

УДК 629.424.1:621.31:681.3

## РОЗВИТОК МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ДЛЯ РОЗРАХУНКОВОЇ ОЦІНКИ НЕСІВНОЇ ЗДАТНОСТІ РАМНИХ КОНСТРУКЦІЙ МОТОРВАГОННОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

Дьомін Р.Ю.

### DEVELOPMENT OF METHODS AND TOOLS FOR THE ESTIMATED EVALUATION OF LOAD-BEARING CAPACITY OF FRAME STRUCTURES OF A MOTORIZED ROLLING STOCK

Domin R.

*Запропоновано подальше удосконалення розрахункового інструментарію стосовно отримання достовірних оцінок несівної здатності рамних конструкцій екіпажних частин. Розроблено рекомендації з удосконалення підходів до розрахункової оцінки напружено-деформованого стану несівних конструкцій екіпажних частин тягового рухомого складу з застосуванням комп'ютерного моделювання складних технічних систем. Ефективність запропонованих рекомендацій доведено на прикладі розрахунків міцності рам візків вагонів дизель-поїздів з вичерпаним строку служби, що був назначений виробником.*

**Ключові слова:** моторвагонний рухомий склад; екіпажні частини; несівні конструкції; комп'ютерне моделювання; розрахунки міцності.

**Вступ.** Через економічну ситуацію, що склалась, залізниці вимушені продовжувати експлуатацію парку рухомого складу, значна частина якого знаходиться за межами призначеного строку служби. Критичний рівень зношеності рухомого складу при недостатньому рівні відновлювальних робіт ставить під загрозу забезпеченість безпеки руху поїздів. Тому питання оцінювання й прогнозування втомної довговічності несівних конструкцій рухомого складу привертають до себе все більшої уваги науковців та спеціалістів в галузі рухомого складу залізниць та тяги поїздів [3-8].

Попри значні напрацювання в напрямку подовження строку служби рухомого складу методика, що застосовується для оцінювання показників втомної довговічності несівних конструкцій та технології подовження терміну служби екіпажних частин, потребують подальшого удосконалення для більш повної відповідності вимогам практики. Водночас визначається нагальна необхідність у розвитку методів і засобів досліджень щодо оцінювання несівної здатності екіпажних частин, зокрема моторвагонного рухомого складу (МВРС).

Гостра актуальність проблеми вимагає комплексних досліджень з визначення ефективних шляхів подовження строку служби МВРС. Теоретичні дослідження з оцінювання залишкового ресурсу несівних конструкцій екіпажних частин мають базуватись на використанні сучасних методів і засобів оцінки динаміки і міцності технічних систем. Тому осучаснення методів і засобів, що використовується, знаходиться серед пріоритетів при розробці проектів пов'язаних з оновленням рухомого складу залізниць.

**Мета дослідження** – подальше удосконалення інструментарію для розрахункової оцінки несівної здатності рамних конструкцій екіпажних частин тягового рухомого складу.

**Об'єкт досліджень.** За запропонованою методикою досліджено несівну здатність рам візків вагонів дизель-поїзда ДР1А.

**Розрахункове моделювання рамних конструкцій.** Для виконання досліджень з визначення залишкового ресурсу несівних конструкцій необхідні дані щодо геометрії моделі та властивості матеріалів: модуля пружності, коефіцієнта Пуансона та густини. Для побудови 3D-моделей використовуються номінальні розміри вузлів та елементів складання з врахуванням геометрії зварних швів. При моделюванні можуть бути використані оболонкові елементи або твердотільні (рис. 1). Рекомендовано раму візка, раму кузова та каркас кузова моделювати твердотільними елементами, обшивку кузова – оболонковими елементами. Моделювання зварних швів твердотільними елементами слід виконувати за допомогою фасок під кутом нахилу 45°. У оболонкових моделях зварні шви не моделюються.

