

УДК 629.463.62

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.224638

Визначення навантаженості довгобазної конструкції вагона-платформи з пружними елементами в повздовжніх балках

С. В. Панченко, О. В. Фомін, Г. Л. Ватуля, О. В. Устенко, А. О. Ловська

Проведено дослідження динамічної навантаженості та міцності удосконаленої несучої конструкції вагона-платформи. Особливістю вагона є наявність в основних повздовжніх балках рами пружних елементів. Це дозволить підвищити втомну міцність несучої конструкції вагона-платформи при експлуатаційних режимах.

Для визначення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи проведено математичне моделювання. До уваги прийняті коливання підсакування. Встановлено, що вертикальне прискорення несучої конструкції вагона-платформи у порожньому стані складає близько $2,0 \text{ м/с}^2$ ($0,2 \text{ g}$). При цьому вертикальні прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи, нижчі на 15 % у порівнянні з вагоном-прототипом.

Визначено основні показники міцності несучої конструкції вагона-платформи. Розрахунок проведений за методом скінчених елементів в програмному комплексі SolidWorks Simulation (Франція). При складанні розрахункової схеми враховано, що несуча конструкція вагона-платформи завантажена чотирма контейнерами типорозміру ICC. Максимальні еквівалентні напруження при цьому виникають у зоні взаємодії шворневої балки з розкосами та складають 254,0 МПа. Тобто міцність несучої конструкції вагона-платформи забезпечується.

Визначено чисельні значення прискорень несучої конструкції вагона-платформи та поля їх дислокації шляхом комп'ютерного моделювання.

Досліджено втомну міцність та власні частоти коливань несучої конструкції вагона-платформи, а також розраховано проектний строк її служби.

Проведені дослідження сприятимуть створенню інноваційних конструкцій вагонів-платформ, а також підвищенню ефективності експлуатації комбінованих перевезень.

Ключові слова: вагон-платформа, несуча конструкція, динамічна навантаженість, міцність конструкції, втомна міцність, транспортна механіка, залізничний транспорт.

1. Вступ

Визначальним напрямом економічного розвитку європейських держав є насамперед успішне функціонування транспортної галузі. Ведучою складовою якої є залізничний транспорт. Сучасна залізнична мережа Європи забезпечує злагоджену та безперебійну взаємодію між всіма її державами. Важливо зазначити, що для утримання лідерських позицій залізничного транспорту у цьому напрямку важливим є забезпечення транспортної галузі сучасним високоефективним рухомим складом.

Відомо, що найзатребуванішим типом рухомого складу в міжнародному сполученні є вагони-платформи. Даний тип вагону використовується для перевезення вантажів, які не потребують захисту від атмосферних опадів. Здебільшого у міжнародному сполученні ці вагони використовуються для перевезень контейнерів або танк-контейнерів. Основним несучим елементом вагона-платформи є рама, яка являє собою зварну конструкцію.

Для підвищення ефективності експлуатації вагонів-платформ знайшли використання довгобазні конструкції, які здатні перевозити одночасно чотири 20-футові контейнери. Разом з цим, такі конструкції вагонів-платформ випробовують значні вертикальні навантаження, обумовлені податливістю конструкції. Це спричиняє накопичення втомних напружень в несучій конструкції та може сприяти її пошкодженню.

У зв'язку з цим важливим є впровадження нових альтернативних рішень, спрямованих на зменшення динамічної навантаженості та покращення втомної міцності несучих конструкцій вагонів. Одним з можливих варіантів зменшення динамічної навантаженості вагонів, зокрема довгобазних, є використання при їх проектуванні мультифункціональних та мультиматеріальних принципів. Дані принципи добре зарекомендували себе в різних галузях машинобудування. Однак при проектуванні вагонів на даний час вони не знайшли широкого розповсюдження. Тому спираючись на позитивний досвід використання зазначених принципів, актуальним є їх інтегрування в залізничну галузь. Це сприятиме створенню інноваційних конструкцій вагонів з покращеними техніко-економічними показниками. Також це дозволить підвищити конкурентоспроможність залізничної галузі та ефективність її експлуатації.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботі [1] наведено особливості випробувань на кручення та згин несучої конструкції вагона-платформи. Дослідження проведені експериментальним шляхом. Для визначення прогину несучої конструкції вагона-платформи використаний метод електричного тензOMETрування. Однак комплекс випробувань, які використовують автори, не висвітлює особливостей розрахунку на втомну міцність несучої конструкції вагона-платформи. Це може сприяти значній похибці отриманих результатів.

Конструкційні особливості вантажного вагона нового покоління для інтермодальних перевезень висвітлюються в роботі [2]. Просторова модель несучої конструкції вагона-платформи спроектована в програмному комплексі PTC/Creo (США). Розрахунок на міцність здійснений в програмах ANSYS (США) та ADAMS/Rail (США).

В роботі [3] розглянуто конструкційні особливості довгобазного вагона-платформи для інтермодальних перевезень. Наведені результати розрахунку на міцність та динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-платформи.

Необхідно зазначити, що при проектуванні несучих конструкцій вагонів-платформ автори обмежилися нормативними значеннями навантажень, що діють на вагон в експлуатації. Це може бути пов'язано з тим, що маса бруто проєктованого вагона та динамічні показники візків не відрізняється від вагонів-прототипів.

Однак для більш точної оцінки показників динаміки та міцності важливим є урахування дійсного динамічного навантаження на стадії проектування вагона.

Моделювання міцності несучої конструкції вагона-платформи для інтер-модальних перевезень різних транспортних засобів проводиться у роботі [4]. При цьому розрахунки проводилися на основі стандартів PN-EN.

В роботі [5] висвітлюються особливості проектування, аналізу та проектно-ї розробки залізничних вагонів нового покоління. Дослідження проведені для Індійської залізниці. При цьому використані міжнародні стандарти для різних умов завантаження, дотримання оптимальних габаритів вагонів тощо. Однак при проектуванні даних конструкцій вагонів не враховано заходів щодо зменшення втомної міцності при експлуатаційних режимах навантаження. Це може бути пояснено тим, що значення динамічних навантажень, закладених у розрахункові нормативи країн-виробників цих вагонів, мають менші значення ніж для вагонів широкої колії.

Дослідження динамічної навантаженості несучої конструкції вагона проводиться у роботі [6]. До уваги прийнятий випадок використання різних типів візків під вагонами. Проведений аналіз впливу технічних характеристик візків на динамічні показники вагона. При цьому в роботі не проводилося дослідження впливу технічних характеристик візків на втомну міцність несучих елементів вагонів.

В роботі [7] наведені результати моделювання міцності несучої конструкції вагона-платформи. Вагон має понижену середню частину рами. Хребтова балка проходить лише в консольних частинах. Розрахунок на міцність реалізований за методом скінчених елементів. Отримані результати підтверджені експериментальними дослідженнями, проведеними на базі Болгарського національного науково-дослідницького інституту. Однак в роботі не зазначено чи покращується втомна міцність несучої конструкції вагона-платформи з урахуванням запропонованих технічних рішень.

Удосконалення несучої конструкції вагона-платформи з метою можливості її експлуатації у міжнародному комбінованому сполученні проводиться у роботах [8, 9]. Для визначення уточнених значень динамічних навантажень проведено математичне моделювання. Отримані навантаження враховано при розрахунках на міцність несучої конструкції вагона-платформи. Однак запропоновані заходи щодо удосконалення несучої конструкції вагона-платформи не сприяють покращенню її втомної міцності.

