

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Горобець Володимир Леонідович

УДК 629.4.023"4014".001

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО - ТЕОРЕТИЧНІ МЕТОДИ ОЦІНКИ РЕСУРСУ
НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ

Спеціальність: 05.22.07 - Рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпропетровськ – 2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі "Будівельна механіка" Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор
БЛОХІН Євген Петрович,
науковий керівник Галузевої науково-дослідної лабораторії динаміки та міцності рухомого складу, завідувач кафедри "Будівельна механіка" Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук, професор ГОЛУБЕНКО Олександр Леонідович, ректор Східноукраїнського національного університету імені В. Даля, м. Луганськ.
- доктор технічних наук, БУБНОВ Валерій Михайлович, Головний конструктор з вагонобудування „Головного спеціалізованого конструкторського бюро з вагонобудування” АТ „Азовмаш”, м. Маріуполь;
- доктор технічних наук, професор ТАРТАКОВСЬКИЙ Едуард Давідович, завідувач кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Української державної академії залізничного транспорту, м. Харків;

Захист відбудеться " ____ " _____ 2009р. о ____ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.02 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Акад. Лазаряна, 2, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Акад. Лазаряна, 2.

Автореферат розісланий " ____ " _____ 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради, д.т.н. проф.

Жуковицький І.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Вступ. Забезпечення ресурсу несучих конструкцій (НК), у тому числі залишкового, є однією з пріоритетних наукових проблем. Це пояснюється тим, що конструкції, призначений строк служби яких вичерпано повинні бути виключені з експлуатації, в той час як їхнє подальше використання дозволяє одержати істотний економічний ефект. При цьому подовження загального строку служби НК повинно бути чітко й всебічно науково обґрунтовано.

Роботи з подовження строку служби рухомого складу (РС) України проводяться Державною адміністрацією залізничного транспорту України (Укрзалізниця, УЗ) з 1998 року.

Вирішення проблеми оцінки ресурсу (у тому числі, залишкового) НК РС ґрунтується на проведенні науково-дослідних робіт із застосуванням комплексних експериментально-теоретичних методів. Основні НК (рами візків і кузови) є елементами конструкції РС, які визначають безпеку його експлуатації.

У поєднанні з призначенням нових строків служби РС виконуються програми з діагностики й неруйнівного контролю його основних елементів і вузлів, що забезпечує індивідуальний періодичний технічний контроль їх стану.

Актуальність теми. Основною функцією залізничного транспорту є транспортування вантажів і перевезення пасажирів при безумовному дотриманні вимог безпеки руху поїздів. Важливою частиною її реалізації є забезпечення потрібного технічного стану парку РС й правомірності його безпечної експлуатації. На поточний момент склалася ситуація, коли значна частина основних серій рухомого складу залізниць України (тягового, моторвагонного, вагонів) експлуатується з перевищенням призначеного строку служби. Повна заміна парку РС новими, прогресивними конструкціями вимагає часу на їх розробку, виготовлення та освоєння, перебудову ремонтної й експлуатаційної бази і, як наслідок, істотних капітальних вкладень.

У зв'язку із цим виникає проблема розвитку експериментальних і теоретичних методів оцінки можливості експлуатації РС, що вичерпав встановлений термін служби. Застосування таких методів дозволяє в ряді випадків обґрунтувати додаткові резерви його наднормативного використання, тим самим сприяючи забезпеченню працездатності галузі.

Не менш відповідальною є задача оцінки ресурсу на стадії проектування й відпрацьовування конструкцій нового РС з метою забезпечення безпеки його експлуатації й впровадження довгострокового планування відновлення локомотивного та вагонного парку.

Можливість експлуатації одиниць РС значною мірою визначається технічним станом їх основних несучих конструкцій - рам візків і кузовів. Тому науково обґрунтована оцінка ресурсу зазначених конструкцій, пов'язана із забезпеченням їх міцності після тривалого періоду експлуатації є шляхом рішення розглянутої проблеми. Це визначає актуальність дисертаційної роботи, спрямованої на розвиток комплексних теоретичних і експериментальних методів оцінки ресурсу несучих конструкцій рухомого складу й наукове обґрунтування можливості подовження їх терміну служби.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота являє собою складову частину науково-дослідних робіт (НДР) з оцінки ресурсу НК РС, які виконувалися Дніпропетровським національним університетом залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна на підставі наказу Генерального директора Державної адміністрації залізничного транспорту України 44-Ц від 17.02.1998 р. та у відповідності до Програми подовження строку служби тягового рухомого складу України.

Результати роботи використано при проведенні наступних НДР:

- «Разработка специализированной системы на базе АВК-32 для моделирования колебаний агрегата 8Т710 и воздействий на объект при его отработке на случай транспортировки с использованием вибростенда «Шенк», № ГР 01850075421. – Днепропетровск, 1987. – 194 с.
- «Розробка рекомендацій по підвищенню терміну експлуатації дизель – поїздів Д1, ДР1 на підставі проведення експериментально-аналітичних робіт», № ДР 0199U000049. – Дніпропетровськ, 1999. – 157 с.;
- «Розробка технічного відношення по визначенню залишкового ресурсу рам візків електровозів ЧС4», № ДР 0199U001439 – Дніпропетровськ, 1999. – 62 с.;
- «Дослідження залишкової втомлюваної міцності несучих конструкцій тепловозів М62, 2М62 та розробка заходів по підвищенню строку їх експлуатації», № ДР 0199U001440. – Дніпропетровськ, 2000. – 109 с.;
- «Визначення термінів та умов подовження строку служби кузовів електровозів ЧС2 та розробка заходів по забезпеченню їх наднормативної експлуатації», № ДР 0103U005119. – Дніпропетровськ, 2003. – 87 с.;
- «Проведення випробувань кузовів (кабіна, боковини) електровозів ЧС-4, ЧС-2, виготовлених ЗЕРЗ», № ДР 0103U005120. – Дніпропетровськ, 2003. – 210 с.;
- «Проведення досліджень та підготовка технічних рішень по поетапному подовженню терміну служби дизель – поїздів Д1, ДР1 до проведення їх капітально – відновлювального ремонту», № ДР 0103U003336. – Дніпропетровськ, 2003. – 39 с.;
- «Проведення досліджень та підготовка технічних рішень по поетапному подовженню терміну служби електропоїздів ЕР1, ЕР2 до проведення їх капітально – відновлювального ремонту», № ДР 0103U003337. – Дніпропетровськ, 2003. – 97 с.;
- «Дослідження з оцінки залишкового ресурсу та можливостей подовження строку служби основних несучих конструкцій електропоїздів ЕР9Е, ЕР9М», № ДР 0106U006495. – Дніпропетровськ, 2006. – 90 с.;
- «Розробка методики поетапного подовження терміну служби рам візків електровозів ЧС4 понад встановлений термін експлуатації без їх заміни», № ДР 0106U006496. – Дніпропетровськ, 2006. – 58 с.

По зазначених науково - дослідних роботах автор роботи був їх керівником (відповідальним виконавцем) і автором науково - технічних звітів.

Мета та задачі дослідження. Метою даної роботи є вдосконалювання методів комплексної теоретико-експериментальної оцінки характеристик витривалості та ресурсу НК РС і наукове обґрунтування його наднормативної експлуатації.

Для реалізації цієї мети поставлено наступні *задачі*: виконати аналіз причин втомних руйнувань основних несучих конструкцій РС в експлуатації; розробити та вдосконалити методи оцінки витривалості та ресурсу несучих конструкцій РС; вдосконалити методи комплексної теоретичної та експериментальної оцінки характеристик опору втомі НК РС; у тому числі, непрямі методи; розробити математичний опис систем випробування НК РС на натурні транспортні вібрації; удосконалити методи експериментальної оцінки характеристик динаміки РС, що мають вплив на точність оцінок його витривалості та ресурсу; розробити науково-методологічне забезпечення створення системи одночасного та поетапного подовження строку служби основних несучих конструкцій РС.

Об'єктом дослідження є процес опору несучих конструкцій залізничного рухомого складу дії циклічних навантажень.

Предметом дослідження є експериментально - теоретичні методи оцінки ресурсу й терміну служби несучих конструкцій рухомого складу залізниць як міри тривалості процесу їх опору дії циклічних навантажень.

В роботі було використано наступні *методи*:

- методи експериментальної оцінки динамічної навантаженості несучих конструкцій рухомого складу в процесі його експлуатації для отримання кількісних оцінок вказаної навантаженості та виявлення причин, що спричиняють руйнування окремих елементів НК РС;
- методи теорії ймовірності та математичної статистики для оцінки статистичних характеристик відхилення границі витривалості НК РС від їх медіанного значення та визначення функцій розподілу параметрів циклів змінних напружень у елементах несучих конструкцій в процесі випробувань та експлуатації рухомого складу;
- метод скінченних елементів (МСКЕ) для оцінки напружено-деформованого стану несучих конструкцій РС;
- методи механіки твердого тіла для оцінки залишкового ресурсу НК РС;
- методи вищої математики та опору матеріалів для вдосконалення моделей опору втомі, використовуваних для оцінки ресурсу НК РС та розробки непрямих методів оцінки їх залишкового ресурсу;
- методи адаптивного управління та обчислювальної математики для розробки системи випробувань несучих конструкцій на дію натурних експлуатаційних вібрацій.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукове значення роботи полягає в наступному.

Вперше одержано:

- теоретичне обґрунтування методів вибору режимів проведення стендових вібраційних випробувань несучих конструкцій рухомого складу (у

тому числі великогабаритних піддатливих об'єктів), що забезпечують лінійне накопичення ушкоджень в конструкції при її блоковому навантаженні з наростанням його амплітуди, а для великогабаритних конструкцій дозволяють одержувати близьке до експлуатаційного співвідношення наробітків основних несучих елементів;

- наукове обґрунтування методів оцінки ресурсу несучих конструкцій рухомого складу непрямыми методами, що дозволяють істотно скоротити обсяги експериментальних досліджень за рахунок використання статистичних показників відмов елементів несучих конструкцій, результатів попередніх досліджень з оцінки динаміки, міцності й ресурсу несучих конструкцій – аналогів досліджуваних конструкцій;
- створення науково-методичної бази проведення комплексних робіт з визначення ресурсу несучих конструкцій тягового рухомого складу різних серій, яка характеризується поєднанням існуючих нормативних вимог до нового рухомого складу, а також обсягів і методів виконання теоретичних і експериментальних робіт з оцінки навантаженості, міцності, витривалості й залишкового ресурсу основних несучих конструкцій.

Одержали подальший розвиток:

- експериментально-теоретичний метод проведення комплексу робіт з оцінки витривалості й ресурсу основних НК РС, що є узагальненням існуючого досвіду проведення відповідних досліджень;
- математичні моделі опору втомі, засновані на принципі оцінки отриманого конструкціями наробітку, стосовно до НК залізничного РС, що поєднують переваги існуючих підходів до оцінки витривалості несучих конструкцій, прийнятих в області залізничного транспорту.

Удосконалено:

- теоретичні основи створення стендових вібраційних систем для випробувань несучих конструкцій рухомого складу на натурні експлуатаційні вібрації, у тому числі, об'єктів великої ваги, що відрізняються від існуючих методів застосуванням попередньої корекції (попереднього перекручення) відтворюваних навантажень, здійснюване за результатами короткочасних тестових навантажень об'єктів випробувань;
- метод оцінки коефіцієнта запасу міцності з урахуванням експериментальних розподілів параметрів циклів навантаження НК, що відрізняється врахуванням напрямку фактичного відхилення параметрів циклів навантаження від стану рівноваги конструкції.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

- основні розроблені в дисертації теоретичні положення використані при виконанні робіт з подовження призначеного строку служби рухомого складу Укрзалізниці, РЖД (пасажирські вагони) та промислового транспорту по наступних серіях рухомого складу:
 - моторні та головні (причіпні) вагонів електропоїздів ЕР1, ЕР2, ЕР9П, ЕР9Е, ЕР9М;
 - моторні та головні (причіпні) вагонів дизель - поїздів Д1, ДР1А;

- несучі конструкції (рами візків та рами кузовів) магістральних електровозів ЧС2, ЧС4, ЧС7, ЧС8 (два останні – з точки зору міцності шкворневих балок), ВЛ8;
- несучі конструкції (рами візків та рами кузовів) магістральних тепловозів М62, 2М62, 2ТЕ10;
- несучі конструкції (рами візків, надресорні балки та кузови) пасажирських вагонів після проведення капітально – відновного ремонту на ВАТ „Дніпровагонрембуд”;
- несучі конструкції (рами візків та рами кузовів) маневрових тепловозів ТГМ6А.
- результати робіт впроваджені при розробці нормативної документації з подовження строку служби локомотивів і моторвагонного рухомого складу (Акти впровадження результатів робіт Укрзалізниці від 24.04.08 р., Проектно-конструкторського бюро Головного управління локомотивного господарства Укрзалізниці (ПКТБ ЦТ) від 28.05.08 р., Державного конструкторського бюро «Південне» від 20.06.08 р., Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна від 10.07.08 р).

Особистий внесок здобувача. Основні положення й результати, наведені в роботі, отримані автором самостійно. Статті [5, 12, 14, 27, 18, 20, 25] опубліковано без співавторів. У публікаціях, опублікованих у співавторстві, авторіві роботи належить:

- розробка методу відтворення вібрацій елементів рухомого складу в частині забезпечення фізичної реалізованості алгоритму [1];
- вибір і обґрунтування режимів навантаження НК ТРС при проведенні їх стендових вібраційних випробувань [2, 4];
- участь у розробці концепції подовження терміну служби ТРС [3, 16, 26];
- розробка методики й аналіз результатів циклічного навантаження рам візків у частині контролю накопичення їх залишкових прогинів [6];
- розробка специфічних методик проведення й програм обробки результатів динамічних міцносних випробувань рухомого складу з метою оцінки ресурсу його основних несучих конструкцій [8, 19, 21];
- порівняльний аналіз існуючих методик оцінки ресурсу НК [9];
- методичне обґрунтування й практичне виконання розрахункової частини результатів з оцінки ресурсу НК пасажирських вагонів [10, 15];
- порівняльний аналіз моделей витривалості з метою оцінки правомірності застосування принципу зниження границі витривалості НК у процесі отримання ними наробітку [7];
- розробка моделі витривалості матеріалів і конструкцій з урахуванням зміни їхніх властивостей в процесі навантаження [22];
- розробка й узгодження методики й алгоритмів поетапного подовження термінів служби НК [11];

- наукове обґрунтування застосування методів оцінки показників міцності, витривалості й ресурсу НК непрямыми методами [17];
- аналіз динамічної навантаженості маневрового тепловоза ТГМ6А в частині придатності експериментальних даних для застосування методів непрямої оцінки ресурсу кузова локомотива [13];
- розробка методу порівняння динамічної навантаженості НК при оцінці їх витривалості й ресурсу непрямыми методами [24].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації було викладено на Міжнародних конференціях: ЮЖЕЛ'98 (м. Белград, 1998 р.); Проблемы механики железнодорожного транспорта. (Дніпропетровськ, 2000 р, 2004 р.); Транспорт XXII века: (Росія, С.-Петербург: ПГУПС-ЛИИЖТ, 2003); (АР Крим, Південноукраїнський національний університет, Ялта 2003р., Алушта 2005 р.) Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: Техніка, технологія, економіка і управління. (Київ: КУЕТТ, 2003, 2005 рр.); Внедрение наукоемких технологий на магистральном и промышленном транспорте (АР Крим: Алушта: ДІПТ – Дніпротехтранс 2005, 2006 рр.); на міжкафедральному семінарі кафедр „Будівельна механіка”, „Вагони”, „Теоретична механіка”, „Колія та колійне господарство”, „Вища математика”, „Локомотиви”, „Енергопостачання залізниць”, „Прикладна механіка” за участю представників Галузевої науково – дослідної лабораторії динаміки та міцності рухомого складу ДІПТу, Інституту рухомого складу, колії та транспортних споруд, Інституту технічної механіки НАН України і НКА України, Інституту ТСТ (ІТСТ) „Трансмаг” НАН України.

