

УДК 629.4.027.35

**ОБГРУНТУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ШВИДКОСТЕЙ РУХУ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ**

Д-р техн. наук І. Е. Мартинов, к-ти техн. наук О. Г. Рейдеймейстер,  
В. Г. Равлюк, старш. викл. М. Г. Равлюк

**ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ ПАСАЖИРСКИХ ВАГОНОВ**

Д-р техн. наук И. Э. Мартынов, к-ты техн. наук А. Г. Рейдеймейстер,  
В. Г. Равлюк, старш. препод. Н. Г. Равлюк

**THE RATIONALE OF THE MATHEMATICAL MODEL TO DETERMINE THE PERMISSIBLE OPERATING SPEEDS OF PASSENGER RAILROAD CARS**

Doct. of techn. sciences I. Martinov, candidate of technical sciences O. Reidemeister, V. Ravlyuk, a senior professor N. Ravlyuk

*Наведено процес формування математичної моделі та основні етапи математичного моделювання руху пасажирських вагонів із несправними гідравлічними гасителями коливань в процесі їх експлуатації. Розроблено математичну модель стійкості руху пасажирського вагона, яка дає можливість визначити допустимі експлуатаційні швидкості руху у залежності від технічного стану та кількості несправних гасителів коливань у вагоні.*

**Ключові слова:** гідравлічний гаситель коливань, пасажирський вагон, швидкість, математична модель.

*Приведен процесс формирования математической модели и основные этапы математического моделирования движения пассажирских вагонов с неисправными гидравлическими гасителями колебаний в процессе их эксплуатации. Разработана математическая модель устойчивости движения пассажирского вагона, которая дает возможность определить допустимые эксплуатационные скорости движения в зависимости от технического состояния и количества неисправных гасителей колебаний в вагоне.*

**Ключевые слова:** гидравлический гаситель колебаний, пассажирский вагон, скорость, математическая модель.

*Given the formation of the mathematical model and the main stages of mathematical modeling of the movement of passenger railroad cars with faulty hydraulic vibration dampers in the course of their operation. Significant development of the theory of mathematical modeling and its successful use in scientific research has led to the wide application of computer technology. Mathematical model of the studied objects or processes represented not only in the form of equations and relations, but also in the form of algorithms and programs for computers. Modeling the movement of a passenger railroad car allows you to adequately reflect the physical properties and characteristics of a hydraulic shock absorber in the course of its operation. As a result of computer simulation of the developed mathematical model stability of the movement of the passenger railroad cars. This enables you to determine the permissible operating speed depending*

*on the technical condition and the number of defective shock absorbers in the car. The article made computer simulation of permissible speeds of passenger railroad cars on straight and curved track sections.*

**Keywords:** *hydraulic vibration damper, passenger railroad cars, speed, mathematical model, speed.*

**Вступ.** Одними з найважливіших елементів системи ресорного підвішування пасажирських вагонів, електровозів і моторвагонних секцій електропоїздів, що експлуатуються на залізницях, є гідравлічні гасителі коливань. Вони значно поліпшують динамічні якості рухомої одиниці за рахунок використання демпфуючих властивостей в'язкої рідини [5, 7-9].

У цей час на залізницях України експлуатується парк рухомих одиниць, побудованих ще в минулому сторіччі, надійність яких неухильно знижується із часом. Поповнення новими рухомими одиницями здійснюється вкрай повільно.

**Постановка проблеми.** Технологія ремонту й технічного обслуговування вузлів рухомого складу в умовах депо часом не забезпечує належної якості контролю й ремонту технічного стану для забезпечення експлуатаційних швидкостей руху. Це пояснюється як нестабільністю поставок комплектуючими заводами, так і відсутністю комплексного підходу до діагностування технічного стану рухомої одиниці в цілому [1, 2]. При технічному обслуговуванні та ремонті не приділяється особлива увага гідравлічним гасителям коливань, незважаючи на той факт, що близько 90% цих приладів виявляються непрацездатними після обороту локомотивів і пасажирських вагонів. Крім цього, у багатьох депо відсутня система реєстрації й обліку дефектів гасителів коливань, що унеможливорює точне встановлення часу виходу гасителя з ладу й причини, що викликала його відмову. Вкрай важливою проблемою є розробка математичної моделі, яка дасть можливість встановити за допомогою комп'ютерного моделювання допустимі експлуатаційні швидкості руху пасажирського состава, в залежності від технічного стану та несправності гідравлічних гасителів коливань на шляху прямування [1, 7].