Аналіз літературних джерел [1–9] дозволяє зробити висновок, що питання покращення втомної міцності довгобазних несучих конструкцій вагонів-платформ шляхом впровадження в них пружних елементів раніше не розглядалися. Тому важливим є проведення відповідних досліджень у цьому напрямку.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є визначення навантаженості довгобазної конструкції вагона-платформи з пружними елементами в повздовжніх балках. Це дасть можливість покращити втомну міцність довгобазної несучої конструкції вагона-платформи при дії циклічних навантажень.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- запропонувати заходи щодо удосконалення несучої конструкції вагона-платформи для підвищення втомної міцності в експлуатації;
- дослідити динамічну навантаженість несучої конструкції вагона-платформи;
- дослідити міцність несучої конструкції вагона-платформи;
- дослідити втомну міцність та власні частоти коливань несучої конструкції вагона-платформи.

4. Заходи щодо удосконалення несучої конструкції вагона-платформи для підвищення втомної міцності в експлуатації

Для зменшення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи та підвищення втомної міцності при експлуатаційних режимах пропонується впровадження в неї пружних елементів. Розміщення пружних елементів передбачається у повздовжніх балках рами, як її основних несучих елементів. Для цього пропонується заміна основних повздовжніх балок рами на балки П-подібного профілю (рис. 1).

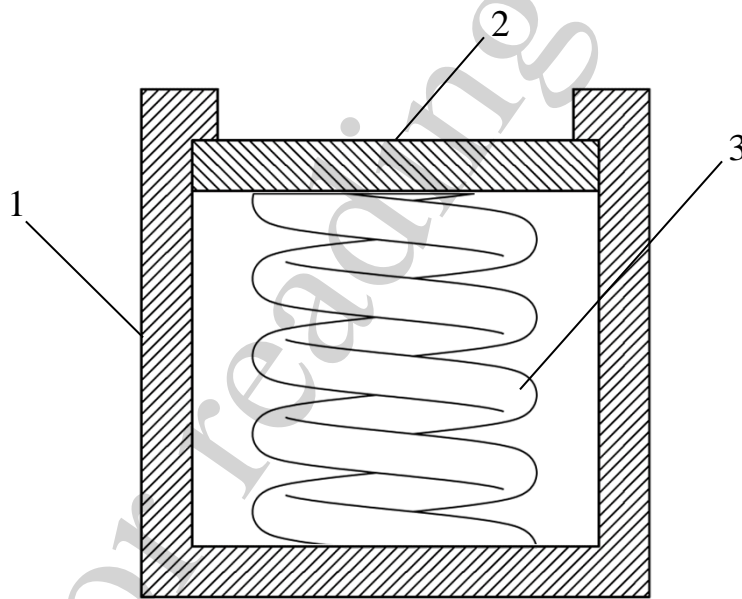
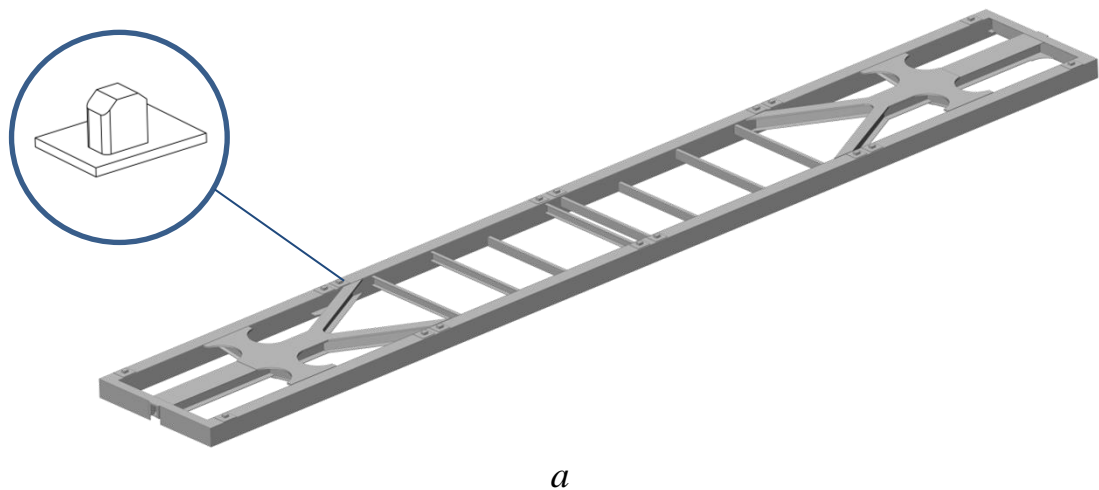


Рис. 1. Переріз основної повздовжньої балки рами: 1 – П-подібний профіль; 2 – горизонтальна планка; 3 – пружний елемент

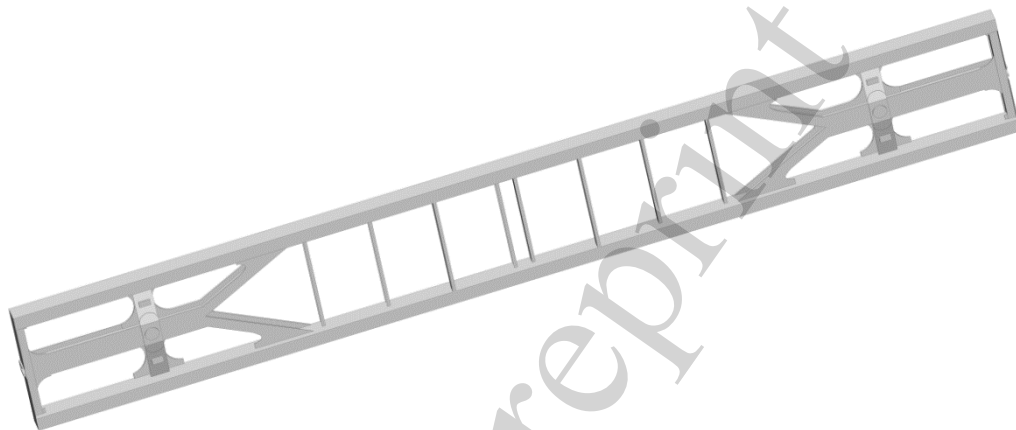
Дослідження проведені стосовно вагона-платформи моделі 13-4024 побудови ПАТ “КВБЗ” (м. Кременчук, Україна). Для цього створено його просторову модель в програмному комплексі SolidWorks (рис. 2).

Переріз основної повздовжньої балки з пружними елементами всередині показаний на рис. 3.

При цьому фітингові упори розміщуються на горизонтальній планці повздовжньої балки (рис. 1, а). Передбачається можливість використання як стаціонарних, так і відкидних фітингових упорів.



a



б

Рис. 2. Просторова модель удосконаленої несучої конструкції вагона-платформи: *a* – вид зверху; *б* – вид знизу

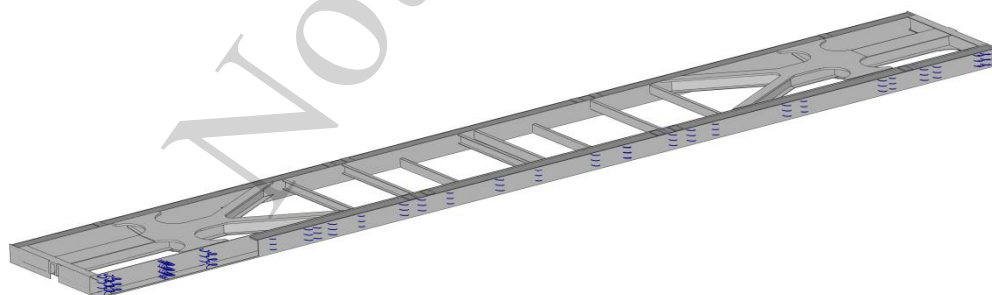


Рис. 3. Несуча конструкція вагона-платформа з пружними елементами у по-вздожній балці

5. Дослідження динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи

Для визначення динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи з урахуванням запропонованих заходів проведено математичне моделювання. Дослідження проведені в плоскій системі координат – площині XZ. Розрахункова схема вагона наведена на рис. 4.

