

УДК 629.4.018

**МОДАЛЬНИЙ АНАЛІЗ РАМИ МОТОРНОГО ВІЗКА ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДА ДР1А****Шевчук П.А., Гриндей П.О.****MODAL ANALYSIS OF BOGIE FRAMES OF A DIESEL-MULTIPLE UNIT TRAIN DR1A****Shevchuk P., Grindey P.**

*У статті розглядається створення розрахункової моделі несучих конструкцій екіпажної частини моторвагонного рухомого складу. Представлені особливості побудови розрахункової моделі для проведення модального аналізу несучих конструкцій візків моторвагонного рухомого складу на прикладі рами моторного візка дизель-поїзда серії ДР1А. Розроблена розрахункова модель рами візка відображає всі характеристики ресорного підвішування і опорних пристроїв вагона дизель-поїзда. Проведено розрахунок власних частот і форм коливань рами візка. Представлено процес верифікації розрахункової моделі, який містить такі етапи: розробка розрахункової моделі, яка відбиває характеристики реальної конструкції вагона дизель-поїзда; підготовка та проведення ходових випробувань; модальний аналіз рами моторного візка; порівняльний аналіз розрахункової частоти у вертикальному напрямі, обчисленої за аналітичною формулою, з частотами, які отримані при випробуваннях та за допомогою модального аналізу. Проведено порівняння отриманих результатів власних частот рами моторного візка дизель-поїзда серії ДР1А.*

**Ключові слова:** модальний аналіз, верифікація, розрахункова модель, власні форми та частоти, рама моторна візка, дизель-поїзд.

**Вступ.** В результаті експлуатації в конструкціях рухомого складу залізниць можуть відбуватися втомні деформації, мікротріщини в з'єднувальних швах, які не призводять до змін геометричних розмірів конструкції, але призводять до зміни міцнісних властивостей. Прогнозування локалізації можливих пошкоджень несучих конструкцій рухомого складу дозволяє підвищити безпеку руху за рахунок проведення своєчасного технічного діагностування з метою виявлення втомних тріщин на ранніх стадіях їх розвитку.

Альтернативним підходом до отримання значень власних коливань конструкції є її числовий аналіз в обчислювальних пакетах. Наразі існує ряд програмних пакетів, які дозволяють проводити модальний аналіз: Ansys, FEM (Patran/Nastran), SolidWorks [1].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.**

Прогнозування довговічності з точки зору втомної міцності дозволяє передбачати ймовірний пробіг моторвагонного рухомого складу (МВРС) без пошкоджень несучих конструкцій, а також виявляти «ослаблені» місця, в яких поява втомних пошкоджень виникне раніше, ніж в інших [2,3]. Крім того, використання інформації щодо розподілу оцінок довговічності по конструкції, забезпечує підвищення ефективності проведення неруйнівного контролю екіпажної частини МВРС, сприяючи тим самим обґрунтованому прийняттю рішень щодо забезпечення експлуатації рейкового рухомого складу поза призначеним терміном служби [4].

**Матеріал дослідження.** На залізницях України експлуатуються дизель-поїзди з гідравлічною передачею ДР1А, виробництва Ризького вагонобудівного заводу. Дизель-поїзда використовують в приміському сполученні, а також в міському сполученні на неелектрифікованих ділянках колії. Цей поїзд складається з двох моторних та чотирьох причіпних (проміжних) вагонів, з'єднаних автозчепами.

Несуча конструкція екіпажної частини дизель-поїзда є складною системою, а найбільш навантаженими є рами візків, тому доцільно провести дослідження власних частот та форм коливань конструкції візка, який відіграє важливу роль в безпеці руху.

У статті представлені особливості побудови розрахункової моделі для проведення модального аналізу несучих конструкцій моторного вагона дизель-поїзда ДР1А. У якості прикладу було взято раму моторного візка [5], та проведена перевірка адекватності отриманих результатів.

Трьохвимірною та кінцево-елементною моделлю рами візка дизель-поїзда ДР1А. Рама моторного візка зварної конструкції має Н-подібну форму у плані й складається з двох поздовжніх і двох поперечних зварних балок закритого коробчастого перетину. Між поперечними балками вздовж поздовжньої осі візка зварена шворнева балка. Ця балка рами моторного візка має зігнуту форму.