Публікації. Основні положення дисертації викладені в 40 наукових публікаціях, у тому числі в 27 наукових статтях і 13 тезах доповідей міжнародних конференцій. Основні 24 статті опубліковано у фахових виданнях, затверджених ВАК України (з них 5 – без співавторів).

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається з вступу, шістьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Рукопис містить 523 сторінок, включаючи 198 рисунків (42 сторінки), 80 таблиць (30 сторінок), бібліографію з 388 найменувань (37 сторінок) та 16 додатків, що займають 219 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

Вступ містить обґрунтування актуальності проблеми визначення ресурсу несучих конструкцій рухомого складу, визначає мету та задачі досліджень. Розкрито наукову новизну отриманих у роботі результатів, їх практичне значення. Наведено дані про апробацію та публікацію результатів дисертації.

В **першому розділі** визначено проблему оцінки ресурсу основних НК РС та подовження призначеного строку служби РС, зроблено огляд наукової літератури, присвяченої визначенню ресурсу та оцінці границі витривалості елементів НК. Розглянуто тенденції розвитку методів оцінки витривалості, підвищення опору втомі НК, оцінки експлуатаційної навантаженості несучих елементів РС.

Для локомотивів на поточний момент застосовуються два основних підходи до подовження терміну служби їх несучих конструкцій:

- одночасна оцінка гранично можливого строку експлуатації несучих конструкцій для певної серії ТРС із застосуванням сучасних експериментальних і теоретичних методів;
- поетапне подовження терміну служби несучих конструкцій РС, особливо у випадку виконання його модернізацій.

Необхідність поетапного подовження строку служби РС обумовлена тим, що його парк не може бути допущений до наднормативної експлуатації без проведення капітального ремонту з подовженням терміну служби (КРП). Система поетапного подовження терміну служби РС представлена багаторівневим контролем стану НК.

Концепція оцінки (подовження) терміну служби ТРС, без обмежень розповсюджувана на основні типи РС, може бути сформульована в такий спосіб:

1. ТРС певного типу експлуатується приблизно в рівних умовах експлуатації. За умови збереження якості технології його виготовлення, екземпляри ТРС, що одержали найбільший наробіток протягом терміну служби, можуть бути використані для оцінки залишкового ресурсу всього цього його типу;
2. Основним критерієм доцільності подовження терміну служби ТРС є забезпечення необхідного залишкового ресурсу його основних НК (рам візків і рами кузова) на період наднормативної експлуатації ТРС;
3. Основною умовою подовження терміну служби ТРС є його відповідність нормативним вимогам, пропонованим до нового ТРС.

Вирішення проблеми дослідження ресурсу НК РС пов'язане з розвитком і узагальненням існуючих методів оцінки характеристик витривалості матеріалів та НК, удосконаленням методів експериментального дослідження навантаженості НК, створенням і розвитком методів оцінки ресурсу НК РС, не пов'язаних з руйнуванням конструкції.

У **другому розділі** надано теоретичне обґрунтування проведення комплексних робіт з оцінки витривалості й ресурсу НК РС. Наведено узагальнений розрахунково-експериментальний метод оцінки ресурсу НК РС, що є розвитком методів оцінки динамічної навантаженості РС.

Введено поняття моделі витривалості, що визначає закон вичерпання несучої здатності НК РС внаслідок дії прикладених до неї детермінованих, випадкових або нестаціонарних навантажень. Розроблено систему розрахункових співвідношень оцінки міцності, витривалості й ресурсу НК РС, засновану на критеріях обсягу отриманого ними наробітку. Особливістю розроблених у розділі моделей витривалості є високий ступінь їх формалізації.

На рис. 1 показано блок-схему методу узагальненої експериментально-теоретичної оцінки характеристик довговічності НК РС залізничного транспорту. Основні, прийняті при його розробці поняття, наведено нижче.

Наробіток у навантаженнях і циклах є основою для подальшої оцінки ресурсу й терміну служби. Як міра наробітку прийнята величина

$$\hat{D} = \sum_{i=1}^k s_i^m n_i = \text{const}, \quad (1)$$

де $\hat{D}$ – дискретна форма міри наробітку НК; k – кількість розрядів (квантилів) силового фактору; s_i – i -й розряд силового фактору, у якості якого може виступати напруження в НК, зусилля, переміщення або будь-який інший фактор, корельований з руйнівним напруженням у НК; m – показник ступеня кривої витривалості; n_i – кількість циклів навантаження при значенні силового фактору s_i .

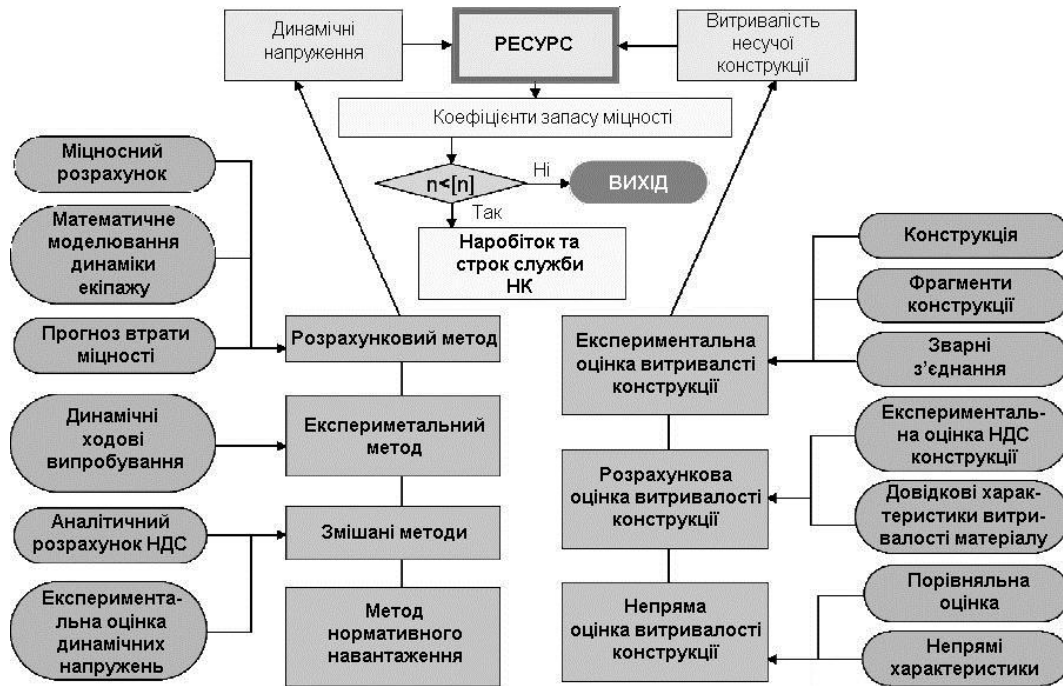


Рис. 1 Узагальнена схема методу розрахунково-експериментальної оцінки ресурсу несучих конструкцій рухомого складу

Ресурс (загальний або залишковий) $D_{\max}$, що виражається в обсязі наробітку до переходу НК у граничний стан.

Перехід від наробітку за виразом (1) до наробітку, вираженого в одиницях терміну служби може бути виконаний наступним чином

$$T = \frac{D_{\max}}{D_A \cdot L_A}, \quad (2)$$

де T – строк експлуатації, років; D_A – питомий наробіток НК, що включає руйнівні напруження, віднесені до одного кілометра пробігу РС, МПа^м; L_A – середньорічний пробіг РС, км/рік.

В роботі ресурс НК найчастіше оцінюється на підставі порівняння характеристик витривалості НК і динамічних напружень, що виникають у ній в процесі експлуатації.

Аналіз руйнівних напружень, що безпосередньо приводять до руйнування конструкції у чисто експериментальній постановці важко реалізований через складність вимірювання статичних і залишкових напружень з урахуван-

ням впливу їх концентрації. Рішенням цієї проблеми є аналіз напружень, що діють поблизу місць руйнувань та корелюються з руйнівними напруженнями.

Визначенню скінченної величини ресурсу НК передують оцінка *коефіцієнтів запасу міцності*. Виконання нормативних вимог щодо величин коефіцієнтів запасу є підставою для призначення термінів служби РС в десятки років.

Динамічні напруження, що виникають у НК РС у процесі експлуатації, можуть бути з різним ступенем вірогідності оцінені наступними методами.

Їх оцінка *розрахунковим методом* заснована на базі:

- теоретичної оцінки залежностей напружень в елементах конструкції від діючих навантажень шляхом проведення розрахунків НК на міцність з використанням методу скінченних елементів (МСКЕ) або подібних йому;
- оцінки навантажень, що діють на НК, шляхом математичного моделювання динамічних процесів при русі РС;
- прогнозу зменшення несучої здатності НК при впливі на них корозії.

Експериментальний метод оцінки динамічних напружень найпоширеніший і дозволяє одержувати обґрунтовані оцінки динамічної навантаженості НК. Але даний метод не дозволяє безпосередньо враховувати концентрацію напружень, пов'язану з недосконаlostями поверхні, величини залишкових напружень. Однак у випадку оцінки ресурсу шляхом порівняння величин наробітків, вплив багатьох невраховуваних компонентів руйнівних напружень взаємно компенсується.

Застосування *змішаних методів* дозволяє одержати найбільш обґрунтовані оцінки динамічних напружень в конструкції. При цьому певні компоненти напружень, експериментальна оцінка яких важка, можуть бути запозичені з досвіду дослідження аналогічних конструкцій або довідкової інформації.

Нормативні методи оцінки динамічних напружень у конструкції, як правило, дозволяють оцінити динамічні напруження в запас надійності розрахунків. Норми розрахунків містять практично всю інформацію, необхідну для таких оцінок, навіть з урахуванням того, що фактичні показники динаміки РС часом не задовольняють нормативним вимогам.

Витривалість НК оцінюється наступними методами.

Експериментальні методи оцінки витривалості НК засновані на створенні напружено-деформованого стану конструкції шляхом безпосереднього прикладання до них циклічних навантажень заданого напрямку й величини.

В роботі зазначається, що у всіх можливих випадках варто віддавати перевагу вказаним методам випробувань.

Зменшення вартості випробувань можна досягти шляхом заміни випробувань екземплярів конструкції випробуваннями її *фрагментів*. Однак при збереженні всіх недоліків експериментального методу до них додається необхідність вибору правильного закріплення фрагмента, а також створення адекватного експлуатаційному режиму навантаження.

Для зварних або лито-зварних конструкцій найбільш імовірним місцем руйнування є зварні шви або навколошовні зони термічного впливу зварювання. Тому одним зі способів оцінки витривалості таких НК є випробування

на витривалість *зразків зварних з'єднань*. Вони повинні бути виконані з дотриманням технології, що використовується при побудові конструкції.

Один з можливих способів зниження собівартості випробувань на витривалість представлений *розрахунковим методом* оцінки витривалості НК. При цьому руйнівні напруження оцінюються шляхом розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) НК. Вплив стану поверхні й технологічних факторів при цьому оцінюється на підставі довідкової інформації або проведених окремо експериментальних досліджень.

Введено поняття *моделі витривалості*, що містить у собі поняття:

- криву витривалості, що в будь-якій формі визначає обсяг навантаження в цілому, від початку навантажень до втрати НК несучої здатності;
- закон вичерпання несучої здатності НК під дією прикладених до неї детермінованих, випадкових або нестационарних навантажень, має враховувати відомі експериментальні дані.

Природною мірою вичерпання здатності НК до опору циклічним навантаженням, згідно (1) буде величина наробітку. Виражена в дискретній формі за певний скінченний період навантаження, вона буде

$$\hat{D} = \sum_{i=1}^k \sigma_i^m n_i, \quad (3)$$

де k – кількість квантилів (розрядів) напруження; σ_i – величина напруження (симетричного циклу) i -го розряду; m – показник ступеня кривої витривалості; n_i – кількість циклів навантаження із напруженням σ_i .

Граничний наробіток D_0 , що відповідає моменту появи макротріщини визначається як

$$D_0 = \sum_{i=1}^k \sigma_i^m n_{0i}, \quad (4)$$

тут n_{0i} – повна кількість циклів навантаження i -го розряду в історії навантаження. У випадку прийняття лінійної гіпотези накопичення ушкоджень повинне бути витримане співвідношення $\sum_{i=1}^k n_{0i}/N_i = 1$, де N_i – наробіток до руйнування в циклах при дії на НК циклічного напруження з амплітудою σ_i .

Наробітки (3), (4) можуть бути прийняті для оцінки міри ушкодження НК. На початку експлуатації НК міра ушкодження M дорівнює нулю, а в момент досягнення НК граничного стану – одиниці, вона може бути оцінена як

$$M(t) = \frac{D(t)}{D_0}, \quad (5)$$

де t – час, відлічуваний з моменту початку навантаження НК.

Вираз (5) відповідає всім умовам для визначення міри ушкодження НК.