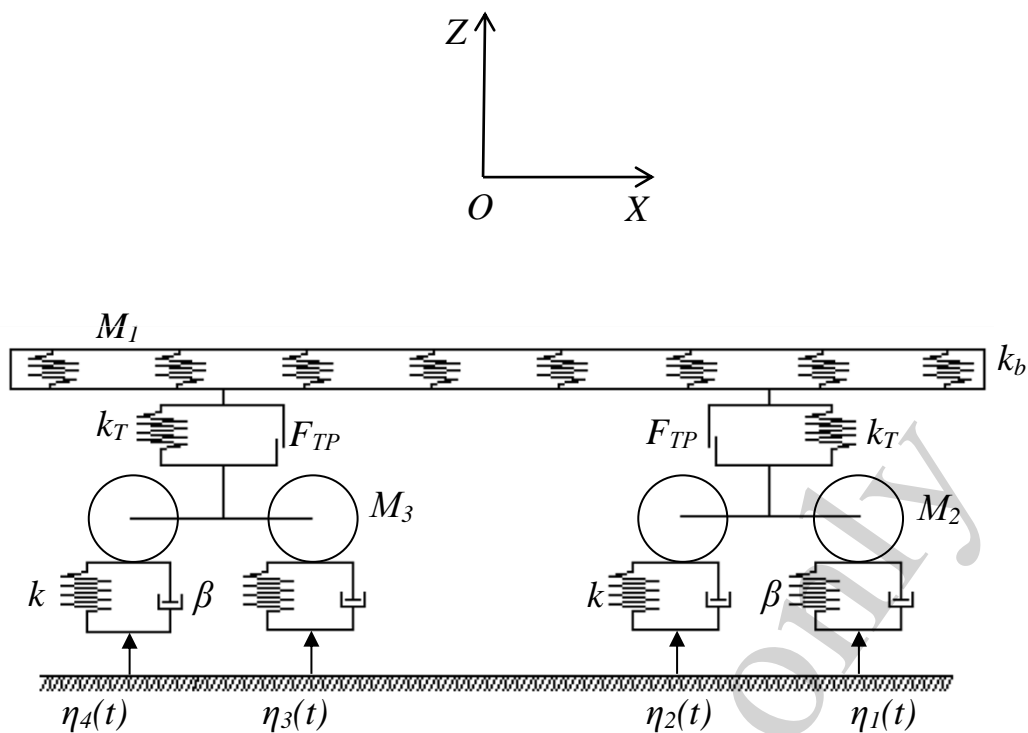


Рис. 4. Розрахункова схема вагона-платформи

При цьому вагон-платформа розглядається як система з трьох твердих тіл: рами та двох візків моделі 18–100 з ресорними комплектами, які мають жорсткість і коефіцієнт відносного тертя.

Прийнято припущення, що на систему накладені такі зв'язки:

– переміщення рами і візків вагона-платформи уздовж осі колії однакові:

$$q_1 = q_2 = q_3;$$

– колісні пари рухаються без проковзування:

$$\psi_{ij} = x_{ij}/R, \quad (i, j = 1, 2),$$

де R – радіус колеса, 0,475 м;

– через відсутність пружних елементів в буксовому підвішуванні підстрибування візків визначаються підстрибуванням колісних пар.

Враховано, що вагон рухається пружно-в'язкою колією [10]. При цьому прийнято припущення, що реакції колії пропорційні як її деформації, так і швидкості цієї деформації. Враховано, що вагон-платформа знаходиться у порожньому стані. При складанні рівнянь руху не прийняті до уваги сили тертя, які виникають між складовими повздожньої балки при вертикальних коливаннях вагона-платформи.

Диференціальні рівняння руху вагона-платформи мають вигляд:

$$M_1 \cdot \ddot{q}_1 + C_{1,1} \cdot q_1 + C_{1,2} \cdot q_2 + C_{1,3} \cdot q_3 = -F_{TP} \cdot \left(\text{sign}(\dot{\delta}_1) + \text{sign}(\dot{\delta}_2) \right), \quad (1)$$

$$M_2 \cdot \ddot{q}_2 + C_{2,1} \cdot q_1 + C_{2,2} \cdot q_2 + B_{2,2} \cdot \dot{q}_2 = F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{\delta}_1) + k(\eta_1 + \eta_2) + \beta(\dot{\eta}_1 + \dot{\eta}_2), \quad (2)$$

$$M_3 \cdot \ddot{q}_3 + C_{3,1} \cdot q_1 + C_{3,3} \cdot q_3 + B_{3,3} \cdot \dot{q}_3 = F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{\delta}_2) + k(\eta_3 + \eta_4) + \beta(\dot{\eta}_3 + \dot{\eta}_4), \quad (3)$$

де M_1 – маса несучої конструкції вагона-платформи;

M_2, M_3 – маса, відповідно, першого та другого за ходом руху візка;

C_{ij} – характеристики пружності елементів коливальної системи, які визначаються значеннями коефіцієнтів жорсткості пружин k_T ;

k_b – жорсткість пружних елементів в бокових балках рами;

B_{ij} – функція розсіювання;

a – половина бази візка;

k – жорсткість колії;

β – коефіцієнт демпфірування;

F_{TP} – сила абсолютного тертя у ресорному комплекті;

δ_i – деформації пружних елементів ресорного підвішування;

$\eta(t)$ – нерівність колії.

Зв'язок кузова з ходовою частиною описувався як послідовне пружне з'єднання:

$$C' = \frac{k_b \cdot (k_T + k_T)}{k_b + (k_T + k_T)}. \quad (4)$$

Вхідними параметрами моделі є технічні характеристики несучої конструкції вагона-платформи, ресорного підвішування, збурюючої дії (табл. 1).

Розв'язок математичної моделі здійснений в програмному комплексі MathCad (США) [11, 12]. Для цього модель зводилася до нормальної форми Коші, а після цього інтегрувалася за методом Рунге-Кутта.

При цьому матриця пружних коефіцієнтів має вигляд:

$$C = \begin{vmatrix} 2k_T & -k_T & -k_T \\ -k_T & k_T + 2k & 0 \\ -k_T & 0 & k_T + 2k \end{vmatrix}, \quad (5)$$

а матриця дисипативних коефіцієнтів

$$B = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\beta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 2\beta_1 \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Таблиця 1
Вхідні параметри до математичної моделі

Назва параметру	Значення
НЕСУЧА КОНСТРУКЦІЯ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ	
маса, т	18,0
половина бази, м	9,25
ВІЗКИ	
маса, т	4,3
половина бази, м	0,925
жорсткість ресорного підвішування, кН/м	8000
коефіцієнт відносного тертя	0,1
КОЛІЯ	
коефіцієнт демпфірування, кН·с/м	200
жорсткість, кН/м	100000
амплітуда нерівності, м	0,01
довжина нерівності, м	25

