

О. О. Ларін, К. Є. Потопальська, А. О. Зуєв, Н.А. Васильченко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРОІЗОЛЯЦІЙНОЇ ПЛАТФОРМИ З КВАЗІНУЛЬОВОЮ ЖОРСТКІСТЮ ДЛЯ МОБІЛЬНОГО РОВЕРА

У роботі представлено розробку та дослідження віброізоляційної платформи з квазінульовою жорсткістю (КНЖ), інтегрованої у мобільний ровер для зменшення впливу низькочастотних вібрацій на встановлену апаратуру. Платформа виготовлена методом 3D-друку з використанням ТПУ та ПЕТГ і містить еластичні КНЖ-елементи. Проведено експериментальні та чисельні дослідження, що підтвердили наявність нелінійної “провальної” ділянки у кривій «навантаження–переміщення» та ефективність запропонованої конструкції у віброізоляції.

Ключові слова: квазінульова жорсткість, віброізоляція, мобільний ровер, 3D-друк, ТПУ.

O. O. Larin, K. E. Potopalska, A. O. Zuev, N.A. Vasylchenko

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF A QUASI-ZERO STIFFNESS VIBRATION ISOLATION PLATFORM FOR A MOBILE ROVER

This work presents the design, development, and validation of a vibration isolation platform with quasi-zero stiffness (QZS) integrated into a mobile rover structure. The proposed system employs elastic elements made of thermoplastic polyurethane (TPU) to achieve nonlinear stiffness behavior that enables efficient passive isolation of low-frequency vibrations without active control or energy consumption. Numerical simulations performed in ANSYS and experimental compression tests confirmed the presence of a sharp stiffness drop characteristic of the QZS effect. The platform demonstrated a high correlation between simulated and measured force–displacement responses, validating the mechanical model. Owing to its lightweight, simplicity, and additive manufacturing compatibility, the QZS-based rover platform offers a cost-effective solution for stabilizing optical equipment and sensors in small robotic systems, where traditional active isolators are impractical.

Keywords: quasi-zero stiffness, vibration isolation, mobile rover, 3D printing, TPU.

Вступ.

Використання мобільних роботизованих платформ, зокрема наземних безпілотних транспортних засобів (UGV), набуло поширення у широкому спектрі застосувань від промислового інспектування та прецизійного сільського господарства до пошуково-рятувальних операцій [1,2].

Спільною рисою таких систем є залежність від оптичних сенсорів, насамперед камер, що використовуються для навігації, збору даних і виконання місії. Проте ефективність цих чутливих приладів суттєво знижується через механічні вібрації, спричинені взаємодією з нерівностями поверхні, роботою приводу та іншими динамічними навантаженнями [3,4]. Такі вібрації призводять до розмиття зображення, тремтіння кадрів і зниження точності алгоритмів комп'ютерного зору, що може погіршити результати виконання місії [5]. Традиційні методи протидії вібраціям здебільшого базуються на пасивній ізоляції з використанням м'яких кріплень, еластомерів або систем пружина–демпфер. Незважаючи на простоту та низьку вартість, такі лінійні ізолятори мають фундаментальне фізичне обмеження: ефективна ізоляція на низьких частотах потребує малої динамічної жорсткості, що, у свою чергу, веде до низької здатності нести статичне навантаження та великих статичних деформацій, знижуючи стабільність платформи [6].