Закон зміни наробітку при дії циклічних напружень в роботі визначається диференціальним рівнянням

$$\frac{dD(t)}{dt} + \lambda \int_0^\infty \sigma^m f(\sigma) d\sigma = 0, \quad (6)$$

де λ – інтенсивність динамічних напружень (сумарна кількість циклів за проміжок часу), що визначається з рівняння $N(dt) = \lambda \cdot dt$, де $N(dt) = \sum n_i(dt)$ – сумарна кількість руйнуючих циклів напруження в конструкції за період часу dt ; $f(\sigma)$ - диференціальна функція розподілу ймовірності появи напружень в конструкції. Позначивши величину питомого наробітку як $d = \int_0^{\infty} \sigma^m f(\sigma) d\sigma$, одержимо

$$\frac{dD(t)}{dt} + \lambda d = 0. \quad (7)$$

Початковою умовою рівняння (7), що забезпечує його правильну прив'язку до статичної кривої витривалості у формі (1) буде

$$D(0) = D_0. \quad (8)$$

Вираз (7), разом з умовою (8) є достатнім для оцінки ресурсу НК. З огляду на характер рівняння, (7), наробіток $D(t)$ є монотонно убутною функцією. При цьому, ресурс вважається вичерпаним у момент T , коли наробіток стане рівним $D(T) = 0$. При стаціонарному навантаженні, коли $d = \text{const}$, наробіток зменшується лінійно від $D(0) = D_0$ до $D(T) = 0$. Дані співвідношення застосовні як до зразка (матеріалу), так і до деталі (конструкції).

Використовуючи традиційну трактовку границі витривалості, можна не враховувати амплітуди напружень, що не перевищують його поточну величину, та відповідно до цього, внести уточнення в модель (7),(8).

$$\frac{dD(t)}{dt} + \lambda_{\sigma_{-1}} \int_{\sigma_{-1}}^{\infty} \sigma^m f(\sigma) d\sigma = 0. \quad (9)$$

Позначивши $d_{\sigma_{-1}} = \int_{\sigma_{-1}}^{\infty} \sigma^m f(\sigma) d\sigma$, отримуємо

$$\frac{dD(t)}{dt} + \lambda_{\sigma_{-1}} d_{\sigma_{-1}} = 0. \quad (10)$$

Залежність (1) в області багатоциклової втоми схематизується у вигляді модифікацій, відображених на рис. 2.

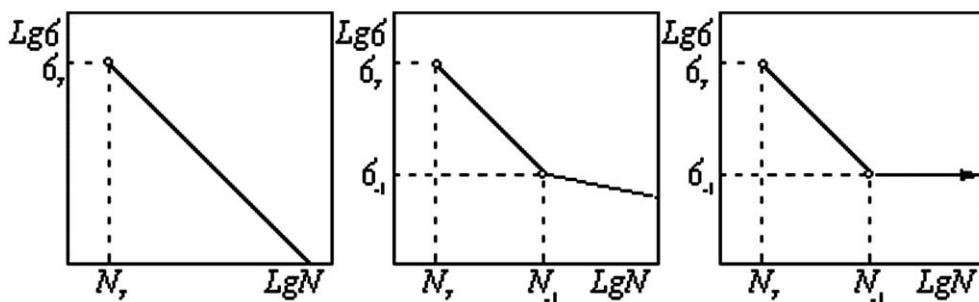


Рис. 2 Модифікації подання ступенної кривої витривалості в області багатоциклової втоми

На рисунку 2: σ_T , N_T – відповідно, напруження і кількості циклів, що визначають точку переходу процесу руйнування в область малоциклової втоми; N_0 – кількість циклів навантаження конструкції, що відповідає точкам перегину кривих витривалості; σ_{-1} – границя витривалості.

З наведених модифікацій буде використана третя, яка містить в явному виді границю витривалості σ_{-1} . Її розрахункові співвідношення мають вигляд

$$N = \begin{cases} N_0 (\sigma_{-1}/\sigma)^m & \text{ї дè } \sigma_0 > \sigma \geq \sigma_{-1}, \\ \infty & \text{ї дè } \sigma < \sigma_{-1}. \end{cases} \quad (11)$$

З урахуванням рівнянь (10) та (11) отримано співвідношення

$$\sigma_{-1}^{m-1} \cdot \frac{d(\sigma_{-1})}{dt} + \frac{\lambda_{\sigma_{-1}}}{m \cdot N_{-1}} d_{\sigma_{-1}} = 0. \quad (12)$$

Рішення інтегро-диференціального рівняння (12) визначає зміну границі витривалості зразка або конструкції як функцію часу. Початковою умовою є вихідна (для нової конструкції), або на момент контролю (при оцінці залишкового ресурсу) величина границі витривалості $\sigma_{-1}|_{t=0} = \sigma_{-10}$.

Врахування зміни параметрів кривої витривалості в процесі навантаження може бути прийнятим на основі емпіричного регресійного рівняння

$$m = 33 \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\hat{a}}}, \quad (13)$$

де $\sigma_{\hat{a}}$ – границя міцності матеріалу (конструкції).

Відомо, що величина $\sigma_{\hat{a}}$ практично незалежна від тривалості та обсягу наробітку, тому вираз (13) для матеріалу або НК у вихідному стані й після навантаження протягом певного періоду часу t може бути записаний у формі

$$m_0 = 33 \cdot \frac{\sigma_{-10}}{\sigma_{\hat{a}}}; \quad m(t) = 33 \cdot \frac{\sigma_{-1}(t)}{\sigma_{\hat{a}}} = k_m \sigma_{-1}(t), \quad (14).$$

де: σ_{-10} – початкове (або на момент контролю) значення границі витривалості; m_0 – початкова (або на момент контролю) величина показника ступеня кривої витривалості.

Вирази (14) можуть бути використані для уточнення рівняння витривалості (12), а саме

$$\frac{d(\sigma_{-1}^{k_m \cdot \sigma_{-1}})}{dt} + \frac{\lambda \cdot (\sigma_{-1})^{k_m \cdot \sigma_{-1}}}{D(t)} \int_{\sigma_{-1}}^{\infty} \sigma^{k_m \cdot \sigma_{-1}} f(\sigma) d\sigma = 0. \quad (15).$$

Модифіковане рівняння моделі витривалості (15) вирішується при наступних початкових умовах для зразка (НК) $\sigma_{-1}(t)|_{t=0} = \sigma_{-10}$; $m(t)|_{t=0} = m_0$.

Для порівняння розглянутих моделей на рис. 3 наведені результати розрахунку залежностей $\sigma_{-1}(t)$, отриманих при однакових вихідних даних.

При цьому використовувалося спрощене рівняння витривалості (12) та рівняння (15), що враховує зміну положення кривої витривалості. У спрощеній моделі прийняті значення $m_0 = m = 3,5$, $\lambda = 1 \text{ c}^{-1}$ і $\sigma_{-10} = 50,7 \text{ МПа}$, при значенні коефіцієнту зменшення границі витривалості $k_\sigma = 3,5$. В уточненій

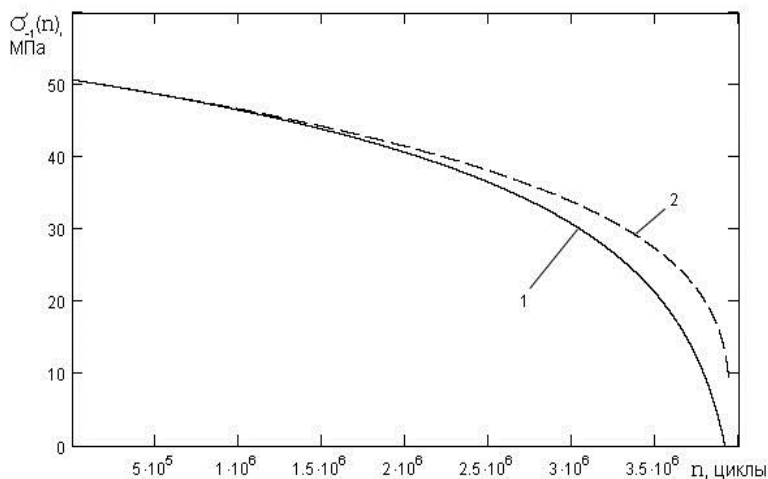


Рис. 3 Порівняння динаміки зміни границі витривалості від кількості циклів навантаження: 1 – модель, що враховує зміну нахилу кривої витривалості; 2 - спрощена модель

ці витривалості від часу або кількості циклів навантаження.

Важливим аспектом відповідності моделі витривалості, описуваної рівнянням (15) є можливість врахування нелінійного накопичення ушкоджень. При зростанні амплітуд блоків навантаження руйнування відбувається при сумарному показнику міри пошкодження, більшому одиниці (відбувається «тренування» матеріалу, тобто пристосування до циклічного навантаження) і навпаки (рис. 4а). Результати оцінки накопичення ушкоджень з використанням моделі (15) наведені на рис. 4б. З порівняння графіків рис. 4а та 4б можна помітити подібність характеру накопичення ушкоджень.

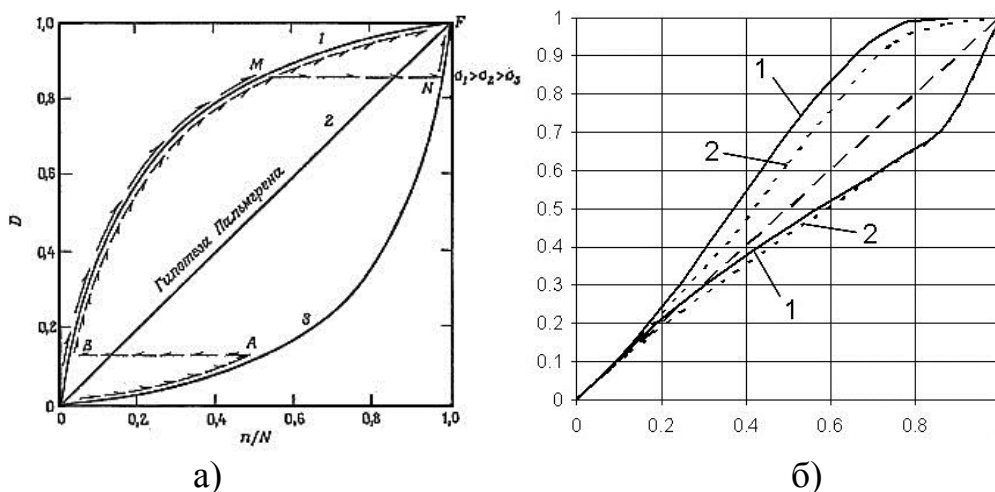


Рис. 4 Залежність накопичення міри ушкодження від нормованого числа циклів а) - за даними монографії Р. Хейвуда б) - для уточненої моделі витривалості з параметрами: 1 - зварної конструкції; 2 - конструкційного матеріалу

Далі в розділі розглянуто метод визначення імовірнісних параметрів границі опору втомі НК на підставі аналізу динаміки їх відмов та отримано

співвідношення, яке визначає закон розподілу границі витривалості, нормованої відносно її медіанного значення

$$f_{\chi}(\chi_{-1D}) = \frac{m}{s_{\gamma} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\chi_{-1D}-1)^2}{2s_{\gamma}^2}} \cdot |(\chi_{-1D})^{m-1}|. \quad (16)$$

У виразі (16): χ_{-1D} – нормована величина границі витривалості конструкції; S_{γ} – середньоквадратичне відхилення нормованого значення терміну служби НК до появи макроскопічного руйнування; m – показник ступеню кривої витривалості (1).

Апробацію пропонованого методу наведено на прикладі «неблагополучних» з погляду опору втомі рам візків пасажирського електровоза ЧС4.

В розділі вдосконалено метод оцінки коефіцієнту запасу міцності, заснований на врахуванні фактичного напрямку відхилення параметрів циклів навантаження НК від рівноважного стану та його застосування до оцінки ресурсу несучих конструкцій рухомого складу.

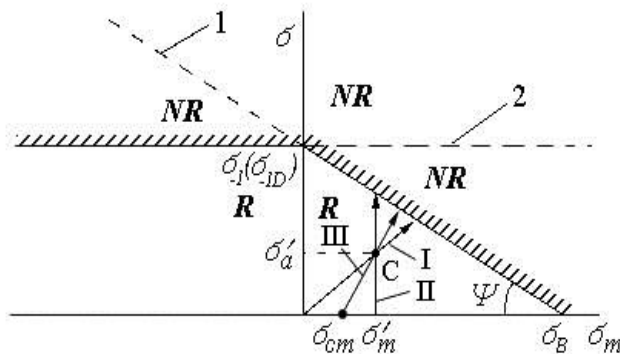


Рис. 5 Площина параметрів циклу навантаження конструкції

На рис. 5 наведено вид діаграми граничних циклів (ліній граничних амплітуд), які є геометричною інтерпретацією виду циклічного навантаження НК. Розглядаються наступні характеристики циклу навантаження: амплітуда циклу $\sigma_a = 0,5 |(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})|$, $\sigma_{\max}$ – максимальне алгебраїчне значення напруження циклу, $\sigma_{\min}$ – мінімальне алгебраїчне значення напруження циклу; $\sigma_m = 0,5(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$ – серед-

нє напруження циклу. Побудова виконується на числовій площині *параметрів циклу навантаження*.

Напівплощина при $\sigma_m > 0$ розділена на дві області: R – область умовно необмеженої довговічності НК, коли відсутні руйнівні цикли; NR – область обмеженої довговічності.

Координати циклу навантаження будуються в осях $\sigma_m - \sigma$, (σ_m – середнє напруження циклу, σ – амплітуда циклу) визначають параметри (σ'_a, σ'_m) циклу C і його приналежність до області R або NR .

При використанні ідеалізації Гудмана область працездатності R у квадранті додатних середніх напружень циклу навантаження відділяється від області NR лінією 1 (Рис. 5). Тангенс нахилу прямої 1 ψ називають коефіцієнтом чутливості до асиметрії циклу та визначають як

$$\psi = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a}. \quad (17)$$

Напруження з *ненульовим середнім напруженням циклу* приводиться до еквівалентних за руйнівною здатністю напружень симетричних циклів так, щоб їх відношення до границі витривалості дорівнювало коефіцієнту запасу.

Для циклу C (рис. 5) з координатами (σ'_a, σ'_m) коефіцієнт запасу може бути визначений з використанням різних траєкторій переходу до границі області працездатності, визначеної положенням прямої Гудмана, а саме:

- по лінії I , проведеній з початку координат (σ'_a, σ'_m) збільшуються пропорційно – запас витривалості по подібному циклу);
- по лінії II (σ_m стале, змінюється тільки амплітуда σ – запас по амплітуді).

Поводження динамічних напружень в елементах конструкції екіпажа не підкоряється винятково ні одній з гіпотез, наведених вище. А саме, на рис. 6 надані послідовності параметрів циклів навантаження консольної частини поздовжньої балки рами візка пасажирського вагона КВЗ-ЦНДІ.

