

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ЕКОНОМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ТРАНСПОРТУ

Кафедра «Тяговий рухомий склад залізниць»

**Ю.М. Черних**

# **ОСНОВИ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ**

Конспект лекцій для студентів напряму  
підготовки 6.050702 «Електромеханіка» всіх форм навчання

**Частина 1**

Київ 2014

**Черних Ю.М.**

**Основи теорії надійності електрорухомого складу:** Конспект лекцій з дисципліни. Ч. 1./ Черних Ю.М. – К.: ДЕГУТ, 2014. – 32с.

У посібнику викладені основні визначення і показники надійності, поняття про надійність і стан локомотива, кількісні показники властивостей локомотива, принципи розрахунку надійності та методика визначення рівня надійності. Вказані чинники, що враховуються при визначенні капітальних вкладень і експлуатаційних витрат, залежність витрат від рівня надійності локомотива. Розглянуті методи підвищення надійності електрорухомого складу при проектуванні, виробництві та експлуатації. Наведені показники надійності невідновних деталей, узагальнений закон надійності невідновних виробів у диференціальній та інтегральній формі.

Конспект лекцій розглянутий та затверджений на засіданні кафедри ТРСЗ (протокол №8 від 03.03 2014 року) та на засіданні методичної комісії факультету ІРСЗТ (протокол №7 від 26.03. 2014 року).

Призначений для студентів напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка» всіх форм навчання та відповідають робочій програмі курсу «Основи теорії надійності електрорухомого складу»

*Укладач:* доцент *Ю.М. Черних*

*Рецензенти:*

доцент кафедри ТРСЗ *Ю.Ф. Дубравін*, к.т.н., доцент;  
начальник відділення організації наукової діяльності ДНДЦ УЗ *Гончаров О.М.*, к.т.н., доцент.

У роботі над конспектом лекцій брав участь студент-дипломник *А.Є. Пилипенко*

## Зміст

<i>Вступ</i> .....	4
<b>Лекція №1.</b> Основні визначення і показники надійності.....	6
1.1. Поняття про надійність локомотива. ....	6
1.2. Поняття про стан локомотива. Подія.....	7
1.3. Кількісні показники властивостей локомотива.....	7
1.4. Поняття про потік відмов.....	9
<b>Лекція №2.</b> Принципи розрахунку надійності.....	11
2.1. Загальна структура формули імовірності нормального функціонування локомотива.....	11
2.2. Елемент і система.....	15
2.3. Поняття про послідовне, паралельне і змішане з'єднання елементів.....	16
<b>Лекція №3.</b> Методика визначення рівня надійності.....	18
3.1. Залежність витрат від рівня надійності локомотива.....	18
3.2. Чинники, що враховуються при визначенні капітальних вкладень і експлуатаційних витрат.....	19
3.3. Склад сумарних капітальних витрат при визначенні надійності.....	20
3.4. Склад сумарних експлуатаційних витрат при визначенні надійності ..	20
3.5. Послідовність розрахунку показників надійності локомотива.....	21
<b>Лекція №4.</b> Методи підвищення надійності електрорухомого складу.....	22
4.1. Причини недостатньої надійності електрорухомого складу.....	22
4.2. Методи підвищення надійності при проектуванні, виробництві і експлуатації ЕРС.....	23
4.3. Структурна схема методів підвищення надійності локомотивів.....	24
<b>Лекція №5.</b> Надійність невідновних пристроїв.....	25
5.1. Поняття про раптові і поступові відмови.....	26
5.2. Показники надійності невідновних деталей.....	27
5.3. Узагальнений закон надійності невідновних виробів "диференціальній формі".....	28
5.4. Узагальнений закон надійності невідновних вузлів у інтегральній формі ..	28
<i>Література</i> .....	31

## Вступ

Однією з найважливіших проблем локомотивного господарства залізничного транспорту країни є необхідність забезпечення надійності роботи локомотивного парку. Ця проблема загострюється по мірі ускладнення конструкції локомотивів, автоматизації процесів перетворення енергії, управління, регулювання за допомогою сучасних електричних і електронних систем, підвищення інтенсивності режимів їх використання.

У комплексній програмі по модернізації парку тепловозів і електровозів і створенні тягового рухомого складу нового покоління поряд з проблемами підвищення тягово-енергетичних, швидкісних характеристик і економічності локомотивів проблема надійності займає одне з центральних місць. Тому інженери-локомотивники повинні володіти знаннями та навичками в області аналізу стану та підвищення надійності тягового рухомого складу при його створенні, експлуатації, технічному обслуговуванні та ремонті.

Успішне розв'язання задач, зв'язаних із підвищенням ефективності виробництва, досягається, у першу чергу, за рахунок підвищення надійності технічних засобів, що експлуатуються.

Ритмічна та стійка робота залізничного транспорту багато в чому залежить від надійності рухомого складу та окремих його вузлів.

Надійність електровозів і електропоїздів є однією із найважливіших умов, які визначають ритмічну та усталену роботу електрифікованих залізниць. Конспект лекцій має за мету допомогти студентові засвоїти вихідні положення теорії надійності та одержати перші навички практичних розрахунків показників надійності щодо електрорухомого складу.

Приступаючи до вивчення дисципліни студент повинен відновити в пам'яті основні положення теорії ймовірності: випадкова подія, ймовірність події, статистична ймовірність, додавання та множення ймовірностей, неспільні та незалежні події, випадкова величина, розподіл випадкової величини, середнє значення та математичне чекання випадкової величини, дисперсія розподілу, щільність розподілу, експонентний і нормальний закон розподілу, теореми про числові характеристики випадкових величин, випадкова функція.

Конспект лекції допоможе, насамперед, засвоїти основні терміни та визначення теорії надійності: працездатний і справний стани, відмови та ушкодження, раптове та поступове відмови, відновлювані чи невідновлювані вироби, які підлягають ремонту чи не підлягають, граничний стан, напрацювання та тривалість експлуатації, ресурс, термін служби, безвідмовність, ремонтоздатність, збереження, надійність. Важливо засвоїти зв'язок між ймовірністю та статичною ймовірністю (частоти) події, середнім значенням і математичним сподіванням випадкової величини, потрібно, також одержати основні уявлення про підвищення надійності шляхом резервування. Насамперед, мається на увазі, структурне резервування. Необхідно засвоїти поняття: основний і резервний

елемент, навантажений резерв, кратність резерву, дублювання, загальне резервування тощо.

Після цього студент може перейти до вивчення способів розрахунку одиничних і комплексних показників надійності. Студентові пропонується із безлічі використовуваних на практиці показників надійності розрахувати тільки три: ймовірність безвідмовної роботи, середнє напрацювання до відмови та інтенсивність відмови. Ці показники звичайно, розраховуються для не відновлюваних об'єктів, а для відновлюваних – тільки стосовно до періоду експлуатації до першого відмовлення. Проте, ці показники досить широко використовуються для оцінки безвідмовності, як на стадії проектування й іспиту об'єктів, так і при їхній експлуатації. Вміння розрахувати зазначені показники дає студентові ключ до розрахунку інших одиничних і комплексних показників надійності та формує розуміння основних закономірностей зміни справності та працездатності електрорухомого складу.

Весь конспект лекцій поділений на окремі теми, які відбивають раціональну послідовність засвоєння матеріалу курсу. Кожна лекція завершується контрольними питаннями, що має за мету допомогти студентові краще осмислювати тему, яку вивчає, і підготуватися до екзамену з курсу.

## ЛЕКЦІЯ №1

### **Тема: Основні визначення і показники надійності**

**Мета:** Вивчення основних показників надійності, кількісних показників властивостей локомотива, стан локомотива та потік відмов.

**План лекції:** 1.1. Поняття про надійність локомотива. 1.2. Поняття про стан локомотива. Подія. 1.3. Кількісні показники властивостей локомотива. 1.4. Поняття про потік відмов.

### **1.1. Поняття про надійність локомотива**

Надійність локомотивів – одна з актуальних проблем залізничного транспорту. Для вирішення цієї проблеми велике значення має теорія надійності. Використовуючи положення теорії надійності, можна розробити науково обґрунтовану систему заходів, здійснення якої при дотриманні вимог безпеки руху має на меті забезпечити нормальну роботу локомотивів з найменшими витратами. Ця система повинна охоплювати всі періоди «життя» локомотива – проектування, виготовлення, експлуатацію та ремонт.

Надійності технічних пристроїв сформульовані в ГОСТ 27.002-89 «Надійність в техніці. Терміни та визначення». На базі цього ГОСТу розроблений і затверджений ГОСТ 24.040.03 - 79 «Тяговий рухомий склад залізничного транспорту. Надійність. Терміни та визначення».

На підставі вищевказаних державних стандартів встановлені відповідні поняття стосовно до електричного рухомого складу. Це передусім три основних терміна, що відносяться як до окремих вузлів, так і до локомотива в цілому: властивість, стан і подія.

Властивість локомотива виконувати тягові функції, зберігаючи свої параметри у встановлених межах протягом заданого часу, є його надійністю.