Початкові переміщення та швидкості прийняті рівними нулю

$$Y_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Розв'язок моделі в програмному комплексі MathCad визначався у вигляді

$$F(t, y) = \begin{bmatrix} y_2 \\ y_4 \\ y_6 \\ \frac{-F_{TP} \cdot (\text{sign}(\dot{\delta}_1) + \text{sign}(\dot{\delta}_2)) - C_{1,1} \cdot y_1 - C_{1,2} \cdot y_3 - C_{1,3} \cdot y_5}{M_1} \\ \frac{F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{\delta}_1) + k(\eta_1 + \eta_2) + \beta(\dot{\eta}_1 + \dot{\eta}_2) - C_{2,1} \cdot y_1 - C_{2,2} \cdot y_3 - B_{2,2} \cdot y_4}{M_2} \\ \frac{F_{TP} \cdot (\text{sign}(\dot{\delta}_1) + \text{sign}(\dot{\delta}_2)) - C_{3,1} \cdot y_1 - C_{3,3} \cdot y_5 - B_{3,3} \cdot y_6}{M_3} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$Z = rkfixed(Y0, tn, tk, n, F).$$

При цьому $y_1 = q_1$, $y_3 = q_3$, $y_5 = q_5$, $y_2 = \dot{y}_1$, $y_4 = \dot{y}_3$, $y_6 = \dot{y}_5$.
Узагальнені прискорення обчислювалися в масиві $ddq_{j,i}$:

$$ddq_{j,1} = \frac{-F_{TP} \cdot (\text{sign}(\dot{\delta}_1) + \text{sign}(\dot{\delta}_2)) - C_{1,1} \cdot y_1 - C_{1,2} \cdot y_3 - C_{1,3} \cdot y_5}{M_1}, \quad (9)$$

$$ddq_{j,2} = \frac{F_{TP} \cdot \text{sign}(\dot{\delta}_1) + k(\eta_1 + \eta_2) + \beta(\dot{\eta}_1 + \dot{\eta}_2) - C_{2,1} \cdot y_1 - C_{2,2} \cdot y_3 - B_{2,2} \cdot y_4}{M_2}, \quad (10)$$

$$ddq_{j,3} = \frac{F_{TP} \cdot (\text{sign}(\dot{\delta}_1) + \text{sign}(\dot{\delta}_2)) - C_{3,1} \cdot y_1 - C_{3,3} \cdot y_5 - B_{3,3} \cdot y_6}{M_3}. \quad (11)$$

Отримані результати наведені на рис. 5, 6.

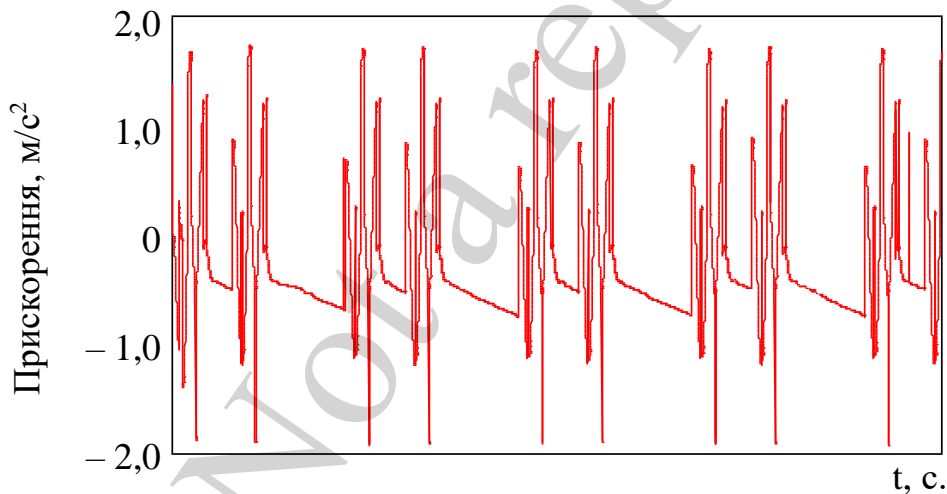


Рис. 5. Прискорення несучої конструкції вагона-платформи в центрі мас

Максимальне вертикальне прискорення несучої конструкції вагона-платформи у порожньому стані складає близько $2,0 \text{ м/с}^2$ ($0,2 \text{ г}$), а візків – близько $8,29 \text{ м/с}^2$ ($0,8 \text{ г}$). З урахуванням запропонованого рішення стає можливим знизити вертикальні прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи на 15 % у порівнянні з вагоном-прототипом. Хід вагона оцінюється як “відмінний” [13, 14].

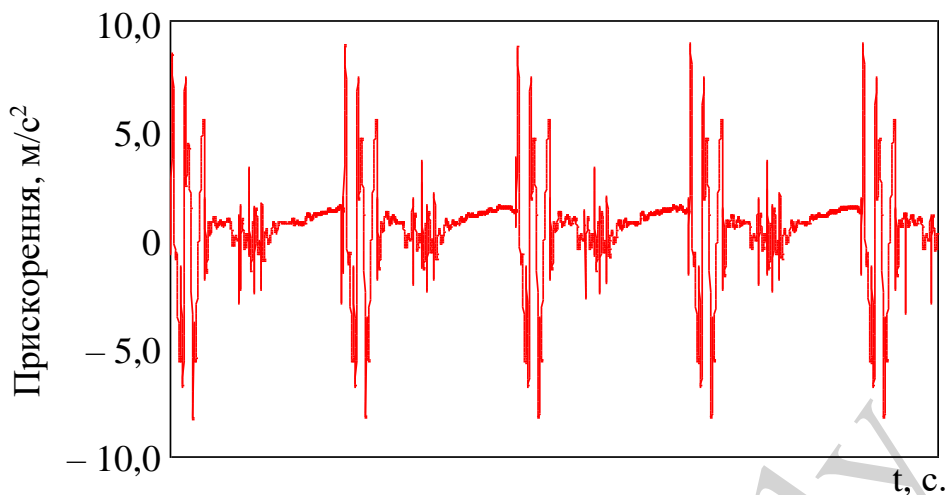


Рис. 6. Прискорення несучої конструкції вагона-платформи в зонах спірання на візки

6. Дослідження міцності несучої конструкції вагона-платформи

Для визначення основних показників міцності несучої конструкції вагона-платформи з пружними елементами в повздовжніх балках проведено розрахунок. При цьому використаний метод скінчених елементів, реалізований в програмному комплексі SolidWorks Simulation (CosmosWorks), [15, 16]. Скінчено-елементу модель несучої конструкції вагона-платформи наведено на рис. 7. В якості скінчених елементів використовувалися просторові тетраедри. Для визначення оптимальної кількості елементів застосований графоаналітичний метод [17, 18]. Кількість вузлів моделі склала 364279, елементів – 1165256. Максимальний розмір елемента склав 30 мм, а мінімальний – 6 мм. Відсоток елементів з співвідношенням боків менше трьох – 87,4, більше десяти – 0,0402. Мінімальна кількість елементів в колі склала 10, співвідношення збільшення розміру елементів – 1,8. Матеріал несучої конструкції – сталь марки 09Г2С.

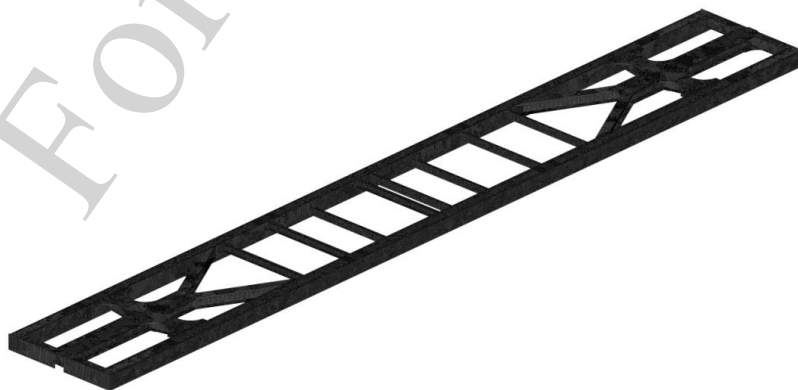


Рис. 7. Скінчено-елементна модель несучої конструкції вагона-платформи

Розрахункова схема несучої конструкції вагона-платформи наведена на рис. 8. При складанні розрахункової схеми враховано, що несуча конструкція

завантажена чотирма контейнерами типорозміру 1СС. Отже в зонах обпирання контейнерів на несучу конструкцію вагона-платформи прикладалося вертикальне навантаження $P_B^{ст}$. Закріплення моделі здійснювалося в зонах обпирання на ходові частини.