Активні системи віброізоляції можуть подолати це обмеження шляхом використання сенсорів та актуаторів, які компенсують збурення у реальному часі [7]. Втім, їх застосування у мобільних роботах із обмеженими ресурсами часто обмежується високою вартістю, енергоспоживанням, складністю керування та збільшенням ваги, що робить їх менш придатними для польових умов [8]. Концепція квазінульової жорсткості (КНЖ) є перспективним напрямком, який дозволяє подолати компромісні обмеження традиційних пасивних ізоляторів. Системи КНЖ поєднують високу статичну жорсткість, що дає змогу підтримувати значні навантаження при мінімальних деформаціях із низькою динамічною жорсткістю у певному діапазоні переміщень [9,10,11]. Така поведінка досягається завдяки поєднанню позитивного елемента жорсткості (наприклад, звичайної пружини) з елементом від'ємної жорсткості, увімкненими паралельно. Елементи, що створюють від'ємну жорсткість, можуть бути представлені попередньо вигнутими балками [12,13], магнітними відштовхувачами [14] або спеціальними геометричними формами, такими як криволінійні балки чи арки [15,16]. Принцип роботи базується на досягненні ділянки плато на графіку «сила–переміщення» (зона КНЖ), де відновлювальна сила залишається майже сталою попри збільшення переміщення. Це призводить до зниження власної частоти системи, розширюючи ефективний діапазон ізоляції вібрацій до нижчих частот, ніж це можливо у лінійних ізоляторах із еквівалентною статичною жорсткістю [17,18,11].

© О. О. Ларін, К. Є. Потопальська, А. О. Зуєв, Н.А. Васильченко

Останні дослідження віброізоляторів на основі квазінульової жорсткості (КНЖ) охоплюють різні галузі, зокрема прецизійні вимірювальні прилади [19, 11], захист авіаційних корисних навантажень [9, 20], сейсмічну ізоляцію чутливих конструкцій [13] та оптичні установки [21, 22]. Серед таких робіт слід відзначити [23], у якій розглянуто пасивні елементи з квазінульовою жорсткістю на основі композитних матеріалів. Результати цього дослідження є релевантними та враховані під час розробки системи, представленої у даній роботі. У сфері робототехніки інтеграція конструкцій з КНЖ залишається недостатньо дослідженою, особливо для малих і енергетично обмежених наземних роботів. У зв'язку з цим створення компактних, легких і економічних віброізоляційних платформ, адаптованих для мобільних роботів типу «ровер», є актуальною науково-прикладною задачею.

Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є розробка концептуальної моделі мобільного ровера з інтегрованими у його шасі віброізолюючими елементами на основі принципу квазінульової жорсткості (КНЖ), а також проведення чисельного та експериментального дослідження для валідації отриманих результатів. Для дослідження властивостей квазінульової жорсткості та оцінки характеристик віброізоляції були проведені експериментальні дослідження (покрокове навантаження та вимірювання переміщень) і чисельне моделювання (статичний аналіз), а також виготовлення та експериментальна перевірка віброізоляційної платформи, інтегрованої у шасі ровера. У межах роботи передбачено створення САД-моделі ровера, виготовлення його деталей методом 3D-друку та проведення статичного експерименту з поступовим навантаженням для підтвердження наявності плато квазінульової жорсткості, виявленого під час чисельного аналізу.

Виклад основного матеріалу.

Концептуальна розробка. Ровер складається з шасі, виконаного у формі жорсткої коробчастої рами, у якій розміщено приводні двигуни та акумулятори. Шасі спирається на чотири колеса, закріплені по кутах конструкції. На верхній поверхні шасі, вздовж його довгих сторін, розташовано чотири пружні (КНЖ) елементи, встановлені попарно один навпроти одного. На рисунку 1 показано схематичне компонування ровера з віброізоляційною платформою, де позначено колеса, шасі, пружні елементи в підсилювальних рамах і верхню площадку для корисного навантаження.