До поперечних балок рами приварені кронштейни для кріплення деталей дискового та ручного гальма, тягових повідків та підвішування осевого редуктору. До повздовжніх балок приварені кронштейни для кріплення буксових повідків, опори для з'єднання букси з рамою та кільцевих гнізд, у яких розміщуються ковзуни.

Повздовжня рама візка з'єднується з колісними парами за допомогою корпусів букс. Середня частина букси через буксовий підшипник спирається на шийку осі колісної пари. Зовнішнє плече корпусу букси виконано у вигляді піддону, на який спирається комплект ресорних пружин. Буксова підвіска, до нижнього конічного краю якої через гумовий амортизатор підвішена консоль рами, верхньою частиною спирається через роз'ємний вкладиш та опо-

рний стакан на двохрядний комплект пружин. Таким чином, вертикальне навантаження від рами візка передається через підвіску ресорному комплекту і далі через корпус букси – на шийку осі колісної пари.

За даними технічної документації за допомогою програми SolidWorks 2012 побудована трьохвимірна геометрична (3-D) модель рами моторного візка ДР1А з урахуванням всіх вище описаних конструкційних особливостей (рис.1).

На основі розробленої 3D моделі згенеровано кінцево-елементну сітку з розміром елемента 6 мм (рис.2). Сітка збудована за допомогою елементів типу тетраедр. Якість побудови сітки перевірена за правилом Рунге [6]. Кінцево-елементна модель рами візка містить 690 491 вузлів і 377 052 елементів.