Максимальні еквівалентні напруження при цьому виникають у зоні взаємодії шворневої балки з розкосами та складають 254,0 МПа. Максимальні переміщення зафіксовані у середній частині повздовжніх балок та дорівнюють 12,6 мм. Тобто міцність несучої конструкції вагона-платформи забезпечується [13, 14, 19].

Результати розрахунку на міцність несучої конструкції вагона-платформи наведені на рис. 9, 10.

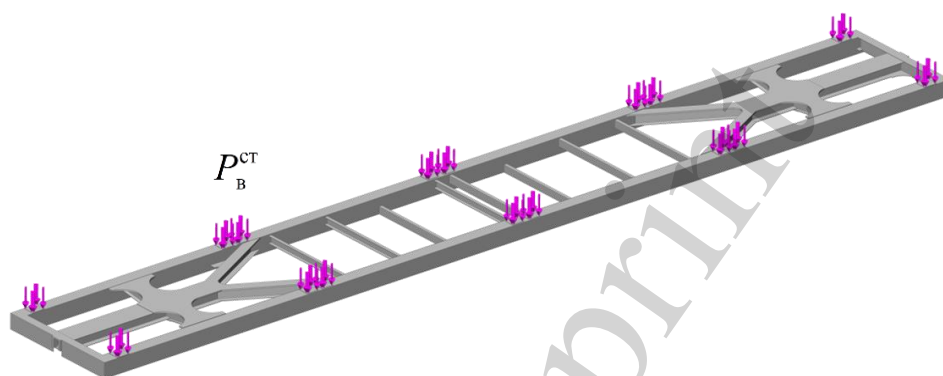


Рис. 8. Розрахункова схема несучої конструкції вагона-платформи

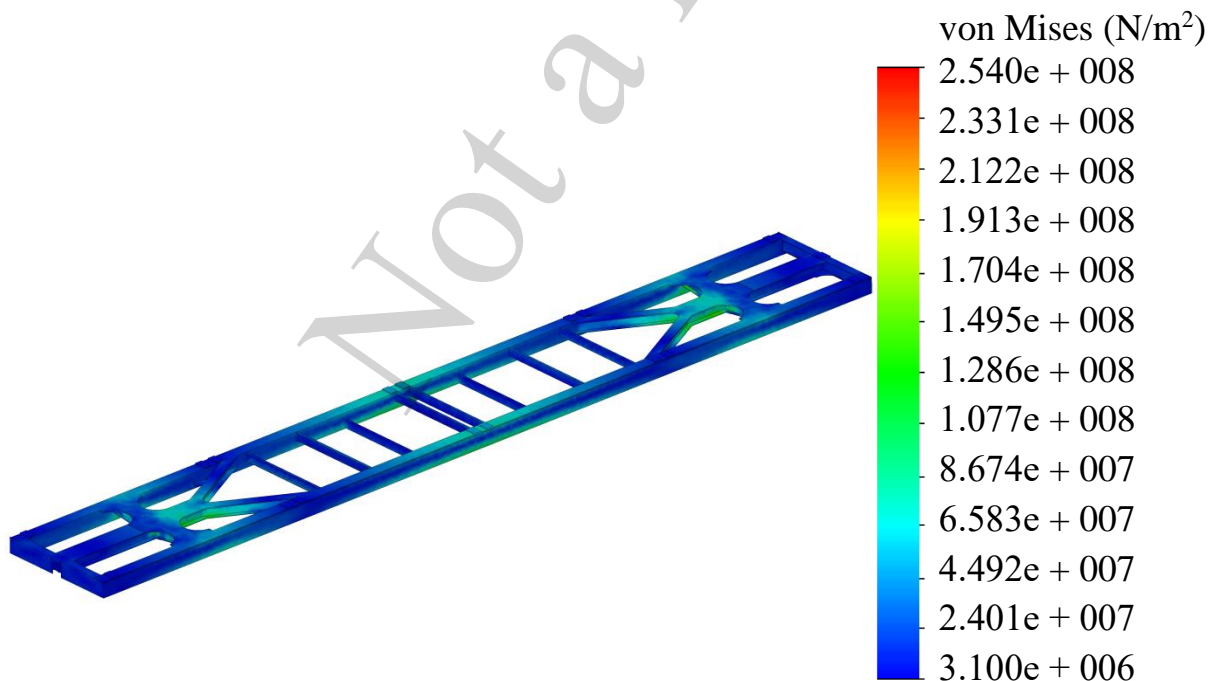


Рис. 9. Напружений стан несучої конструкції вагона-платформи

Також в рамках дослідження визначено чисельні значення прискорень та поля їх розподілення відносно несучої конструкції вагона-платформи. Розраху-

нок проведений в програмному комплексі SolidWorks Simulation (CosmosWorks). При цьому параметри дослідження ідентичні до тих, які використані при визначенні показників міцності несучої конструкції вагона-платформи. Результати розрахунку наведені на рис. 11.

