

Ловська А. О., Діжо Я., Блатницький М.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЗДОВЖНЬОЇ ДИНАМІКИ ЗЙОМНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ДОВГОМІРНИХ ВАНТАЖІВ ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ ВАГОНОМ-ПЛАТФОРМОЮ

*В матеріалах статті висвітлено особливості конструкції зйомного модуля для перевезень довгомірних вантажів. Особливістю зйомного модуля є те, що його конструкція виконана каркасною. Кріплення зйомного модуля на транспортних засобах здійснюється за фітингові упори, передбачені в його куткових частинах.*

*Для визначення повздовжніх навантажень, які діють на зйомний модуль проведено математичне моделювання його динаміки за умови розміщення на вагоні-платформі. У якості прототипу використано вагон-платформу моделі 13-401 на візках 18-100. Важливо сказати, що даний вагон-платформа є універсальним. Однак, у зв'язку з нестачею спеціалізованих вагонів для перевезень контейнерів, існує модернізація конструкції даного вагона-платформи, яка передбачає постановку на нього фітингових упорів. Враховано, що на передній упор вагона-платформи діє повздовжня сила у 2,5 МН, що відповідає режиму "ривок". До уваги прийнято можливі сили тертя, які виникають між горизонтальними поверхнями фітингових упорів вагона-платформи та фітингами зйомного модуля. При проведенні моделювання враховано, що між фітинговим упором та фітингом встановлено жорсткий зв'язок.*

*Розв'язок математичної моделі здійснено за методом Рунге-Кутта, який реалізує програмний комплекс MathCad. При цьому початкові умови були покладені близькими до нуля.*

*Встановлено, що максимальне прискорення, яке діє на зйомний модуль складає близько 38 м/с<sup>2</sup>. Дана величина прискорення знаходиться в межах допустимих. Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проектування сучасних транспортних засобів модульного типу та підвищенню ефективності експлуатації транспортної галузі.*

**Ключові слова:** транспортна механіка, зйомний модуль, динамічна навантаженість, залізничні перевезення, комбінований транспорт.

**Актуальність дослідження.** Залізничний транспорт вже тривалий час є провідною галуззю транспортної системи, на яку припадає привальований сегмент перевезень. Одним із найбільш поширених вантажів, які використовуються різними галузями народного господарства є лісові. Перевезення їх залізницею здійснюється здебільшого на спеціальних вагонах-платформах, які оснащені вертикальними стійками для утримання вантажу.

**Постановка проблеми.** Нестача вагонів-платформ для перевезень довгомірних вантажів в експлуатації призвела до ситуаційної адаптації універсальних вагонів-платформ до перевезень довгомірних вантажів. Однак це повністю не вирішує проблеми забезпечення транспортної галузі рухомим складом для перевезень таких вантажів. Тому питання створення та впровадження в експлуатацію зйомних модулів для перевезень довгомірних, в тому числі лісових вантажів, є досить актуальним питанням.

**Теоретичний аналіз дослідження.** Відомо, що найбільш поширеним транспортним засобом для перевезень довгомірних вантажів залізницею є вагони-платформи. Питання їх удосконалень для можливості використання під перевезення розширеної номенклатури вантажів, в тому числі довгомірних, висвітлюються в ряді публікацій.

В публікації [1] авторським колективом проведені комплексні дослідження динаміки несучої конструкції вагона-платформи для довгомірних вантажів. При теоретичному дослідженні використані класичні методи динаміки вагонів. Отримані результати підтверджені експериментальними випробуваннями. Однак при цьому не проводилося дослідження навантаженості вагона-платформи при несиметричних схемах, які можливі в експлуатації.

Інноваційну конструкцію вагона-платформи з обертовою платформою запропоновано авторами публікації [2]. Наявність такої платформи дозволяє забезпечувати можливість завантаження-розвантаження вагона за схемою ACTS. Однак така конструкція вагона-платформи є вузькоспрямованою і не дозволяє його використання для різної номенклатури вантажів.

В роботі [3] запропоновано конструкцію зйомного модуля для перевезень довгомірних вантажів. Особливістю зйомного модуля є те, що його рама утворена П-подібними профілями, в середині яких розміщуються пружні елементи, перекриті горизонтальними листами. Таке конструкційне рішення сприяє зменшенню вертикальних навантажень, які діють на зйомний модуль, за рахунок сил тертя, що виникають при його коливаннях. Однак недоліком конструкції зйомного модуля є складність технічного обслуговування та ремонту в експлуатації.