**Аналіз попередніх досліджень.** У роботах [8, 9] розглянуті загальні питання

функціонування гідравлічних гасителів коливань при русі пасажирського вагона. Для певної конструкції гідравлічного гасителя отримано залежності коефіцієнта непружного опору, наведено вплив характеристики гасителя на параметри руху рухомої одиниці. Наведено спосіб визначення працездатності гідравлічного гасителя і обґрунтовано вибір кількості та місця встановлення гідравлічних гасителів у ресорному підвішуванні вагона.

У роботах [5, 9] представлені різні конструкції стендів для оцінки технічного стану гідравлічних гасителів коливань для визначення величини параметра опору, що розраховується за робочою діаграмою. У роботах пропонується використовувати для визначення величини опору спеціальну таблицю, а можливі несправності гасителів оцінювати візуально за видом робочої діаграми.

Значний внесок у розвиток теорій динаміки, міцності та якості ремонту рухомого складу внесли такі вчені, як Є. П. Блохін, М. Ф. Веріго, С. В. Вершинський, І. В. Галієв, В. Н. Котуранов, Н. Н. Кудрявцев, С. В. Мямлін, В. А. Лазарян, В. О. Лукін, О. М. Савчук, М. М. Соколов, А. В. Смольянінов, В. Ф. Ушкалов, В. Д. Хусідов, І. І. Челноков, Л. А. Шадур, а також зарубіжні дослідники Картер, Коффман, Шперлінг, Гарг та ін [5, 8-1].

**Мета роботи.** Розробити математичну модель для розрахунку оптимально-допустимих експлуатаційних швидкостей руху пасажирських вагонів із несправними гідравлічними гасителями коливань.

**Основна частина дослідження.** При проектуванні й дослідженні нових механічних систем та вузлів пасажирських вагонів, аналіз властивостей існуючих вузлів і механізмів пасажирських вагонів, виборі обґрунтуванні їх оптимальних конструктивних технологічних параметрів і умов функціонування широко використовується математичне моделювання. Воно являє

собою сукупність математичних рівнянь, формул і нерівностей, логічних операторів та інших залежностей, що описують фізичні процеси, характерні для пасажирського вагона або гідравлічних гасителів коливань, що досліджуються. Отримані при цьому за допомогою математичних символів описи називаються математичними моделями. У більш вузькому представленні математичною моделлю називають формальну залежність між значеннями параметрів на вході моделюючого вузла (процесу) і вихідними параметрами [3].

Моделювання руху пасажирського вагона дозволяє адекватно відобразити фізичні властивості і характеристики гідравлічного гасителя коливань в процесі його експлуатації.

Розрізняють моделювання предметне й абстрактне. При предметному моделюванні будують фізичну модель, яка відповідним чином відображає основні фізичні властивості й характеристики моделюючого об'єкта. При цьому модель може мати іншу фізичну природу в порівнянні з моделюючим об'єктом. Якщо модель і об'єкт однієї і тієї ж фізичної природи, тоді моделювання називають фізичним [4].

Фізичне моделювання широко застосовувалося до недавнього часу при створенні складних технічних об'єктів. Звичайно виготовлявся макетний або дослідний зразок технічного об'єкта, проводилися випробування, у процесі яких визначалися його вихідні параметри й характеристики, оцінювалися надійність функціонування й ступінь виконання технічних вимог, що висували до об'єкта. Якщо варіант технічної розробки ви являвся невдалим, усе повторюється спочатку, тобто здійснюється повторне проектування, виготовлення дослідного зразка, випробування тощо [3, 6].