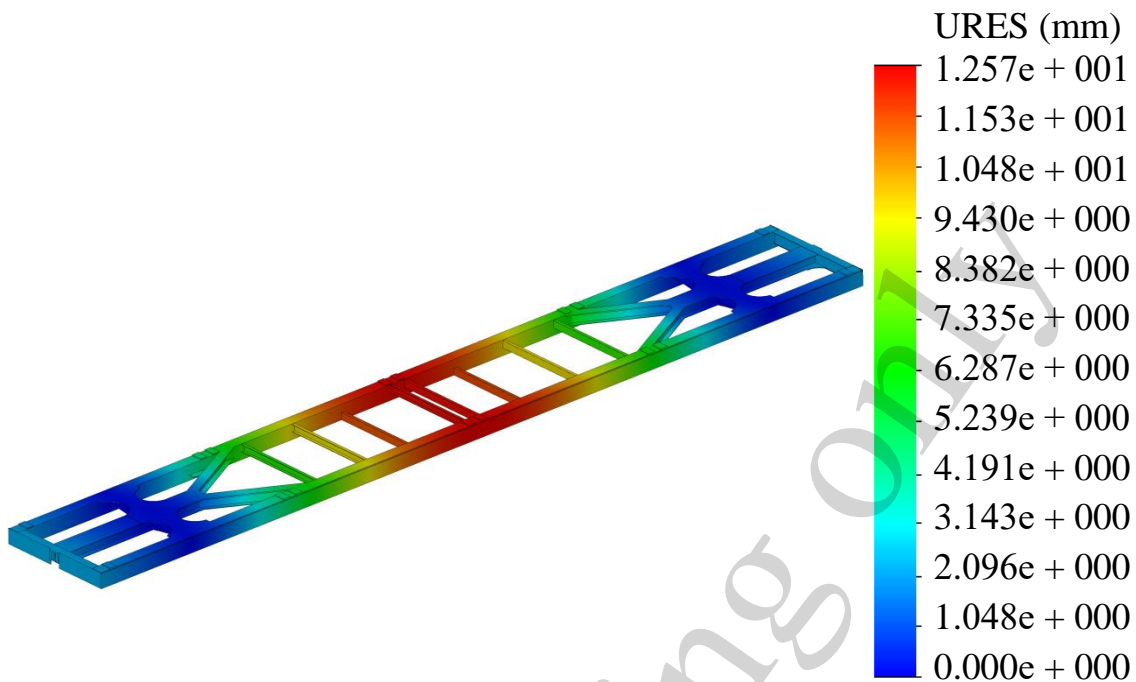


Рис. 10. Переміщення в вузлах несучої конструкції вагона-платформи

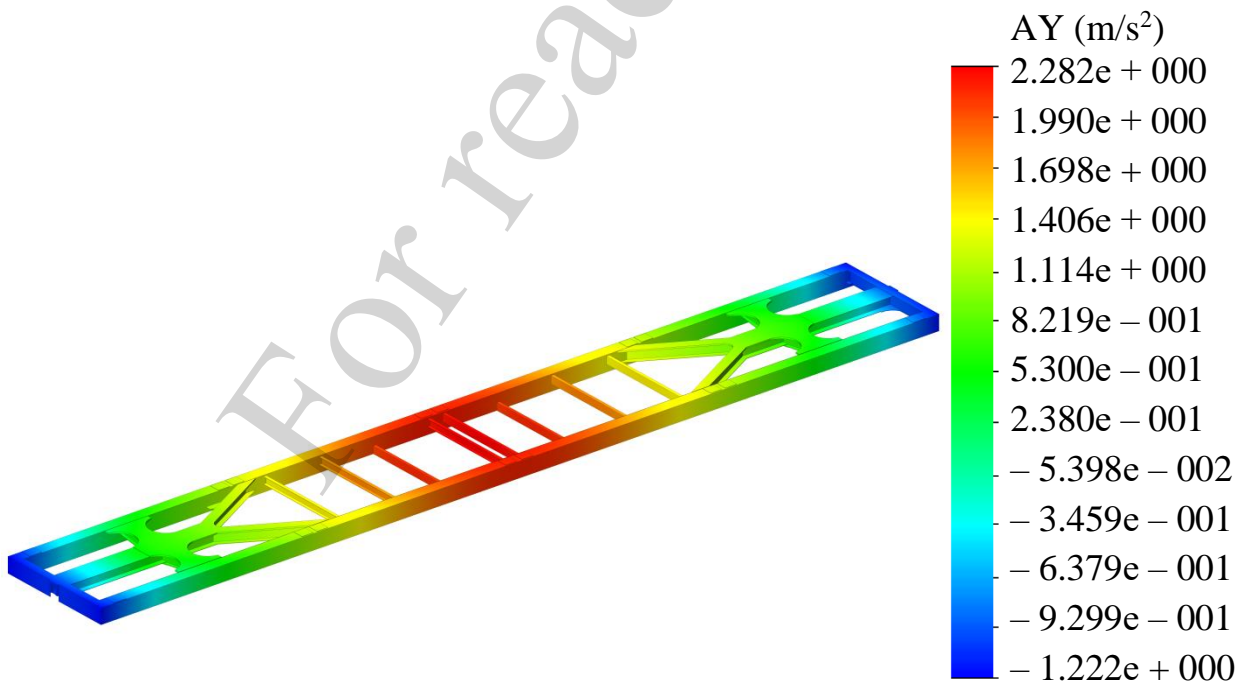


Рис. 11. Поля розподілення прискорень відносно несучої конструкції вагона-платформи

Встановлено, що максимальні прискорення зосереджені в середній частині несучої конструкції вагона-платформи та складають $2,28 \text{ м/с}^2$. В консольних частинах прискорення склали $-1,22 \text{ м/с}^2$.

7. Дослідження втомної міцності та власних частот коливань несучої конструкції вагона-платформи

За розробленою розрахунковою схемою (рис. 8) проведено визначення втоми несучої конструкції вагона-платформи. При цьому база випробувань складала 10^7 циклів. Крива втоми отримана на підставі модуля пружності сталі марки 09Г2С за допомогою опцій програмного комплексу SolidWorks Simulation (CosmosWorks). Дослідження на втому проводилися на підставі попередньо проведених розрахунків на статичну міцність з послідовним урахуванням циклічності навантаження.

Проведені дослідження дозволили визначити найбільш навантажені зони несучої конструкції вагона-платформи (рис. 12). До них відносяться зони взаємодії шворневих балок з розкосами, а також середні частини повздовжніх балок.

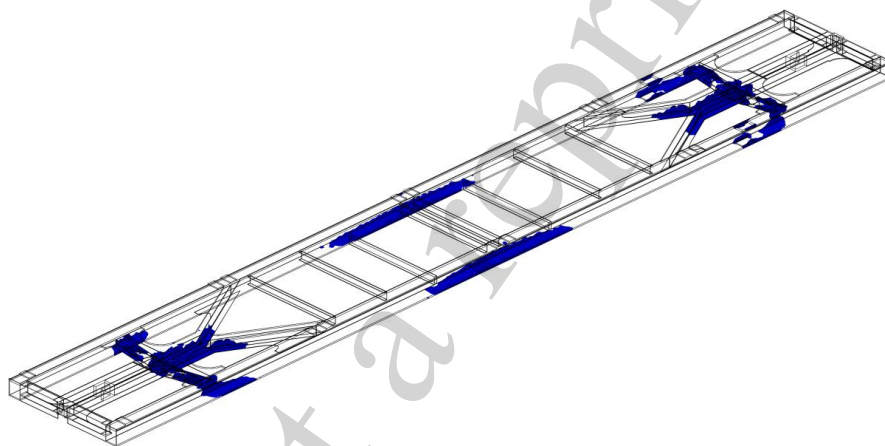


Рис. 12. Найбільш навантажені зони несучої конструкції вагона-платформи

Також за результатами розрахунків визначений індикатор біаксіальності несучої конструкції вагона-платформи (рис. 13). Цей показник характеризує відношення мінімального напруження в несучій конструкції вагона-платформи до максимального [20–23].

Проведені розрахунки дозволили зробити висновок, що втомна міцність несучої конструкції вагона-платформи при заданій базі випробувань забезпечується, оскільки після прикладення циклічного навантаження пошкоджень в ній не виявлено. При цьому втомна міцність несучої конструкції збільшується на 16 % у порівнянні з типовою конструкцією, де після бази $9,22 \cdot 10^7$ у відповідності до складеної розрахункової схеми з'являються пошкодження у середніх частинах основних повздовжніх балок.

Для визначення проектного строку служби вагона-платформи використана методика, наведена в [24]:

$$T_{\Pi} = \frac{(\sigma_{-1Д} / [n])^m \cdot N_0}{B \cdot f_e \cdot \sigma_{ав}^m}, \quad (12)$$

де $\sigma_{-1Д}$ – середнє значення границі витривалості; n – допустимий коефіцієнт запасу міцності; m – показник ступеня кривої втоми; N_0 – база випробувань; B – коефіцієнт, який характеризує час безперервної роботи об'єкту в секундах; f_e – ефективна частота динамічних напружень; $\sigma_{ав}$ – амплітуда еквівалентних динамічних напружень.