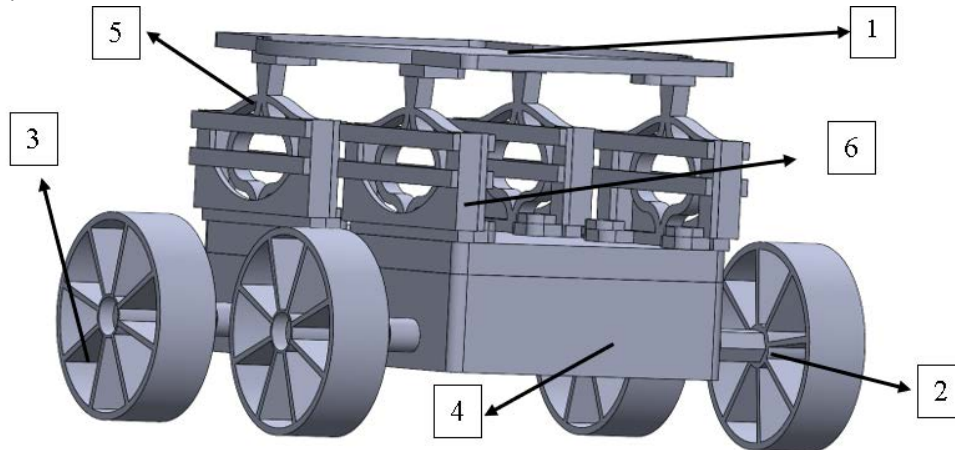


Рис. 1. Концептуальна модель мобільного ровера: 1) верхня площадка, 2) шасі, 3) колесо, 4) жорстка коробчаста рама, 5) КНЖ віброізолятор, 6) підсилювальна рама

Кожен пружний елемент призначений для реалізації ефекту квазінульової жорсткості. Для підвищення стабільності та запобігання надмірним деформаціям під навантаженням ці елементи встановлені у жорсткі армувальні рамки. Дані ізолятори несуть верхню функціональну платформу, яка слугує поверхнею для кріплення корисного навантаження. У центрі верхньої платформи передбачено круглу пластину для розміщення додаткових вантажів, що дозволяє переводити систему в робочу зону квазінульової жорсткості шляхом зміщення характеристики «сила–переміщення» у ділянку плато.

Інтеграція віброізоляційної платформи у шасі ровера. Віброізоляційна платформа механічно інтегрована з шасі ровера шляхом жорсткого кріплення армувальних рамок безпосередньо до верхньої панелі базової конструкції. Це забезпечує необхідне вирівнювання пружних елементів під час роботи та запобігає їх зміщенню.

Верхня функціональна платформа встановлена на чотирьох елементах, формуючи стійку опорну систему, ізольовану від вібрацій.

Корисне навантаження, маса якого переводить систему в робочу зону квазінульової жорсткості, розташовується в центрі верхньої платформи. Таке розміщення забезпечує симетричне навантаження та рівномірний розподіл ефекту віброізоляції. Модульна конструкція дозволяє змінювати або регулювати масу корисного навантаження без модифікації базового механізму.

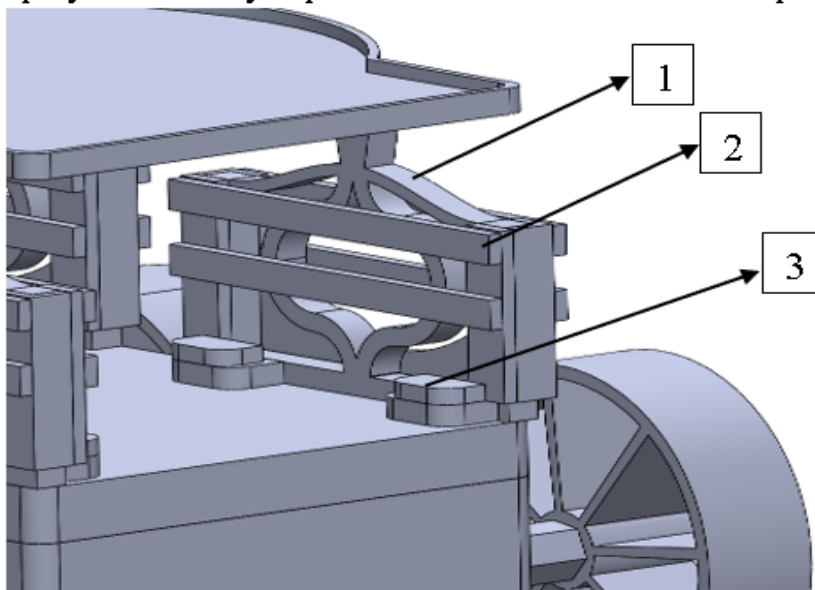


Рис. 2. CAD-збірка ровера з указанням принципу кріплення: 1) віброізолятор в жорсткій рамі, 2) жорстка рама, 3) місце кріплення під болт М3.