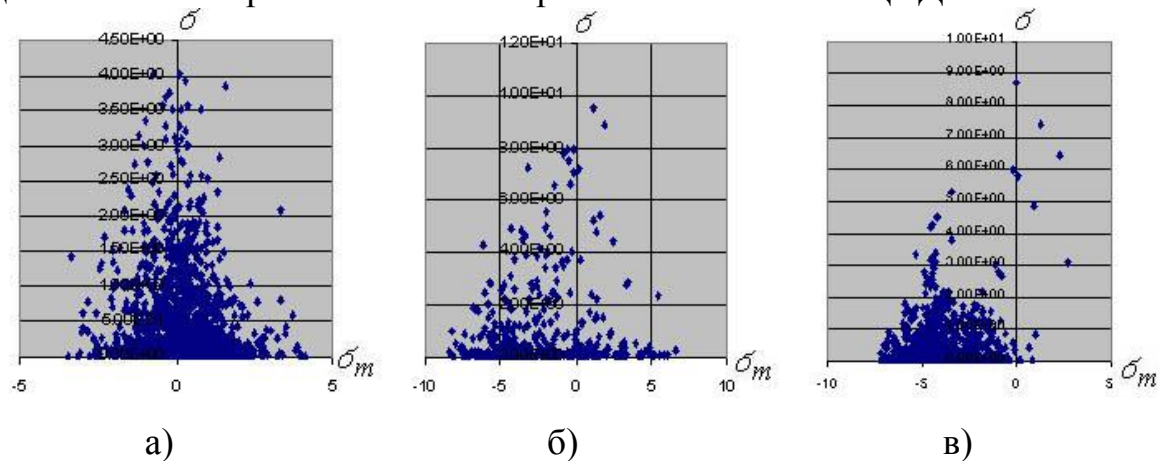


Рис. 6 Послідовності циклів навантаження рами візка пасажирського вагона:
а) - швидкість 20-40 км/год, пряма; б) - швидкість 80-100 км/год, пряма; в) - швидкість 60-80 км/год, крива радіуса $R > 650$ м

Пропонований в роботі метод розрахунку коефіцієнта запасу для циклу C (рис. 5) передбачає напрямок виходу за границю області працездатності R по лінії III , що зв'язує координати циклу (σ'_a, σ'_m) та рівноважного стану тієї ж точки НК $(0, \sigma_{cm})$, де σ_{cm} – статичне напруження в досліджуваній точці НК. Таким чином отримано вирази (17) для оцінки величини коефіцієнту запасу n_{ED} та еквівалентного за руйнівною здатністю напруження симетричного циклу σ_{ED} .

Результати аналізу застосування розрахункових співвідношень (17) наведені в табл. 1. Пропонований метод оцінки коефіцієнту запасу близький до розрахунку запасу по амплітуді. Найбільша відмінність від методу запасу по амплітуді може спостерігатися, коли здійснюється рух РС в кривих з великими швидкостями, який саме й потребує уточненої оцінки досліджуваних в розділі показників.

$$n_{ED} = \min \left(\frac{\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a + \psi(\sigma'_m - \sigma_{\tilde{n}\tilde{o}})}}{1 - \frac{\sigma_{\tilde{n}\tilde{o}}}{\sigma_{\hat{a}}}}, \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a} \right), \quad (17)$$

$$\sigma_{ED} = \max \left(\frac{\sigma_a + \psi(\sigma'_m - \sigma_{\tilde{n}\tilde{o}})}{1 - \frac{\sigma_{\tilde{n}\tilde{o}}}{\sigma_{\hat{a}}}}, \sigma_a \right).$$

Таблиця 1.

Розрахунок наробітків несучої конструкції при різних способах приведення напруження до амплітуд еквівалентних симетричних циклів навантаження

Умови руху		Наробіток при використанні способу приведення до напружень симетричного циклу, МПа ⁴ ·10 ⁴		
Діапазон швидкостей, км/год	План колії: П – пряма; К – крива R>650 м.	по подібному циклу	по запасу амплітуди	по формулах (17)
20-40	П	8,9	0,76	0,77
80-100	П	15,1	6,9	6,8
60-80	К	8,1	3,1	3,0

Далі в розділі розглянуто проблему організації стендових вібраційних випробувань (СВВ) НК великогабаритних об'єктів великої ваги, пов'язану з призначенням режимів їх навантаження. А саме, при гармонійному навантаженні різної частоти основні елементи НК навантажуються відносно неоднаково, при цьому принцип відповідності їхньої навантаженості експлуатаційним напруженням порушується.

Як критерій вибору можливих частот навантаження НК f_i при проведенні СВВ приймається квадратична цільова функція (ЦФ)

$$C(f_i) = \sum_{i=1..k} \sum_{i=i..k} [N_{ij}(f_i) - N_{\hat{A}ij}]^2 \rightarrow \min, \quad (18).$$

де $N_{ij}(f) = \sigma(f)_{\hat{A}Si} / \sigma(f)_{\hat{A}Sj}$, $i=1...j-1, j+1...k$ – відношення напружень $\sigma(f)_{\hat{A}Si}$ в характерних точках k контрольованих елементів конструкції НК при проведенні стендових випробувань; $N_{\hat{A}ij}$ – те ж саме, отримане при проведенні динамічних міцносних випробувань.

Можна зажадати, щоб для обраної частоти f_i максимізувався наробіток НК за одиницю часу проведення СВВ, для чого ввести допоміжну функцію

$$D_i(f_i) = \sigma(f_i)_{si} \cdot f_i \rightarrow \max. \quad (19)$$

З урахуванням (18), (19) частота навантаження об'єкту випробувань (ОВ) для пари i - j елементів конструкції НК частота навантаження приймається при досягненні локального максимуму однієї з узагальнених вагових функцій W_{ij} наступних форм, з урахуванням пріоритету i або j елемента конструкції, для якого бажано одержати найбільше форсування випробувань по амплітуді

$$W_{ij}(f) = \frac{D_i(f)}{C_{ij}(f)} \quad \text{або} \quad W_{ij}(f) = \frac{D_j(f)}{C_{ij}(f)}, \quad (20)$$

$$C_{ij}(f_i) = [N_{ij}(f_i) - N_{Aij}]^2.$$

Експлуатаційні розподіли напружень по їхніх розрядах у характерних точках НК РС і відношення наробітків N_{Aij} в формулі (20) визначаються шляхом статистичної обробки результатів динамічних міцносних випробувань досліджуваної конструкції.

В **третьому розділі** одержали розвиток теоретичні основи побудови СВВ НК РС на дію натурних транспортних вібрацій. В зв'язку з тим, що теоретичні основи відтворення натурних вібрацій не достатньо розроблені, використовують різні схематизації, якими заміняють реальні процеси навантаження НК, або їх натурними випробуваннями в умовах експлуатації.

Для вирішення вказаної проблеми запропоновано математичний опис СВВ, яка дозволяє забезпечити компенсацію нелінійності амплітудно- і фазочастотної характеристик (АЧХ і ФЧХ) передатної функції (ПФ) системи «ВС – об'єкт випробувань (ОВ)» (далі – системи).

Тракт відтворення вібрацій за допомогою ВС в частотній області описується співвідношенням

$$Y(f) = W_c(f) \cdot X(f), \quad (21)$$

тут: $Y(f)$ – спектр вихідного сигналу (переміщення стола ВС); $W_c(f)$ – ПФ системи; $X(f)$ – спектр вхідного відтвореного сигналу.

З метою реалізації ідеальної ПФ системи в тракт відтворення сигналу включається аналоговий або цифровий блок корекції (БК) передатної функції ВС, що враховувалося доповненням рівняння (21) відповідною ПФ

$$Y(f) = W_c(f) \cdot W_o(f) \cdot X(f), \quad (22)$$

де: $W_o(f)$ – передатна функція блоку корекції ПФ системи «ВС-ОВ».

Для реалізації БК з передатною функцією $W_o(f)$ синтезується лінійний цифровий коригувальний фільтр (ЦКФ) виду

$$y'(t) = \sum_{i=0}^n a'_i x(t - ih) - \sum_{i=1}^n b'_i y(t - ih),$$

тут: n - порядок ЦКФ; a'_i , b'_i – коефіцієнти фільтра, що підлягають визначенню; y' – проміжний вихідний (попередньо перекручений фільтром) сигнал; h – крок квантування процесів в часі.

Коефіцієнти a_i і b_i визначаються шляхом мінімізації функціонала похибки апроксимації ґ ПФ системи з застосуванням методів нелінійного програмування

$$\varepsilon(a_0, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n) = \sum_{\omega} [W_{\delta}(\omega) - W_c(\omega)]^P \rightarrow \min, \quad (23)$$

де P – додатній парний показник ступеню.

Співвідношення (21) - (23) математично описують метод відтворення абсолютного переміщення стола ВС або деякої точки ОВ, але при цьому постає проблема фізичного вимірювання відповідних натурних вібрацій. Проблема не виникає, коли відтворюваний сигнал Y являє собою прискорення стола ВС або контрольованої точки ОВ. В цьому випадку до математичного опису ПФ системи (21) додається послідовна ланка подвійного ідеального диференціатора W_{δ} з передатною функцією

$$W_{\delta} = j^2 w^2, \quad (24)$$

де w – кругова частота; j – мнима одиниця.

Тоді в передатній функції ЦКФ $W_y(f)$ має з'явитися ланка ідеального подвійного інтегратора з ПФ W_u , зворотна функції (24), а саме

$$W_{\varepsilon} = \frac{1}{j^2 w^2}. \quad (25)$$

Через невизначеність ПФ ЦКФ в області інфранизких (близьких до $w=0$) частот пряма ідентифікація коефіцієнтів такого ЦКФ (23) неможлива. Для вирішення цієї задачі розроблено метод ідентифікації фіктивного переміщення ОВ.

При цьому процес ідентифікації ПФ системи містить наступні етапи:

- ідентифікація ПФ системи $W_{yy}(f)$, де її виходом є прискорення ОВ;
- виконання подвійного інтегрування ПФ у робочій частотній області як

$$W_{\delta\delta} = \frac{W_{\delta\delta}}{j^2 w^2}; \quad f = f_i \div f_{\delta},$$

де: f_n та f_p – відповідно, нижня та верхня (робоча) частоти системи.

В результаті даної операції обчислюється фіктивна ПФ $W_{yf}(f)$, виходом якої є переміщення місця установки датчика прискорень;

- корекція ПФ в області частот $f < f_n$. У найпростішому випадку, коли мінімальна із власних частот системи «ВС-ОВ» достатньо велика, це буде

$$W_{\delta}(f \leq f_i) = W_{\delta\delta}(f_i),$$

$$W_{\delta}(f > f_i) = W_{\delta\delta}(f).$$

Подальшим розвитком принципів організації СВВ на дію натурних вібрацій є система відтворення вібрацій великогабаритних масивних об'єктів. Проблеми реалізації вказаної СВВ можна сформулювати наступним чином:

- збудження пласко - просторових коливань великогабаритного масивного об'єкта пов'язане з реалізацією багатоточкового навантаження;
- відбувається взаємний вплив ВС один на одного (перехресні динамічні зв'язки), що вносить додаткові переключування при відтворенні сигналів;

- велика маса ОВ приводить до виникнення додаткових резонансів у робочому діапазоні частот електромеханічної системи.

Структурна схема напівнатурної гібридної аналого-цифрової системи управління СВВ великогабаритних ОВ наведена на рис. 7, що складається з:

- цифрової системи управління (ЦСУ), що містить у собі:
 - блок завдання нерівностей (БЗН), що моделює геометричні й стикові нерівності рейкових ниток;
 - математичної моделі транспортного засобу (ММТ) у вигляді системи диференціальних рівнянь, що описують його коливання;
 - цифрової системи управління вібростендами (ЦСУ), що здійснює корекції АЧХ вібростендів і виключення їх взаємного впливу;
- блоку сполучення з об'єктом випробувань у складі:
 - аналого-цифрових (АЦП) і цифро-аналогових (ЦАП) перетворювачів;
 - блоку аналогових фільтрів (БФ) низької частоти.
- системи управління вібростендами (СУВ), що включає в себе штатні засоби для керування гідропульсаторами;
- ВС, обладнаних датчиками переміщень з встановленим на них ОВ.

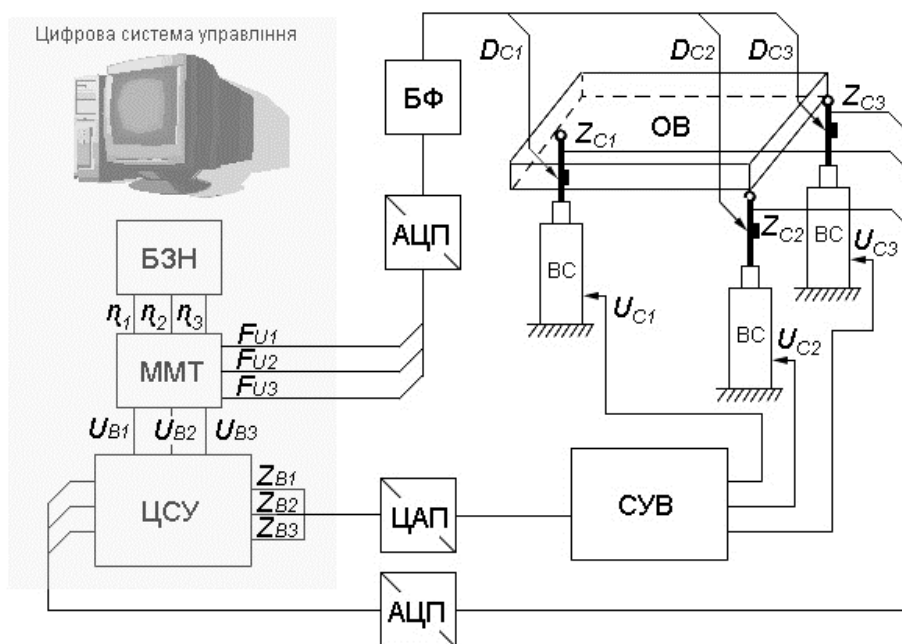


Рис. 7 Структурна схема системи управління СВВ великогабаритних об'єктів

Функціонування системи відбувається наступним чином. ВС обладнані вбудованими датчиками переміщень Z_{ci} , $i=1..3$, сигнали з яких через АЦП надходять на входи ЦСУ. Кожний з вібростендів обладнаний тарованою мездозою, що вимірює в аналоговій формі зусилля взаємодії гідропульсатора з ОВ D_{ci} , $i=1..3$. Зазначені величини після фільтрації й перетворення в цифрову форму надходять у якості вхідних змінних (зусиль від вантажу) у блок ММТ. З виходу блоку ММТ в цифровій формі визначаються переміщення платформи з вантажем ОВ, які після корекції в блоці ЦСУ (величини Z_{Bi} ,

$i=1..3$) і перекладу у форму аналогового сигналу надходять на входи блоку СУВ. Там вони підсилюються й надходять на керуючі входи гідропульсаторів, як керуючі впливи U_{ci} , $i=1..3$.

Схема системи управління ВС для випробувань великогабаритних ОБ у термінах передатних функцій наведена на рис. 8.