*Надійність* – властивість комплексна, залежна від складових властивостей, а саме: безвідмовності, ремонтпридатності, довговічності та збереженості.

*Безвідмовність* – властивість локомотива зберігати працездатність протягом заданого часу без вимушених перерв на ремонт. Відмови локомотива усувають в процесі ремонту, відновлюючи його працездатність. Отже, тільки властивість безвідмовності не повністю характеризує надійність відновлюваних систем або вузлів. Тому вводять поняття властивості ремонтпридатності.

Під ремонтпридатністю розуміють пристосованість даного вузла, деталі або системи до виявлення і усунення відмов шляхом проведення технічного обслуговування і виконання ремонту.

Однак властивість ремонтпридатності не визначає процесу відновлення працездатності, оскільки сам процес ремонту йде за своїми законами. Для опису цих законів вводять поняття відновлюваність.

*Довговічність* – здатність вузла, деталі або локомотива зберігати свою працездатність до граничного стану з необхідними перервами на ремонт. Довговічність визначається двома умовами: або фізичним, або моральним зносом. Фізичний знос настає в тому разі, коли подальший ремонт та експлуатація стають вже не вигідними, тому що витрати перевищують дохід в експлуатації; моральний знос означає невідповідність параметрів локомотива сучасним умовам їх експлуатації.

*Збереженість* називають властивість локомотива безупинно зберігати свій справний і працездатний стан протягом встановленого часу транспортування або перебування у резерві.

## **1.2. Поняття про стан локомотива. Подія**

Стан локомотива може бути працездатним, непрацездатним, справним, працездатним і несправним, несправним і непрацездатним.

При справному стані локомотив відповідає всім вимогам ПТЕ. Стан локомотива вважають несправним, якщо він не відповідає хоча б одній з вимог ПТЕ. Наприклад, несправні звукові сигнали у кабіні машиніста, все інше обладнання справне і може працювати з повним навантаженням. Такий локомотив працездатний, але несправний. Інший приклад – розбите лобове скло в кабіні машиніста, все механічне та електричне обладнання справно. Локомотив знаходиться також в працездатному, але несправному стані.

Подія – перехід локомотива з одного можливого стану в інший. Прикладом події є відмова, а також пошкодження. *Відмовою* називають порушення працездатного стану, в результаті чого локомотив повністю або частково втрачає свої тягові властивості. Поряд з відмовою розрізняють також *ушкодження*. Несуттєве пошкодження не порушує працездатність (наприклад, перегоріла сигнальна лампа), істотне ж пошкодження є відмова (локомотив непрацездатний). Наслідками відмови є:

- 1) Невиконання заданих показників по масі поїзда, швидкості, часу ходу, часу стоянок;
- 2) Відновлення на шляху прямування, навіть без порушення графіка руху;
- 3) Неплановий ремонт;
- 4) Дострокова заміна вузла;
- 5) Завищений обсяг планового ремонту, точніше завищений обсяг робіт при плановому ремонті.

## **1.3. Кількісні показники властивостей локомотива**

Для кількісної оцінки надійності недостатньо загальних визначень. Треба встановити кількісні показники зазначених вище властивостей локомотива.

Оскільки всі розглянуті події є випадковими (відбуваються у випадкові моменти часу), то доцільно для їх кількісної оцінки використовувати положення теорії ймовірностей. При цьому число показників має бути мінімальним, вони повинні мати чіткий і ясний сенс, охоплювати всі стадії «життя» локомотива (проектування, виготовлення, експлуатацію та ремонт). Визначення їх повинне здійснюватися з мінімальною витратою праці і коштів при використанні сучасної обчислювальної техніки.

Цим вимогам задовольняють такі показники властивостей вузлів, деталей і локомотива в цілому:

1. Кількісним показником (мірою) безвідмовності є *ймовірність безвідмовної роботи за час t*:

$$P\{T>t\}, \quad (1.1)$$

тобто час безвідмовної роботи  $T$  буде більше заданого часу  $t$ . Для скорочення умова (1.1) записують у вигляді  $P(t)$ .

На підставі умови (1.1) не можна заздалегідь сказати, скільки часу локомотив пропрацює безвідмовно, але можна визначити ймовірність  $P(t)$  того, що він не відмовить за заданий час  $t$ . Ця ймовірність є важливою характеристикою надійності локомотива.

2. Кількісною мірою порушення безвідмовності є *ймовірність відмови*:

$$Q\{T\leq t\}, \quad (1.2)$$

тобто час безвідмовної роботи  $T$  не більше заданого часу  $t$ , або, іншими словами, відмова настане швидше, ніж локомотив пропрацює заданий час  $t$ . Умова (1.2) скорочено записують як  $Q(t)$ .

Оскільки подія, що полягає у порушенні безвідмовності, є відмовою, то сума протилежних подій

$$P(t)+Q(t)=1. \quad (1.3)$$

З рівняння (1.3) випливає, що  $Q(t) = 1 - P(t)$  або  $P(t) = 1 - Q(t)$ .

3. Кількісним показником *готовності* локомотива в момент  $t_0$  затребування його до поїзда є *ймовірність його готовності* або *ймовірність справного стану* до цього моменту, яку записують у вигляді  $P(t_0)$ .

Кількісною мірою працездатного стану локомотива може служити *коефіцієнт готовності*  $k_r$  під яким розуміють ймовірність того, що локомотив працездатний в довільно обраний момент часу.

4. Кількісною мірою використання локомотива служить *коефіцієнт використання*  $k_v$  або ймовірність того, що локомотив працює в будь-який момент розглянутого періоду експлуатації.

5. Кількісним показником імовірності відновлення за час ремонту  $\tau$  є ймовірність відновлення працездатного стану локомотива за цей час, яку запи-



сують у вигляді  $v(\tau \leq \tau_n) = v(\tau)$ , тобто час відновлення  $\tau$  не перевищить нормативний час  $\tau_n$ .

6. Ймовірність того, що локомотив знаходиться в даний момент на відновленні, називають *коефіцієнтом ремонтпридатності*  $k_p$ .

7. Показниками ремонтпридатності, крім ймовірність відновлення  $v(\tau)$  і коефіцієнта ремонтпридатності, служать також *середня і питома трудомісткості* (вартості) технічного обслуговування і ремонту даного виду, що характеризують витрати часу на виконання ремонтних операцій.

8. *Питома трудомісткість відновлення* – це витрати праці на ремонт даного виду віднесені до напрацювання  $T = w_{max}$  локомотива за звітний період:

$$w_{пит} = \frac{1}{T} \int_0^{w_{max}} wp(w)dw \quad (1.4)$$

де  $w$  – випадкове значення трудомісткості ремонту даного виду;  $p(w)$  – щільність розподілу трудомісткості ремонту даного виду.

9. *Середня трудомісткість ремонту* даного виду:

$$W = \int_0^{w_{max}} wp(w)dw \quad (1.5)$$

10. Кількісним показником довговічності служить призначений *гамма-ресурс*, тобто пробіг локомотива від початку експлуатації до списання незалежно від його технічного стану. При цьому  $\gamma$  (гамма) означає відсоток локомотивів, пробіг яких до списання повинен бути не менше встановленого. Гамма-процентний ресурс пов'язаний з напрацюванням  $T_0$  локомотива до його списання співвідношенням:

$$\gamma/100 = 1 - \int_0^{T_0} p(T)dT \quad (1.6)$$

де  $p(T)$  – щільність розподілу напрацювання локомотивів за час від початку експлуатації до їхнього списання.

11. Узагальнюючим показником надійності є *ймовірність нормального функціонування* локомотива, яку позначають у вигляді  $P_{нф}(t)$ . Ймовірність нормального функціонування – це ймовірність того, що планове завдання з перевезення не буде зірвано через порушення справного стану локомотива, тобто його відмови.

#### 1.4. Поняття про потік відмов

Найважливішим поняттям в теорії надійності є відмова. Оскільки відмови локомотивів – це одиничні явища, користуються для кількісного визначення показників надійності *поняттям потоку відмов*, запозиченим з теорії масового обслуговування, що має перевірені практикою методи вирішення подібних за-

вдань. При цьому вважають потік відмов найпростішим, тобто припускають, що в експлуатації мають місце такі умови:

1. Ймовірність відмови не залежить від вибору початку відліку часу (або пробігу), а залежить тільки від тривалості інтервалу часу (пробігу), протягом якого ведеться відлік. Ця умова означає, що щільність потоку відмов постійна (закон розподілу кількості відмов у будь-якому проміжку часу не залежить від вибору початку і кінця проміжку, а тільки від його тривалості). Такий потік називають *стаціонарним*.

2. Ймовірність одночасної появи двох і більше відмов одного локомотива дорівнює нулю, тобто неможлива одночасна поява декількох відмов локомотива. Такий потік називають *ординарним*.

3. Закон розподілу кількості відмов у будь-якому проміжку часу (пробігу) не залежить від того, які були відмови до і після цього проміжку. Його називають потоком *без наслідки*.