Повна тривимірна модель ровера та віброізоляційної платформи (рисунок 1) була розроблена в CAD-системі та імпортована в CAE-пакет для подальшого аналізу.

Обґрунтування вибору матеріалів. Для виготовлення пружних елементів системи (елементів КНЖ) було обрано термопластичний поліуретан (ТПУ). Цей матеріал має здатність до значних пружних деформацій, що забезпечує реалізацію нелінійної характеристики жорсткості, та використовується в адитивному виробництві методом FDM, оскільки для створення фізичної моделі ровера застосовується саме ця технологія. Конструкційні компоненти (корпус, кріплення, армувальні рамки) виготовлені з поліетилентерефталатгліколю (ПЕТГ). Цей матеріал має високу міцність, жорсткість, що є необхідним для забезпечення точної геометрії несучої конструкції. Фізико-механічні властивості матеріалів ТПУ, ПЕТГ та сталі використаних у конструкції надані у таблицях 1 та 2.

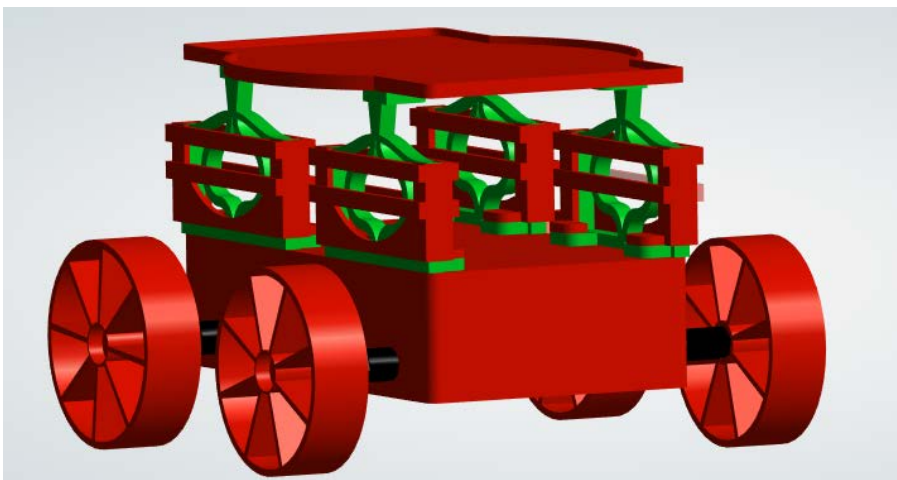


Рис. 3. Матеріали конструкції (червоний-ПЕТГ, чорний- сталь, зелений-ТПУ)

Табл. 1

Властивості матеріалів

Матеріал	Густина (кг/м ³)	Модуль Юнга (МПа)	Коефіцієнт Пуассона
ТПУ	1180	21	0,48
ПЕТГ	1270	2100	0,38
Сталь	7850	200000	0,3

Табл. 2

Об'ємна релаксація ТПУ

Індекс і	Відносний модуль(і)	Час релаксації(і) (s)
1	0,3097	110,85
2	0,15	1068,1

Численні розрахунки. Для визначення працездатності концептуальної моделі ровера було проведено статичний аналіз із поступовим прикладанням навантаження на платформу. Для чисельного аналізу використовувався метод скінченних елементів (МСЕ). Для цього було побудовано SE-сітку, що складалася з 238 613 елементів (розмір елемента становив 1,5 мм). Було проведено аналіз сіткової схожимості, і розмір елемента обрано тоді, коли визначена похибка була менше 5%.