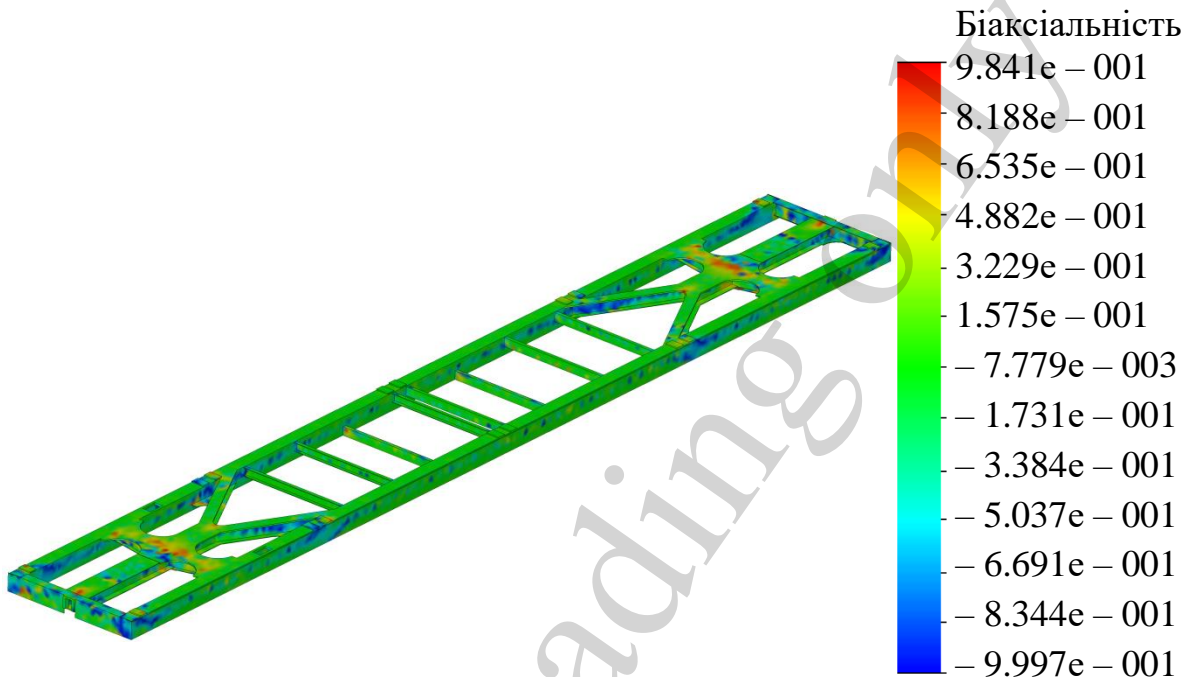


Рис. 13. Індикатор біаксіальності несучої конструкції вагона-платформи

Амплітуда еквівалентних динамічних напружень визначена за формулою

$$\sigma_{ав} = \sigma_{св} (k_{дв} + \psi_{\sigma} / K_{\sigma}), \quad (13)$$

де $\sigma_{св}$ – напруження від статичного вагового навантаження; $k_{дв}$ – коефіцієнт вертикальної динаміки; ψ_{σ} – коефіцієнт чутливості; K_{σ} – загальний коефіцієнт зниження втомної міцності.

При розрахунках прийняті такі вхідні параметри: $\sigma_{-1Д}=245$ МПа; $n=2$; $m=8$; $N_0=10^7$; $B=3,07 \cdot 10^6$ сек.; $f_b=2,7$ Гц; $k_{дв}=0,35$; $\psi_{\sigma}/K_{\sigma}=0,2$.

Проведені розрахунки показали, що проектний строк служби запропонованої несучої конструкції вагона-платформи складає 41,9 року. Тобто отримане значення проектного строку служби вище на 20 % за строк служби вагону-прототипу. Важливо зазначити, що отримана величина проектного строку служби повинна бути уточнена з урахуванням додаткових досліджень повздовжньої навантаженості несучої конструкції вагона-платформи.

Також в рамках дослідження визначено значення власних частот коливань несучої конструкції вагона-платформи. Розрахунок проведено за розрахунковою схемою, наведеною на рис. 8. Результати розрахунку наведені на рис. 14.

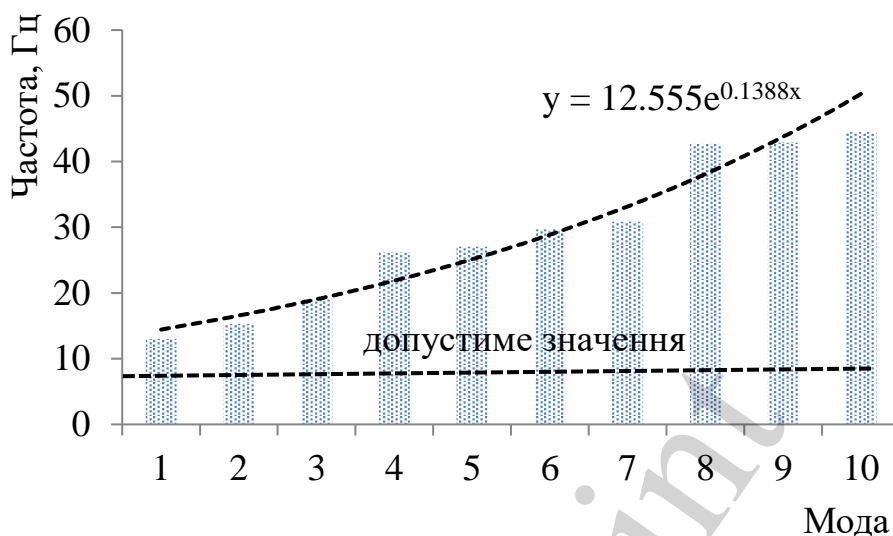


Рис. 14. Значення власних частот коливань несучої конструкції вагона-платформи

За даними, наведеними в рис. 14, можна зробити висновок, що значення власних частот коливань знаходяться в межах допустимих, оскільки перша власна частота коливань має значення більше 8 Гц [13, 14].

8. Обговорення результатів визначення навантаженості довгобазної конструкції вагона-платформи з пружними елементами в повздовжніх балках

Для зменшення динамічної навантаженості несучої конструкції довгобазного вагона-платформи пропонується впровадження в неї пружних елементів. Розміщення пружних елементів передбачається у повздовжніх балках рами. Для цього пропонується заміна їх на балки П-подібного профілю (рис. 1).

Для обґрунтування запропонованого рішення проведено математичне моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона. До уваги прийняті коливання підсакування. Дослідження проведені в плоскій системі координат в площині XZ (рис. 4). Встановлено, що максимальне вертикальне прискорення несучої конструкції вагона-платформи складає близько $2,0 \text{ м/с}^2$. Тобто з урахуванням запропонованого рішення стає можливим знизити вертикальні прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи на 15 %.

При складанні моделі не враховано проковзування колісних пар відносно рейок. Також при складанні моделі прийнято припущення, що переміщення рами і візків вагона-платформи уздовж осі колії однакові. Модель враховує, що підстрибування візків визначаються підстрибуванням колісних пар.

Визначено основні показники міцності несучої конструкції вагона-платформи. Максимальні еквівалентні напруження виникають у зоні взаємодії

шворневої балки з розкосами та складають 254,0 МПа (рис. 9). Максимальні переміщення виникають у середній частині повздовжніх балок та дорівнюють 12,6 мм. Отже міцність несучої конструкції вагона-платформи забезпечується.

За розрахунковою схемою, наведеною на рис. 8, визначено чисельні значення прискорень несучої конструкції вагона-платформи та поля їх дислокації.

Досліджено втомну міцність несучої конструкції вагона-платформи. Результати розрахунку показали, що втомна міцність удосконаленої несучої конструкції вагона-платформи збільшується на 16 % у порівнянні з типовою конструкцією.

Обмеженнями даного дослідження є те, що автори провели визначення динамічної навантаженості та міцності несучої конструкції вагона-платформи тільки у вертикальній площині. В подальших дослідженнях в цьому напрямку важливим є визначення динамічної навантаженості вагона-платформи у просторовій системі координат. Також до уваги необхідно прийняти податливість вантажу, що перевозиться.

