

УДК 629.421.4/5

*Ю.Я. Водянніков, О.Г. Макеєва, К.Л. Жихарцев*

### ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ І МАНЕВРОВИХ ЛОКОМОТИВІВ З МЕТОЮ ПРОДОВЖЕННЯ ЇХ ТЕРМІНУ СЛУЖБИ

*Представлені особливості методики продовження терміну служби промислових і маневрових локомотивів. Запропоновано, для прийняття обґрунтованого рішення за результатами діагностування, застосовувати методи статистичних рішень, а оцінку ресурсу - на основі концепції накопичення розсіяних пошкоджень.*

**Вступ.** Можливість продовження призначеного терміну служби промислових і маневрових локомотивів визначається наявністю у нього залишкового ресурсу базових частин (рама візка, рама кузова, несні елементи кузова) з вичерпаним призначеним строком служби.

На відміну від магістральних локомотивів, експлуатація промислових і маневрових локомотивів відбувається за низьких швидкостей руху (до 40 км/год), при цьому основні ушкодження вузлів промислових локомотивів обумовлені проходженням стикових зазорів.

У зв'язку з цим, методика продовження терміну служби промислових і маневрових локомотивів має деякі особливості на відміну від магістральних.

**Постановка проблеми.** Залишковий ресурс визначається за результатами технічного діагностування базових частин локомотива. Термін «діагностика» відповідає грецькому слову «diagnosis» (розпізнавання), а технічним діагностуванням називається наука про розпізнавання технічного стану об'єкта [1, 2]. Тому, основним завданням технічної діагностики є розпізнавання технічного стану в умовах обмеженої інформації. Як правило, аналіз стану проводиться в умовах експлуатації, за яких отримання інформації вкрай ускладнене, тому часто не представляється можливим за наявною інформацією зробити однозначний висновок, в свою чергу викликає необхідність використання статистичних методів.

**Матеріали і результати досліджень.** Для прийняття обґрунтованого рішення застосовують методи статистичних рішень. Рішення задач технічної діагностики пов'язано з прогнозуванням надійності на найближчий період експлуатації (до наступного технічного ремонту), які ґрунтуються на моделях відмов (табл. 1).

Іншим важливим напрямком технічної діагностики є контролепридатність - властивість виробу, що характеризує його пристосованість до проведення контролю заданими засобами [3].

© *Водянніков Ю.Я., Макеєва О.Г., Жихарцев К.Л., 2020*

---

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

*Таблиця 1. - Класифікація відмов*

Відмова	Причина	Характер прояви	Характер пошкодження
Втома	Вплив експлуатаційних навантажень	Тріщини	Початкова довжина, швидкість розвитку, критична довжина
Зношування	Тертя	Зміна геометричних розмірів	Зазори
Старіння	Вплив навколишнього середовища	Розшарування, розтріскування, зміна міцності	Площа, глибина, межа міцності, межа втоми
Корозія	Агресивне середовище, підвищена вологість	Очаги корозії	Площа, глибина
Випадкові ушкодження	Випадкові удари, наднормативні навантаження	Вм'ятини, подряпини, пробойни, зміна геометричних розмірів	Площа, довжина, глибина, втрата стійкості

Контролепридатність передбачає визначення зовнішньої і внутрішньої зони обстеження в загальній конструкції з метою розмежування цих зон на ті, для яких буде здійснюватися 100 % контроль (зовнішні) і ті, які вимагають формування програми вибіркового контролю.

Програма вибіркового контролю базується на основі ймовірності виявлення тріщини [4-8] або іншого критичного пошкодження (табл. 2).