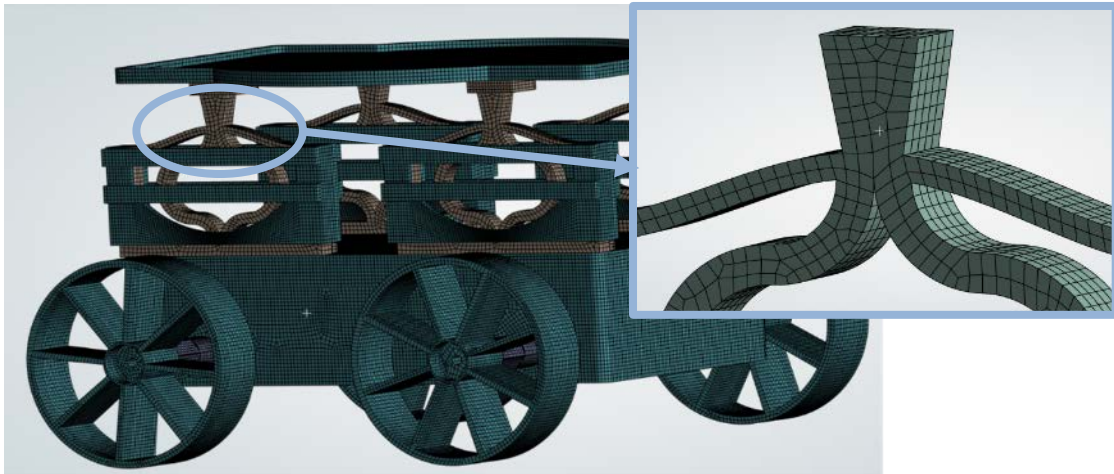


Рис. 4. Скінченно-елементна сітка ровера з КНЖ-платформою (розмір елементів 1,5 мм).

Для дослідження поведінки системи в зоні квазінульової жорсткості було виконано статичний аналіз у двох постановках.

На дископодібну ділянку верхньої платформи прикладалося рівномірно розподілений тиск навантаження (максимальний тиск –893,8 Па з кроком в 44,7 Па). На кожному кроці фіксувалося вертикальне переміщення верхньої платформи. Отримана залежність "переміщення–тиск" демонструвала ділянку різкого збільшення переміщення при незначній зміні навантаження, що ідентифікувало початок зони квазінульової жорсткості (рисунок 5а).

Для прямого підтвердження ефекту квазінульової жорсткості був виконаний розрахунок, де до верхньої платформи прикладалося поступове вертикальне переміщення (максимальне переміщення – 15,5 мм з кроком в 0,31 мм). Отримана крива "сила–переміщення" містила ділянку з майже постійним значенням сили, що підтверджувало наявність плато – характеристики, яка свідчить про квазінульову динамічну жорсткість у цьому діапазоні переміщень. Оцінка міцності конструкції показала, що максимальні еквівалентні напруження, отримані в різних елементах конструкції (віброізолятор – 4,87 Мпа, колесо – 1,23 Мпа) не перевищують відповідні межі міцності (запас міцності для елемента віброізолятора – 4,3, запас міцності для колеса 1707.3).

Експериментальне дослідження. Для валідації чисельних розрахунків та перевірки працездатності конструкції ровера його було надруковано за допомогою технології адитивного виробництва та проведено статичні випробування на стиск.

Технологічний процес виготовлення. Усі структурні частини ровера: корпус, кріплення коліс, колеса і опорні рамки для КНЖ-пружин (рисунок 1) були виготовлені методом 3D-друку з із матеріалу ПЕТГ із використанням сопла діаметром 0,4 мм і висоти шару 0,2 мм на принтері FDM. Використовувалися типові параметри друку для ПЕТГ, що забезпечило необхідну жорсткість і

точність геометрії. КНЖ-елементи (рисунок 1) були надруковані з ТПУ 40Д із використанням сопла діаметром 0,4 мм і висоти шару 0,2 мм.