На перших етапах розрахунку конструкції, які ведуться за простими розрахунковими схемами, за необхідності приймаються рішення щодо спрощення 3D-моделі. Для спрощення розрахунку рекомен-

довано для рами кузова та каркасу зварні шви моделювати тільки в тих зонах, де очікуються найбільші напруження. При цьому перевагу необхідно надавати твердотільним елементам, оскільки ці моделі дозволяють екстраполювати напруження по товщині пластини безпосередньо до границі зварного шва.

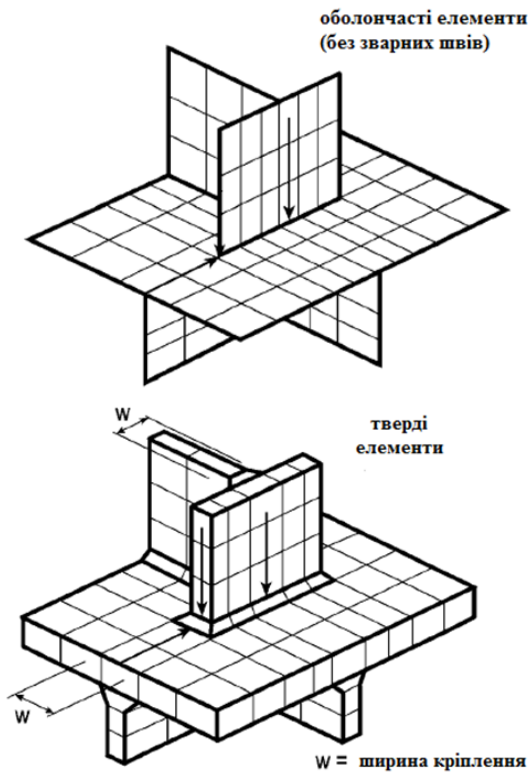


Рис. 1. Типові моделі для аналізу напружень зварних деталей

При побудові розрахункової схеми необхідно визначити реальні константи, якими володіють несівні конструкції МВРС. Так, рама візка видається пружним тілом, а допоміжні тіла – абсолютно жорсткими. Пружні елементи, що зв'язують пружне тіло з допоміжним, і є реальними константами.

Розрахункова схема повинна враховувати всі зв'язки, які обмежують рухливість несівних конструкцій. Для моделювання зв'язків використовуються додаткові елементи, які є геометричними примітивами. Як правило, ці допоміжні елементи моделюються абсолютно жорсткими тілами.

Додаткові елементи та несівні конструкції пов'язані між собою пружними елементами з характеристиками жорсткості відсутнього тіла. Відсутнє тіло є елементом, який контактує з несівною конструкцією та передає зусилля або момент, чи бере участь в обмеженні руху. Додатковими елементами для рами візка можуть бути балансир, поводок, шворінь з пружно-поворотним пристроєм, ковзун, колісна вісь тощо.

Маси тіл, які спираються на елементи несівної конструкції, моделюються віддаленими масами з інерційними характеристиками як у згаданих. Віддалена маса спирається на обрані поверхні абсолют-

но жорстко. У разі спирання віддаленої маси на несівну конструкцію через пружні елементи необхідно передбачити проміжне додаткове тіло.

Другий візок, на який спирається маса кузова, моделюється спрощено завдяки допоміжним елементам поданих абсолютно жорсткими тілами. Елементи, які моделюють букси, фіксуються за всіма ступенями вільності. Довжина пружин є довільною і використовується тільки для визначення напрямку деформації пружин.

Розрахункова несівна конструкція кузова моделюється наступним чином. Рама кузова спирається на елементи, що розглядаються як геометричні примітиви, які імітують раму візка. Елемент рами візка, який зв'язаний з кузовом сумарною жорсткістю, фіксується за всіма ступенями вільності. Автозчеп вважається абсолютно жорстким тілом, який зв'язаний з упорами на рамі кузова пружними елементами.