Таблиця 1.1

№ відмови	1	2	3	...	n
Момент виникнення і-ї відмови	$t_1$	$t_2$	$t_3$	...	$t_n$
Ймовірність виникнення і-ї відмови	$Q(t_1)$	$Q(t_2)$	$Q(t_3)$	...	$Q(t_n)$

Результати статистичної обробки даних про відмови локомотивів свідчать, що припущення про стаціонарність потоку відмов локомотивів більш-менш виправдовується в період нормальної експлуатації. Умова ординарності цього потоку виправдовується тільки для первинних відмов, під яким розуміють відмову даного вузла, викликавши відмову іншого вузла (або вузлів). Так, наприклад, відмова тягового двигуна електровоза при неспрацьовуванні реле перевантаження є вторинним, разом з тим як первинним є відмова реле перевантаження. Ми будемо розглядати тільки первинні відмови, оскільки саме вони є причинами порушення надійності локомотивів. Відмови – події випадкові. Тому час настання відмови – теж випадкова величина, яка може приймати значення  $t_1, t_2, \dots, t_n$ .

При визначенні показників надійності виходять із закономірностей випадкового виникнення відмов. В основі цих закономірностей лежить характеристика потоку відмов. Вона вважається заданою, якщо відомо час і ймовірність виникнення кожної відмови, як це подано в табл. 1.1

Причиною відмови можуть бути недоліки проектування, конструкцій, якості виготовлення, порушення правил обслуговування та ремонту, вплив непередбачених розрахунком механічних та електричних навантажень, вплив кліматичних умов, природні процеси зношування обладнання і вузлів, а також старіння матеріалів.

## **Контрольні запитання**

1. Дати визначення поняттю «надійність локомотива».
2. Дати визначення поняттю «безвідмовність локомотива».
3. Дати визначення поняттю «ремонтпридатність локомотива».
4. Дати визначення поняттю «довговічність локомотива».
5. Дати визначення поняттю «збереженість локомотива».
6. Дати визначення поняттю «стан локомотива. Події».
7. Дати визначення показникам властивостей локомотива: імовірності безвідмовної роботи, імовірності відмови, імовірності справного стану.
8. Дати визначення кількісним показникам властивостей локомотива: коефіцієнт готовності, коефіцієнт використання, коефіцієнт ремонтпридатності.
9. Дати визначення поняттю «потік відмов».
10. Що служить кількісною мірою роботоздатного стану локомотива?
11. Що служить кількісним показником безвідмовності?
12. Які наслідки відмов можуть бути?
13. Коли стан локомотива вважається несправним?
14. В яких станах може знаходитися локомотив?
15. Який потік відмов називають «стаціонарним»?
16. Який потік відмов називають «ординарним»?
17. Який потік відмов називають «потік без наслідків»?
18. Скількома умовами визначається довговічність?

**Література:** [1],[2],[10],[11].

## **ЛЕКЦІЯ №2**

**Тема:** Принципи розрахунку надійності.

**Мета:** Вивчення принципів розрахунку надійності та методики визначення рівня надійності.

**План лекції:** 2.1. Загальна структура формули імовірності нормального функціонування локомотива. 2.2. Елемент і система. 2.3. Поняття про послідовне, паралельне і змішане з'єднання елементів.

### **2.1. Загальна структура формули імовірності нормального функціонування локомотива**

Для розрахунку показників надійності широко використовують положення теорії ймовірності і в першу чергу, що визначають ймовірність настання складних подій. Як ми раніше домовилися, що потік відмов локомо-

тива формується за незалежними подіями і без наслідків, приведемо перших два положення теорії ймовірностей, на основі яких визначимо ймовірність настання таких складних подій, як суми та добутку вихідних подій. Складна подія  $A$  полягає в тому, що станеться подія  $A_1$ , або  $A_2, \dots$ , або  $A_n$ , називають сумою вихідних подій і позначають як:

$$A_n = A_1 + A_2 + \dots + A_n = \sum_1^n A_i$$

При цьому ймовірність суми  $n$  несумісних подій дорівнює сумі ймовірностей цих подій:

$$P(A) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n) = \sum_1^n P(A_i) \quad (2.1)$$

Складна подія  $A$ , яка полягає в одночасному здійсненні (співпаданні) декількох подій, називають добутком вихідних подій  $A_j$  та показують, як на:

$$A = A_1 A_2 \dots A_m = \prod_1^m A_j$$

Ймовірність цієї події є невідповідність працює робіт ймовірності цих подій:

$$P(A) = P(A_1)P(A_2) \dots P(A_m) = \prod_1^m P(A_j) \quad (2.2)$$

Оскільки за час роботи локомотив може перебувати в декількох станах, а перехід з одного стану в інший є подією, то ймовірність нормального функціонування локомотива в даному проміжку часу визначають як ймовірність добутку незалежних подій за формулою (2.2), а для всього часу роботи – по формулі (2.1) як суму добутків ймовірностей нормального функціонування локомотива в кожному проміжку часу. Згідно з цим загальна структура формули ймовірності нормального функціонування локомотива буде мати вигляд:

$$P(A) = \sum_1^n \sum_1^m P(A_{ij}) \quad (2.3)$$

Скористаємося формулою (2.3) для визначення ймовірності нормального функціонування локомотива, вважаючи, що за час  $t$  він може перебувати поки тільки в двох можливих станах: працездатного та справним, а також в несправному і непрацездатному (стані відмови). Відновлення справного працездатного

стану після  $i$ -ї відмови відбувається за час  $\tau_i < \tau_d$ , де  $\tau_d$  – допустимий час простою локомотива на лінії.

Схема можливих ситуацій подана на рис. 2.1, де позначено:  $t_0$  – час очікування локомотива до поїзда (час, до якого локомотив повинен бути на контрольному пункті);  $t'$  – планове закінчення часу роботи локомотива;

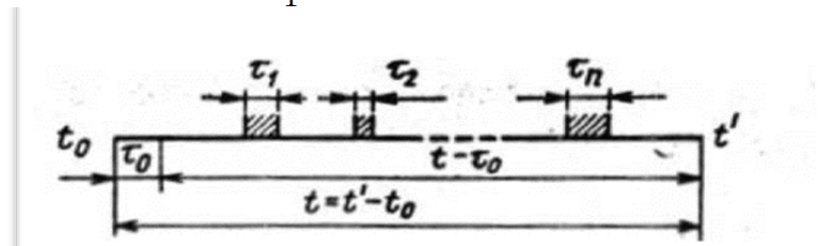
$t = t' - \tau_0$  – оперативний час, для якого визначають показники роботи локомотива;  $\tau_0$  – час, що минув з моменту очікування локомотива до моменту відновлення його справного стану (у тих випадках, коли локомотив не готовий до моменту  $t_0$ ).

Будемо вважати, що сумарний час відновлення справного стану локомотива на лінії значно менше оперативного часу тобто:

$$\sum_{i=1}^n \tau_i \ll t$$

Це означає, що «чистий» час роботи локомотива після усунення наслідків відмов ще достатній для виконання планового завдання з перевезень. Тоді для ймовірності безвідмовної роботи локомотива за «чистий» час його роботи, тобто виключаючи час відновлення, наближено можна прийняти, що:

$$P(t - \sum_{i=1}^n \tau_i) \approx P(t)$$



**Рис. 2.1. Схема можливих ситуацій протягом оперативного часу роботи локомотива**

Це означає, що ймовірність безвідмовної роботи локомотива по відновленні його справного стану після  $i$ -ї відмови дорівнює ймовірності його безвідмовної роботи при відсутності відмови. Крім того, оскільки за умовою часи відновлення  $\tau_i$  малі, то наближено приймемо вірогідності відновлення справного стану після кожної відмови однаковими і рівними ймовірності відновлення за допустимий час простою локомотива на лінії:  $v(\tau_1) \approx v(\tau_2) \approx \dots \approx v(\tau_n) \approx v(\tau_d)$ .

Розглянемо такі можливі ситуації за схемою рис. 2.1 і визначимо ймовірність нормального функціонування локомотива та застосуємо до кожної з них:

- 1) локомотив справний до моменту  $t_0$  і не відмовить за час  $t$ ;
- 2) локомотив справний до моменту  $t_0$ , але має  $i = 1, 2, \dots, n$  відмов, після яких відновлення працездатного, справного стану відбувається за час  $\tau_i < \tau_d$ ;
- 3) локомотив несправний до моменту  $t_0$ , але відновлюється за час  $\tau_0 \leq t$ .

У нормальних умовах експлуатації і ремонту локомотивів третя ситуація виникає рідко і тому надалі її враховувати не будемо. Знайдемо ймовірність нормального функціонування локомотива стосовно до двох перших ситуацій.