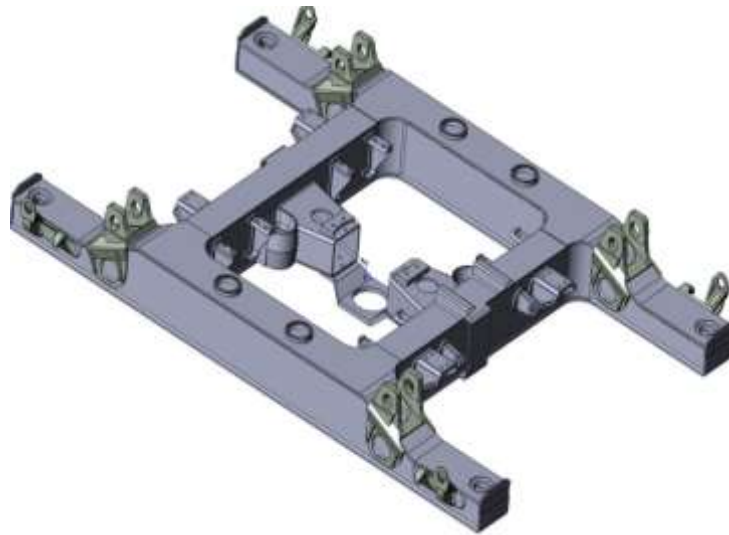


Рис. 1. 3D-модель рами візка

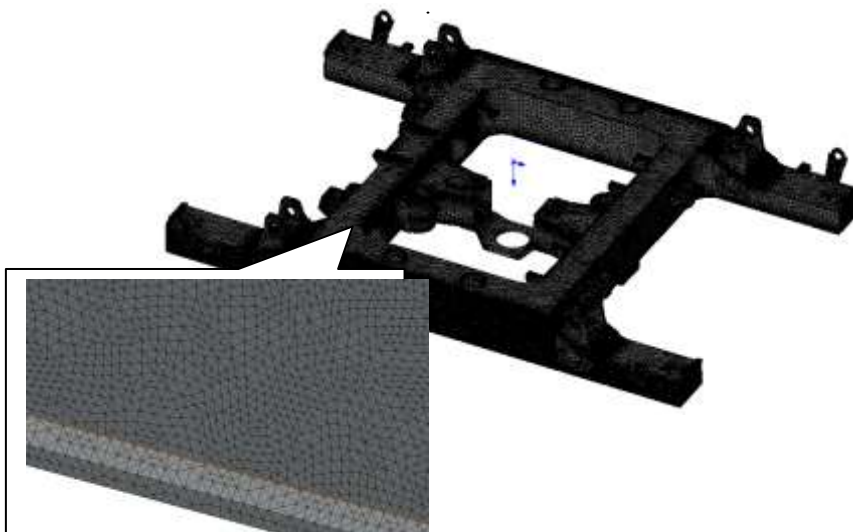


Рис. 2. Кінцево-елементна модель рами візка

**Розрахункова модель для модального аналізу.** Значний вплив на частоти і форми коливань конструкції мають умови її закріплення і конструктивні особливості, тому розрахункова модель рами візка повинна відображати всі характеристики ресорного підвішування і опорних пристроїв моторного вагона дизель-поїзда.

Для проведення розрахунків дослідження динамічного напружено-деформованого стану рами візка створена розрахункова модель (рис. 3).

Відмінність цієї розрахункової моделі від тої, що застосована для статичних розрахунків, полягає в тому, що вона доповнена додатковими елементами. Кузов представлений у вигляді віддаленої маси, що спирається на ковзуни надресорної балки, які відображені у вигляді абсолютно жорстких елементів.

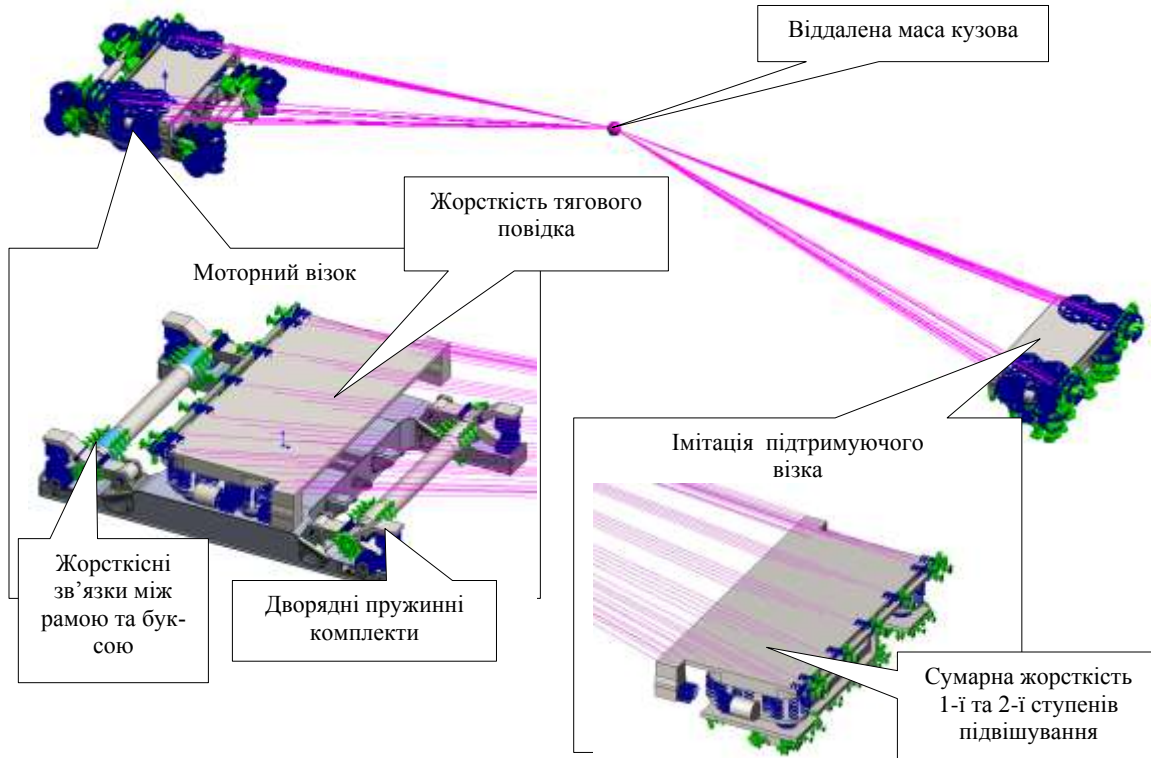


Рис. 3. Розрахункова модель рами моторного візка

**Модальний аналіз.** Як відомо, реальні конструкції мають нескінченне число власних форм коливань, тоді як в кінцево-елементній моделі кількість власних форм коливань відповідає кількості ступенів вільності. При модальному аналізі конструкції для кожної власної частоти можливо зіставити частки маси, яка коливається за своєю формою коливань.