*Таблиця 2. - Аналітичні вирази, які використовуються при розрахунку ймовірності виявлення тріщини*

Позначення параметра	Аналітичний вираз ймовірності виявлення	Найменування параметру
1	2	3
$Q_A$	$Q_A = Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3 \cdot Q_4$	Ймовірність виявлення пошкодження: при одиничному контролі; одиничного пошкодження в одиничній зоні одиничним методом контролю
$Q_B$	$Q_B = 1 - (1 - Q_A)^\phi$	Ймовірність виявлення пошкодження: при багаторазовому контролі; одиничного пошкодження в одиничній зоні одиничним методом контролю
$Q_C$	$Q_C = 1 - (1 - Q_B)^\phi$	Ймовірність виявлення пошкодження: при багаторазовому контролі; безліч пошкоджень в одиничній зоні одиничним методом контролю

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Кінець таблиці 2

1	2	3
$Q_E$	$Q_E = 1 - [1 - \prod_{i=1}^k (1 - Q_{Ci})]$	Ймовірність виявлення пошкодження: при багаторазовому контролі; безліч пошкоджень в безлічі зон безліччю методів контролю
$q$	$q = \frac{\log(1 - Q_E)}{\log(0,5)}$	Порівняльний критерій оцінки ймовірності (50/50) виявлення в парку об'єктів
<p><i>Примітка:</i>  <math>Q_1</math> - ймовірність виявлення пошкодження при контролі одиничного (конкретного) елемента;  <math>Q_2</math> - ймовірність виявлення елемента, що має пошкодження;  <math>Q_3</math> - ймовірність виявлення зони, що має пошкодження;  <math>Q_4</math> - ймовірність виявлення об'єкта, що має пошкодження.</p>		

Коефіцієнт  $\phi$  визначається за формулою:

$$\phi = \sum_{n=1}^n \left[ 1 - \frac{(n-1) \cdot \Delta N}{N} \right], \quad (1)$$

де  $\Delta N$  - період між випадками появи ушкоджень у парку локомотивів;

$n$  - кількість пошкоджених елементів;

$N$  - парк локомотивів.

Важливим елементом діагностування є визначення областей конструкції з потенційно високими значеннями напружень під час впливу експлуатаційних навантажень. Такі області, як правило, визначаються шляхом проведення розрахункових досліджень.

Вихідним матеріалом оцінки напружень є результати розрахунку на статичні навантаження, який дозволяє виявити найбільш небезпечні зони з точки зору накопичення пошкоджень. Цей розрахунок виконується від дії вертикальних вагових навантажень, так як вони для промислового тепловоза відносяться до найбільш важливих. Напруження в небезпечних зонах, викликані впливом вагових навантажень, представлятимуть середні значення напружень циклів, обумовлених коливаннями локомотива під час проходження стикових зазорів.

Сучасні методи оцінки напружено-деформованого стану, що застосовуються під час розрахунку несних конструкцій, базуються на програмах, призначених для створення повноцінної кінцево-елементної моделі [9], яка враховує особливості геометричних розмірів, силових факторів тощо. До таких програм слід віднести ANSYS фірми ANSYS Corporation, DesignWorks фірми CADSL H, Cosmos / DesignStar і фірми StructuralResearch & AnalysisCorporation, MSC NastranforWindows і практично всю лінійку програмних продуктів MSC тощо.

За результатами розрахункових досліджень розробляється карта обстеження для рами кузова (рис. 1) і рами візка (рис. 2) із зазначенням зон як для огляду, так і за необхідності, проведення дефектоскопії з метою виявлення тріщин.