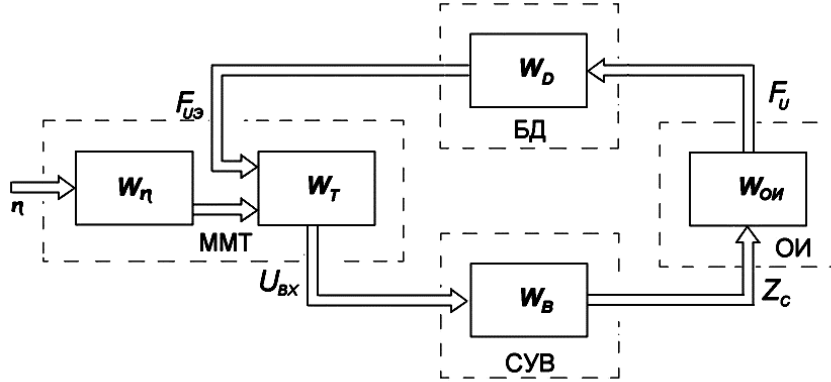


Рис. 8 Схема системи управління ВС (СУВ) для проведення випробувань великогабаритних об'єктів в термінах передатних функцій

На рисунку 8: W_D – матриця передатних функцій блоку датчиків, пов'язаних з гідропульсаторами; W_{OB} – матриця передатних функцій ОБ, що зв'язує переміщення столів вібростендів із зусиллями, що діють із боку вантажу на транспортер; W_η , W_T – матриці передатних функцій транспортного екіпажа; W_B – матриця передатних функцій вібростенда, включаючи систему управління СУВ. Вихідним сигналом у цієї системі є вектор переміщень столів вібростендів Z_C , вхідним – вектор нерівностей колії η .

Загальне матричне рівняння СУВ, що зв'язує вхідні і вихідні перемінні, в частотній області має вигляд

$$Z_C = (I - W_D W_{\hat{A}} W_{\hat{N}})^{-1} W_{\hat{A}} W_{\hat{O}} W_\eta \eta. \quad (26)$$

Далі в розділі наведено принципи побудови блоку нейтралізації перехресних динамічних зв'язків у системі «ВС – об'єкт випробувань».

Рівняння руху системи, що складається у матричній формі буде записано як

$$\tilde{A} F_U = Z_{\hat{A}}, \quad (27)$$

де: $\tilde{A}$ – квадратна матриця розмірності 3×3 з ненульовими елементами; $F_U^T = [F_{U1}, F_{U2}, F_{U3}]$ – вектор зусиль ВС, що діють на ОБ; $Z_{\hat{A}}^T = [Z_{\hat{A}1}, Z_{\hat{A}2}, Z_{\hat{A}3}]$ – вектор переміщень столів ВС.

Частина системи СУВ, що складається із трьох ВС і об'єкта випробувань, може бути описана матричним рівнянням виду

$$W_{\hat{I}\hat{I}} (W_{\hat{A}\hat{O}} U_{\hat{A}\hat{O}} + F_U) = Z_{\hat{A}}. \quad (28)$$

В рівнянні (28): $W_{\hat{I}\hat{I}}$ – квадратна матриця взаємного впливу розмірності 3×3 з ненульовими елементами $W_{\hat{I}\hat{I}ij} \neq 0$; $W_{\hat{A}\hat{O}}$ – квадратна діагональна ма-

триця розмірності 3×3 з діагональними елементами $\mathbf{W}_{\hat{A}\hat{O}j} \neq 0$, якщо $i \neq j$, елементи $\mathbf{W}_{\hat{A}\hat{O}j} = 0$. Елементи $\mathbf{W}_{\hat{I}\hat{I}ii}$ й $\mathbf{W}_{\hat{A}\hat{O}ii}$ тотожно дорівнюють передатним функціям i -го гідроциліндра.

Передатна функція системи, з (27) та (28) має форму

$$\mathbf{Z}_{\hat{A}} = (\mathbf{I} - \mathbf{W}_{\hat{I}\hat{I}} \tilde{\mathbf{A}}^{-1})^{-1} \mathbf{W}_{\hat{I}\hat{I}} \mathbf{W}_{\hat{A}\hat{O}} \mathbf{U}_{\hat{A}\hat{O}}. \quad (29)$$

Уводяться позначення

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{\hat{A}} &= \mathbf{W}_{\hat{I}\hat{I}} \mathbf{W}_{\hat{A}\hat{O}}, \\ \mathbf{W}_{\hat{A}} \tilde{\mathbf{A}}_{\hat{E}}^{-1} &= \mathbf{W}_{\hat{I}\hat{I}} \tilde{\mathbf{A}}^{-1} = \mathbf{W}_{\hat{I}\hat{I}} \mathbf{W}_{\hat{A}\hat{O}} \mathbf{W}_{\hat{A}\hat{O}} \tilde{\mathbf{A}}^{-1}, \end{aligned} \quad (30)$$

де: $\mathbf{W}_{\hat{A}}$ – матриця передатних функцій вібростендів.

З (28) з урахуванням (30) записується

$$\mathbf{Z}_{\hat{A}} = \mathbf{W}_{\hat{A}} \{ \mathbf{U}_{\hat{A}} - \tilde{\mathbf{A}}_{\hat{K}}^{-1} \mathbf{Z}_{\hat{A}} \}, \quad (31)$$

де $\mathbf{W}_{\hat{A}}$ – діагональна матриця; $\tilde{\mathbf{A}}_{\hat{E}}^{-1}$ – матриця, у якій всі елементи $\gamma_{ij} \neq 0$.

Матриця $\tilde{\mathbf{A}}_{\hat{E}}^{-1}$ представляється у вигляді

$$\tilde{\mathbf{A}}_{\hat{E}}^{-1} = \mathbf{A} + \mathbf{G}_{\hat{K}},$$

де: $\mathbf{A}$ – діагональна матриця; $\mathbf{G}_{\hat{E}}$ – матриця, у якій всі елементи матриці $\tilde{\mathbf{A}}_{\hat{E}}^{-1}$, а її діагональні елементи дорівнюють нулю.

З виразу (29) отримується:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{\hat{A}} &= \mathbf{W}_{\hat{A}} \{ \mathbf{U}_{\hat{A}} - \mathbf{G}_{\hat{K}} \mathbf{Z}_{\hat{A}} \} + \mathbf{W}_{\hat{A}} \mathbf{A} \mathbf{Z}_{\hat{A}}, \\ [\mathbf{I} - \mathbf{W}_{\hat{A}} \mathbf{A}] \mathbf{Z}_{\hat{A}} &= \mathbf{W}_{\hat{A}} \{ \mathbf{U}_{\hat{A}} + \mathbf{G}_{\hat{K}} \mathbf{Z}_{\hat{A}} \}, \\ \mathbf{Z}_{\hat{A}} &= \mathbf{G}_{\hat{I}} \{ \mathbf{U}_{\hat{A}} + \mathbf{G}_{\hat{K}} \mathbf{Z}_{\hat{A}} \}, \end{aligned} \quad (32)$$

тут: $\mathbf{G}_{\hat{I}} = [\mathbf{I} - \mathbf{W}_{\hat{A}} \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{W}_{\hat{A}}$ – діагональна матриця, що описує головні тракти передачі сигналів; $\mathbf{G}_{\hat{E}}$ – матриця перехресних зв'язків вібростендів.

Залежність, що зв'язує електричні сигнали $\mathbf{U}$, які надходять на входи управління СУВ з переміщеннями ВС $\mathbf{Z}_{\hat{A}}$ має вигляд

$$\mathbf{Z}_{\hat{A}} = [\mathbf{I} - \mathbf{G}_{\hat{O}} \mathbf{G}_{\hat{K}}]^{-1} \mathbf{G}_{\hat{O}} \mathbf{U}_{\hat{A}} = \mathbf{G} \mathbf{U}_{\hat{A}}. \quad (33)$$

У виразі (33): $\mathbf{G}$ – матриця передатних функцій об'єкта управління.

В рівнянні (33) обидві матриці $\mathbf{G}_{\hat{I}}$ й $\mathbf{G}_{\hat{E}}$ залежать від масово-інерційних властивостей об'єкта випробувань. Визначити елементи цих матриць шляхом безпосередньої їх ідентифікації дуже важко.

Ланку корекції передатних функцій $\mathbf{R}$ включається послідовно з матрицею $\mathbf{G}$ передатних функцій об'єкта управління, таким чином одержується

$$\mathbf{Z}_{\hat{A}} = [\mathbf{I} + \mathbf{G} \mathbf{R}]^{-1} \mathbf{G} \mathbf{R} \mathbf{U}_{\hat{A}} = \mathbf{G}_{\hat{E}} \mathbf{U}_{\hat{A}}. \quad (34)$$

Взаємний вплив вібростендів виключається у випадку, коли матриця

$$\mathbf{D}_{\hat{I}} = \mathbf{G} \mathbf{R} \quad (35)$$

– діагональна.

Підстановка виразу (33) в (35) дає

$$\left[\mathbf{I} - \mathbf{G}_O \mathbf{G}_K \right]^{-1} \mathbf{G}_O \mathbf{R} = \mathbf{D}_O. \quad (36)$$

Остаточний вираз для матриці коригувальної ланки, що дозволяє нейтралізувати взаємний вплив стендів і вантажу має вигляд

$$\mathbf{R} = \mathbf{G}^{-1} \left[\mathbf{I} - \mathbf{G}_O \mathbf{G}_K \right] \mathbf{D}_O. \quad (37)$$

Практичні аспекти визначення матриці $\mathbf{R}$ ланки корекції розглянуто нижче. Із зовнішньої сторони, зв'язок керуючих впливів з переміщеннями столів вібростендів може бути задана як

$$\mathbf{Z}_A = \mathbf{B} \mathbf{U}_A, \quad (38)$$

де $\mathbf{B}$ – квадратна матриця розмірністю 3×3 з ненульовими коефіцієнтами.

Порівнюючи (38) та (33) отримуємо

$$\mathbf{B} = \left[\mathbf{I} - \mathbf{G}_O \mathbf{G}_K \right]^{-1} \mathbf{D}_O. \quad (39)$$

Нехай оцінка $\bar{\mathbf{B}}$ матриці $\mathbf{B}$ отримана методами прямої ідентифікації. Вказана оцінка розділяється на дві частини – $\bar{\mathbf{G}}_O$, що по визначенню складається з їхніх діагональних елементів матриці $\bar{\mathbf{B}}$ та $\bar{\mathbf{B}}_O$, яка містить всі інші елементи матриці $\bar{\mathbf{B}}$. Тоді $\mathbf{Z}_A = \bar{\mathbf{G}}_O \mathbf{U}_A + \bar{\mathbf{B}}_f \mathbf{U}_A$. Якщо матриця $\bar{\mathbf{B}}$ не особлива, то з (33) одержується $\mathbf{U}_A = \bar{\mathbf{B}}^{-1} \mathbf{Z}_A$ і, далі

$$\mathbf{Z}_A = \bar{\mathbf{G}}_O \left[\mathbf{U}_A + \bar{\mathbf{G}}_O^{-1} \bar{\mathbf{B}}_O \bar{\mathbf{B}}^{-1} \mathbf{Z}_A \right]. \quad (40)$$

З порівняння рівнянь (40) та (32) одержано остаточні вирази для визначення складові матриці ланки корекції

$$\mathbf{G}_O = \bar{\mathbf{G}}_O,$$

$$\mathbf{G}_K = \bar{\mathbf{G}}_O^{-1} \bar{\mathbf{B}}_f \bar{\mathbf{B}}^{-1}.$$

В рамках роботи наголошується, що характеристики опору втомі НК РС, по мірі можливості оцінюються експериментально. При цьому виникає проблема вибору режимів навантаження НК, що забезпечують лінійне накопичення ушкоджень при проведенні СВВ для різних режимів навантаження.

Під *режимом* навантаження НК мається на увазі послідовність блоків її циклічного деформування з постійними параметрами від початку випробувань до руйнування; *рівень* навантаження визначає параметри блоку (амплітуда напруження σ , кількість n циклів навантаження). Режими навантаження, що руйнують НК при меншій кількості циклів, є *жорсткими*.

Вказане ілюструються на рис. 9, де прийняті позначення: $n_1^{(1)}, n_2^{(1)} \dots n_k^{(1)}$ – кількості циклів жорсткого режиму випробувань при рівнях навантаження $1, 2 \dots k$; $n_1^{(2)}, n_2^{(2)} \dots n_k^{(2)}$ – те ж саме при випробуваннях м'якого режиму; $\sigma_1^{(1)}, \sigma_2^{(1)} \dots \sigma_k^{(1)}$, $\sigma_1^{(2)}, \sigma_2^{(2)} \dots \sigma_k^{(2)}$ – амплітуди напружень блоків навантаження.

Вибір параметрів блоків навантаження має бути зробленим таким чином, аби співвідношення амплітуд та тривалості блоків навантаження НК забезпечували лінійне накопичення пошкоджень.

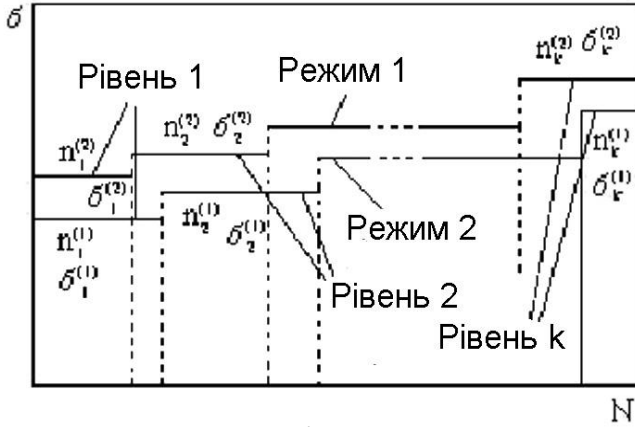


Рис. 9 Ілюстрація до визначення понять при призначенні режимів стендових випробувань несучих конструкцій

Проведені в розділі дослідження дозволяють пропонувати наступну послідовність зростаючих рівнів обох режимів випробувань

$$\begin{aligned}\sigma_{i+1}^{(1)} &= K_{\sigma} \sigma_i^{(1)}, \\ \sigma_{i+1}^{(2)} &= K_{\sigma} \sigma_i^{(2)}, \\ K_{\sigma} &> 1.\end{aligned}\quad (41)$$

У виразі (41) $K_{\sigma} > 1,0$ – коефіцієнт послідовного форсування рівнів напружень в конструкції, ідентичний для обох режимів випробувань.

Позначимо $K_{\sigma} = (\sigma_i^{(1)} / \sigma_i^{(2)})^m$, де

K_p – коефіцієнт зміни рівнів напружень при переході до наступного режиму випробувань. Тоді

$$n_i^{(2)} = n_i^{(1)} \cdot K_{\sigma}. \quad (42)$$

З рівняння (42) слідує, що відношення кількості циклів навантаження конструкції на послідовно взятих блоках навантаження повинні бути обернено пропорційні рівням напружень.