Дослідження навантаженості вагона-платформи при експлуатаційних режимах проводиться в роботі [4]. До уваги прийнято, зокрема, повздовжню схему навантаження вагона, яка відповідає режиму "розтягнення – ривок". При цьому авторами використано експериментальні методи досліджень, які дозволили визначити найбільш навантажені зони конструкції вагона-платформи. Однак авторами не запропоновано рішень щодо удосконалення конструкції вагона-платформи з урахуванням виявлених концентраторів напружень.

В статті [5] проведено аналіз різних конструкцій вагонів-платформ з довгою базою. Висвітлено особливості визначення міцності їх конструкцій при експлуатаційних навантаженнях. Авторами зазначено основні напрямки удосконалень конструкцій вагонів-платформ для підвищення ефективності їх використання. Разом з цим, не приділялося уваги питанням їх удосконалень, зокрема для перевезень довгомірних вантажів.

В публікації [6] проводиться дослідження навантаженості вагона з вантажем при вписуванні у криву. Авторським колективом запропоновано новий метод для розрахунку сил, що діють на кріплення вантажу у вагонах при залізничних перевезеннях. Однак при цьому не запропоновано рішень, спрямованих на удосконалення конструкції вагона з метою можливості перевезень в ньому довгомірних вантажів.

Проведений аналіз наукових публікацій доводить, що питання перевезень довгомірних вантажів залізницею є досить актуальними та потребують подальших досліджень для підвищення ефективності експлуатації залізничної галузі.

**Мета статті:** висвітлення результатів математичного моделювання зйомного модуля для перевезень довгомірних вантажів при сприйнятті повздовжніх навантажень.

**Задачі дослідження.** Для досягнення зазначеної мети визначені такі задачі:

- сформулювати розрахункову схему для визначення повздовжньої навантаженості вагона-платформи, завантаженої зйомними модулями;
- визначити динамічну навантаженість зйомного модуля.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Для підвищення ефективності перевізного процесу пропонується впровадження в експлуатацію зйомного модуля для перевезень довгомірних вантажів (рис. 1). Особливістю зйомного модуля є те, що його конструкція каркасна. Вантажний майданчик представлений рамою, яка складається з основних повздовжніх балок, основних поперечних балок та ряду проміжних поперечних балок. Для утримання вантажу від переміщень у повздовжній площині зйомний модуль має торцеві надбудови. Ці надбудови утворені сукупністю поперечних та вертикальних балок.

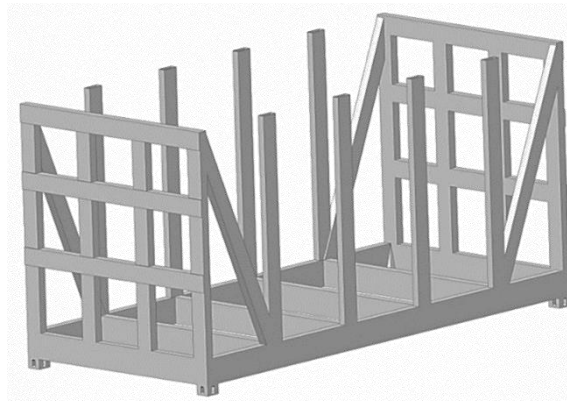


Рисунок 1 – Зйомний модуль

Для утримання вантажу від поперечних переміщень зйомний модуль оснащено боковими стійками. При цьому кутові стійки взаємодіють з першою стійкою з боку консолі похилими поясами. Для кріплення зйомного модуля на транспортних засобах в його кутових частинах передбачені фітингові упори.

Для визначення повздовжнього навантаження, яке діє на зйомний модуль проведено математичне моделювання. Для цього сформовано математичну модель (1), яка характеризує повздовжню навантаженість зйомного модуля, розміщеного на вагоні-платформі. У якості прототипу використано вагон-платформу моделі 13-401 на візках 18-100. Важливо сказати, що даний вагон-платформа є універсальним. Однак, у зв'язку з нестачею спеціалізованих вагонів для перевезень контейнерів, існує модернізація конструкції даного вагона-платформи, яка передбачає постановку на нього фітингових упорів. Враховано, що на передній упор вагона-платформи діє повздовжня сила у 2,5 МН [7], що відповідає режиму “ривок”. Також до уваги прийнято можливі сили тертя, які виникають між горизонтальними поверхнями фітингових упорів вагона-платформи та фітингами зйомного модуля [8, 9] (рис. 2). При проведенні моделювання враховано, що між фітинговими упорами та фітингами встановлено жорсткий зв'язок.