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

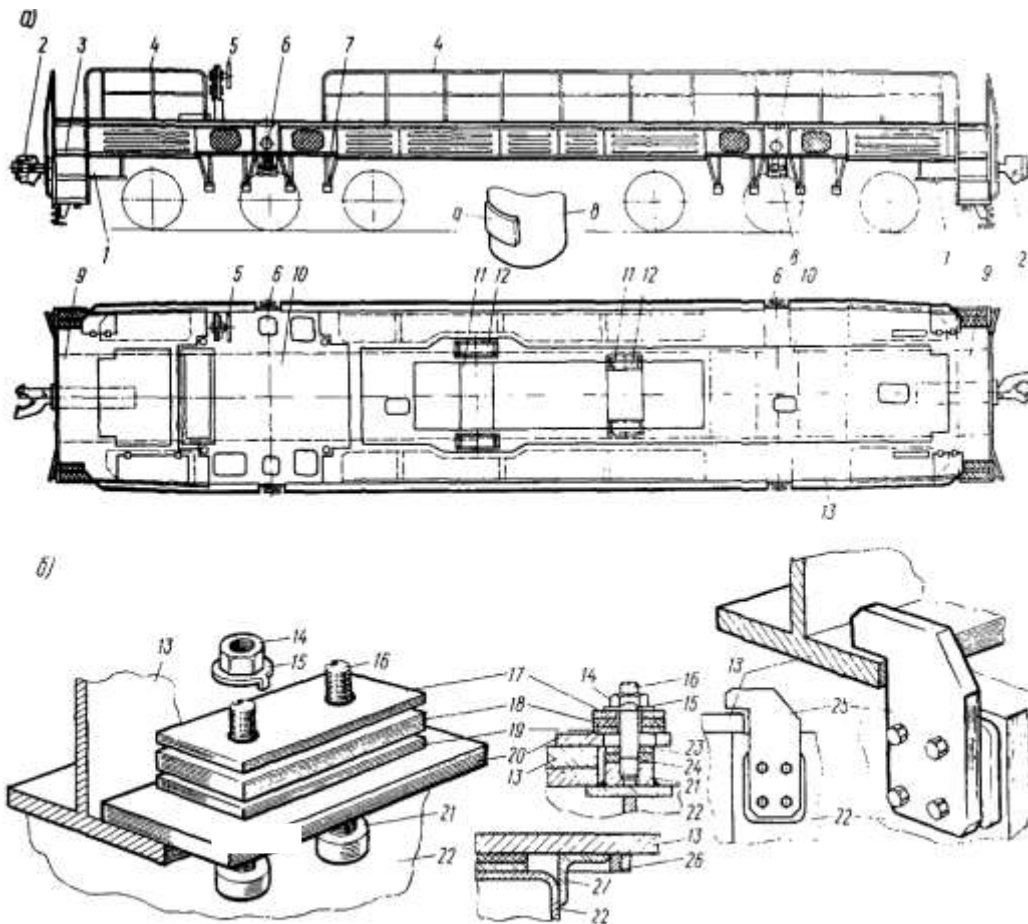


Рис. 9. Главная рама тепловоза (а) и подвеска топливного бака (б):  
 1 — стыжной ящик; 2 — автоцепка; 3 — подножка; 4 — поручни; 5 — ручной тормоз; 6 — подвес; 7 — консоли; 8 — шкворень; 9 — буферный брус; 10 — шкворневая балка; 11 — поперечная балка; 12, 20 — плиты; 13 — продольная балка; 14 — гайка; 15 — лепестковая шайба; 16 — шпилька; 17, 18, 19 — резинометаллические прокладки; 21 — усилительная бонка; 22 — топливный бак; 23, 24 — стальные прокладки; 25 — предохранительный захват; 26 — выступ; 27 — упорный угольник; а — сменная накладка

Рис. 1. Рама маневрового тепловоза ЧМЭЗ

Обстеження технічного стану є першим кроком продовження терміну служби локомотива.

Наступні етапи містять оцінку залишкового ресурсу, в якості критеріїв для якого приймаються: корозія металу; довговічність (втомна міцність) і накопичення пошкоджень.

**Корозія.** Для визначення залишкового ресурсу, в разі корозійного пошкодження, необхідно визначити:

- ✓ мінімальну товщину елементів, за яких напруження досягають границі плинності,
- ✓ корозійну стійкість сталі [10] - здатність матеріалів чинити опір корозії, яка формується швидкістю корозії в даних умовах.