Динамічний відгук несучої конструкції моторного вагона зумовлений її власними формами коливань. Вихідні дані модального аналізу використані для подальшого обчислення характеристик напружено-деформованого стану конструкції рами моторного візка при динамічному аналізі.

Рама візка через пружні елементи підвішується до буксового важеля з одного кінця та через імітацію сайлент блока з іншого кінця. Буксовий важіль жорстко зв'язаний з колісною парою, яка представлена абсолютно жорстким тілом, що фіксується в місцях розміщення букс. Такі елементи рами, як буксовий поводиток і тяговий поводиток, замінені пружними елементами. Віддалена маса кузова також спирається на елементи, що моделюють підтримуючий візок. Модель підтримуючого візка представлена геометричними примітивами, що відбивають надресорну балку з ковзунами та шворневий вузол.

Для представленої розрахункової моделі застосовано модальне демпфірування, яке встановлює коефіцієнт демпфірування за кожною формою коливань для врахування розсіювання механічної енергії.

З усього масиву власних частот, якими володіє конструкція, коливання відбуваються в основному на певних частотах. Такі частоти називаються головними, а напрямки, за яким вони діють – головними напрямками [7].

Для рами візка розраховані частоти в діапазоні до 100 Гц. Результати модального аналізу представлені в Таблиці 1, де показані значення частот і масові частки по головним напрямкам. Частоти, форми коливань яких, мають значні масові частки підкреслені.

Оскільки в розрахунковій моделі маса кузова спирається пружно через ковзуни на раму візка, то, власні частоти кузова проявляються в спектрі власних частот.

Результати модального розрахунку

Мода	Частота, Гц	Масові частки за напрямком		
		повздожній	вертикальний	поперечний
<u>1</u>	<u>0,60768</u>	7,356e-009	1,3663e-007	<u>0,39718</u>
2	1,2068	1,7788e-008	4,7029e-010	0,00039213
<u>3</u>	<u>1,2764</u>	0,0061473	<u>0,60178</u>	7,9211e-008
4	<u>1,4335</u>	7,345e-008	1,7586e-006	<u>0,45858</u>
<u>5</u>	<u>1,5465</u>	0,014934	<u>0,25025</u>	3,1203e-006
6	<u>12,421</u>	<u>0,89798</u>	1,3239e-007	6,1415e-006
<u>7</u>	<u>16,715</u>	0,0001138	2,1787e-009	<u>0,053702</u>
8	65,408	2,062e-008	2,127e-007	4,0447e-007
9	71,427	0,008309	4,2769e-006	8,0837e-008
10	92,769	4,6134e-006	0,019603	1,0292e-008

Це дозволяє виконати перевірку розрахункової частоти кузова у вертикальному напрямі, обчисленої за аналітичною формулою, з частотою, отриманою за допомогою модального аналізу. Так, частота кузова у вертикальному напрямі  $v_a$  за аналітичним розрахунком є:

$$v_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\sum \kappa_{\text{віз}}}{m_{\text{куз}}}}$$

де  $\sum \kappa_{\text{віз}}$  – сумарна жорсткість моторного і підтримуючого візків;  $m_{\text{куз}}$  – маса кузова з пасажирями, отже:

$$v_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\kappa_{\text{віз1}} + \kappa_{\text{віз2}}}{m_{\text{куз}}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1714473 + 1599361}{40900}} = 1,43 \text{ Гц.}$$

Обчислена на підставі модального аналізу конструкція рами моторного візка частота коливань у вертикальному напрямі становить:  $v_{\text{розр}} = 1,27 \text{ Гц}$ .

Для повного порівняльного аналізу визначені частоти коливань кузова й рам візків моторного вагона за результатами ходових динамічних випробу-

вань на підставі вимірних реалізацій прискорень. Під час ходових випробувань також вимірювалися деформації поздовжніх балок рами моторного візка вагона дизель поїзда. Розміщення тензодатчиків показано на рис. 4. Обробка отриманих реалізацій прискорень і деформаційних процесів проведена з використанням програми, розробленої в ПК Labview [8]. При випробуваннях значення власної частоти коливань у вертикальному напрямі кузова становить:  $v_{\text{випр}} = 1,44 \text{ Гц}$ .