Разом з цим проведені дослідження сприятимуть створенню сучасних конструкцій вагонів-платформ з покращеними техніко-економічними та експлуатаційними показниками.

9. Висновки

1. Запропоновано заходи щодо удосконалення несучої конструкції вагона-платформи для підвищення втомної міцності в експлуатації. Особливістю запропонованого рішення є те, що основні повздовжні балки рами складаються з П-подібних профілів, перекритих горизонтальними листами. Між горизонтальними частинами профілів та листами розміщуються пружні елементи. Таке технічне рішення сприятиме зменшенню динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи в експлуатації.

2. Дослідження динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи показало, що максимальне вертикальне прискорення несучої конструкції вагона-платформи складає близько $2,0 \text{ м/с}^2$ (0,2 g), а візків – близько $8,29 \text{ м/с}^2$ (0,8 g). З урахуванням запропонованого рішення стає можливим знизити вертикальні прискорення, які діють на несучу конструкцію вагона-платформи на 15% у порівнянні з типовою конструкцією.

3. Дослідження міцності несучої конструкції вагона-платформи показали, що максимальні еквівалентні напруження виникають у зоні взаємодії шворневої балки з розкосами та складають 254,0 МПа. Максимальні переміщення виникають у середній частині повздовжніх балок та дорівнюють 12,6 мм. Тобто міцність несучої конструкції вагона-платформи забезпечується.

На підставі комп'ютерного моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції вагона-платформи визначено чисельні значення прискорень та поля їх дислокації відносно несучої конструкції вагона-платформи. Максимальні прискорення виявлені в середній частині несучої конструкції вагона-платформи та дорівнюють $2,28 \text{ м/с}^2$.

4. Дослідження втомної міцності несучої конструкції вагона-платформи показало, що втомна міцність при базі випробувань 10^7 забезпечується. При

цьому втомна міцність несучої конструкції збільшується на 16 % у порівнянні з типовою конструкцією.

Результати розрахунку власних частот коливань несучої конструкції вагона-платформи показали, що їх значення знаходяться в межах допустимих.

Подяка

Дані дослідження проведені в рамках наукової теми молодих вчених “Інноваційні засади створення ресурсозберігаючих конструктивів вагонів шляхом урахування уточнених динамічних навантажень та функціонально-адаптивних флеш-концептів”, яка виконується за рахунок коштів державного бюджету України з 2020 р.

Література

1. Das, A., Agarwal, G. (2020). Investigation of Torsional Stability and Camber Test on a Meter Gauge Flat Wagon. *Advances in Fluid Mechanics and Solid Mechanics*, 271–280. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-15-0772-4_24
2. Šťastniak, P., Kurčík, P., Pavlík, A. (2018). Design of a new railway wagon for intermodal transport with the adaptable loading platform. *MATEC Web of Conferences*, 235, 00030. doi: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823500030>
3. Fabian, P., Gerlici, J., Masek, J., Marton, P. (2013). Versatile, Efficient and Long Wagon for Intermodal Transport in Europe. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 15 (2), 118–123. URL: <http://communications.uniza.sk/index.php/communications/article/view/628>
4. Krason, W., Niezgodna, T. (2014). FE numerical tests of railway wagon for intermodal transport according to PN-EU standards. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 62 (4), 843–851. doi: <https://doi.org/10.2478/bpasts-2014-0093>
5. Nandan, S., Trivedi, R., Kant, S., Ahmad, J., Maniraj, M. (2020). Design, Analysis and Prototype Development of Railway Wagons on Different Loading Conditions. *SSRN Electronic Journal*. doi: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3539937>
6. Myamlin, S., Lingaitis, L. P., Dailydka, S., Vaičiūnas, G., Bogdevičius, M., Bureika, G. (2015). Determination of the dynamic characteristics of freight wagons with various bogie. *Transport*, 30 (1), 88–92. doi: <https://doi.org/10.3846/16484142.2015.1020565>
7. Stoilov, V., Simić, G., Purgić, S., Milković, D., Slavchev, S., Radulović, S., Maznichki, V. (2019). Comparative analysis of the results of theoretical and experimental studies of freight wagon Sdggmrss-twin. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 664, 012026. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/664/1/012026>
8. Fomin, O., Lovska, A., Pistek, V., Kucera, P. (2020). Research of stability of containers in the combined trains during transportation by railroad ferry. *MM Science Journal*, 2020 (1), 3728–3733. doi: https://doi.org/10.17973/mmsj.2020_03_2019043
9. Fomin, O., Lovska, A., Pištěk, V., Kučera, P. (2019). Dynamic load effect on the transportation safety of tank containers as part of combined trains on rail-

way ferries. *Vibroengineering PROCEDIA*, 29, 124–129. doi: <https://doi.org/10.21595/vp.2019.21138>

10. Дьомін, Ю. В., Черняк, Г. Ю. (2003). *Основи динаміки вагонів*. Київ: КУЕТТ, 269.

11. Кирьянов, Д. В. (2006). *Mathcad 13*. СПб.: БХВ. Петербург, 608.

12. Дьяконов, В. (2000). *MATHCAD 8/2000: специальный справочник*. СПб.: Питер, 592.

13. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних) (2015). Київ, 162.

14. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам (2016). Москва, 54.

15. Алямовский, А. А. (2007). *SolidWorks/COSMOSWorks 2006–2007. Инженерный анализ методом конечных элементов*. Москва, 784.

16. Fomin, O., Lovska, A., Radkevych, V., Horban, A., Skliarenko, I., Gurenkova, O. (2019). The dynamic loading analysis of containers placed on a flat wagon during shunting collisions. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14 (21), 3747–3752. URL: https://www.researchgate.net/publication/337316337_THE_DYNAMIC_LOADING_ANALYSIS_OF_CONTAINERS_PLACED_ON_A_FLAT_WAGON_DURING_SHUNTING_COLLISIONS

17. Vatulia, G. L., Lobiak, O. V., Deryzemlia, S. V., Verevicheva, M. A., Orel, Y. F. (2019). Rationalization of cross-sections of the composite reinforced concrete span structure of bridges with a monolithic reinforced concrete roadway slab. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 664, 012014. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/664/1/012014>

18. Vatulia, G., Komagorova, S., Pavliuchenkov, M. (2018). Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results. *MATEC Web of Conferences*, 230, 02037. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002037>

19. EN 12663-2. Railway applications - structural requirements of railway vehicle bodies - Part 2: Freight wagons (2010).

20. Kondratiev, A. V., Gaidachuk, V. E., Kharchenko, M. E. (2019). Relationships Between the Ultimate Strengths of Polymer Composites in Static Bending, Compression, and Tension. *Mechanics of Composite Materials*, 55 (2), 259–266. doi: <https://doi.org/10.1007/s11029-019-09808-x>

21. Dižo, J., Steišūnas, S., Blatnický, M. (2016). Simulation Analysis of the Effects of a Rail Vehicle Running with Wheel Flat. *Manufacturing Technology*, 16 (5), 889–896. doi: <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2016/a/1213-2489/mt/16/5/889>

22. Dižo, J., Harušinec, J., Blatnický, M. (2015). Multibody System of a Rail Vehicle Bogie with a Flexible Body. *Manufacturing Technology*, 15 (5), 781–788. doi: <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2015/a/1213-2489/mt/15/5/781>

23. Fomin, O., Lovska, A. (2020). Improvements in passenger car body for higher stability of train ferry. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23 (6), 1455–1465. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.08.010>

24. Устич, П. А., Карпыч, В. А., Овечников, М. Н. (1999). *Надежность рельсового нетягового подвижного состава*. Москва, 415.