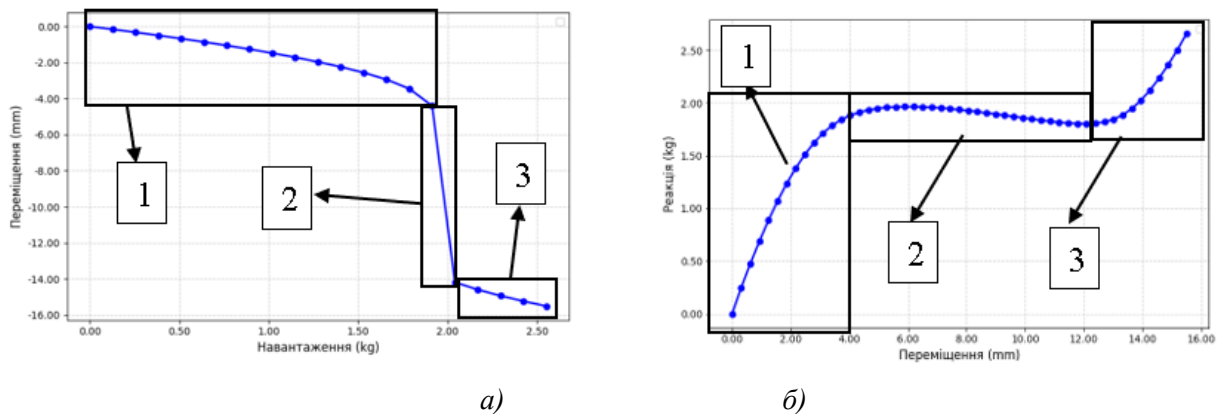


Рис. 5. а) вертикальне переміщення платформи залежно від прикладеного тиску, що демонструє поступове переміщення (1), зону КНЖ (2) та вихід із зони (3) (Тиск перерахований в еквівалентні значення реального вантажу); б) крива реакційної сили залежно від переміщення, що демонструє збільшення реакції (1), ділянку КНЖ (2) та вихід із цієї зони (3).

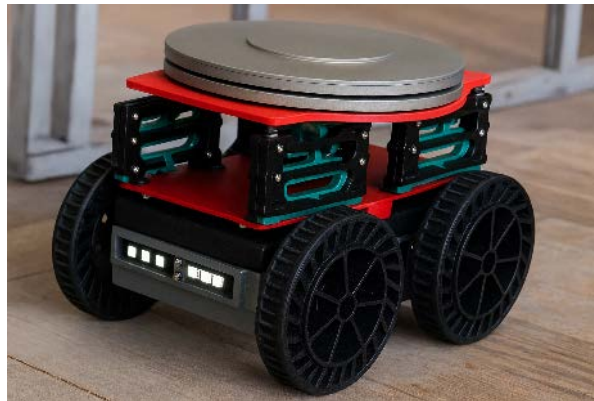


Рис. 6. Роздрукований ровер під час тестів: корпус із ПЕТГ і КНЖ-елементи з ТПУ

Методика проведення експерименту. Ровер розміщувався на жорсткій горизонтальній поверхні, після чого на дископодібну верхню пластину, розташовану в центрі платформи, поступово встановлювали навантаження. Навантаження збільшувалося покроково з кроком 0,5 кг, а відповідні вертикальні переміщення фіксувалися за допомогою контактної датчика переміщень, встановленого поруч із платформою. Початкове положення верхньої пластини без навантаження приймалося за нульовий рівень.