Для верифікації моделі рами моторного візка, розрахункові частоти зіставлені з частотами, що мають значну інтенсивність з амплітудних спектрів деформацій, отриманих з тензодатчиків 1 і 2 при швидкості руху 40-50 км/год, представлені на рис. 5.

При зіставленні представлених значень було визначено, що розрахункові частоти задовільно узгоджуються з результатами випробувань, що в свою чергу підтверджує адекватність побудованої розрахункової моделі.

На рис. 6-8 представлені форми коливань рами візка дизель-поїзда ДР1А, що відповідають частотам: 1,27 Гц; 1,43 Гц; 12,4 Гц.

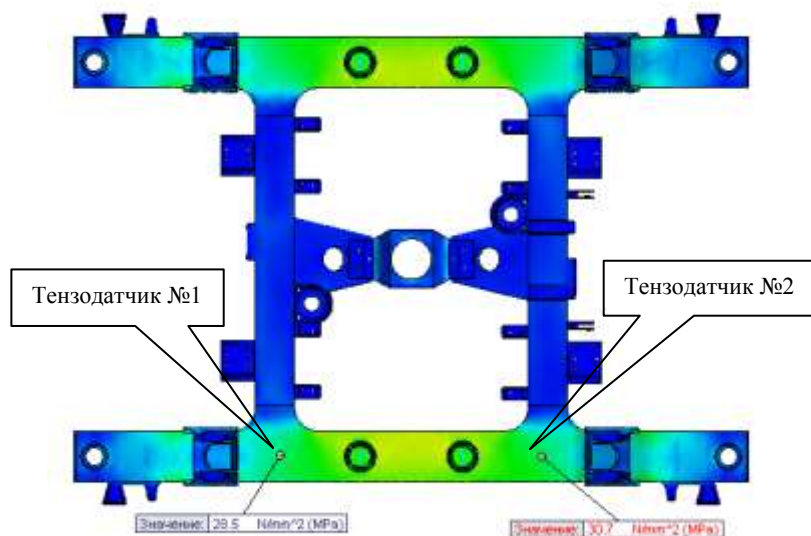


Рис. 4. Розміщення тензодатчиків на рамі візка

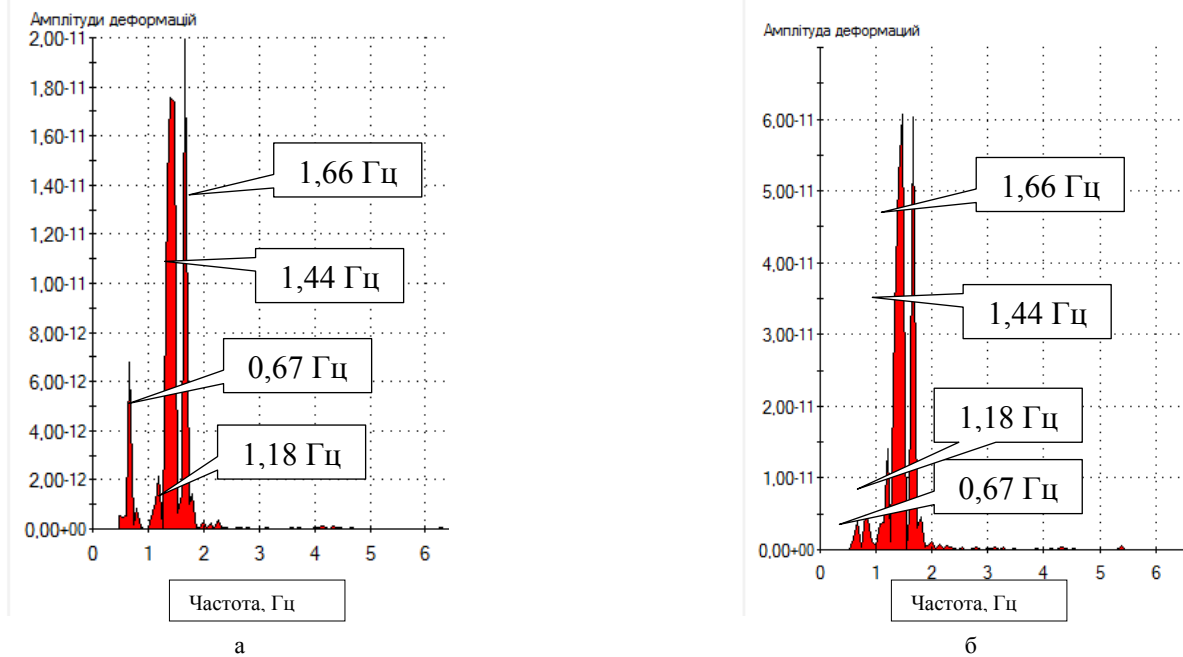


Рис. 5. Амплітудний спектр деформацій в місці розміщення тензодатчиків: а – №1 та б – №2



Рис. 6. Форма коливань, яка відповідає частоті 1,27 Гц



Рис. 7. Форма коливань, яка відповідає частоті 1,43 Гц



Рис. 8. Форма коливань, яка відповідає частоті 12,4 Гц

**Висновки.** Розроблена розрахункова модель для проведення модального аналізу рами моторного візка вагона дизель-поїзда ДР1А, в якій відображено всі характеристики ресорного підвішування і опорних пристроїв вагона, зокрема, кузов вагона представлений як віддалена маса, що спирається на два візки посередництвом пружних елементів, при цьому в якості підтримуючого візка застосовані геометричні примітиви, колісні пари представлені за допомогою твердих тіл, що не мають переміщень.

Кінцево-елементна модель рами візка містить 690 491 вузлів і 377 052 елементів типу «тетраedr».

На підставі цієї моделі проведено модальний аналіз з визначенням власних частот в діапазоні до 100 Гц. Нижча розрахована власна частота у вертикальному напрямі має значення 1,28 Гц, що корелюється зі значенням частоти підсакакування кузова, рівним 1,43 Гц, яке обчислено за аналітичним виразом.