Побудова кінцево-елементної моделі несівних конструкцій проводиться в декілька етапів:

- на першому етапі кінцево-елементна модель доводиться до збіжності результатів із застосуванням правила Рунге [2];

- на другому етапі проводиться ущільнення сітки для застосування екстраполяції до точки сингулярності кінцево-елементної моделі.

Довірчий інтервал розрахункових значень напружень повинен становити не менше 95%. Збіжність результатів перевіряють, використовуючи правило Рунге, за виразом

$$\frac{1}{\rho^2 - 1} (\sigma_{h2} - \sigma_{h1}) \leq 0,05 \cdot \sigma_{h2}, \tag{1}$$

де  $\sigma_{h1}$  і  $\sigma_{h2}$  – результати розрахунків з розмірами сітки  $h_1$  та  $h_2$ ;  $\rho$  – співвідношення розмірів сітки; вираз  $\frac{1}{\rho^2 - 1} (\sigma_{h2} - \sigma_{h1})$  – головний член похибки.

Розміри сітки, які застосовуються для екстраполяції, визначаються з умови типу концентратора на границі зварного шва (рис. 2): тип а – границя зварного шва на широкій поверхні; тип б – границя зварного шва на кромці листа.

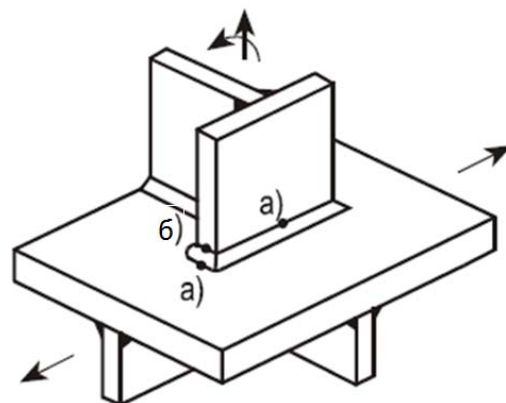


Рис. 2. Типові концентратори напружень для зварних деталей

**Визначення динамічних навантажень.** За рекомендаціями Пам'ятки UIC 518 вхідні дані для чисельного моделювання динаміки руху рейкових екіпажів включають [12]:

- геометричні параметри колії;
- жорсткість і властивості демпфування колії;
- характеристики геометричного контакту колеса з рейкою;
- технічний стан транспортного засобу;
- стан поверхні колії.

Динамічна модель транспортного засобу повинна бути адекватним відображенням всіх аспектів реального об'єкту, які впливають на динамічні характеристики [8, 10]. Для цього будується 3-D нелінійна модель транспортного засобу, включаючи:

- маси, інерційні характеристики і розподіл навантаження;
- жорсткості підвішування, демпфірування, тертя, обмежувачі тощо;
- частоти власних коливань кузова;
- характеристики взаємодії коліс з рейками.

Для валідації моделі мають використовуватись результати контрольних випробувань. Дані моделювання порівнюється з результатами випробувань за параметрами спектральних щільностей потужності (СЩП) та основними частотами за аналізом наступних вимірюваних величин:

- поперечні та вертикальні прискорення кузова;
- поперечні та вертикальні прискорення візків;
- кутові прискорення виляння візків.

За отриманими результатами моделювання представляються такі дані:

- значення оцінюваних величин, виражених в абсолютних величинах й у відсотках від граничних значень;
- значення показників безпеки руху отриманих за розрахованими величинами, включно з такими, які перевищили граничні значення, з визначенням можливих причин;
- приклади типових осцилограм для кожної вимірюваної або змодельованої величини.

При дослідженні МВРС за межами призначеного строку служби належить визначати власні частоти і відповідні форми коливань несівних конструкцій [9]. Такі відомості необхідні для досліджень на відсутність резонансних коливань при експлуатації МВРС та штатній роботі обладнання. Крім цього, модальний аналіз виконується для:

- налаштування побудованої розрахункової схеми;
- визначення вагової долі кожної моди;
- визначення кількості мод необхідних для динамічного аналізу;
- верифікації розрахункової моделі.