Ймовірність нормального функціонування в першій ситуації визначимо на підставі формули 2.2 у вигляді добутку ймовірності безвідмовної роботи за час  $t$  і ймовірності готовності до моменту  $t_0$  (добуток тому, що він означає одночасність наявності розглянутих властивостей локомотива – його безвідмовної роботи і готовності):

$$P_{нф}(t) = P(t_0)P(t) \quad (2.4)$$

Розглянемо спочатку ймовірність нормального функціонування електроваза по відновленні його справного стану після  $i$ -ї відмови. Ймовірність виникнення першої відмови  $Q(t_1) = 1 - P(t_1)$ ; ймовірність виникнення другої відмови  $Q(t_2) = 1 - P(t_2)$ ; і аналогічно  $i$ -ї відмови  $Q(t_i) = 1 - P(t_i)$ . Припустимо далі, що ймовірності настання відмов однакові:  $Q(t_1) = Q(t_2) = \dots = Q(t_n) = Q(t)$  і крім того  $v(\tau_1) = v(\tau_2) = \dots = v(\tau_n)$ .

Отже, ймовірність будь-якої відмови  $Q(t) = 1 - P(t)$ . Тоді ймовірність нормального функціонування локомотива з відновлення справного стану після першої відмови  $P_{нф1}(t)$  буде дорівнює добутку (одночасні події) ймовірності готовності  $P(t_0)$  локомотива до моменту ( $t_0$ ), ймовірності  $1 - P(t)$  настання першої відмови, ймовірності  $v(\tau_1) = v(\tau_n)$  відновлення справного стану локомотива після першої відмови та ймовірності  $P(t - \tau_1) = P(t)$  безвідмовної роботи за час після першої відмови, тобто:

$$P_{нф1}(t) = P(t_0) [1 - P(t)] v(\tau_n) P(t).$$

Ймовірність нормального функціонування локомотива, коли наступить друга відмова визначимо як ймовірність синхронної події, яка полягає у відповідності ймовірності  $P_{нф1}(t)$  і ймовірності відмови:

$$Q(t_2) \approx Q(t) = 1 - P(t)$$

$$P_{нф21}(t) = P_{нф1}(t) Q(t) = P_{нф1}(t) [1 - P(t)]$$

З відновлення справного стану локомотива після другої відмови ймовірність його нормального функціонування:

$$P_{нф2}(t) = P_{нф21}(t) v(\tau_n) = P_{нф1}(t) [1 - P(t)] v(\tau_n)$$

Підставляючи в це вираження значення  $P_{нф1}(t)$ , маємо:

$$P_{нф2}(t) = P(t_0) [1 - P(t)]^2 [v(\tau_n)]^2 P(t)$$

Міркуючи аналогічно, знайдемо ймовірність нормального функціонування локомотива з відновлення його нормального стану після  $n$ -ї відмови:

$$P_{нфn}(t) = P(t_0) [1 - P(t)]^n [v(\tau_n)]^n P(t) \quad (2.5)$$

Оскільки локомотив може перебувати в будь-якій з цих ситуацій, то для визначення ймовірності нормального функціонування скористаємося ймовірністю суми вихідних подій (можливо чи одне, чи інше, чи  $n$ -й стан). Згідно з цим підсумуємо всі ймовірності нормального функціонування як складної події – від справного стану до відновлення після  $n$ -ї відмови.

Отримаємо:

$$P_{\text{нф}}(t) = P(t_0)P(t) \left\{ 1 + \sum_1^n [v(\tau_{\text{д}})]^k [1 - P(t)]^k \right\} \quad (2.6)$$

де  $1 \leq k \leq n$ .

Таким чином, співвідношення 2.6 визначає ймовірність того, що стосовно до досліджуваних ситуацій завдання з перевезення не буде зірване через ненадійність локомотива.

Вище всі показники надійності подані в функції часу роботи локомотива. Ці ж показники можна розглядати як функції пробігу, відповідного даному моменту часу. Методи розрахунку залишаються колишніми.

Принциповий графік зміни  $P_{\text{нф}}(t)$  поданий на рис. 2.2, де  $t_1, t_2, t_3 \dots$  – час появи перших, других, третіх ... відмов;  $\tau_1, \tau_2, \tau_3 \dots$  – часи відновлення справного стану електровоза після відповідних відмов;  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3 \dots$  – ймовірності нормального функціонування електровоза, відновлюваного після відповідних відмов.

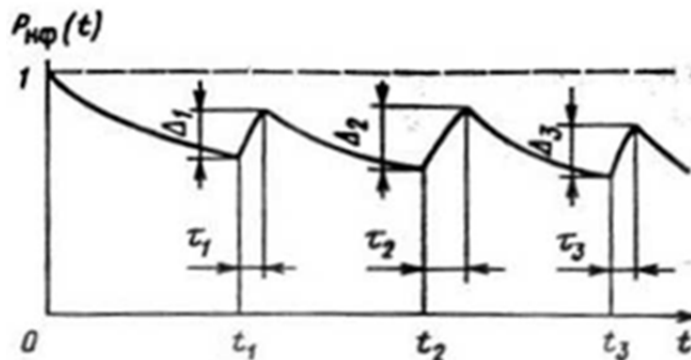


Рис. 2.2. Графік змін ймовірності нормального функціонування локомотива

## 2.2. Елемент і система

При визначенні надійності локомотивів треба враховувати складність їхніх пристроїв, оскільки різні вузли та деталі локомотивів мають різну надійність. Тому для конкретизації показників надійності таких складних пристроїв, якими є локомотиви, їх умовно ділять на елементи і системи.

*Елементом* – називають частина системи, яка не має самостійного експлуатаційного призначення і виконує в системі обмежені функції. Для практичного використання будь-якого елемента його треба з'єднати з іншими елементами в певну систему.

*Системою* – називають сукупність спільно діючих пристроїв, що забезпечують виконання певних практичних завдань.

Залежно від завдань прийнято один і той самий вузол розглядати як елемент або як систему. Наприклад, при оцінці надійності електровоза постійного

струму його розглядають як систему, що складається з основних елементів: струмоприймача, швидкодіючого вимикача, пускових резисторів, тягових двигунів тощо. Коли ж визначають надійність, наприклад, тягового двигуна, який щодо електровоза в цілому є елементом, його розглядають вже як систему, що складається з основних елементів: якір, остов, щітковий апарат, полюси і т.д. При оцінці якості якоря тягового двигуна його розглядають теж як систему, що складається з вала, якірної втулки, осердя, колектора, секції обмотки і т.д. Аналогічним чином прийнято розглядати, наприклад, колектор як систему, утворену комплектом елементів, що включає в себе набір пластин, коробку, міжламельну ізоляцію, ряд ізоляційних деталей, натискну шайбу, стяжні болти і т.п.

Завдяки умовному поділу на елементи і системи можна досить просто і з прийнятною для практики точністю побудувати методику розрахунку складних систем. Для цього використовують поняття функціонального або логічного послідовного, паралельного та змішаного з'єднання елементів у схемі.

Слід пам'ятати, що ці терміни теорії надійності, що характеризують функціональну залежність елементів у схемі, яка розглядається, відрізняються по своїй суті від аналогічних понять, прийнятих в електротехніці і які характеризують дійсне електричне з'єднання елементів.

### 2.3. Поняття про послідовне, паралельне і змішане з'єднання елементів

*Послідовним з'єднанням елементів* в теорії надійності називають таке, при якому відмова хоч би одного елемента викликає відмову всієї системи в цілому. Таким чином, всі  $m$  послідовно з'єднаних елементів повинні працювати безвідмовно протягом встановленого терміну. Цю вимогу можна записати як ймовірність одночасної безвідмовної роботи всіх елементів:

$$P(t) = p_1(t) p_2(t) \dots p_m(t) = \prod_1^m p_i(t) \quad (2.7)$$

де  $P(t)$ ,  $p_i(t)$  – ймовірності безвідмовної роботи системи та  $i$ -го елемента, відповідно.

Якщо ймовірність безвідмовної роботи для всіх  $m$  елементів однакова, тобто  $p_1(t) = p_2(t) = \dots = p(t)$  то на підставі умови (2.7) ймовірність безвідмовної роботи системи  $P(t) = [p(t)]^m$ .

Ймовірність відмови системи

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - [p(t)]^m \text{ або } Q(t) = 1 - [1 - q(t)]^m$$

де  $q(t) = 1 - p(t)$  – ймовірність відмови кожного із  $m$  елементів.

Оскільки у елементів електровоза ймовірність відмови мала, то можна наближено прийняти, що  $[1 - q(t)]^m = 1 - mq(t)$ , і, отже:

$$Q(t) \approx mq(t) \quad (2.8)$$



Таким чином, надійність системи, утвореної з  $m$  послідовних з'єднаних елементів, завжди нижче надійності найбільш слабкого з них.

Нагадаємо ще раз, що поняття «з'єднання» елементів і вузлів з точки зору надійності відрізняється від їх дійсного електричного з'єднання. Відомо, наприклад, що на електровозах однофазно-постійного струму всі тягові двигуни включені паралельно. Однак оскільки відмова одного з двигунів означає відмову електровоза, з точки зору надійності всі двигуни електровоза слід розглядати «з'єднаними» послідовно.