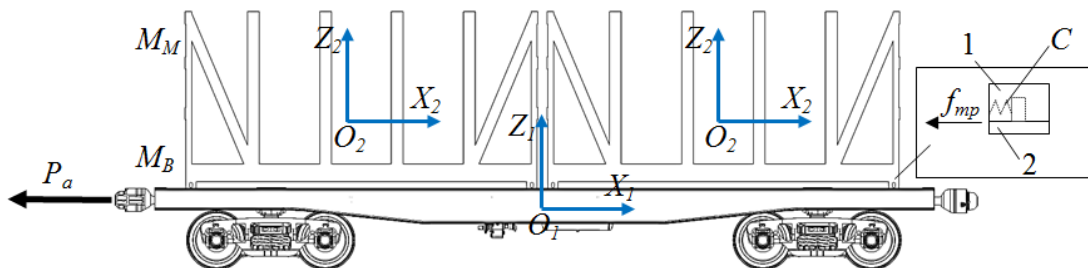


Рисунок 2 – Розрахункова схема вагона-платформи зі зйомними модулями 1 – фітинг; 2 – фітинговий упор

Математична модель при цьому має вигляд:

$$\begin{cases} M_B \cdot \ddot{q}_1 = P_a - \sum_{i=1}^n (f_{mp} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + C(q_1 - q_2)), \\ M_M \cdot \ddot{q}_2 = (f_{mp} \cdot \text{sign}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) + C \cdot (q_1 - q_2)), \end{cases} \quad (1)$$

де  $M_B$  – маса-брутто вагона-платформи;  
 $P_a$  – повздовжня сила, що діє на автозчеп;  
 $n$  – кількість зйомних модулів, розміщених на вагоні-платформі;  
 $f_{mp}$  – сила тертя між фітінговими упорами та фітінгами;  
 $M_M$  – маса зйомного модуля;  
 $C$  – жорсткість зв'язку між фітінгом та фітінговим упором;  
 $q_1, q_2$  – координати, що визначають переміщення, відповідно, вагона-платформи та зйомного модуля відносно повздовжньої осі.

Розв'язок математичної моделі (1) здійснено за методом Рунге-Кутта [10, 11], який реалізує програмний комплекс MathCad [12]:

$$Q(t, y) = \left| \begin{array}{c} y_3 \\ y_4 \\ \frac{P_{y0} - \sum_{i=1}^n (F_{TP} \cdot \text{sign}(y_3 - y_4) + C_\phi \cdot (y_1 - y_2))}{M_B} \\ \frac{F_{TP} \cdot \text{sign}(y_3 - y_4) + C_\phi \cdot (y_1 - y_2)}{M_M} \end{array} \right| \quad (2)$$

$Z = \text{rkfixed}(Y0, tn, tk, n', Q)$ ,

де  $Y0$  – вектор, який містить початкові умови;  
 $tn, tk$  – величини, які визначають початкову та кінцеву змінну інтегрування;  
 $n'$  – фіксоване число кроків;  
 $Q$  – символний вектор.

Визначення узагальненого прискорення, яке діє на зйомний модуль здійснено у масиві  $ddq_{j,i}$ :

$$ddq_{j,1} = \frac{P_a - \sum_{i=1}^n (f_{mp} \cdot \text{sign}(y_3 - y_4) + C(y_1 - y_2))}{M_B}, \quad (3)$$

$$ddq_{j,2} = \frac{(f_{mp} \cdot \text{sign}(y_3 - y_4) + C \cdot (y_1 - y_2))}{M_M}, \quad (4)$$

де  $y_1 = q_1; y_2 = q_2; y_3 = \dot{q}_1; y_4 = \dot{q}_2$ .

При цьому початкові умови були покладені близькими до нуля. Встановлено, що прискорення, яке діє на зйомний модуль складає близько 38 м/с<sup>2</sup> (рис. 3).

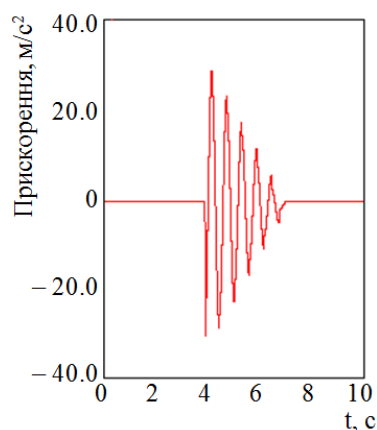


Рисунок 3 – Повздовжнє прискорення, яке діє на зйомний модуль

Дана величина прискорення знаходиться в межах допустимих [7]. Важливо сказати, що при наявності власного ступеня вільності вантажу, розміщеного в зйомному модулі розрахована величина прискорення може мати більше значення. Тому при подальших дослідженнях в цьому напрямку даним питанням буде приділено окрему увагу.