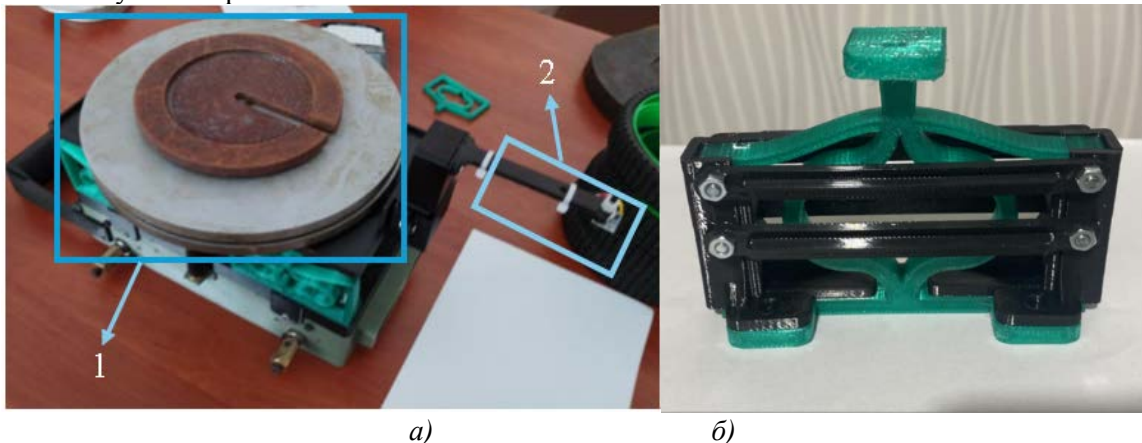


Рис. 7. Експериментальна установка: а) прототип ровера, навантажувальні ваги (1) та датчик вимірювання переміщення (2); б) віброізолятор із армуючим каркасом

У процесі навантаження платформа поступово деформувалася, доки не досягла критичного навантаження, після якого відбувався різкий спад–провал (рисунок 8), а не плавна ділянка плато. Це переміщення означає вхід системи в зону негативної жорсткості, характерну для структур КНЖ [23], побудованих на основі попередньо стиснених еластичних елементів.

Отримана в експериментах залежність “переміщення–навантаження” показала три характерні ділянки:

- Лінійна область жорсткості: поступове, майже пропорційне збільшення переміщення зі зростанням навантаження (на рисунку 8 (1) в діапазоні 0-2кг).
- Область нестійкості (провалу): різке збільшення переміщення при досягненні критичного навантаження, що відповідає входженню в зону КНЖ (на рисунку 8 (2) в області 2 кг).
- Післяпровальна область: подальше зростання жорсткості при повному стисканні елементів (на рисунку 8 (3) після 2 кг).

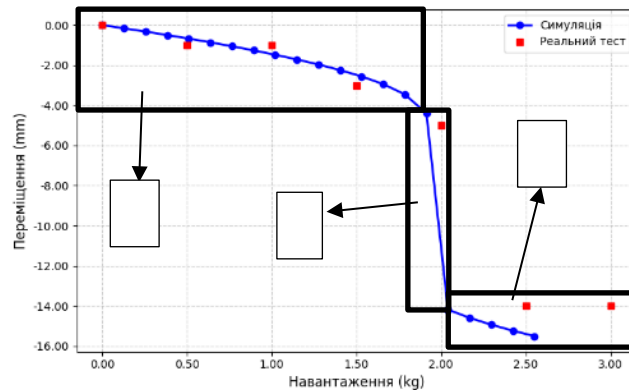


Рис. 8. Експериментальна крива “переміщення–навантаження”, що демонструє різкий провал, пов’язаний із переходом до зони КНЖ.