За результатами ходових випробувань вагона побудовано амплітудні спектри деформацій згину бічної балки рами моторного візка і встановлені частоти, що відповідають найбільшим амплітудам деформацій.

## Література

1. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. И. Харитонович, Н. Б. Пономарев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 1040с.
2. Оцінка втомної довговічності несучих конструкцій тягового рухомого складу / Г. Ю. Черняк, Р. Ю. Дьомін, П. О. Гриндей, А. В. Мостович // Залізничний трансп. України. – 2008. – №3. – С. 15-17.
3. Техническое регулирование и продление назначенных сроков службы тягового подвижного состава./ В.И. Дворецкий, А.Ю. Черняк, Ю.В. Браславец, П.А. Гриндей // Залізничний трансп. України. – 2008. – № 2/1. – С. 51-53
4. Використання комп'ютерного моделювання для подовження терміну служби тягового рухомого складу / Г. Ю. Черняк, Р. Ю. Дьомін, А. В. Мостович та ін. // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2008. – № 5 (123). Ч. 2. – С. 126-130.
5. Дизельные поезда. Устройство, эксплуатация, ремонт, устранение неисправностей/ А.П. Палкин и др.// Изд-во «Транспорт». – 1970. – С.1-360.
6. Численные методы. Учеб.пособие/ Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков /Режим доступа–[http://storage.library.opu.ua/online/books/kaf\\_is/bahvalov\\_.pdf](http://storage.library.opu.ua/online/books/kaf_is/bahvalov_.pdf)
7. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. М.: Наука, 1967. – 444 с.
8. Федоров В.П. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW / В.П. Федосов, А.К. Нестеренко. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 427 с.