Фізичне моделювання складних технічних систем сполучене з більшими тимчасовими й матеріальними витратами.

Абстрактне моделювання пов'язане з побудовою абстрактної моделі. Така модель являє собою математичні співвідношення, графи, схеми, діаграми тощо. Найбільш потужним і універсальним методом абстрактного моделювання є математичне

моделювання. Воно широко використовується як у наукових дослідженнях, так і при проектуванні.

Математичне моделювання дозволяє за допомогою математичних символів і залежностей скласти опис функціонування технічного об'єкта в навколишньому зовнішньому середовищі, визначити вихідні параметри й характеристики, одержати оцінку показників ефективності і якості, здійснити пошук оптимальної структури й параметрів об'єкта. Застосування математичного моделювання при проектуванні в більшості випадків дозволяє відмовитися від фізичного моделювання, значно скоротити обсяги випробувань і кінцевих робіт, забезпечити створення технічних об'єктів з високими показниками ефективності і якості. Одним з основних компонентів системи проектування в цьому випадку стає математична модель.

У якості математичних об'єктів виступають числа, змінні, вектори, матриці тощо. Процес формування математичної моделі й використання її для аналізу й синтезу називається математичним моделюванням. У конструкторській практиці під математичним моделюванням звичайно розуміється процес побудови математичної моделі, а проведення досліджень на моделі в процесі проектування називають обчислювальним експериментом.

Для здійснення обчислювального експерименту на ЕОМ будемо розробляти необхідний алгоритм реалізації математичної моделі допустимих швидкостей руху пасажирського состава на шляху прямування у якого є вагон із несправними гідравлічними гасителями коливань.

Алгоритм автоматизованого проектування являє собою сукупність описів, що забезпечують виконання операцій і процедур проектування, необхідних для одержання проектної розв'язку. Для наочності алгоритми найчастіше представляють у вигляді схем або графів, іноді дають їх вербальний (словесний) опис [3, 1].

**Основні етапи математичного моделювання руху пасажирських вагонів.** В ході виконання математичного

## Рухомий склад залізниць

моделювання руху пасажирського вагона з несправними гасителями коливань для встановлення допустимих швидкостей можна виділити кілька етапів:

- постановка завдання моделювання;
- складання математичного опису руху пасажирського вагона з несправними гасителями коливань, що досліджуються;
- вибір методу розв'язку рівнянь

математичного опису й реалізація його у формі моделюючої програми;

— установлення відповідності (адекватності) моделі руху пасажирського вагона з несправними гасителями коливань.

Загальна схема процесу математичного моделювання представлена на рис. 1.