При побудові розрахункової схеми передбачається, що інерцією, пружністю та іншими властивостями володіють усі елементи системи. Розрахункова схема вважається налаштованою, якщо власна частота коливань кузова визначена аналітично та роз-

рахункова частота за МСЕ співпадають з похибкою не більше 5 %.

Результати визначення власних частот та форм коливань є основою для динамічного аналізу несівних конструкцій МВРС. Кількість мод необхідних для динамічного аналізу визначається таким чином, щоб вагові долі коливань за головними напрямками склали не менше 80%.

Для верифікації розрахункової схеми зіставляються розрахункові частоти з частотами, що мають значну інтенсивність за отриманими амплітудними спектрами деформації з тензодатчиків, що були розміщені на несівних конструкціях в контрольних точках при випробуваннях. Якщо за результатами верифікації різниця між частотами більше за 5%, то розрахункову модель уточнюють.

**Дослідження напружено-деформованого стану рам візків дизель-поїзда.** Приклад практичного застосування викладених раніше рекомендацій ілюструє аналіз напружено-деформованого стану (розрахунку міцності) несівних конструкцій екіпажних частин вагонів дизель-поїзда серії ДР1А. Цей аналіз виконано методом скінченних елементів у пакеті SolidWorks [1].

Розрахункові схеми моделей рам візків моторного і причіпного вагонів подібні і містять складові елементи: дві осі з буксами; надресорну балку з ковзунами як геометричні примітиви; кузов як віддалена маса. Такі елементи рами, як буксовий поводок і тяговий поводок, замінено пружними елементами. Складові елементи є абсолютно жорсткими. Розрахункова модель рами візка моторного вагона наведена на рис. 3.

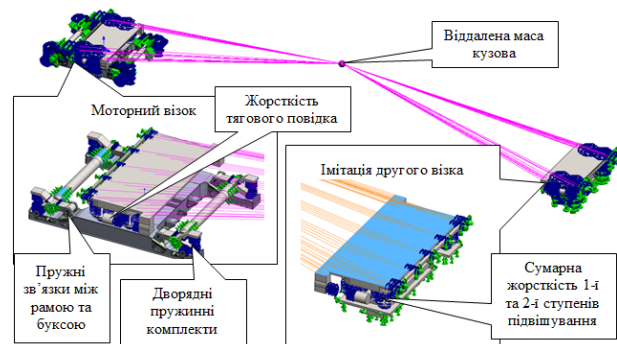


Рис. 3. Розрахункова модель рами моторного візка

Динамічна реакція несівної конструкції обумовлена частотами і формами власних коливань. Тому процедура динамічного аналізу у визначенні характеристик напружено-деформованого стану конструкції передбачає виконання модального аналізу.

Реальні конструкції мають нескінченну кількість власних форм коливань. В кінцево-елементній моделі кількість власних форм коливань відповідає кількості ступенів вільності. У модальному аналізі для кожної власної форми коливань можна зіставити відсоткову частку маси конструкції, що коливається за кожною з форм.

У розрахунках рам візків розглянута обмежена кількість мод, таким чином, щоб процентна доля маси в головному напрямку складала не менше 60%. За результатами модального розрахунку встановлені основні власні частоти: для моторного вагона – 0,61, 1,28, 1,43, 1,55, 12,42 Гц; для причіпного вагона – 0,67, 1,39, 1,54, 1,64, 14,59 Гц.

Результати модального аналізу необхідні зокрема для досліджень на брак резонансних коливань елементів екіпажних частин при русі МВРС та роботі механізмів, розміщених на ньому.

Розрахункові навантаження екіпажних частин формуються зі статичної, квазістатичної та динамічної складових. Статичною складовою є сили тяжіння. Квазістатичне навантаження відповідає умовам криволінійного руху. Характеристики динамічного навантаження залежать від результатів взаємодії рухомого складу і колії.