*Паралельним з'єднанням елементів* в теорії надійності називають таке, при якому відмова системи настає при відмові всіх без винятку елементів. Якщо  $n$  елементів з'єднані паралельно, то згідно з цим визначенням ймовірність відмови системи:

$$Q(t) = q_1(t)q_2(t) \dots q_n(t) = \prod_1^n q_i(t)$$

А ймовірність безвідмовної роботи:

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \prod_1^n q_i(t) = 1 - \prod_1^n [1 - p_i(t)]$$

Якщо  $q_1(t) = q_2(t) = \dots = q(t)$ , то  $P(t) = 1 - [q(t)]^n$  ймовірність відмови системи:

$$Q(t) \approx [q(t)]^n \quad (2.9)$$

Таким чином, при паралельному з'єднанні елементів надійність системи завжди вище надійності найкращого елемента.

Крім послідовного і паралельного з'єднань елементів, в теорії надійності використовують поняття змішаного з'єднання елементів, яке являє собою одну або кілька комбінацій логічного послідовного і паралельного з'єднань елементів. Змішане з'єднання елементів застосовується при загальному або роздільному резервуванні. Однак при резервуванні елементів на електрорухомому складі не можна не рахуватися зі збільшенням маси вузлів, їх габаритів, вартості виготовлення та ремонту, що накладає суттєві обмеження в першу чергу на механічні конструкції. Надійність системи залежить не тільки від ймовірності безвідмовної роботи кожного елемента і кількості їх, а й від прийнятої схеми їх функціонального (логічного) з'єднання.

### ***Контрольні запитання***

1. Яку складну подію називають «сумою вихідних подій»?
2. Яку складну подію називають «добутком вихідних подій»?
3. Що називають «елементом системи»?
4. Що називають «системою елемента»?
5. Яке з'єднання елементів в теорії надійності називається «послідовним»?
6. Яке з'єднання елементів в теорії надійності називається «паралельним»?

7. Яке з'єднання елементів в теорії надійності називається «змішаним»?

Література [3],[4],[7],[11].

## ЛЕКЦІЯ №3

### Тема: Методика визначення рівня надійності

**Мета:** Вивчення витрат від рівня надійності локомотива та послідовності розрахунку показників надійності локомотива

**План лекції:** 3.1. Залежність витрат від рівня надійності локомотива. 3.2. Чинники, що враховуються при визначенні капітальних вкладень і експлуатаційних витрат. 3.3. Склад сумарних капітальних витрат при визначенні надійності. 3.4. Склад сумарних експлуатаційних витрат при визначенні надійності. 3.5. Послідовність розрахунку показників надійності локомотива.

#### 3.1. Залежність витрат від рівня надійності локомотива

Виникає питання: яке має бути значення ймовірності нормального функціонування електровоза протягом заданого часу, або яка його надійність? Оскільки відмова локомотива на лінії означає зниження ефективності перевезень, то визначення необхідного рівня надійності локомотива засноване на техніко-економічних вишукуваннях. Недостатня надійність локомотивів призводить в їх експлуатації до великого матеріального збитку, а іноді і до непоправних наслідків. Економічний ефект від підвищення надійності локомотивів проявляється у збільшенні часу корисної роботи локомотивів, скороченні потреби в рухомому складі, сировини, енергії і т.п., що в кінцевому результаті означає підвищення продуктивності праці.

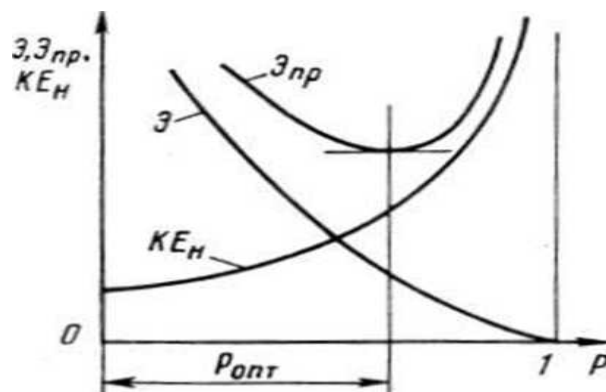


Рис. 3.1. Залежності витрат від рівня надійності локомотива:  $K_{EH}$  – капітальні вкладення на заходи з підвищення надійності;  $\mathcal{E}$  – експлуатаційні витрати;  $\mathcal{E}_{ПР}$  – наведені витрати.

Вжиття заходів щодо підвищення надійності вимагає додаткової витрати праці і коштів. Локомотив буде тим дорожче, чим ближче його надійність до одиниці. При цьому витрати на його проектування та виготовлення зростають значно швидше, ніж збільшується надійність

З іншого боку, більш надійний локомотив дешевший в експлуатації, оскільки витрати для підтримки його працездатного стану менші. Отже, існує оптимальний рівень надійності, при якому наведені витрати мінімальні, як це подано на рис. 3.1.

Уявімо залежності наведених капітальних вкладень у функції надійності у вигляді  $KE_n(P)$ , експлуатаційних витрат від надійності у вигляді  $\mathcal{E}(P)$  і приведених витрат від надійності у вигляді  $\mathcal{E}_{np}(P)$ .

Оскільки:

$$\mathcal{E}_{np}(P) = KE_n(P) + \mathcal{E}(P), \quad (3.1)$$

де  $E_n$  – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, то умову визначення економічно оптимального рівня надійності можна відобразити у вигляді:

$$\frac{d\mathcal{E}_{np}}{dP} = 0 \text{ або } \frac{d}{dP} [KE_n(P) + \mathcal{E}(P)] = 0$$

Корінь цього рівняння дає  $P_{opt}$  (див. рис. 3.1). Тому вимоги до показників надійності не можуть призначатися довільно. Вони повинні визначатися економікою і відповідальністю вузлів. Не слід домагатися абсолютної надійності тих вузлів локомотива, відмова яких не зачіпає безпеку руху. Рівень надійності таких вузлів слід призначати по мінімуму приведених витрат, як це подано вище. Навпаки, вузли, що забезпечують безпеку руху, такі, як гальмівне обладнання і колісні пари, повинні мати практично абсолютну надійність.

### **3.2. Чинники, що враховуються при визначенні капітальних вкладень і експлуатаційних витрат**

Розрахунок конкретного значення  $P_{opt}$  є досить трудомістким, тому що пов'язаний з великим обсягом робіт по збору вихідних даних та їх обробки з метою визначення залежності  $KE_n(P)$  і  $\mathcal{E}(P)$ . Ці залежності повинні бути знайдені з урахуванням таких факторів:

1) пропускної здатності ділянки, середнього інтервалу між поїздами, часу перерви руху поїздів через відмову локомотива, коефіцієнтом заповнення пропускної здатності ділянки і дільничної швидкості, річних витрат поїзда – годин на дільниці внаслідок перерви руху за відмов локомотивів;

2) розмірів роботи дільниці: обсягу річних перевезень та річного пробігу локомотива;

3) використання рухомого складу: маси поїзда брутто, ходової і дільничної швидкості руху, обороту локомотива, середньодобового пробігу, середньодобової продуктивності локомотива, величини локомотивного і вагонного парків;

4) надійності локомотивів: напрацювання на відмову, ймовірності відновлення працездатного стану, коефіцієнтів використання і простою локомотива через відновлення його працездатного стану;

5) ціни локомотива, річних експлуатаційних витрат (загальних і за елементами витрат), вартості перевезень, втрат на одиницю пробігу внаслідок відмов локомотивів на ділянці, капітальних витрат (загальних і за елементами).

### 3.3. Склад сумарних капітальних витрат при визначенні надійності

Сумарні капітальні витрати визначаються за формулою:

$$\sum K = K_l + K_B + K_{гр}, \quad (3.2)$$

де  $K_l = \frac{1}{K_{и}} C_l M_э$  – капітальні вкладення в локомотивний парк;

$K_{и}$  – коефіцієнта використання локомотивів;

$C_l$  – ціна локомотива;

$M_э$  – чисельність експлуатованого парку локомотивів;

$K_B = C_в n_в$  – капітальні вкладення в вагонний парк;

$C_в$  – гуртова ціна вагона;

$n_в$  – число вагонів з урахуванням тих, що знаходяться в ремонті;

$K_{гр}$  – вартість вантажної маси на колесах.