#### Висновки:

Проведено математичне моделювання динамічної навантаженості зйомного модуля, розміщеного на вагоні-платформі при русі у складі поїзда. З урахуванням наявності сил тертя між фітингами та фітинговими упорами прискорення, яке діє на зйомний модуль склало близько 38 м/с<sup>2</sup>. Отримане значення прискорення знаходиться в межах допустимих, що дозволяє зробити висновок про можливість використання даного зйомного модуля при завданих умовах навантаження в експлуатації.

Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проектування сучасних транспортних засобів модульного типу та підвищенню ефективності експлуатації транспортної галузі.

#### Література

1. Rúben Silva, Diogo Ribeiro, Cássio Bragança, Cristina Costa, António Arêde, Rui Calçada. Model Updating of a FreightWagon Based on Dynamic Tests under Different Loading Scenarios. *Applied Science*. 2021. Vol. 11. 10691. <https://doi.org/10.3390/app112210691>
2. Wiesław Krasoń, Tadeusz Niezgodą, Michał Stankiewicz. Innovative Project of Prototype Railway Wagon and Intermodal Transport System. *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 14. P. 615–624. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.307>
3. Glib Vatulia, Alyona Lovska, Mykhailo Pavliuchenkov, Volodymyr Nerubatskyi, Andrii Okorokov, Denys Hordiienko, Roman Vernigora, Irina Zhuravel. Determining patterns of vertical load on the prototype of a removable module for long-size cargoes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. №6/7 (120). P. 21 – 29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266855>
4. Pavol Šťastniak, Pavol Kurčík, Alfréd Pavlík. Design of a new railway wagon for intermodal transport with the adaptable loading platform. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 235(2). 00030. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823500030>
5. Apurba Das, Gopal Agarwal. Compression, tension & lifting stability on a meter gauge flat Wagon: an experimental approach. *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 2020. June. <https://doi.org/10.1080/14484846.2020.1775007>
6. Zhang D., Tang Y., Clarke D. B., Peng Q., Dong C. An innovative method for calculating diagonal lashing force of cargo on railway wagons in a curve alignment. *Veh. Syst. Dyn.* 2021. Vol. 59. P. 352–374.
7. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних).
8. Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Mykhailo Pavliuchenkov. Study of the Dynamics and Strength of the Detachable Module for Long Cargoes under Asymmetric Loading Diagrams. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, 3211. <https://doi.org/10.3390/app14083211>
9. Sergii Panchenko, Juraj Gerlici, Glib Vatulia, Alyona Lovska, Mykhailo Pavliuchenkov, Kateryna Kravchenko. The Analysis of the Loading and the Strength of the FLAT RACK Removable Module with Viscoelastic Bonds in the Fittings. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13(1), 79. <https://doi.org/10.3390/app13010079>
10. Задачин В. М., Конощенко І. Г. Чисельні методи: навчальний посібник. – Харків, 2014. 180 с.
11. Гой Т. П., Махней О. В. Диференціальні рівняння: навчальний посібник. – Івано-Франківськ, 2012. 352 с.
12. Соболенко О. В., Петречук Л. М., Іващенко Ю. С., Єгорцева Є. Є. Методи рішення математичних задач у середовищі Mathcad: Навчальний посібник з дисципліни “Інформатика і системологія”. Дніпро, 2020. 60 с.

#### References

1. Rúben Silva. (2021). Model Updating of a FreightWagon Based on Dynamic Tests under Different Loading Scenarios / Rúben Silva, Diogo Ribeiro, Cássio Bragança, Cristina Costa, António Arêde, Rui Calçada // *Applied Science*. – Vol. 11. 10691. <https://doi.org/10.3390/app112210691>
2. Wiesław Krasoń. (2016). Innovative Project of Prototype Railway Wagon and Intermodal Transport System / Wiesław Krasoń, Tadeusz Niezgodą, Michał Stankiewicz // *Transportation Research Procedia*. – Vol. 14. P. 615–624. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.307>
3. Glib Vatulia. (2022). Determining patterns of vertical load on the prototype of a removable module for long-size cargoes / Glib Vatulia, Alyona Lovska, Mykhailo Pavliuchenkov, Volodymyr Nerubatskyi, Andrii Okorokov, Denys Hordiienko, Roman