Таким чином, при визначенні параметрів напружено-деформаційного стану екіпажних частин у статичному режимі проводяться розрахунки міцності рам візків при дії сил тяжіння і відцентрових сил при допустимому непогашеному прискоренні.

Стосовно динамічного аналізу запропоновано підхід, суть якого полягає у використанні СЩП прискорень, що міряються протягом ходових випробувань, при формуванні зовнішнього навантаження несівних конструкцій. За цих обставин дані прискорень з часової області переводяться в область частот у вигляді функції СЩП. Вважається, що всі власні форми коливань приводяться функцією СЩП до розподілу потужності цих форм за частотою коливань.

За результатами динамічного розрахунку отримано середньоквадратичні значення напружень рам візків, за якими визначено небезпечні, з точки зору динамічного навантаження, зони, в яких середньоквадратичне відхилення перевищує 10 МПа

Небезпечні зони рами візка моторного вагона:

- зона №1 - основний метал в зоні технологічних отворів шворневої коробки;
- зона №2 - радіусні переходи верхніх полиць з'єднань поперечної балки з боковою;
- зона №3 - зварні шви та пришовні зони з'єднань шворневої балки з поперечними балками;
- зона №4 - зварні шви та пришовні зони з'єднань кронштейнів для кріплення дискового гальма з поперечними балками;
- зона №5 - зварні шви та пришовні зони з'єднань кронштейнів для кріплення осьового редуктора з поперечними балками.

Небезпечні зони рами візка причіпного вагона:

- зона №6 - зварні шви та пришовні зони приварення шворневої балки до поперечних балок;
- зона №7 - радіусні переходи верхніх полиць з'єднань поперечної балки з боковою;
- зона №8 - зварні шви та пришовні зони з'єднань шворневих втулок з шворневою коробкою;
- зона №9 - основний метал на кромках верхніх полиць в середній зоні шворневої коробки.

Визначені небезпечні зони рам візків рекомендовано піддавати періодичному контролю.

Врахування розподілу динамічних навантажень за конструкцією і впродовж часу експлуатації дизель-поїзда надає можливість визначити довговічність несівних конструкцій. Водночас через те, що дизель-поїзди серії ДР1А знаходяться в аварійному стані і експлуатуються зі швидкостями руху до 40 км/год, тому проведення ходових динамічних випробувань та випробувань міцності з низькими швидкостями не дозволили поширити отримані дані на весь діапазон робочих швидкостей до 120 км/год. Ця обставина обмежила можливості повноцінної оцінки залишкового ресурсу.

За результатами динамічних розрахунків можна визначити коефіцієнт запасу опору втомі для будь якої точки конструкції. Для найбільш небезпечних зон рам візків, тобто для зон 1 і 6, розрахункові значення коефіцієнта запасу опору втомі нормативною оцінкою становлять 1,1 і 2,03. Останнє значення свідчить про недостатній опір втомі рами візка причіпного вагона.

**Висновки.** За результатами проведеного дослідження запропоновано рекомендації щодо удосконалення підходів до розв'язання питань розрахункової оцінки несівної здатності рам візків тягового рухомого складу. Ефективність застосування розроблених рекомендацій доведено на прикладі аналізу розрахунку міцності несівних конструкцій ходових частин вагонів дизель-поїзда серії ДР1А. Перспективи подальшого удосконалення методів і засобів оцінки міцності несівних елементів локомотивів і моторвагонного рухомого складу мають визначатись програмними завданнями щодо оновлення залізничного рухомого складу.