### 3.4. Склад сумарних експлуатаційних витрат при визначенні надійності

Сумарні річні експлуатаційні витрати визначаються за формулою:

$$\sum \mathcal{E} = \mathcal{E}_{рл} + \mathcal{E}_{рен} + \mathcal{E}_{нр} + \mathcal{E}_{отк} + \mathcal{E}_в \quad (3.3)$$

де  $\mathcal{E}_{рл} = \mathcal{E}_{рл1} \sum MS_{рлч} \cdot 10^{-3}$  – річні витрати на ремонт локомотивів;

( $\mathcal{E}_{рл1}$  – витрати на ремонт локомотива, грн, віднесені до  $10^3$  локомотиво-км пробігу;

$\sum MS_{рлч}$  – річний пробіг локомотивів експлуатаційного парку на ділянці звернення;)

$\mathcal{E}_{рен} = a_p K_l$  – амортизаційні відрахування на реновацію локомотивного парку;

( $a_p$  – норма амортизаційних відрахувань;)

$\mathcal{E}_{отк} = \mathcal{E}_{отк1} t k_{нв} M_э$  – річні експлуатаційні витрати на відновлення працездатного стану локомотивів в депо, за винятком амортизаційних відрахувань на реновацію за час простою в ремонті і втрат через простої поїздів на ділянці;

( $\mathcal{E}_{отк1}$  – річні затрати на відновлення працездатного стану одного локомотива;

$t$  – середній час роботи локомотива в році;

$k_{нв}$  – коефіцієнт простою при відновленні працездатного стану локомотива;)

$\mathcal{E}_{нр} = \mathcal{E}_{нр1} \sum T_{нр}$  – річні втрати через простій потягів на ділянці звернення внаслідок відмов локомотивів;

( $\mathcal{E}_{нр1}$  – вартість втрат протягом 1 год. простою поїздів;

$\sum T_{нр}$  – сумарний час простою поїздів;)

$\mathcal{E}_6 = \mathcal{E}_{B1}n_6$  – експлуатаційні річні витрати на утримання і ремонт вагонного парку;  
( $\mathcal{E}_{61}$  – річні витрати на утримання і ремонт одного вагона).

### 3.5. Послідовність розрахунку показників надійності локомотива

Найдоцільніша послідовність розрахунку показників на надійності локомотива з урахуванням зазначених вище факторів така:

1. Визначають масу поїзда, ходову швидкість руху, розмір руху (в парах поїздів) залежно від вантажопотоку.

2. Розраховують показники ймовірності відновлення працездатного стану локомотивів, загальний час перерви руху поїздів протягом доби через відмову локомотива і коефіцієнт заповнення пропускної здатності ділянки залежно від напрацювання на відмову при відновленні працездатного стану електровоза на перегоні, а також річні втрати поїздо-годин через відмови локомотивів.

3. Визначають коефіцієнт готовності, коефіцієнти використання і простою електровоза, показники використання рухомого складу.

4. Розраховують економічні показники роботи дільниці.

За допомогою показників надійності можна оцінювати доцільність модернізації вузлів локомотивів. Проведення модернізації при забезпеченні всіх вимог безпеки вигідне, якщо умовний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень  $E_{усл}$  більше або дорівнює нормативному  $E_n$  (для ЕРС  $E_n = 0,12$ ) і термін окупності витрат на проведення модернізації менше нормативного.

Крім оцінки цільових перевірок доцільності модернізації вузлів локомотивів, можна порівнювати різні локомотиви по їх безвідмовності, прогнозувати тривалості їх безперервної роботи до чергової профілактики, розраховувати характеристики системи технічного обслуговування і ремонту, установлювати необхідний штат виконавців і в результаті розробляти обґрунтовані пропозиції щодо підвищення техніко-економічних показників використання локомотивів.

### *Контрольні запитання*

1. Чим визначаються вимоги до показників надійності вузлів локомотива?
2. Чим визначаються сумарні капітальні витрати на заходи щодо підвищення надійності?
3. Чим визначаються сумарні річні експлуатаційні витрати при визначенні залежності витрат від рівня надійності локомотива?
4. Як визначити капітальні вкладення в локомотивний парк при визначенні надійності?
5. Як визначити річні витрати на ремонт локомотивів при визначенні надійності?
6. Як визначити амортизаційні відрахування на реновацію локомотивного парку при визначенні надійності?
7. Як визначити річні експлуатаційні витрати на відновлення працездатного стану локомотивів в депо, за винятком амортизаційних відрахувань на ренова-

цію за час простою в ремонті і втрат через простої поїздів на ділянці при визначенні надійності?

8. Як визначити річні втрати через простій потягів на ділянці звернення внаслідок відмов локомотивів при визначенні надійності?

**Література** [3],[5],[10],[12], [14].

## ЛЕКЦІЯ №4

**Тема:** Методи підвищення надійності електрорухомого складу.

**Мета:** Вивчення причин недостатньої надійності електрорухомого складу (ЕРС) та методів підвищення надійності при проектуванні, виробництві і експлуатації ЕРС.

**План лекції:** 4.1. Причини недостатньої надійності електрорухомого складу. 4.2. Методи підвищення надійності при проектуванні, виробництві і експлуатації ЕРС. 4.3. Структурна схема методів підвищення надійності локомотивів.

### 4.1. Причини недостатньої надійності електрорухомого складу

Складність обладнання електрорухомого складу та інтенсивність його використання часто випереджають якість застосовуваних елементів і технологію їх виготовлення. Це одна з істотних причин недостатньої надійності ЕРС ряду серій. Крім того, перевантаження ЕРС, що необґрунтовано іноді допускаються в експлуатації, також знижують його надійність. Тому, щоб ЕРС не виявився практично непрацездатним через часті відмови в експлуатації, потрібна розробка заходів що до підвищення його надійності: підвищення якості проектування, забезпечення суворої технологічної та виробничої дисципліни, неослабного контролю за якістю продукції, введення обґрунтованих нормативів на технологію і матеріали. Вжиття цих заходів залежить насамперед від заводів-виробників ЕРС. При цьому розробка таких нормативів і стандартів має бути заснована не на існуючому на підприємстві рівні виробництва, а на показниках надійності кращих зразків ЕРС, досягнутих у нас і за кордоном.

Необхідним заходом забезпечення надійності є випробуванням вузлів устаткування і конструкції головних зразків ЕРС на стадії їх проектування в умовах, що відтворюють фактичні електричні, механічні та теплові режими їх роботи. При цьому велике значення мають прискорені і форсовані випробування.

Надійність ЕРС залежить також від умов експлуатації, режимів руху поїздів, якості технічного обслуговування і ремонту. Виникаючі іноді необґрунтовані прагнення перевантажити локомотив з метою провести по ділянці поїзд великої маси, насправді призводять до різкого зниження надійності локомотива і збільшення кількості його відмов.

## 4.2. Методи підвищення надійності при проектуванні, виробництві і експлуатації ЕРС

Аналіз всього різноманіття факторів, що впливають на надійність ЕРС, свідчить, що способи підвищення надійності можна розділити на дві групи заходів: спрямовані на підвищення безвідмовності і на підвищення ремонтпридатності (відновлювальності). Їхня реалізація дає найбільший ефект при системному підході до проблеми забезпечення надійності, який полягає в узгодженому вжитті заходів у процесі проектування, виготовлення і експлуатації локомотивів.

До важливих заходів щодо підвищення надійності ЕРС, крім проектування та технології поліпшення виготовлення, належить вдосконалення схем силових ланцюгів і ланцюгів керування. При наявності ряду лімітуючих факторів (масо-габаритні показники, вартість, якість деталей і т.п.) проектувальник змушений застосовувати далеко не кращі з точки зору надійності елементи, що постачаються промисловістю. Відповідальні вузли схем звичайно проектують з елементів, що мають незначну розбіжність параметрів. На противагу цьому схеми, побудовані з елементів, що допускають нормальну роботу при широких межах зміни їх параметрів, забезпечують надійність навіть при використанні малостабільних елементів в різних умовах експлуатації. Це особливо важливо для систем управління локомотивами, коли випадкові перешкоди, коливання живильної напруги, зміни температури, вологості можуть призвести до відмов, які важко виявити.

Відомо, що резервування і застосування систем вбудованого автоматичного контролю є ефективними схемними методами підвищення надійності. Проте в даний час ці методи не знайшли ще широкого застосування при проектуванні і створенні локомотивів, по-перше, через відсутність таких бортових систем контролю і по-друге, через обмеження масо-габаритних показників для розміщення таких систем. Крім того, резервування є досить ефективним способом підвищення надійності систем короткочасної дії. Для локомотивів, які є пристроями довготривалої дії, не менше значення для підвищення надійності мають використання елементів високого класу, застосування друкованих схем, блокових принципів побудови вузлів, мікропроцесорів, періодична заміна небезпечних, в сенсі відмови, елементів і блоків і т.д.

Уніфікація елементів і вузлів локомотивів полегшує вирішення організаційних завдань забезпечення надійності і, зокрема, постачання запасними частинами.

Оскільки сучасні, а тим більше перспективні локомотиви характеризуються збільшенням потужності і розширенням діапазону регулювання режимів роботи, то особливого значення набувають дослідження процесів старіння та зносу. У цих умовах підвищення надійності досягають тренуванням елементів і вузлів на спеціальних стендах, при якій скорочується час їх припрацювання за рахунок більш тяжких випробувальних режимів.