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

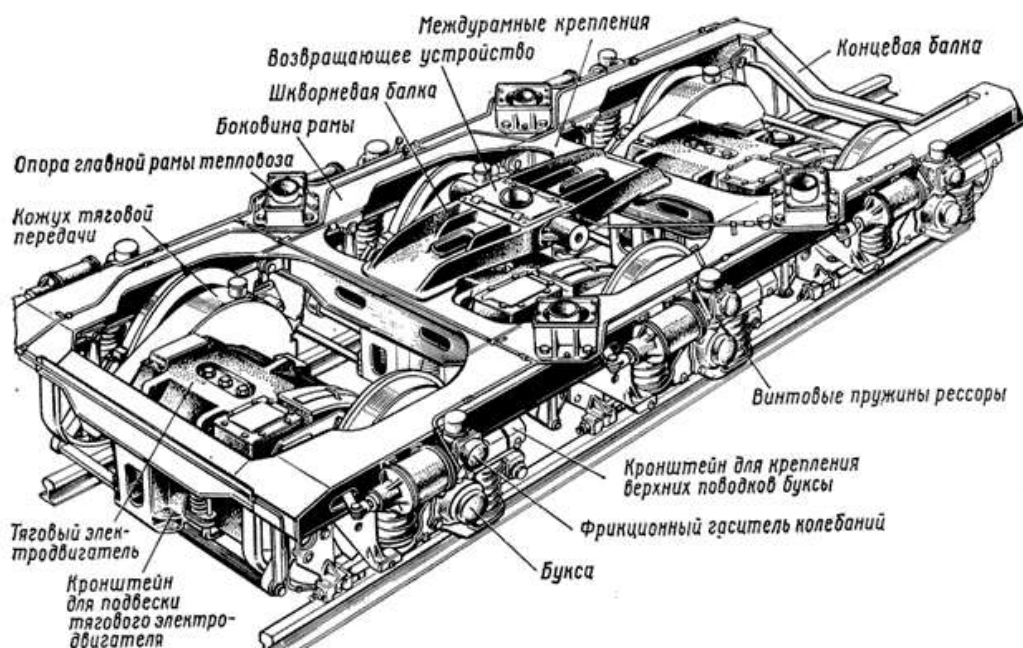


Рис. 2. Візок маневрового тепловоза ЧМЭЗ

Слід зазначити, що корозійні пошкодження мають критичне значення для тонкостінних конструкцій, наприклад рам вагонів, для товстостінних конструкцій, які не працюють в агресивних середовищах, цим фактором можна знехтувати.

**Довговічність.** Одним з критеріїв у разі оцінки довговічності рами кузова, рами візка є момент появи втомних тріщин в найбільш напружених вузлах конструкції. Оцінка опору втоми визначається двома способами: розрахунковим [11-12] і шляхом проведення стендових випробувань базових частин локомотива. Для цього необхідно отримувати записи зміни напружень в найбільш ушкоджуваних зонах під час руху локомотива з робочою швидкістю по коліях промислових підприємств. Істотна різниця полягає як у конструкції та стану колії, так і у швидкостях, з якими рухається рухомий склад. У зв'язку з цим, слід очікувати, що динамічні напруження і частоти коливань рам промислових локомотивів, будуть значно менші в порівнянні з магістральними.

**Накопичення пошкоджень.** Для промислових локомотивів, що мають тривалий термін служби до 50 років, важливим, для продовження терміну служби, є фактор накопичення пошкоджень. Це пов'язано з тим, що в умовах експлуатації елементи конструкції сприймають складний комплекс силових впливів, що призводить в матеріалі на рівні субмікро-, мікро- і макрорівнях до: хімічних флуктуацій; порушення вихідної структури; зародження, локалізації і злиття пір і мікротріщин; утворення і розвитку макротріщин. Ці незворотні зміни структури, що відбуваються на всіх стадіях деформування, призводять до певної «пошкоджуваності» матеріалу і, як наслідок, - до його руйнування.

В даний час велике поширення набули методи, в яких в якості запобіжного пошкодження прийнятий деякий формально введений параметр, що залежить від тривалості навантаження або накопиченої деформації.

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

---

Основними параметрами, що визначають темп зростання пошкодженості, є фактори зовнішніх впливів: рівень напружень і режим навантаження, вид напружено-деформованого стану матеріалу, ступінь агресивності середовища, а також поточний рівень пошкодженості.