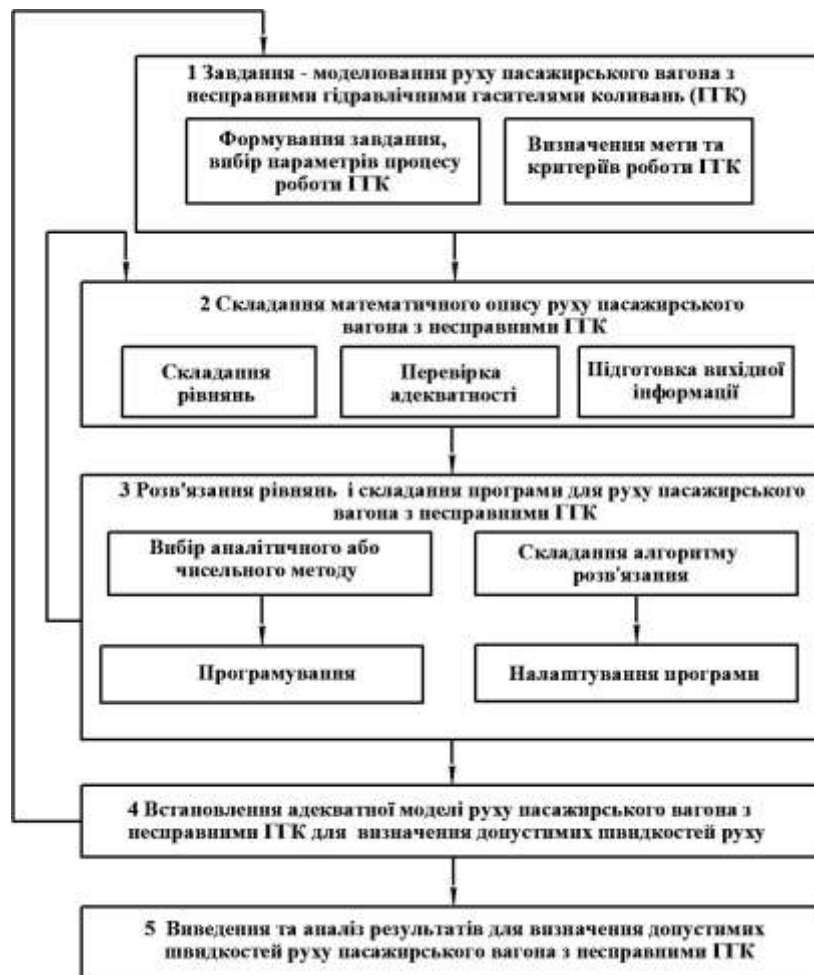


Рис. 1. Етапи розробки математичної моделі руху пасажирського вагона з несправними гасителями коливань в процесі експлуатації

Етап складання математичного опису — це етап формалізації завдання, вираження її у вигляді конкретних математичних залежностей і відношень. Тут для кожного виділеного елемента і явища записують рівняння (або систему рівнянь), що відображає його функціонування. У залежності від процесу математичний опис може бути представлено у вигляді системи алгебраїчних, диференціальних, інтегральних і інтегрально-диференціальних

рівнянь.

Крім того тут же виконується попередній аналіз в існуванні розв'язків складених рівнянь. Якщо вдасться довести, що математичне завдання не має розв'язку, тоді необхідність у наступній роботі з першопочаткового варіанту моделі не потрібна. Слід скорегувати або постановку завдання, або способи її математичної формалізації. Також підготовлюється вихідна інформація для моделювання, тобто

діапазони змінювання змінних, що входять у математичний опис руху пасажирського вагона з несправними гасителями коливань [2-6].

Етап вибору методу розв'язку й розробки моделюючої програми включає розробку алгоритмів для аналітичного або численного розв'язку завдання, складання програми на ЕОМ і безпосереднє проведення розрахунків. Крім того, на цьому етапі виконується вибір найбільш ефективного методу розв'язуванні з наявних.

При складанні математичних моделей у ході розрахунків допустимих швидкостей руху пасажирських вагонів із несправними гасителями коливань, найбільше часто використовуються такі математичні методи: найменших квадратів, скінчених елементів, планування експерименту.

Етапу становлення адекватності моделі є заключним у послідовності етапів, що виконуються при розробці. Побудована модель повинна вірно якісно й кількісно описувати властивості моделюючого пасажирського вагона з несправними гасителями коливань, тобто вона повинна бути адекватною моделюючому об'єкту (процесу).

Для перевірки адекватності математичної моделі реальному процесу потрібно порівняти результати вимірювань на пасажирському вагоні під час руху з результатами, отриманими на моделі в ідентичних умовах.

Як видно зі схеми (рисунок 1), аналіз результатів — це заключний етап моделювання. Тому дані, які будуть отримані про допустимі швидкості руху пасажирських вагонів із несправними гасителями коливань на шляху прямування, будемо представляти у вигляді таблиць, діаграм, а також розробляють рекомендації з використання результатів моделювання щодо встановлення допустимих швидкостей руху пасажирських вагонів на різних типах візках.

Таку послідовність етапів будемо виконувати циклічно для різних швидкостей руху пасажирських вагонів.