Розділ чотири присвячений розробці непрямих методів оцінки міцності та ресурсу НК РС. Необхідність впровадження вказаних методів обумовлена бажанням обґрунтованого скорочення об'єму лабораторних досліджень витривалості НК великої вартості, не в ущерб вірогідності їх результатів.

В розділі розглядаються два методи вказаного типу:

- метод порівняльної оцінки залишкового ресурсу НК шляхом зіставлення їх динамічної навантаженості;
- метод оцінки залишкового ресурсу НК РС за станом найменш довговічного елемента їхньої конструкції.

Метод порівняльної оцінки залишкового ресурсу НК шляхом зіставлення динамічної навантаженості РС еталону і досліджуваного РС застосовний, коли в них використовуються уніфіковані несучі конструкції (наприклад, рами візків).

Нормований наробіток НК із урахуванням ймовірностей ситуації руху розраховується як

$$D = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 p_i^V p_j^A S_{A\hat{A}ij}^m, \quad (43)$$

де: D – наробіток НК на один цикл коливань (питомий наробіток); n – кількість діапазонів швидкості руху; p_i^V – імовірність руху з i -ї швидкістю; p_j^A – імовірність руху в прямій ($j=1$), кривій великого й середнього радіуса; $S_{A\hat{A}ij}^m$ – еквівалентна сила в i - j ситуації руху; m – показник ступеня кривої витривалості.

Відношення ресурсів досліджуваного РС стосовно еталона буде зворотним до відношення їхніх наробітків по формулі (43). При цьому повний ресурс НК досліджуваного РС (термін служби), буде визначений як

$$T_{\hat{A}} = \frac{T_A D_A}{D_{\hat{A}}}, \quad (44)$$

тут: T_B – ресурс НК досліджуваного типу РС; T_E – ресурс НК еталонного типу РС; D_B – питомий наробіток НК досліджуваного типу РС; D_E – питомий наробіток НК еталонного типу РС.

Метод порівняльної оцінки залишкового ресурсу НК РС за станом найменш довговічного елемента їхньої конструкції («слабкого» елемента, СЕ) надає можливість індивідуального прогнозування залишкового ресурсу НК РС за результатами історії їхньої експлуатації. В якості джерела даних про витривалість конструкції використовуються її ж НК, які одержують фактичний експлуатаційний наробіток.

Основна розрахункова формула метода СЕ наведена нижче

$$R = C_{CR} \cdot R_{\min}; \quad C_{CR} = \left(\frac{T_{\min \xi} \cdot k_{S\min} \cdot k_{K\min}}{\|T_{\xi}\| \cdot k_{K\xi}} \right)^m \cdot k_i^{-1}, \quad (45)$$

де $k_{K\xi}$ – найбільший коефіцієнт концентрації напружень в основній НК РС (при необхідності оцінки ресурсу його зварених з'єднань); $k_{S\min} = \sigma_{\xi\max} / \sigma_{\xi\bar{a}}$ – відношення максимального напруження в перетині «слабкого» елемента $\sigma_{\xi\max}$ при несприятливій формі коливань ξ НК РС до напруження $\sigma_{\xi\bar{a}}$ (для тої ж форми коливань) у місці розташування датчика в області «слабкого» елемента (коефіцієнт розподілу напружень по перетині); $k_{K\min}$, $k_{K\xi}$ – коефіцієнти концентрації напружень в області «слабкого» елемента конструкції й основній НК; $k_i \leq [k_{\sigma}]^m = 1 \div 16$ – коефіцієнт надійності розрахунку наробітку, пов'язаний з коефіцієнтом запасу витривалості, величина якого вибирається з умов і характеру експлуатації НК, стану й віку несучих конструкцій, а також забезпечення безпеки руху на магістральних шляхах.

Для проведення розрахунків за даним методом необхідно визначити поля напружень, що виникають в НК при її деформаціях, які відповідають певним формам її власних коливань (власних форм напружено-деформованого стану (НДС) НК). Визнається достатнім розгляд форм коливань конструкції як твердого тіла, а також перших форм вигину й крутіння. Зазначений вибір повинне бути підтверджено експериментально, шляхом аналізу амплітуд і частот коливань, які реєструються в процесі обробки експериментальних даних динамічної навантаженості РС.

Матеріал, викладений у **п'ятому розділі**, містить розгляд методів оцінки експлуатаційної навантаженості НК РС при вирішенні задач оцінки їхньої витривалості та ресурсу. Розглянуто особливості аналізу НДС НК РС, стосовно рішення задач оцінки й подовження їх призначених термінів служби.

Для оцінки навантажень, що діють на НК РС, можуть бути розглянуті три основних методи одержання оцінок динамічної навантаженості РС:

- **статистичний**, при цьому для кожної ситуації руху (тип елемента плану шляхи, швидкість руху, режим ведення локомотива) оцінюються показники міцності й динаміки РС з урахуванням ймовірності їх появи.
- **експлуатаційний**, коли випробування проводяться на ділянках обертання випробовуваного РС з встановленими швидкостями руху. Сумарна тривалість реалізацій динамічних процесів може бути прийнята рівною

$$T_{\Sigma} = n_v n_p n_r T_{\Sigma}$$

де: T_{Σ} – сумарна тривалість динамічних процесів, що підлягають наступному аналізу; n_v – кількість інтервалів швидкостей руху; n_p – кількість елементів плану шляхи; n_r – кількість режимів ведення поїзда; T_{Σ} – інтервал реєстрації динамічних процесів у кожній ситуації руху.

- **максимальної навантаженості**, при цьому вимоги до обсягу й характеру проведення випробувань можуть відповідати одному з вище згаданих методів, однак для оцінки динамічної навантаженості НК відбирається єдина із зафіксованих реалізація динамічних процесів, якій відповідає найбільший наробіток.

Експлуатаційний метод проведення випробувань НК РС з метою оцінки його ресурсу уявляється найбільш придатним для одержання обґрунтованих оцінок їх динамічної навантаженості.

В розділі розглянуто способи формування дослідних зчепів при проведенні випробувань з метою оцінки й подовження термінів служби основних НК РС, вказано типові обсяги й прийоми вимірів, використовувані при проведенні експериментальних робіт з оцінками ресурсу РС та подовженні його терміну служби.

Розглянуто вплив похибок реєстрації натурних процесів навантаження НК РС на результати оцінки нормативних показників динамічних якостей РС, а також оцінок його ресурсу.

В **шостому розділі** наведено результати досліджень міцності й ресурсу несучих конструкцій характерних з точки зору методології досліджень серій рухомого складу.

Оцінка залишкового ресурсу рам візків електропоїздів ЕР9Е, М, які проведені з використанням непрямого методу порівняння їх динамічної навантаженості з моторвагонним рухомим складом (МВРС) – еталоном (електропоїзд ЕР9П), рами візків якого мають практично ідентичну конструкцію з розглянутими у розділі серіями МВРС. Для оцінки динамічної навантаженості рам візків електропоїздів ЕР9М, ЕР9Е проведені їх динамічні ходові й динамічні міцнісні випробування. Дано загальний опис їх результатів.

Зроблено висновки, що відношення наробітків візків причіпних (головних) вагонів електропоїздів ЕР9М, Е та моторних вагонів ЕР9М дозволяє без обмежень прийняти Технічні рішення по подовженню терміну служби основних несучих конструкцій електропоїздів ЕР9П. При цьому вважається, що показники витривалості рам візків електропоїздів ЕР9Е, М не гірше, ніж рам

візків електропоїздів ЕР9П. Рами моторних вагонів електропоїздів ЕР9Е навантажені більше, ніж аналог (ЕР9П), що дозволяє подовжити їх термін служби до 30 років від побудови.

В даному ж розділі наведено обґрунтування застосування методу порівняльної оцінки залишкового ресурсу методом «слабкого» елементу на прикладі рами кузова тепловоза ТГМ6А, яке показало можливість використання методу для проведення робіт з оцінки залишкового ресурсу НК РС. Основні результати робіт наведено в табл. 2.

На підставі проведених комплексних робіт зроблено висновок (табл. 2), що ресурс основних НК тепловозів ТГМ6А групи 1 становить 36 років експлуатації від побудови, а ресурс основних несучих конструкцій тепловозів ТГМ6А групи 2 складає 33 років експлуатації від побудови за тієї ж умови.

Запропонований розділі 3 роботи метод корекції АЧХ вібраційного стеґна використано для відтворення впливу напівсинусоїдальних імпульсів прискорення на складну механічну конструкцію, результати якого показані на рис. 10, 11.

Таблиця 2.

Результати оцінки залишкового ресурсу кузовів тепловозів ТГМ6А

№ пп	Експлуатаційні групи тепловозів		Нижня гра- ница віку до руйну- вання, років	Коефіці- єнт k_n , формула (45) ¹	Коефіці- єнт C_{CR} формула (45)	Оцінка ресур- су, ро- ків	Залиш- ковий ресурс, років
	№ групи	Склад гру- пи, зав. №№					
1	1	157, 204	23,3	1,2	1,55	36	5
2	2	557,701,794,837, 862,954,1012-1014, 1265,1266, 1454	18,7	1,07	1,76	33	10

Примітка. 1 - різні значення коефіцієнта $k_n > 1$ призначені з урахуванням ступеня морального й фізичного зносу екіпажної частини та обладнання тепловозів.

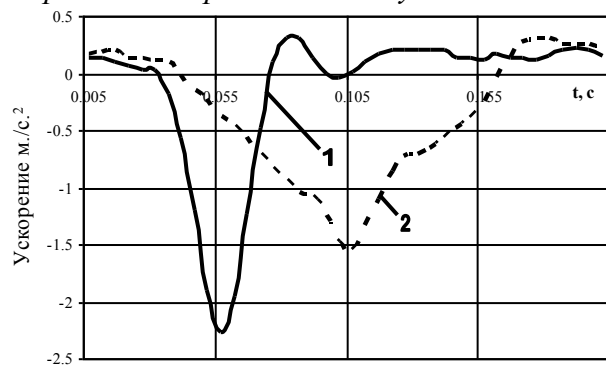


Рис. 10 Напівсинусоїдальні імпульси прискорення, відтворені на електрогідравлічному вібростенді SHENK: 1 - імпульс тривалістю 30 мс; 2 - імпульс тривалістю 100 мс.

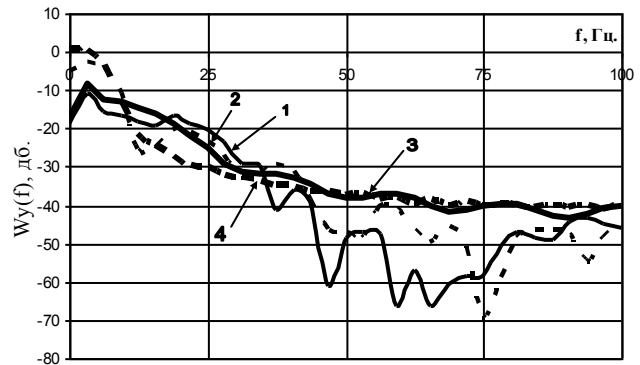


Рис. 11 Порівняння спектрів відтворених і еталонних сигналів.
1 - імпульс 30 мс, відтворений; 2 - імпульс 30 мс, еталон; 3 - імпульс 100 мс, відтворений; 4 - імпульс 100 мс, еталон.

З наведених даних слідує, що розроблений в роботі метод відтворення натурних вібрацій дозволяє отримати задовільну якість динамічних процесів.

З метою визначення частоти гармонійного навантаження при проведенні випробувань з оцінки залишкового ресурсу рами кузова вагона відкритого типу було проведено співставлення напружень, що виникали в датчиках 1 та 7, розташованих на полицях хребтової балки вагона та датчика 5, який був розташований на нижній полиці його шкворневої балки. Отримані за співвідношеннями (23) відповідно позначені узагальнені цільові функції W_{15} й W_{75} (рис. 12).

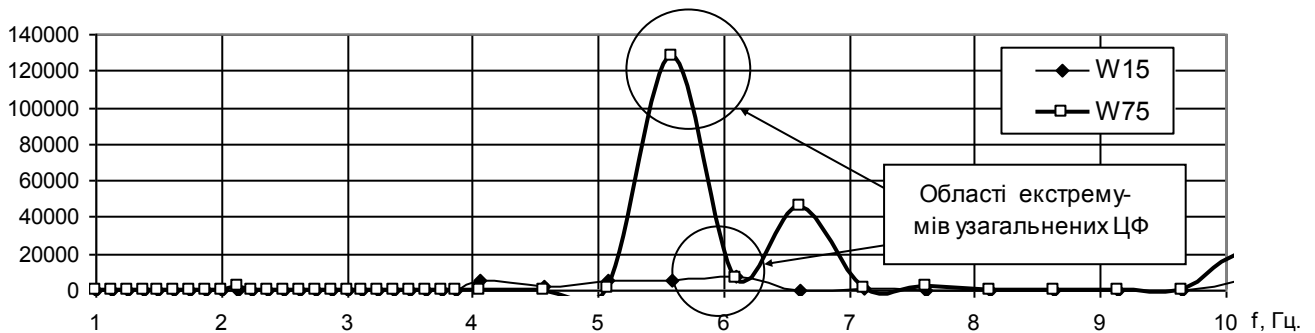


Рис. 12 Узагальнені цільові функції кузова пасажирського вагона відкритого типу

Встановлено, що при проведенні випробувань на ресурс, кузов пасажирського вагона відкритого типу необхідно піддавати гармонійному навантаженню із частотою 5, 75 Гц.

В розділі надано результати проведення комплексу досліджень з лабораторної оцінки границі витривалості рам візків тепловозів М62 і 2М62 і оцінки їх залишкового ресурсу. При визначенні залишкового строку служби несучих конструкцій тепловозів був використаний критерій його оцінки, заснований на порівнянні наробітку, що сприймається несучими конструкціями при проведенні стендових випробувань і в процесі експлуатації.

Для цього були використані співвідношення, отримані на підставі формули (2), а саме

$$T_D = \frac{\sum_i N_{\hat{a}i} \sigma_{\hat{a}i}^m \chi_{\hat{a}i}^m}{L_D \sum_i \bar{N}_{\hat{a}i} \bar{\sigma}_{\hat{a}i}^m \chi_{ei}^m}, \quad (46)$$

де T_D – залишковий строк служби НК; L_D – річний пробіг локомотива; $N_{\hat{a}i}$ – кількість циклів навантаження, отримана НК в процесі проведення стендових випробувань при рівні еквівалентного напруження $\sigma_{\hat{a}i}$; $\bar{N}_{\hat{a}i}$ – середня кількість циклів навантаження, отримана НК в процесі експлуатації на ділянці пробігу 1 км при рівні напружень $\sigma_{\hat{a}i}$; m – показник ступеня кривої витривалості.