- Vernigora, Irina Zhuravel // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – №6/7 (120). P. 21 – 29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266855>
- 4 Pavol Šťastniak. (2018). Design of a new railway wagon for intermodal transport with the adaptable loading platform / Pavol Šťastniak, Pavol Kurčik, Alfréd Pavlík // MATEC Web of Conferences. – Vol. 235(2). 00030. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823500030>
  - 5 Apurba Das. (2020). Compression, tension & lifting stability on a meter gauge flat Wagon: an experimental approach / Apurba Das, Gopal Agarwal // Australian Journal of Mechanical Engineering. June. <https://doi.org/10.1080/14484846.2020.1775007>
  - 6 Zhang D. (2021). An innovative method for calculating diagonal lashing force of cargo on railway wagons in a curve alignment / Zhang D., Tang Y., Clarke D. B., Peng Q., Dong C. // Veh. Syst. Dyn. – Vol. 59. P. 352–374.
  - 7 DSTU 7598:2014. Vagoni vantazhni. Zagal'ni vimogi do rozrahunkiv ta proektuvannya novih i modernizovanih vagoniv kolii 1520 mm (nesamohidnih).
  - 8 Juraj Gerlici. (2024). Study of the Dynamics and Strength of the Detachable Module for Long Cargoes under Asymmetric Loading Diagrams / Juraj Gerlici, Alyona Lovska, Mykhailo Pavliuchenkov // Applied Sciences. – Vol. 14, 3211. <https://doi.org/10.3390/app14083211>
  - 9 Sergii Panchenko. (2023). The Analysis of the Loading and the Strength of the FLAT RACK Removable Module with Viscoelastic Bonds in the Fittings / Sergii Panchenko, Juraj Gerlici, Glib Vatulia, Alyona Lovska, Mykhailo Pavliuchenkov, Kateryna Kravchenko // Applied Sciences. – Vol. 13(1), 79. <https://doi.org/10.3390/app13010079>
  - 10 Zadachyn V. M., Koniushenko I. H. Chyselni metody: navchalnyi posibnyk. – Kharkiv, 2014. 180 s.
  - 11 Hoi T. P., Makhnei O. V. Dyferentsialni rivniannia: navchalnyi posibnyk. – Ivano-Frankivsk, 2012. 352 s.
  - 12 Sobolenko O. V., Petrechuk L. M., Ivashchenko Yu. S., Yehortseva Ye. Ye. Metody rishennia matematychnykh zadach u seredovyschi Mathcad: Navchalnyi posibnyk z dystsyplyny "Informatyka i systemolohiia". Dnipro, 2020. 60 s.

*The materials of the article highlight the features of the design of the removable module for the transportation of long cargo. The feature of the removable module is that its design is made of a frame. Fastening of the removable module on vehicles is carried out by the fitting stops provided in its corner parts.*

*To determine the longitudinal loads acting on the lifting module, mathematical modeling of its dynamics was carried out under the condition of placement on a platform car. A 13-401 model platform car on 18-100 trolleys was used as a prototype. It is important to say that this platform car is universal. However, due to the lack of specialized wagons for transporting containers, there is a modernization of the design of this platform wagon, which involves the installation of fitting stops on it. It is taken into account that a longitudinal force of 2.5 MN acts on the front stop of the platform car, which corresponds to the "jerk" mode. Possible frictional forces that arise between the horizontal surfaces of the fitting stops of the platform car and the fittings of the removable module are taken into account. When modeling, it is taken into account that a rigid connection is established between the fitting stop and the fitting.*

*The mathematical model was solved using the Runge-Kutta method, which is implemented by the MathCad software complex. At the same time, the initial conditions were set close to zero.*

*It was established that the maximum acceleration acting on the removable module is about 38 m/s<sup>2</sup>. This acceleration value is within the permissible limits. The conducted research will contribute to the creation of recommendations for the design of modern modular vehicles and increase the efficiency of operation of the transport industry.*

**Key words:** transport mechanics, lifting module, dynamic load, railway transportation, combined transport.

**Ловська А. О.** – д.т.н., професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту.

**Діжо Я.** – PhD, доцент кафедри транспорту та підйомно-транспортної техніки Жилінського університету в Жиліні.

**Блатницький М.** – PhD, доцент кафедри транспорту та підйомно-транспортної техніки Жилінського університету в Жиліні.