Потрібно відмітити, що математичні завдання, які досліджуються будуть складними за своєю структурою, вони

будуть мати більшу розмірність. Часто трапляється, що відомі алгоритми й програми для ЕОМ не дозволяють розв'язати завдання в першопочатковому вигляді. У такому випадку будемо розробляти нові алгоритми для роботи несправних гідравлічних гасителів коливань пасажирських вагонів, тоді вихідну постановку завдання й модель будемо спрощувати [5, 7, 1].

У багатьох випадках доцільно й зручно поєднувати математичні моделі з фізичними або з реальними об'єктами. При цьому дослідження значно спрощуються та будуть дешевшими. Перевагою математичного моделювання є можливість установити поведінку досліджуваного пасажирського вагона з несправними гасителями коливань в різних режимах роботи без значних витрат часу й ризику.

Для пасажирського вагона розробимо математичну модель в якого будуть несправні гасителі коливань (один, два, три та чотири — в одному візку), для визначення допустимих швидкостей руху в процесі їх експлуатації.

Як відомо у конструкції пасажирського вагона немає елементів тертя (крім гасителів коливань у буксовому ступені ресорного підвішування, але з подальшого стане ясно, що вони на стійкість руху мало впливають), так що незначні коливання можна описати такою математичною моделлю [3, 4, 8]

$$M \frac{d^2q}{dt^2} + (B+F) \frac{dq}{dt} + (C+K)q=0, \quad (1)$$

з вектором узагальнених координат  $q$  і матрицями  $M$ ,  $C$ ,  $B$  коефіцієнтів інерції, жорсткості і в'язкості, а також матрицями  $F$ ,  $K$ , елементи яких описують сили взаємодії коліс і рейок.

Рух пасажирських вагонів буде стійкий, якщо амплітуда коливань не збільшується, а це має місце у тому випадку, коли дійсні частини всіх коренів характеристичного рівняння

$$\det [M\lambda^2 + (B+F)\lambda + (C+K)] = 0, \quad (2)$$

не є позитивні.

Скориставшись даною математичною моделлю розробимо складний математичний

матричний алгоритм в програмному середовищі, в якому розглянемо різні випадки руху пасажирського вагона, коли:

- вийшов із ладу один гаситель;
- вийшло з ладу два гасителі на одному візку;
- вийшло з ладу два гасителі з одної сторони вагона;
- вийшло з ладу два гасителі, по одному на кожному візку, з різних сторін вагона;
- зберіг працездатність один гаситель;
- вийшли з ладу всі гасителі.

Далі шляхом математичного комп'ютерного моделювання при введенні вихідних даних у залежності від типу пасажирського вагона розглянемо всі випадки технічного стану гідравлічних гасителів коливань для встановлення допустимих експлуатаційних швидкостей руху пасажирських вагонів на візках моделей КВЗ-ЦНИИ та 68-7007.

**Висновок.** Описано алгоритм та процеси побудови математичного моделювання для визначення допустимих експлуатаційних швидкостей руху пасажирських вагонів із несправними гасителями коливань, які рухаються на візках КВЗ-ЦНИИ та 68-7007. Запропоновано математичну модель стійкості руху пасажирського вагона, яка враховує відсутність елементів тертя конструкції пасажирського вагона (крім гасителів коливань у буксовому ступені ресорного підвищування, коефіцієнтів інерції, жорсткості і в'язкості, а також елементів, які описують сили взаємодії коліс і рейок).

Розроблена модель дозволяє визначати допустимі експлуатаційні швидкості руху пасажирських вагонів у залежності від технічного стану гідравлічних гасителів коливань на шляху прямування пасажирського состава.