Процес вичерпання ресурсу міцності конструкції в рамках теорії накопичення розсіяних пошкоджень трактується у вигляді кінетичного рівняння [13-15]:

$$\frac{d\omega}{d\xi} = f[q(\xi), \omega(\xi)] \quad (1)$$

де  $\xi$  - аргумент, який має сенс напрацювання (час, число циклів навантаження, накопичена деформація або інші параметри;

$\omega(\xi)$  и  $q(\xi)$  - функції, вибір яких проводиться, виходячи з певних теоретичних чи експериментальних даних, отриманих з досить простих дослідів.

Найпростішою моделлю накопичення пошкоджень є правило лінійного підсумовування. У розрахунках на втому принцип лінійного підсумовування представляється в формі лінійної залежності накопичених пошкоджень від відносного напрацювання, вираженої через число циклів навантаження (критерій Пальмгрена):

$$\sum_{k=1}^n \frac{N_k}{N_p} = 1 \quad (2)$$

де  $n$  – кількість тимчасових інтервалів;

$N_k$  – число циклів навантаження в  $k$ -му інтервалі;

$N_p$  – число циклів навантаження до граничного стану.

### Висновки.

Під час діагностування технічного стану локомотива доцільно використовувати методику контролепригодності, яка дозволяє визначити ймовірність виявлення пошкодження.

Корозія не є критичним фактором для визначення ресурсу рами кузова і візка локомотива.

Концепція накопичення розсіяних пошкоджень може бути використана для прогнозування ресурсу конструкції до утворення тріщин.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бигус Г. А. Основы диагностики технических устройств и сооружений. // Г. А. Бигус, Ю. Ф. Даниев, Н. А. Быстрова. Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. М. 2015 – 448 с. ;
2. Мигаль В. Д. Методы технической диагностики автомобилей: Учебное пособие/ Серия «Высшее образование», Издатель Форум. М. 2016-416 с.
3. В. И. Сагунов, Контролепригодность структурно связанных систем // Сагунов В. И., Ломакина Л. С. Серия: "Библиотека по автоматике", Издательство: "Государственное энергетическое издательство" . 1990-112 с. ;
4. Баврин И.И. Теория вероятностей и математическая статистика / И.И.Баврин. - М.: Высш. шк., 2005.— 160 с. ;

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

---

5. Вентцель Е. С. Задачи и упражнения по теории вероятностей: Учеб. пособие для студ. вузов / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. — 5-е изд., испр. — М.: Издательский центр «Академия», 2003. — 448 с. ;
6. Гмурман В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике /В. Е. Гмурман. - М., Высш.шк., 2004.- 404 с.
7. Гмурман, Владимир Ефимович. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов /В. Е. Гмурман.-Изд. 12-е, перераб.-М.:Высшая школа, 2009.- 478с. ;
8. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей: Учебник / Б.В. Гнеденко. - Изд. 8-е, испр. и доп. — М.: Едиториал УРСС, 2005. — 448 с. ;
9. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975 -541 с.;
10. А. П. Черепанов. Применение показателя коррозионной стойкости материала при оценке ресурса технических устройств // XXI век. Техносфернаф безопасность. 2016. № 2.URL;
11. С. В. Серенсен. Руководство по расчету на усталость деталей машин (в вероятностном аспекте) к определению расчетных характеристик сопротивления усталости деталей машин. // Серенсен С. В., Когаев В.П. – М.: ВНИИНМаш, 1971 – 106 с.;
12. С. В. Серенсен. Руководство к определению расчетных характеристик сопротивления усталости деталей машин.// Серенсен С. В., Когаев В.П. – М.: ВНИИНМаш, 1972 – 107 с.;
13. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.;
14. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях: Анализ, предсказание, предотвращение / под ред. Э. И. Григолюка. – М.: Мир, 1985 -624 с.;
15. Качанов Л. М. Основы механики разрушения. – М.: Наука, 1974. – 308 с.;