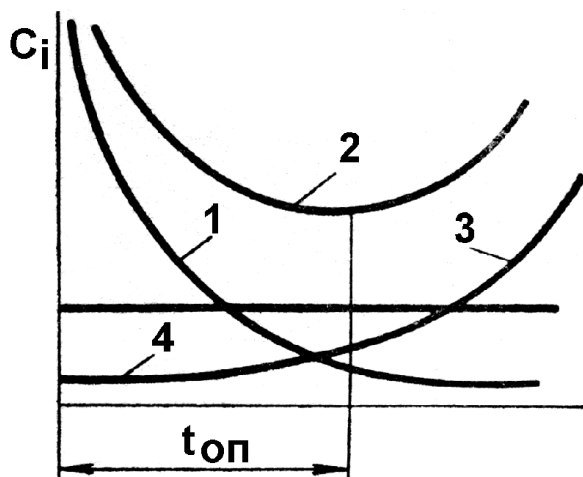


Рис. 11. Залежність питомих витрат від величини міжремонтного ресурсу:

- 1 – питомі приведені витрати на капітальний ремонт машини;
- 2 – сумарні питомі витрати;
- 3 – питомі приведені витрати, пов'язані з усуненням випадкових відмов;
- 4 – експлуатаційні витрати.

наперед заданої допустимої вірогідності відмови  $F(t_0)$ . В цьому випадку, задаючи допустиме значення  $F(t_0) = \alpha$ , визначають час виконання профілактики або ремонту об'єкту  $U$  момент часу  $t_0$  всі виробу даного найменування незалежно від їх технічного стану повинні бути обслужені або відремонтовані, внаслідок чого їх технічний стан може бути доведений до рівня нових виробів.

На рис. 11 представлений графік залежності сумарних питомих витрат від величини міжремонтного ресурсу, з якого видно, що оптимальний міжремонтний ресурс відповідає мінімальним сумарним питомим витратам

### 6.3. Оптимальні періоди обслуговування і ремонту машин

Як наголошувалося, обґрунтоване визначення оптимальних періодів обслуговування і ремонту є однією з найважливіших задач загальної проблеми підвищення надійності машин і мінімального витрачання засобів для підтримки їх на певному рівні вірогідності безвідмовної роботи

Можливі два підходи до рішення цієї проблеми. Перший полягає в тому, що об'єкт експлуатується до певної, але

Якщо задати замість  $F(t) = \alpha$  допустимий середній час безвідмовної роботи  $T_{\text{ср}}$ , тоді час проведення профілактичних робіт можна знайти з виразу

$$T_{\text{ср}} = \int_0^T P(t) dt,$$

де  $P(t)$  – вірогідність безвідмовної роботи.

Якщо ремонт проводить примусово в деякі моменти часу  $T, 2T, 3T$  в умовах ремонтних майстерних, а відмови, виникаючі за період експлуатації, усувати на місці, то сумарні затрати складуть  $C = C_3 N_3 + C_p N_p$ ,

де  $C_3, C_p$  – відповідно вартість відновлення одної відмови при експлуатації (з урахуванням втрат від простоїв) і ремонтів на ремонтному підприємстві;

$T_3, T_p$  – число виробів, відновлених в результаті відмови в умовах експлуатації і на ремонтному підприємстві.

Питомі витрати, віднесені до середнього часу безвідмовної роботи і загального числа виробів  $N$ , можуть бути визначені з формули

$$C_0 = \frac{C_3 \int_0^T F(t) dt + C_p \cdot \left( 1 - \int_0^T f(t) dt \right)}{\int_0^T P(t) dt}.$$

### Список використаної літератури

1. Сідашенка О. І. Ремонт машин / О. І. Сідашенка, А. Я. Полівського. – К. : Урожай, 1994. – 400 с.
2. Ермолов Л. С. Основы надёжности сельскохозяйственной техники / Л. С. Ермолов, В. М. Кряжков, В. Е. Черкун. – М. : Колос, 1982 – 270 с.
3. Черноиванов В. И. Организация и технология восстановления деталей машин / В. И. Черноиванов. – М. : Агропромиздат, 1989. – 334 с.
4. Авдеев М. А. Технология ремонта машин и оборудования / М. А. Авдеев, Е. Л. Воловик, И. Е. Ульман. – М. : Агропромиздат, 1986. – 246 с.
5. Серый И. С. Курсовое и дипломное проектирование по надёжности и ремонту машин / И. С. Серый, А. П. Смелов, В. Е. Черкун. – М. : Агропромиздат, 1991. – 184 с.
6. Комплексная система технического обслуживания и ремонта в сельском хозяйстве. – М. : ГОСНИТИ, 1986. – 322с.
7. Артемов М. Е. Ремонт зерноуборочных комбайнов / М. Е. Артемов, Ю. П. Шатров, В. А. Калинин. – М. : Россельхозиздат, 1986. – 142 с.
8. Кривенко М. М. Ремонт и техническое обслуживание автотракторных двигателей / М. М. Кривенко, И. М. Федосов. – М. : Колос, 1980. – 288 с.
9. Мочалов Н. И. Ремонт почвообрабатывающих машин / Н. И. Мочалов, С. И. Костенко, В. А. Васильев. – М. : Россельхозиздат, 1986. – 142 с.
10. Лауш П. В. Техническое обслуживание и ремонт машин / П. В. Лауш. – К. : Вища школа, 1989. – 351с.

**Навчальне видання**

**Автори:**

**Іванов** Геннадій Олександрович.

**Гавриш** Валерій Іванович.

**Полянський** Павло миколайович.

**Гольдшмідт** Олег Валеріанович.

## **НАДІЙНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ**

Курс лекцій

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 2,5.

Тираж 50 прим. Зам. №

Надруковано у видавничому відділі  
Миколаївського національного аграрного університету  
54020, м. Миколаїв, вул. Паризької Комуни, 9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №4490 від 20.02.2013 р.