Надійність електричного та електронного обладнання локомотивів в експлуатації істотно залежить від його температурного режиму. Збільшення складності та прагнення до зменшення масо-габаритних показників пристроїв електрообладнання призводить до концентрації високих температур. Тому при розрахунку надійності та виготовленні таких пристроїв серйозна увага має бути приділена відведенню тепла та запобіганню появи шкідливих наслідків нагрівання. Крім теплового фактора, в умовах експлуатації чинить великий вплив на надійність локомотивів і другий фактор – механічні навантаження, обумовлені ударами і вібраціями. Попередження наслідків цих двох факторів становить основу заходів щодо підвищення надійності локомотивів.

Слід враховувати кваліфікацію обслуговуючого і ремонтного персоналу, що впливає на надійність локомотивів і, зокрема, на час їх відновлення. Оптимізація процесів виготовлення і технічного обслуговування на основі наукової організації праці є істотним чинником підвищення надійності локомотивів.

### **4.3. Структурна схема методів підвищення надійності локомотивів**

1. Методи підвищення надійності
  - 1.1. Проектування
    - 1.1.1. Схемні рішення
      - 1.1.1.1. Спрощення схем
      - 1.1.1.2. Створення схем з обмеженням наслідків
      - 1.1.1.3. Створення схем з широкими допусками
      - 1.1.1.4. Резервування
    - 1.1.2. Конструктивні заходи
      - 1.1.2.1. Застосування більш надійних елементів
      - 1.1.2.2. Полегшення режимів роботи елементів
      - 1.1.2.3. Уніфікація матеріалів, деталей і вузлів
      - 1.1.2.4. Облік психофізіологічних можливостей машиніста
      - 1.1.2.5. Полегшення ремонту
  - 1.2. Виробництво
    - 1.2.1. Вдосконалення технології
    - 1.2.2. Автоматизація
    - 1.2.3. Тренування елементів
    - 1.2.4. Статистичний контроль якості
    - 1.2.5. Нові матеріали
  - 1.3. Експлуатація
    - 1.3.1. Система бездефектного ремонту
    - 1.3.2. Узагальнення досвіду
    - 1.3.3. Пропозиції по модернізації
    - 1.3.4. Підвищення кваліфікації персоналу
    - 1.3.5. Технічна діагностика



## ***Контрольні запитання***

1. Коли здійснюється полегшення режимів роботи елементів для підвищення надійності локомотивів?
2. Коли здійснюється тренування елементів для підвищення надійності локомотивів?
3. Коли здійснюється технічна діагностика для підвищення надійності локомотивів?
4. Коли здійснюється підвищення кваліфікації персоналу для підвищення надійності локомотивів?
5. Коли здійснюється облік психологічних можливостей машиніста для підвищення надійності локомотивів?
6. Коли здійснюється статистичний контроль якості для підвищення надійності локомотивів?
7. Коли здійснюється уніфікація матеріалів, деталей і вузлів для підвищення надійності локомотивів?
8. Коли здійснюється полегшення ремонту для підвищення надійності локомотивів?
9. Коли здійснюється удосконалення технології для підвищення надійності локомотивів?
10. Коли здійснюється автоматизація для підвищення надійності локомотивів?

**Література** [3], [10], [11], [15].

## **ЛЕКЦІЯ №5**

**Тема:** Надійність невідновних пристроїв.

**Мета:** Вивчення показників надійності та узагальнених законів надійності невідновних виробів.

**План лекції:** 5.1. Поняття про раптові і поступові відмови. 5.2. Показники надійності невідновних деталей. 5.3. Узагальнений закон надійності невідновних виробів в диференціальній формі. 5.4. Узагальнений закон надійності невідновних вузлів в інтегральній формі.

## 5.1. Поняття про раптові і поступові відмови

Досі випадкові відмови локомотива в цілому або окремих його вузлів розглядалися без урахування природи їх виникнення. Проте дослідження свідчать, що за характером виникнення відмови можна розбити на дві групи: раптові і поступові. І ті й інші – випадкові.

*Раптова відмова* характерна тим, що її появі не передували ніякі видимі зміни або які виявляються контролем зміни параметрів вузла (деталі). Цей вид відмов є наслідком внутрішнього накопичення змін властивостей матеріалу, і в той момент, коли ці зміни досягають критичного значення, відбувається стрибкоподібна зміна стану, що викликає відмову. Раптові відмови іноді називають неконтрольованими. Неконтрольовані доти, доки внутрішні процеси зміни властивостей матеріалу ускладнюють прогнозування моментів появи раптових відмов і розробку заходів щодо їх попередження.

*Поступова відмова* супроводжується видимим або контрольованою поступовою зміною властивостей або параметрів деталі (вузла). Тому передбачити настання поступової відмови простіше, ніж раптові. Фізика поступових відмов вивчена значно повніше, ніж раптових, і полягає вона зазвичай у зносі або старінні матеріалів, поступово наростаючих в часі.

Строго кажучи, раптові відмови є теж деякою мірою наслідком старіння або зносу матеріалу. Тому поняття «раптовість відмови» значною мірою визначається можливістю контролю за ходом прихованих внутрішніх фізико-хімічних процесів зміни властивостей матеріалу.

У практиці іноді важко розрізнити поступова це відмова чи раптова, оскільки проявляються їхні комбінації і взаємний вплив. На жаль, досі не вдається досить точно діагностувати стан ряду вузлів електровоза: ізоляції електричних машин, проводів, контактних з'єднань тощо. Тому такі події, як пробій ізоляції, виникнення тріщин в устаткуванні, перекидання на колекторах двигунів, належить до раптових відмов. До поступових відмов належать зноси тертьових деталей, зниження електричної міцності по мірі терміну служби, розрегулювання апаратури тощо. Оскільки в умовах експлуатації можуть наступати як раптові, так і поступові відмови, то, вважаючи їх незалежними, можна подати на підставі виразу (2.2) ймовірність  $P(t)$  безвідмовної роботи локомотива як ймовірність спільного настання цих подій:

$$P(t) = P_p(t)P_n(t) \quad (5.1)$$

де  $P_p(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи локомотива (або його вузла, деталі) при раптових відмовах;

$P_n(t)$  – те саме при поступових відмовах.

Розглянемо спочатку визначення ймовірності  $P_p(t)$ . Попередньо зауважимо, що з точки зору надійності всі деталі і вузли локомотива можна розбити на дві групи: однократної дії або невідновлювані (які не підлягають ремонту) і відновлювані (ремонтвані). Прикладами деталей одноразової дії є електри-

чні лампи, діоди, тиристори тощо, які при відмові не ремонтують, а замінюють новими. Процес заміни являє собою вже відновлення даного вузла, а не деталі однократної дії. Так заміна тиристора у випрямному блоці електровоза є процес відновлення справного стану цього блоку.

## 5.2. Показники надійності невідновних деталей

Оскільки показники надійності та методи їх розрахунку для невідновлюваних і відновлюваних деталей і вузлів різні, розглянемо спочатку їх стосовно до невідновлюваних вузлів (деталей). Для цих вузлів (деталей) поняття «ремонтотпридатність» не існує. Надійність їх тотожна ймовірності безвідмовної роботи  $P(t)$ . Щоб її повніше охарактеризувати, використовують стосовно до невідновлюваних деталей ще й інші показники, пов'язані з імовірністю  $P(t)$ .

1) *Наробіток до відмови*  $T_o$  – середній час роботи вузла (деталі), визначений для всієї сукупності невідновлюваних вузлів (деталей) даного вузла [мається на увазі наробіток до першої і єдино можливої відмови кожної деталі (вузла) даного типу] напрацювання до:

$$T_o = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (5.2)$$

2) *Гамма-процентний наробіток*  $T_\gamma$ , протягом якого локомотив пропрацює безвідмовно з імовірністю, рівною  $\gamma$  відсотків:

$$P(T_\gamma) = \frac{\gamma}{100}; 1 - Q(T_\gamma) = \frac{\gamma}{100}; Q(T_\gamma) = 1 - \frac{\gamma}{100} \quad (5.3)$$

Для невідновлюваних вузлів  $\gamma$  %-ве напрацювання тотожне  $\gamma$  %-му ресурсу ( $\gamma$  %-му терміну служби);

3) *Частоту відмов* вузлів (деталей)  $f(t)$ , під якою розуміють швидкість настання відмов вузлів (деталей) в даний момент часу, обчислену в припущенні, що число вузлів в кожен момент часу дорівнює вихідному. Іншими словами,  $f(t)$  є число відмов в одиницю часу, віднесене до початкового числа вузлів (деталей). Оскільки ймовірність відмови обчислюється, як буде подано далі, виходячи теж з початкової кількості вузлів (деталей), то можна записати, що:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = f(t) \quad (5.4)$$

4) Однак у процесі роботи вузли відмовляють і число залишених працездатними все зменшується, оскільки ці вузли невідновлювані. Тому частота відмов не характеризує надійність вузлів, що залишилися працездатними. Для того, щоб її охарактеризувати кількісно, вводять ще поняття *інтенсивність відмов*  $\lambda(t)$ , під яким розуміють швидкість настання відмов у даний момент часу вузлів, що пропрацювали справно до цього моменту. Іншими словами,  $\lambda(t)$  є число відмов в одиницю часу, віднесене до числа вузлів, які безвідмов-

но пропрацювали до цього часу. При цьому вузли, що відмовили, не замінюють новими. Згідно з цим визначенням:

$$\lambda(t) = f(t)/P(t) \quad (5.5)$$

### 5.3. Узагальнений закон надійності невідновних виробів у диференціальній формі

Встановимо зв'язок між показниками  $f(t)$ ,  $\lambda(t)$  и  $T_0$ . Знаючи, що  $P(t) + Q(t) = 1$  або  $P(t) = 1 - Q(t)$  і диференціюючи за часом, отримуємо:

$$\frac{dP(t)}{dt} = -\frac{dQ(t)}{dt} \text{ або } -\frac{dP(t)}{dt} = \frac{dQ(t)}{dt} \quad (5.6)$$

Отже, швидкість зменшення ймовірності безвідмовної роботи, представлена як  $-\frac{dP(t)}{dt}$ , є не що інше, як швидкість настання відмови  $\frac{dQ(t)}{dt}$ .