## References

1. SolidWorks 2007/2008. Computer simulations in engineering practice / A. Alyamovskiy, A. Sobachkin, E. Odintsov, A. Kharitonovich, N. Ponomarev. – SPb.: BHV-Petersburg, 2008 – 1040 p.
2. Fatigue life evaluation of supporting structures of the traction rolling stock / A.Cherniak, R. Demin, P. Hryndey, A. Mostovych // Railway transport of Ukraine. – 2008. – №3. – P. 15-17.
3. Technical regulation and prolongation of specified time in service of the traction rolling stock / V. Dvoretzkiy, A. Chernyak, Y. Braslavets, P. Hryndey // Railway transport of Ukraine. – 2008. – № 2/1. – P. 51-53.
4. Using of computer simulations for extended life of the traction rolling stock / A.Cherniak, R. Demin, A. Mostovych and others // The newsletter of the East Ukrainian Volodymyr Dahl National University. – 2008. – № 5 (123). Part 2. – P. 126-130.
5. Diesel trains. Structure, operation, repair, troubleshooting process / A. Palkin and others // Publishing house "Transport". – 1970. – P.1-360.
6. Numerical methods. Textbook / N. Bakhvalov, N. Zhidkov, G. Kobel'kov / The access mode - [http://storage.library.opu.ua/online/books/kaf\\_is/bah](http://storage.library.opu.ua/online/books/kaf_is/bah).
7. Oscillation in the Practice of Engineering / S. Timoshenko. – М.: Nauka, 1967 – 444 p.
8. V. Fedorov. Digital Signal Processing in LabVIEW / V. Fedosov, A. Nesterenko. М.:DMK Press, 2007. – 427 p.

## Шевчук П.А., Гриндей П.А. Модальный анализ рамы моторной тележки дизель-поезда ДР1А.

*В статье рассматривается создание расчетной модели несущих конструкций экипажной части моторвагонного подвижного состава. Представлены особенности построения расчетной модели для проведения модального анализа несущих конструкций тележек моторвагонного подвижного состава на примере рамы моторной тележки дизель-поезда серии ДР1А. Разработанная расчетная модель рамы тележки отражает все характеристики рессорного подвешивания и опорных устройств вагона дизель-поезда. Проведен расчет собственных частот и форм колебаний рамы тележки. Представлено процесс верификации расчетной модели, который содержит следующие этапы: разработка расчетной модели, отражающей характеристики реальной конструкции вагона дизель-поезда; подготовка и проведение ходовых испытаний; модальный анализ рамы моторной тележки; сравнительный анализ расчетной частоты в вертикальном направлении, исчисленной по аналитической формуле, с частотами, полученные при испытаниях и с помощью модального анализа. Проведено сравнение полученных результатов собственных частот рамы моторной тележки дизель-поезда серии ДР1А.*

**Ключевые слова:** модальный анализ, верификация, раз-счетная модель, собственные формы и частоты, рама моторной тележки, дизель-поезд.

## Shevchuk P., Grindey P. Modal analysis of bogie frames of a diesel-multiple unit train DR1A.

*This article describes how to create the computational models of supporting structures of the multiple unit undercarriage. The construction features of the computational model for modal analysis of supporting structures of the multiple unit cars on the example of the motor bogie frame of the diesel-multiple unit train DR1A were presented. The designed computational model of the bogie frame reflects all the characteristics of spring suspension and supporting devices of the diesel-multiple unit train cars. The calculation of natural frequencies and forms of oscillations of the bogie frame was carried out. There is the verification process of the computational model that includes the following stages: the development of computational model that reflects the characteristics of a real construction of the diesel-multiple unit train car; preparation and conduct of the running tests; modal analysis of the motor bogie frame; comparative analysis of the rated frequency in the vertical direction, calculated by an analytical formula with frequencies obtained during testing and by means of modal analysis. The comparison of the obtained results of natural frequencies of the motor bogie frame in the diesel-multiple unit train DR1A was conducted.*

**Keywords:** modal analysis, verification, computational model, natural mode and frequencies, motor bogie frame, diesel-multiple unit train.

Шевчук П.А. – аспірант кафедри «Залізничного транспорту» СХУ ім. В. Даля,  
e-mail: [pavel\\_shevchuk\\_1990@ukr.net](mailto:pavel_shevchuk_1990@ukr.net), тел. 0635984225

Гриндей П.О. – начальник науково-дослідного відділу випробувань, ДНДЦ УЗ, [grindey@1520mm.com](mailto:grindey@1520mm.com)

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

Стаття подана 27.03.2015