#### Л і т е р а т у р а

1. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А. А. Алямовский // М.: ДМК Пресс, 2014. – 562 с.
2. Бахвалов Н. С. Численные методы (анализ, алгебра, обыкновенные дифференциальные уравнения) / Н. С. Бахвалов // М.: Наука, 1975. – 632 с.
3. Боднар Б. Е. Методы сравнительной оценки ресурса несущих конструкций подвижного состава / Б. Е. Боднар, В. Л. Горобец, И. М. Грушак // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – №8 (78). – 2004. – С. 118-126.
4. Горобец В. Л. Визначення залишкового ресурсу тягового рухомого складу / В. Л. Горобец, О. І. Паламаренко, В. П. Кулешов // Залізничний трансп. України. – 2001. – №1. – С.14-16.
5. Дворецкий В. И. Продление срока службы несущих конструкций транспортных машин / В. И. Дворецкий // Проблемы ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 425-430.
6. Оцінювання залишкового ресурсу рам візків електровазів ВЛ10 / В. А. Леонєв, Б. С. Шульгінов, А. О. Лукашевич та ін. // Вісник Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя. Спец. випуск. – 2011. – Ч. 2. – С.29 – 34.

7. Показники динаміки електровоза ЧС4 та міцності несучих конструкцій рам візків виробництва ХК «Луганськтепловоз» / І. Є. Батюшин, О. М. Бондарев, В. Л. Горобець, О. М. Заболотний, Д.О. Ягода // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 19. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – С. 152-160.
8. Сучасні підходи до нормативних оцінок міцності несучих елементів екіпажних частин, динамічних якостей локомотивів та їх дії на колію / І. Є. Батюшин, С. Г. Грищенко, Р. Ю. Дьомін, Ю. В. Дьомін, Г. Ю. Черняк // Локомотив-Інформ. – 2010. – №2. – С. 24-27.
9. Черняк А. Ю. Модальний аналіз і усталостна довговечність рам тележеч тягового подвижного состава / А. Ю. Черняк, Е. О. Гриндей, П. А. Гриндей // Локомотив-Інформ. – 2010. – №11. – С. 4-7.
10. Evans, J. Challenges in simulation of rail vehicle dynamics / J. Evans, M. Berg // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. – 2009. – Vol. 47. – Iss. 8. – P. 1023-1048.
11. Investigation of the some problems of running safety of rolling stock on the Ukrainian railways / R. Domin, I. Domin, G. Cherniak et al. // Archives of Transport. – 2016. – Vol. 40. – Iss. 4. – P. 15-27.
12. Testing and Approval of Railway Vehicles from the Point of View of their Dynamic Behaviour : Safety – Track fatigue – Ride quality : UIC Code 518. – International Union of Railways. – September 2009. – 119 p.
8. Leonets' V. A. Otsinyuvannya zalishkovogo resursu ram vizkiv yelektrovoziv VL10 / V. A. Leonets', B. S. Shul'ginov, A. O. Lukashevich ta in. // Visnik Ternopil'skogo natsional'nogo tekhnichnogo univertitetu im. I. Pulyuya. Spets. vipusk. – 2011. – CH. 2. – S. 29-34.
9. Chernyak A. Yu. Modal'nyy analiz i ustalostnaya dolgovechnost' ram telezhek tyagovogo podvizhnogo so-stava / A. Yu. Chernyak, Ye. O. Grindey, P. A. Grindey // Lokomotiv-inform. – 2010. – №11. – S. 4-7.
10. Domin R. Investigation of the some problems of running safety of rolling stock on the Ukrainian railways / R. Domin, Iu. Domin, G. Cherniak, et al. // Archives of Transport. – 2016. – Vol. 40, Issue 4. – P. 79-91.
11. Evans J. Challenges in simulation of rail vehicle dynamics / J. Evans, M. Berg // Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. – 2009. – Vol. 47, Issue 8. – P. 1023-1048.
12. UIC Code 518. Testing and Approval of Railway Vehicles from the Point of View of their Dynamic Behaviour: Safety – Track fatigue – Ride quality. – International Union of Railways. – 1995. – 119 p.