Вище було показано, що  $\frac{dQ(t)}{dt} = f(t)$  і тому на підставі умови (5.4) маємо

$$-\frac{dP(t)}{dt} = \frac{dQ(t)}{dt} = f(t) \quad (5.7)$$

Підставляючи в рівняння (5.6) з рівняння (5.7) вираз  $f(t)$ , отримуємо залежність інтенсивності відмов вузлів, що залишилися працездатними від швидкості наростання відмов:

$$\lambda(t) = -\frac{dP(t)}{dt} \frac{1}{P(t)} = f(t) \quad (5.8)$$

Цю важливу залежність широко використовують в теорії надійності. Вона є узагальненим законом надійності невідновлюваних виробів, представленим у диференціальній формі. Для наочності у правій частині рівняння (5.8) на рис. 5.1. подані як приклад значення ймовірності безвідмовної роботи  $P(t_1)$ , ймовірності відмови  $Q(t_1)$ , швидкості  $-\frac{dP(t)}{dt} = -tg \alpha_1$ , зниження ймовірності безвідмовної роботи і наростання ймовірності відмови  $\frac{dQ(t)}{dt} = -tg \alpha_2$  в момент  $t_1$ . Аналогічним чином можна подати ці ж показники надійності в будь-який момент часу.

### 5.4. Узагальнений закон надійності невідновних вузлів у інтегральній формі

Визначимо на підставі виразу (5.8) інтегральну залежність ймовірності безвідмовної роботи від інтенсивності відмов у кожен момент часу. Для цього спочатку розділимо змінні у виразі (5.8), тобто подамо цю рівність у вигляді:

$$-\lambda(t)dt = \frac{dP(t)}{dt}$$

Інтегруючи його, одержимо:

$$-\int \lambda(t)dt = \int_0^t \ln P(t) = \ln P(t) - \ln P(0)$$

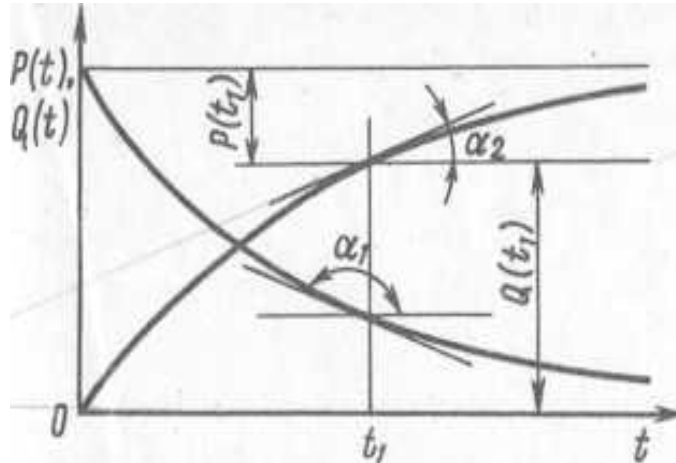
оскільки  $P(0)=1$ , а  $\ln=0$ , то

$$-\int_0^t \lambda(t)dt = \ln P(t) \quad (5.9)$$

Потенціюючи рівняння (5.9). отримаємо остаточно, що

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (5.10)$$

Вираз (5.10) являє собою узагальнений закон надійності в інтегральній формі, який широко використовують у практиці розрахунків. Хоча цей закон отриманий для невідновлюваних вузлів, його можна використовувати при певних припущеннях і для відновлюваних вузлів і систем в цілому.



**Рис. 5.1. Криві зміни ймовірностей безвідмовної роботи  $P(t_1)$  і ймовірності відмови  $Q(t_1)$**

### **Контрольні запитання**

1. До яких відмов, раптових чи поступових, належить розрегулювання апаратури?
2. До яких відмов, раптових чи поступових, належить перекидання на колекторах двигунів?
3. До яких відмов, раптових чи поступових, належить пробій ізоляції?
4. До яких відмов, раптових чи поступових, належить виникнення тріщин в устаткуванні?
5. До яких відмов, раптових чи поступових, належить знос третьових деталей?
6. До яких відмов, раптових чи поступових, належить зниження електричної міцності ізоляції?

7. Дати визначення поняттю «наробіток до відмови невідновлюваних вузлів».
8. Дати визначення поняттю «гамма-процентний наробіток невідновлюваних вузлів».
9. Дати визначення поняттю «частота відмов невідновлюваних вузлів».
10. Дати визначення поняттю «інтенсивність відмов невідновлюваних вузлів».

**Література** [3], [9], [10], [16].

## Література

1. ДСТУ 2860 – 94. НАДІЙНІСТЬ ТЕХНІКИ. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1995. – 92 с.
2. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 37 с.
3. *Электроподвижной состав: эксплуатация, надежность и технология ремонта: Учебник для вузов ж-д. транспорта.* / Под ред. А.Т. Головатого, П.И. Борцова.–М.: Транспорт, 1983. – 350 с.
4. *Галкин В.Г., Парамзин В.П., Четвергов В.А.* Надежность тягового подвижного состава: Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта.–М.: Транспорт, 1981. – 184 с.
5. *Решетов Д.М.* др. Надежность машин. – М.: Высшая школа, 1988.
6. *Кубарев А.И.* Надежность в машиностроении.–М.: Издательство стандартов, 1988.
7. *Соловьев В.К.* Основы математической теории надежности. – М.: Знание, 1975.
8. *Саульев В.К.* Математическая теория надежности. – М.: Наука, 1974.
9. *Дружинин Г.В.* Надежность автоматизированных систем управления. – М.; Энергия, 1977.
10. *Черних Ю.М.* Методичні вказівки до практичних занять з курсу «Основи надійності вагонів» – К.: КІЗТ.– 2001.
11. *Шульгінов Б.С.* Надійність електрорухомого складу: Методичні вказівки до курсової роботи із дисципліни «Основи теорії надійності електрорухомого складу». – К.:ДЕТУТ, 2008. – 32 с.
12. *Ивлев В.В.* Надежность систем из однотипных элементов. – М.: Радио и связь, 1986. – 96 с.
13. *Вентцель Э.С.* Теория вероятностей.: Учебник для высших технических учебных заведений.–М.: Наука, 1969. – 576 с.
14. *Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В.* Краткий курс математической статистики для технических приложений.–М.: Физматгиз, 1959. – 436 с.
15. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов.–М.: Наука, 1980. – 975 с.
16. *Устич П.А., Карпычев В.А., Овечников М.Н.* Надежность рельсового нетягового подвижного состава.–М.: ИГ «Вариант», 1999.–41 с.
17. *Алексюк М.М.* Основы теорії надійності електрорухомого складу: Методичні рекомендації щодо виконання практичних робіт із дисципліни «Основи теорії надійності електрорухомого складу». – К.: ДЕТУТ, 2008. – 30 с.
18. *Поленюк А.В., Черных Ю.М.* Методические указания по проведению практических занятий по курсу «Надежность ЭПС». – Днепропетровск: ДИИТ,1991.–18 с.
19. *Четвергов В.А., Пузанков А.Д.* Надежность локомотивов. – М.:Маршрут, 2003.–415 с.

*Навчально-методичне видання*

**Юрій Максимович Черних**

# **ОСНОВИ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ**

Конспект лекцій  
для студентів напряму підготовки 6.050702  
«Електромеханіка» всіх форм навчання

## **Частина 1**

Відповідальний за випуск: Черних Ю.М.

Редактор: Щербак Н.В.  
Макет і верстка Андрієнка В.О.

Підписано до друку 17.04.14 р. Формат 60x84/16.  
Друк – ризографія. Папір – офсетний.  
Зам. №100/14. Тираж 15 прим.

Надруковано у Редакційно-видавничому відділі ДЕГУТ  
Свідоцтво про реєстрацію від 27.12.2007 р. Серія ДК № 3079  
03049, м. Київ – 49, вул. Миколи Лукашевича, 19