Після проведення динамічних ходових і динамічних міцносних випробувань тепловозів М62, 2М62, з урахуванням імовірності виникнення різних експлуатаційних ситуацій був знайдений глобальний розподіл імовірності

еквівалентних напружень, зведених на одиницю пробігу локомотива (1 км). Під час проведення стендових випробувань з оцінки опору втомі рам візків було зафіксоване руйнування рами візка зав. № 364 по непровару стикового зварного шва литої шелепи з нижньою полицкою поздовжньої балки рами. Висновки щодо залишкового ресурсу тепловозів М62 наведені в табл. 3.

В розділі наведено результати комплексної оцінки ресурсу НК пасажирських вагонів після проведення їх капітально-відновного ремонту. Загальний вид плацкартного пасажирського вагона, встановленого на вібраційний стенд, наведено на рис. 13.

Таблиця 3.

Загальний ресурс рам візків тепловозів М62, 2М62

№ пп	Режим випробувань	Найменування параметру	Середнє значення параметру
1	З урахуванням передчасного руйнування візка №364.	Строк служби, років	25
2	Проведення випробувань візків №364, №363 у повному обсязі	Строк служби, років	39



Рис. 13 Загальний вид плацкартного пасажирського вагона, встановленого на вібраційний стенд

В результаті проведення ходових міцносних випробувань, шляхом статистичної обробки було визначено закон розподілу амплітуд динамічних напружень у контрольованих місцях кузова вагона в експлуатації.

При обробці результатів випробувань враховувався рух вагонів тільки по стиковій колії, як той, що найбільш ушкоджує НК.

Для контрольованої точки кузова вагона обчислені

еквівалентні експлуатаційні напруження, а також розрахункові границі витривалості за результатами проведених стендових вібраційних випробувань. Результати розрахунку наведені в табл. 4.

Таблиця 4.

Оцінка коефіцієнтів запасу опору утомі кузова пасажирського вагона.

№ пп	Вид розрахунку ¹	Границя витривалості, МПа	Припустимий коефіцієнт запасу [n]	Коефіцієнт запасу n
1	1	12,16	1,3	1,242
	2	14,20	1,3	1,413

Примітка. 1 - вид розрахунку еквівалентних по руйнуючій здатності напружень, де 1 - приведення експлуатаційних напружень до еквівалентних напружень симетричного циклу відповідно до Норм, формула (18); 2 - те ж, за запасом по амплітуді, формула (19).

З урахуванням того, що при розрахунку виду 1 не задовольняються вимоги Норм розрахунку до величини коефіцієнту запасу витривалості, проведено оцінку обмеженого ресурсу кузова пасажирського вагона, що склав 23,35 років.

Завершує розділ загальний перелік комплексних експериментально - теоретичних досліджень по оцінці та подовженню призначених термінів служби РС із зазначенням використання методів, розроблених в дисертації.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі поставлені та вирішені теоретичні й практичні завдання, спрямовані на рішення проблеми забезпечення наднормативної експлуатації несучих конструкцій рухомого складу з вичерпаним строком служби шляхом виконання комплексних експериментально-теоретичних досліджень. Розроблені й удосконалені в дисертації методи експериментально-теоретичних досліджень по оцінці й подовженню строку експлуатації рухомого складу, методи проведення експериментальних досліджень витривалості несучих конструкцій рухомого складу, методи теоретичної оцінки міцності й ресурсу несучих конструкцій непрямыми методами, методи створення випробувальних систем для проведення досліджень по впливу на складні механічні системи натурних вібрацій дозволяють одержувати обґрунтовані, ефективні й більше точні рішення поставлених у роботі завдань. Основні наукові результати проведених у роботі досліджень, висновки й рекомендації полягають у наступному.

1. Встановлено актуальність і важливість для залізничної галузі проблеми забезпечення експлуатації парку рухомого складу України в період після вичерпання ними призначеного строку служби. Рішення даної проблеми на належному науковому рівні вимагає розробки й удосконалювання прогресивних методів і технологій проведення теоретичних і експериментальних досліджень.

2. Однією з найбільш важливих проблем при виконанні зазначених робіт є наукове обґрунтування методів проведення комплексних випробувань несучих конструкцій рухомого складу при оцінці й подовженні їх ресурсу й призначеного строку служби.

3. На підставі аналізу існуючих методів оцінки опору конструкцій циклічному навантаженню розвинуто обґрунтовані моделі їхньої витривалості, що у достатній мері описують спостережувані фізичні явища.

4. Одержала розвиток система розрахункових співвідношень оцінки міцності, витривалості й ресурсу несучих конструкцій рухомого складу, заснована на критеріях отриманого ними обсягу наробітку, що відрізняється високим ступенем формалізації, Запропонована уточнена модель зниження границі витривалості НК при дії циклічних навантажень, що враховує зміну характеристик матеріалу протягом тривалого навантаження. Показано адекватність запропонованої моделі експериментальним даним, пов'язаним з нелінійним нагромадженням втомних руйнувань у конструкції при нестационарному їх навантаженні. Одержали розвиток емпіричне моделі витривалості різного рівня складності, починаючи із загальної, заснованої на основних

припущеннях теорії витривалості й закінчуючи моделями, що враховують нелінійне нагромадження пошкоджень у матеріалі.

5. Запропоновано метод оцінки статистичних характеристик границі витривалості несучих конструкцій рухомого складу, заснований на аналізі статистики їхніх руйнувань в умовах експлуатації. Показано, що для «неблагополучних» з погляду несучі конструкції тягового рухомого складу середньоквадратичне відхилення границі витривалості конструкції становить 8,8-9 %.

6. Удосконалено метод оцінки коефіцієнтів запасу витривалості й пов'язаного з ним розрахунку еквівалентних по руйнівній здатності напружень у несучих конструкціях, заснований на врахуванні експериментальних даних про відхилення параметрів циклів навантаження від положення рівноваги.

7. Одержали розвиток методи й математичний опис систем для випробувань несучих конструкцій рухомого складу на натурні експлуатаційні вібрації, у тому числі, об'єктів великої ваги, обґрунтована доцільність їхнього використання. Запропоновані методи дозволяють забезпечити якісне відтворення динамічних навантажень, що діють на несучі конструкції рухомого складу шляхом компенсації перекручувань, обумовлених нелінійністю амплітудно-частотної характеристики вібраційних стендів, технологічної оснащення й ваги об'єктів випробувань.

8. Запропоновано метод уточненої оцінки границі витривалості несучих конструкцій шляхом його ітеративної корекції з послідовним виключенням блоків навантажень, що не впливають на її втомне руйнування. Метод дозволяє одержати її обґрунтовані оцінки при проведенні випробувань несучих конструкцій на витривалість блоковими навантаженнями з підвищенням амплітуди, що гарантують втомне руйнування конструкції.

9. Розроблено непрямі методи оцінки витривалості й ресурсу несучих конструкцій рухомого складу;

9.1. Розроблено метод порівняльної оцінки залишкового ресурсу несучих конструкцій шляхом зіставлення їх динамічної навантаженості з навантаженістю рухомого складу, який має аналогічні несучі конструкції, що дозволяє одержувати оцінки ресурсу несучих конструкцій, у тому числі, залишкового, при наявності результату проведення комплексу робіт з оцінки ресурсу рухомого складу – аналога;

9.2. Запропоновано метод порівняльної оцінки залишкового ресурсу несучих конструкцій рухомого складу із використанням принципу «слабкого елемента», що полягає в зіставленні його наробітку в процесі експлуатації з наробітком основних несучих елементів. Особливістю методу є індивідуальний прогноз ресурсу досліджуваної конструкції без проведення її випробувань до руйнування.

10. Наведено результати комплексних експериментально - теоретичних робіт з оцінки й подовження строків служби рухомого складу, найбільш важливі для обґрунтування розроблених у роботі теоретичних положень.

10.1. При проведенні комплексу ресурсних випробувань кузова пасажирського вагона відкритого типу (плацкартного) підтверджена можливість призначення режимів його гармонійного навантаження.

10.2. Проведено дослідження з порівняльної оцінки динамічної навантаженості рам візків електропоїздів ЕР9П с ЕР9М,Е, на підставі яких строк служби рам візків електропоїздів ЕР9М, Е подовжено до 37 років від їх побудови.

10.3. Наведено результати робіт з відтворення імпульсів прискорень на електрогідравлічному вібростенді й підтверджена можливість розвинених у роботі методів для відтворення натурних вібрацій складних механічних систем.

10.4. Надано результати експериментально-теоретичних робіт з оцінки залишкового ресурсу рам візків тепловозів М62, 2М62 з використанням моделі витривалості, заснованою на критеріях сприйнятого наробітку, що дозволило подовжити їх встановлений строк служби до 39 років від побудови.

10.5. Наведено результати комплексної оцінки залишкового ресурсу кузовів пасажирських вагонів після проведення їх капітально-відновного ремонту, що дозволило обґрунтувати їх встановлений строк служби до 48 років від побудови.

11. Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень практично впроваджені Замовником (Укрзалізниця) при розробці Технічних рішень на подовження строку служби серій тягового рухомого складу, Технічних умов на проведення капітальних ремонтів з подовженням строку служби та призначенні строку служби пасажирських вагонів після проведення капітально-відновного ремонту.

12. Комплексні дослідження залишкового ресурсу основних несучих конструкцій розглянутих у роботі серій рухомого складу підтвердили можливість його подальшої експлуатації протягом 30-50% від спочатку призначених строків служби.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні:

1. Блохин Е. П. Способ воспроизведения вибраций элементов железнодорожных вагонов при их стендовых испытаниях/ Е.П. Блохин, А.И. Паламаренко, В.Л. Горобец // Динамика поезда и подвижного состава железных дорог: Межвуз. сб. научн. тр. – 1990. - Днепропетровск: ДИИТ, 1990 – С 4 - 9.

2. Горобец В. Л. Оценка остаточного ресурса рам тележек электропоездов ЭР1, ЭР2 путем их стендовых вибрационных испытаний/ В.Л. Горобец, В. П. Кулешов, А. И. Паламаренко // Транспорт. Нагруженность и прочность подвижного состава: Сб. научн. тр. ДИИТа. - Днепропетровск: "Наука и образование", 1998. – С. 56-62.

3. Продление срока службы тягового подвижного состава – один из способов обеспечения его надежной эксплуатации/ Е.П. Блохин, В.Л. Горобец, А.Д. Лашко и др. // Транспорт: Зб. наук. пр. ДІІТу, Випуск 6. – Дніпропетровськ: Арт - Прес, 2000. – С. 14–20.

4. Горобец В. Л. Визначення залишкового ресурсу тягового рухомого складу/ В. Л. Горобець, О. І. Паламаренко, В. П. Кулешов. // Залізнич. транспорт України. – 2001. –№1. – С.14–16.

5. Горобец В. Л. Оценка показателей сопротивления усталости несущих конструкций тягового подвижного состава по данным его эксплуатации // Транспорт: Зб. наук. праць. – Вип. 9. – Дніпропетровськ, 2001. – С. 60 – 66.

6. Богатырь Г. П. Некоторые результаты стендовых вибрационных испытаний рам тележек КВЗ – ЦНИИ/ Г. П. Богатырь, В. Л. Горобец, В. А. Ключко // Транспорт: Зб. наук. пр. ДІІТу. - Вип. 10. –Дніпропетровськ, 2001. – С 51–57.

7. О модели сопротивления усталости несущих конструкций тягового подвижного состава для оценки их остаточного ресурса/ Е.П. Блохин, В. Л. Горобец, В. П. Кулешов и др. - Вісник Східноукраїнського державн. університету, 2002. – № 2. – С. 276-289.

8. Влияние эксплуатационных нагрузок на напряжения в элементах несущих конструкций электровоза ВЛ60/ А. М. Бондарев, В. Л. Горобец, И. М. Грущак и др. // Зал. транспорт України, 2002 - №4. – С.21– 25.

9. Бондарев О. М. Методики оцінки залишкового ресурсу пасажирського рухомого складу/ О. М. Бондарев, В. Л. Горобець, Б. Я. Остапук. // Зал. транспорт України, 2002 – №5. – С.28–30.

10. Комплексная оценка срока службы пассажирских вагонов после проведения капитально-восстановительного ремонта: В 2 ч./ Е. П. Блохин, О. М. Савчук, Г. В. Рейдемейстер, В. Л. Горобец, и др. // Зал. транспорт України, 2002 - №6. – С.24–29. – Ч. 1.

11. Блохин Е. П. Методичні та теоретичні аспекти поетапного подовження строку служби тягового рухомого складу/ Е.П. Блохин, В. Л. Горобец, Н. И. Сергиенко // Сборник научных трудов НГУ – 2002. – №15. – Днепропетровск: РИК НГУ, 2002. - С. 105-112.

12. Горобец В. Л. Накопление усталостных повреждений и назначение режимов стендовых вибрационных испытаний несущих конструкций подвижного состава // Транспорт: Збірник наук. праць Дніпропетровського державн. технічн. університету залізн. трасп-ту – Вип. 12. – Дніпропетровськ. - 2002. – С. 58-63.

13. Экспериментальная оценка динамических качеств тепловозов ТГМ 6А в условиях их эксплуатации на путях промтранспорта/ А.М Бондарев, В.Л. Горобец, И.М. Грущак и др. //Збірник наук. праць Київського університету економіки і технологій транспорту: Серія „Транспортні системи і технології” – Вип.. 4. – К: КУЕТТ, 2003. – С. 13–21.

14. Горобец В. Л. Принцип эргодичности в модели выносливости материалов и конструкций // Зал. транспорт України, 2003. – №4. – С.32 – 35.

15. Комплексная оценка срока службы пассажирских вагонов после проведения капитально-восстановительного ремонта: В 2ч./ Е. П. Блохин, О. М. Савчук, Г. В. Рейдемейстер, В. Л. Горобец, и др. // Зал. транспорт України, 2003. - № 3. – С.23–26. – Ч. 2.

16. Горобец В. Л. Продление срока службы подвижного состава Украины / В. Л. Горобец, Е. П. Блохин // Вестник Восточноукраинского национального университета им. В. Даля. - №9 (67). – 2003. - С 180-185.

17. Боднарь Б. Е. Методы сравнительной оценки ресурса несущих конструкций подвижного состава/ Б.Е. Боднарь, В.Л. Горобец, И.М. Грущак // Вестник Восточноукраинского национального университета им. В. Даля. - №8 (78). – 2004. - С 118-126.

18. Горобец В. Л. Воспроизведение реальных вибраций элементов и оборудования подвижного состава // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна. - Вып.4. – Днепропетровск, 2004. – с.141-148.

19. Динамічні ходові та динамічні міцності випробування електровоза ВЛ40у/В. Л. Горобець, О. М. Бондарєв, М. І Сергієнко та ін. // Зал. транспорт України. – 2006 - №1. – С. 55–60.