**Демин Р.Ю. Развитие методов и средств для расчетной оценки несущей способности рамных конструкций моторвагонного подвижного состава.**

*Предложено дальнейшее совершенствование расчетного инструментария по получению достоверных оценок несущей способности рамных конструкций экипажных частей. Разработаны рекомендации по совершенствованию подходов к расчетной оценке напряженно-деформированного состояния несущих конструкций экипажных частей тягового подвижного состава с применением компьютерного моделирования сложных технических систем. Эффективность предложенных рекомендаций доказана на примере расчетов прочности рам тележек вагонов дизель-поездов с истекшим сроком службы, назначенным производителем.*

**Ключевые слова:** моторвагонный подвижной состав; экипажные части; несущие конструкции; компьютерное моделирование; расчеты прочности.

**Domin R. Development of methods and tools for the estimated evaluation of load-bearing capacity of frame structures of a motorized rolling stock.**

*A further improvement of the settlement tool for obtaining reliable estimates of the non-existent capacity of the frame structures of the crew parts was proposed. The recommendations on the improvement of approaches to the estimated evaluation of the stress-strain state of load-bearing structures of the ejection parts of the traction rolling stock with the application of computer modeling of complex technical systems are developed. The effectiveness of the proposed recommendations has been proved with the example of calculating the strength of the bogie frames of diesel-train cars with expired service life, designated by the manufacturer.*

**Keywords:** motorized rolling stock; crew parts; bearing structures; numerical modeling; strength calculations.

**Дьомін Р.Ю.** – к.т.н., докторант кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин СНУ ім. В. Даля, e-mail: r.domin@1520mm.com

*Рецензент:* д.т.н., проф. **Горбунов М.І.**

**References**

1. Alyamovskiy A. A. SolidWorks Simulation. Inzhenernyy analiz dlya professionalov: zadachi, metody, rekomendatsii / A. A. Alyamovskiy // M.: DMK Press, 2014. – 562 s.
2. Batyushin I. E. Pokazniki dinamiki yelektrovoza CHS4 ta mitsnostiy nesuchikh konstruksiy ram vizkiv virobnitstva KHK «Lugans'kteplovoz» / I. E. Batyushin, O. M. Bondarêv, V. L. Gorobets', O. M. Zabolotniy, D.O. Yagoda // Visnik Dniropetr. nats. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazaryana. – 2007. – Vip. 19. – D.: Vid-vo DNUZT, 2007. – S. 152-160.
3. Batyushin I. E. Suchasni pidkhodi do normativnikh otsinok mitsnostiy nesivnikh yelementiv yekipazhnikh chastin, dinamichnikh yakostey lokomotiviv ta ikh dii na koliyu / I. E. Batyushin, S. G. Grishchenko, R. YU. D'omin, YU. V. D'omin, G. YU. Chernyak // Lokomotiv-inform. – 2010. – №2. – S. 24-27.
4. Bakhvalov N. S. Chislennyye metody (analiz, algebra, obyknovennyye differentsial'nyye uravneniya) / N. S. Bakhvalov // M.: Nauka, 1975. – 632 s.
5. Bodnar' B. Ye. Metody sravnitel'noy otsenki resursa nesushchikh konstruksiy podvizhnogo sostava / B. Ye. Bodnar', V. L. Gorobets, I. M. Grushchak // Visnik Skhidnoukr. nats. un-tu im. Volodimira Dalya. – №8 (78). – 2004. – S. 118-126.
6. Gorobets' V. L. Vznachennyya zalishkovogo resursu tyagovogo rukhomogo skladu / V. L. Gorobets', O. I. Palamarenko, V. P. Kulêshov // Zaliznichniy transp. Ukraïni. – 2001. – №1. – S. 14-16.
7. Dvoret'skiy V. I. Prodleniye sroka sluzhby nesushchikh konstruksiy transportnykh mashin / V. I. Dvoret'skiy // Problemi resursu i bezpeki yekspluatatsiy konstruksiy, sporud ta mashin. – K.: IEZ im. E. O. Pato-na NAN Ukraïni, 2006. – S. 425-430.