### *Список використаних джерел*

1. Гейзлер, А. А. Усовершенствованный вариант гасителей колебаний подвижного состава [Текст] / А. А. Гейзлер, Ш. К. Исмаилов, Л. П. Колосов, В. М. Ларин // Омский гос. ун-т путей сообщения. — Омск : 1999. - С 79-85.
2. Дослідження роботи гідравлічних гасителів коливань та здійснення розрахунку щодо допустимих швидкостей експлуатації рухомого складу у разі виявлення їх непрацездатності. підготовка рекомендацій щодо внесення відповідних доповнень до нормативних документів [Текст] : звіт про НДР (поміж.) : 10/5 / Укр. держ. акад. залізнич. трансп. ; кер. Мартинов І. Е. ; викон.: Равлюк В. Г. [та ін.] — Х., 2014. – 42 с. – Бібліогр.: с. 40–42. – № ДР 0113U008100.
3. Клиначёв, Н. В. Введение в технологию мультидоменного физического моделирования с применением ненаправленных графов [Электронный ресурс] // Н. В. Клиначёв — Режим доступа : [http://model.exponenta.ru/lectures/sml\\_03.htm](http://model.exponenta.ru/lectures/sml_03.htm). Загл. с экрана. — (Дата обращения 02.12.2014).
4. Скворцов, Л. М. Диагонально неявные FSAL-методы Рунге-Кутты для жестких и дифференциально-алгебраических систем [Текст] / Л. М. Скворцов // Математическое моделирование. 2002. - №2. - С. 3-17.
5. Соколов, М. М. Гасители колебаний подвижного состава [Текст] : Справ. / М. М. Соколов, В. И. Варава, Г. М. Левит. — М. : 1985. -216 с.
6. Хайрер, Э. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи [Текст] учеб. / Э. Хайрер, Г. Ваннер. — М.: Мир, 1999. -685 с.
7. Інструкція з експлуатації і ремонту гідравлічних гасителів коливань візків пасажирських вагонів [Текст] : Інструк. ЦІ – 0061: Затв. нак. УЗ №281-Цвід 27.07.06. — К. : ТОВ «ВД Мануфактура», 2006. – 80 с.
8. Челноков, И. И. Гидравлические гасители колебаний пассажирских вагонов [Текст] учеб. / И. И. Челноков. — М. : 1975. - 72 с.
9. Стенды для испытания гасителей колебаний железнодорожных экипажей

## Рухомий склад залізниць

---

[Текст] / И. И. Челноков [и др.] // Сб. науч. тр. ЛИИЖТ. — Л. : 1964. - Вып. 215. - С. 160-170.

1. Shampine, L. F. The MATLAB ODE Suite [Text] / L. F. Shampine, M. W. Reichelt. SIAM J. on Scientific Computing. Vol. 18. 1997. - № 1. - P. 1-22.

---

Мартинов Ігор Ернстович д-р техн. наук, професор кафедра вагонів Українська державна академія залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-36. E-mail: [martinov.hiit@rambler.ru](mailto:martinov.hiit@rambler.ru).

Рейдеймейстер Олександр Геннадійович к. т. н., доцент кафедри вагони та вагонне господарство Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Равлюк Василь Григорович к. т. н., старший викладач кафедра вагонів Українська державна академія залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: [ravvg@ukr.net](mailto:ravvg@ukr.net).

Равлюк Микола Григорович старший викладач кафедра вагонів Українська державна академія залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-35.

Martinov Igor E. d-r science, professor department of vagonis Ukrainian state Academy of railway transport. Tel.: (057) 730-10-36. E-mail: [martinov.hiit@rambler.ru](mailto:martinov.hiit@rambler.ru).

Reidemeister Alexander G. candidate of technical sciences, docent, of Department of carriages and carriage sector Dnepropetrovsk national University of railway transport named after academician V. Lazaryan.

Ravlyuk Vassyl G. candidate of technical sciences, a senior professor of chair of cars of Ukrainian state Academy of railway transport. Tel.: (057) 730-10-35. E-mail: [ravvg@ukr.net](mailto:ravvg@ukr.net).

Ravlyuk Nicholay G. a senior professor of chair of cars of Ukrainian state Academy of railway transport. Tel.: (057) 730-10-35.