20. Горобец В. Л. О назначении режимов испытаний на выносливость крупногабаритных изделий железнодорожного транспорта. // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна, – Вып. 15, – Днепропетровск, 2007. – С. 154-158.

21. Показники динаміки електровоза ЧС4 та міцності конструкцій рам візків виробництва ХК „Луганськтепловоз”/ О. М. Бондарєв, І.Е. Батюшин, В. Л. Горобець. та ін. // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна, – Вып. 19, – Днепропетровск, 2007. – С. 152-160.

22. Горобец В. Л. Модель выносливости материалов и конструкций с учетом эволюции их механических характеристик/ В. Л. Горобец, Ю.И. Саввин // Вісник Дніпропет. нац. ун-ту залізн.. тр-ту ім. акад.. В. Лазаряна. – Вип. 21, – Д: Вид - во ДНУ ЗТ, 2008. – С. 7-15.

23. Горобец В. Л. Оценка сопротивления несущих конструкций подвижного состава циклическим нагрузкам с учетом влияния равномерной коррозии /В.Л. Горобец, Д. А. Ягода, П. А. Ягода // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна, - Вып. 23, – Днепропетровск: Вид - во ДНУ ЗТ, 2008. – С. 25 - 29.

24. Бондарєв О.М. Визначення строку служби несучих конструкцій моторвагонного рухомого складу із застосуванням методики порівняння їх динамічної навантаженості/ О.М. Бондарєв, В.Л. Горобець, І.М. Грущак // Вісник Дніпропет. нац. ун-ту залізн.. тр-ту ім. акад. В. Лазаряна, – Вип. 24, – Дніпропетровськ: Вид - во ДНУ ЗТ, 2008. – С. 18-24.

Додаткові:

25. Горобец В. Л. Исследование напряженно – деформированного состояния кузовов вагонов электропоездов ЭР1, ЭР2 // Транспорт. Нагруженность и прочность подвижного состава: Сб. научн. тр. ДИИТа. – Днепропетровск: "Наука и образование", 1998. – С. 135–141.

26. Научное обоснование продления срока службы пассажирских вагонов после проведения капитально - восстановительного ремонта/ А.Н. Пшинько, Е.П. Блохин, В.Л. Горобец. и др. // Новини науки Придніпров'я, - Дніпропетровськ, - №4. - 2002. – С. 48-54.

27. Горобец В. Л. Оценка коэффициентов запаса выносливости и эквивалентных по разрушающей способности циклических напряжений по дан-

ным натурных испытаний подвижного состава // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна - Вып.1, - Днепропетровск, 2003. – С. 116 - 122.

28. Горобец В.Л. Воспроизведение нестационарных ударных нагрузок при проведении стендовых испытаний оборудования вагонов / В.Л. Горобец А. И. Паламаренко// Проблемы механики железнодорожного транспорта. Тез IX Всес. конф. Днепропетровск 22 – 27 мая, – Днепропетровск: ДИИТ, 1996. – С. 16.

29. Горобец В.Л. Оценка характеристик усталостной прочности рам тележек электропоездов/ В. Л. Горобец Л. А., А. Н. Пшинько, А. М. Бондарев, А. И. Паламаренко // ЮЖЕЛ'98: The 5 th international scientific conference of railway experts, October 28-30. 1998. – Vrnjacka Banja, Yugoslavia 1998. – S. 236.

30. Горобец В.Л. Безопасность движения и продление срока службы электропоездов./ В. Л. Горобец, Л. А. Манашкин, В. А. Каблуков // ЮЖЕЛ'98: The 5 th international scientific conference of railway experts, October 28-30. 1998. – Vrnjacka Banja, Yugoslavia 1998. – S. 237.

31. Горобец В. Л. Продление срока службы подвижного состава Украины/ В. Л. Горобец, Е. П. Блохин, А. Д. Лашко, В. П. Кулешов// Проблемы механики железнодорожного транспорта: X междунар. научн. конф. Днепропетровск 24 – 26 мая 2000 г. – Днепропетровск: ДИИТ, 2000. – С 157 – 158..

32. Горобец В. Л. Исследование длительной прочности подвижного состава Украины/ В. Л. Горобец, Е. П. Блохин. А.Н. Пшинько // Подвижной состав XXI века: Идеи, требования, проекты. С.-Петербург 3-5 июля 2003 г. – С.-Петербург: ПГУПС-ЛИИЖТ, 2003. – С. 98.

33. Горобец В. Л. Методы оценки выносливости несущих конструкций подвижного состава// Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: Техніка, технологія, економіка і управління. Перша наук. - практична конф. Київ 4 – 5 грудня. – Київ: КУЕТТ, 2003.

34. Горобец В. Л. Теория и методы продления срока службы подвижного состава / В. Л. Горобец, Ю. И. Асввин// Проблемы механики железнодорожного транспорта. Динамика, прочность и безопасность движения подвижного состава: XI междунар. конф. Днепропетровск 26-29 мая 2004 г. – Днепропетровск: ДНУЖТ, 2004. – С. 67.

35. Горобец В. Л. Индивидуальное прогнозирование степени равномерного коррозионного износа ответственных элементов несущих конструкций тягового подвижного состава/ В. Л. Горобец, Д. А. Ягода// Проблемы механики железнодорожного транспорта. Динамика, прочность и безопасность движения подвижного состава: XI междунар. конф. Днепропетровск 26-29 мая 2004 г. – Днепропетровск: ДНУЖТ, 2004. – С. 68.

36. Горобец В. Л. Проблемы организации и научного обоснования поэтапного продления срока службы тягового подвижного состава/ В. Л. Горобец, А. Д. Лашко, Н. И. Сергиенко, А. Д. Жаковский// Проблемы механики железнодорожного транспорта. Динамика, прочность и безопасность движе-

ния подвижного состава: XI междунар. конф. Днепропетровск 26-29 мая 2004 г. – Днепропетровск: ДНУЖТ, 2004. – С. 107.

37. Горобец В. Л. Продление срока службы промышленного тягового подвижного состава/ В. Л. Горобец, Б. Е. Боднар, А. М. Бондарев, И. М. Грущак // Проблемы механики железнодорожного транспорта. Динамика, прочность и безопасность движения подвижного состава: XI междунар. конф. Днепропетровск 26-29 мая 2004 г. – Днепропетровск: ДНУЖТ, 2004. – С. 42.

38. Горобец В. Л. Обеспечение сверхнормативной эксплуатации тягового подвижного состава. Внедрение наукоемких технологий на магистральном и промышленном транспорте: I Научно - практическая конф. Алушта 6 – 10 июня 2005 г. – Алушта: ДНУЖТ - Днепротехтранс, 2005. – С. 3-4.

39. Горобец В. Л. Методы оценки и продления срока службы тягового подвижного состава Украины/ В. Л. Горобец, В. А. Зайцев// Внедрение наукоемких технологий на магистральном и промышленном транспорте: II Научно-практическая международная конф. Алушта, 5 – 9 июня 2006 г. – Алушта: ДНУЖТ - Днепротехтранс, 2005. – С. 7

40. Горобец В. Л. Перспективы индивидуального прогнозирования ресурса несущих конструкций локомотивов с использованием бортовых систем диагностики./ В. Л. Горобец, В. А. Зайцев, С. В. Пилипенко, И. Е. Батюшин, А.В. Шелковый// Внедрение наукоемких технологий на магистральном и промышленном транспорте: III Научно-практическая международная конф. Алушта, 5 – 9 июня 2007 г. – Алушта: ДНУЖТ - Днепротехтранс, 2007. – С. 3.

АНОТАЦІЇ

Горобець В.Л. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО - ТЕОРЕТИЧНІ МЕТОДИ
ОЦІНКИ РЕСУРСУ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ
РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеню доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.07 - рухомий склад залізниць і тяга поїздів. Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2008.

Дисертація присвячена розвитку експериментально-теоретичних методів визначення оцінок витривалості та ресурсу основних несучих конструкцій рухомого складу.

Розроблено та вдосконалено методи теоретичної та експериментальної оцінки характеристик опору втомі несучих конструкцій, у тому числі, непрямыми методами, створено математичний опис систем випробування несучих конструкцій на натурні транспортні вібрації. Обґрунтовано вибір режимів проведення стендових випробувань несучих конструкцій, у тому числі, великогабаритних. Розвинуто експериментально-теоретичний метод проведення комплексу робіт з оцінки витривалості й ресурсу рухомого складу. Наведено результати дослідження міцності та ресурсу декількох серій рухомого складу.

Ключові слова: рухомий склад, ресурс, залишковий ресурс, міцність, витривалість, строк служби, несучі конструкції, стендові вібраційні випробування.

Горобец В.Л. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО - ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РЕСУРСА НЕСУЩИХ
КОНСТРУКЦИЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА. - Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.22.07 - подвижной состав железных дорог и тяга поездов. Днепропетровский государственный технический университет железнодорожного транспорта, Днепропетровск, 2008.

Защищается двадцать семь научных работ, которые содержат исследования по научному обоснованию оценки выносливости и ресурса основных несущих конструкций (НК) подвижного состава (ПС) и методов их теоретико-экспериментального определения.

Значительная часть ПС Украины исчерпала установленные сроки службы и согласно действующей нормативной базе должна быть исключена из эксплуатации. Решение проблемы оценки ресурса (в том числе, остаточного) несущих конструкций подвижного состава основывается на проведении научно - исследовательских работ с применением комплексных экспериментально - теоретических методов.

Целью данной работы является совершенствование методов комплексной теоретико-экспериментальной оценки характеристик выносливости и ресурса НК ПС и научное обоснование их сверхнормативной эксплуатации.

Объектом исследования является процесс сопротивления НК железнодорожного подвижного состава действию циклических нагрузок.

Предметом исследования являются экспериментально-теоретические методы оценки ресурса и срока службы НК ПС железных дорог как меры продолжительности процесса их сопротивления действию циклических нагрузок.

Для достижения цели исследования проведен анализ причин усталостных разрушений основных несущих конструкций подвижного состава в эксплуатации; разработка и усовершенствование методов оценки их выносливости и ресурса, усовершенствованы методы комплексной теоретической и экспериментальной оценки характеристик сопротивления несущих конструкций усталости, в том числе, косвенными методами; создано математическое описание систем их испытаний на натурные транспортные вибрации, усовершенствован метод экспериментальной оценки характеристик динамики подвижного состава, которые оказывают влияние на точность оценок его выносливости и ресурса.

В рамках работы впервые получено теоретическое обоснование методов выбора режимов проведения стендовых вибрационных испытаний несущих конструкций подвижного состава (в том числе крупногабаритных податливых объектов), которые обеспечивают линейное накопление повреждений в конструкции при ее блочном нагружении с нарастанием его амплитуды, а для крупногабаритных конструкций позволяют получать близкое к эксплуатационному соотношению наработок основных несущих элементов, научное обоснование методов оценки ресурса несущих конструкций подвижного состава косвенными методами, которые позволяют существенно сократить объемы экспериментальных исследований за счет использования статистических показателей отказов элементов несущих конструкций, результатов предыдущих исследований по оценке динамики, прочности и ресурса несущих конструкций – аналогов исследуемых конструкций, создана научно-методическая база проведения комплексных работ по определению ресурса несущих конструкций тягового подвижного состава разных серий, которая характеризуется объединением существующих нормативных требований к новому подвижному составу, а также объемов и методов выполнения теоретических и экспериментальных работ по оценке нагруженности, прочности, выносливости и остаточного ресурса основных несущих конструкций. Получил дальнейшее развитие экспериментально-теоретический метод проведения комплекса работ по оценке выносливости и ресурса основных НК ПС, который является обобщением существующего опыта проведения соответствующих исследований, математические модели сопротивления усталости, основанные на принципе оценки полученной конструкциями наработки.

Усовершенствованы теоретические основы создания стендовых вибрационных систем для испытаний несущих конструкций подвижного состава на натурные эксплуатационные вибрации, в том числе, объектов большого

веса, которые отличаются от существующих методов применением предварительной коррекции (предыскажения) воспроизводимых нагрузок, осуществляемого по результатам кратковременных тестовых нагрузок объектов испытаний, метод оценки коэффициента запаса прочности с учетом экспериментальных распределений параметров циклов нагрузки несущих конструкций, который отличается учетом направления фактического отклонения параметров циклов нагрузки от состояния равновесия конструкции.

Разработанные в диссертации теоретические положения использованы при выполнении научно-исследовательских работ по продлению назначенного срока службы подвижного состава Украины, России (пассажирские вагоны) и промышленного транспорта по ряду серий подвижного состава.

С применением разработанных в работе методов исследована прочность и оценен ресурс ряда серий подвижного состава. Основные результаты работы внедрены Государственной администрацией железнодорожного транспорта Украины при разработке нормативной документации по продлению срока службы локомотивов и моторвагонного подвижного состава.

Ключевые слова: подвижной состав, ресурс, остаточный ресурс, прочность, выносливость, срок службы, несущие конструкции, стендовые вибрационные испытания.

Gorobets' V. L. EXPERIMENTAL-AND-THEORETICAL METHODS
OF ESTIMATION OF RESOURCE OF THE
RAILWAY TRANSPORT ROLLING STOCK
SUPPORTING STRUCTURES. - Manuscript.

Dissertation for competition of academic degree of doctor of technical sciences on speciality 05.22.07 – railway rolling stock and train traction. – Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipropetrovsk, 2009.

The dissertation is devoted to development of experimental-and-theoretical methods of determination of estimations of durability and resource of the basic rolling stock supporting structures.

The development and perfection of methods of theoretical and experimental estimation of characteristics of fatigue resistance of supporting structures are carried out including use of indirect methods; the mathematical description of test systems of supporting structures on natural transport vibrations is created. The choice of test conditions for performing the bench tests of supporting structures, including large-sized ones, is theoretically proved. The experimental-and-theoretical method of carrying out the complex of works on estimation of durability and resource of the rolling stock is advanced.

The strength research and resource estimation of several types of the rolling stock are carried out with an application of methods developed in the dissertation.

Key words: rolling stock, resource, residual resource, strength, durability, endurance, service life, supporting structures, bench vibration tests.

Горобець Володимир Леонідович

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО - ТЕОРЕТИЧНІ МЕТОДИ ОЦІНКИ РЕСУРСУ
НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Спеціальність 05.22.07 - Рухомий склад залізниць та тяга поїздів

Підписано до друку _____. Формат 60X84 1/ 16. Папір для множних апаратів. Ум. друк. арк. 2,0. Обл. - вид арк. 2,2. Тираж 150 прим. Замовлення № _____. Тираж 150.

Безкоштовно.

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Адреса університету та редакційно – видавничого відділу ДНУЗТ: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Акад. В.А. Лазаряна, 2.