На рисунку 8 можна побачити нелінійна поведінка, яка відтворюється як в експериментальному так і в чисельному дослідженні. За результатами експериментального дослідження цільове навантаження для досягнення зони КНЖ у межі 2-2,5 кг, а в чисельному моделюванні – 1.9-2.3 кг. Таким чином, відхилення між експериментальними та чисельними результатами складає 8-12 відсотків. Розбіжності в абсолютних значеннях переміщень можуть бути обумовлені технологічними факторами, такими як анізотропія механічних властивостей матеріалу ТПУ, отриманих в процесі адитивного виробництва.

Поведінка віброізоляторів в експериментальному дослідженні (рисунок 9 а) також виявилася схожою з чисельним дослідженням (рисунок 9 б).

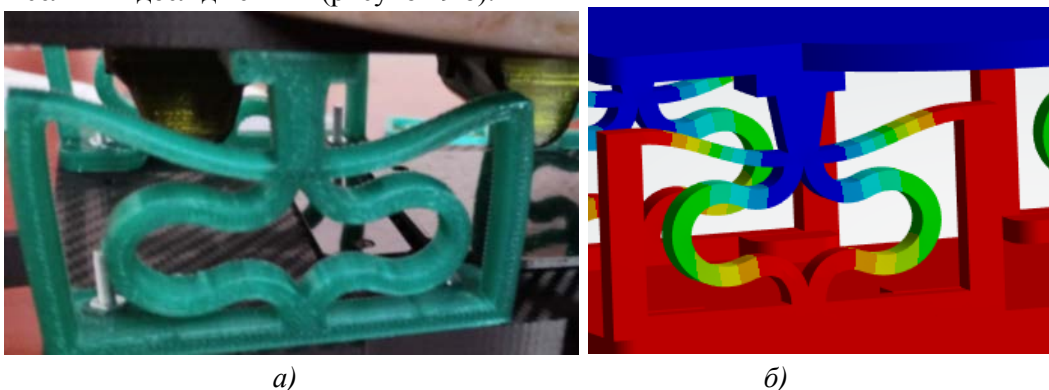


Рис. 9. а) деформація КНЖ-елементів із ТПУ і раптове опускання верхньої платформи під час переходу до зони КНЖ; б) деформований стан платформи на моменті виходу з зони КНЖ

Обговорення. Експериментальні результати показали високий рівень збігу з чисельним моделюванням. Критичне навантаження, що відповідало моменту провалу, співпадає зі значенням, отриманим у статичному аналізі з відповідною похибкою (8-12%). В обох випадках (експеримент та чисельне моделювання) чітко прослідковується нелінійна поведінка, що притаманна системам з КНЖ. Точка провалу на експериментальній кривій з’явилася майже при тому самому навантаженні, що й у чисельній моделі, що підтверджує коректність моделювання (приблизно 8 %).

Отримані розбіжності у величинах переміщень можуть бути пояснені варіаціями властивостей ТПУ та недосконалістю міжшарового зчеплення в процесі адитивного виробництва.

Загалом узгодження чисельних і експериментальних результатів підтверджує реалізацію механізму квазінульової жорсткості у створеній платформі ровера.

Висновки

У даній роботі було розроблено, виготовлено та досліджено пасивну віброізоляційну платформу з ефектом квазінульової жорсткості (КНЖ), інтегровану в конструкцію мобільного ровера. Експериментальні та чисельні дослідження підтвердили основні принципи роботи системи. Результати статичних випробувань продемонстрували характерну нелінійну поведінку з чітко вираженою ділянкою різкого збільшення деформації («провалу») при досягненні критичного навантаження. Ключовими перевагами запропонованої конструкції є пасивний та енергонезалежний принцип роботи, а також технологічність виготовлення за допомогою FDM-друку із застосуванням доступних полімерних матеріалів (ПЕТГ для несучих елементів та ТПУ для пружних компонентів). Перспективи подальших досліджень включають оптимізацію форми пружних елементів, проведення динамічних випробувань та можливість створення комбінованих пасивно-активних систем для підвищення адаптивності.

Подяка: Це наукове дослідження було підтримано та частково фінансувалось Національним фондом досліджень України (НФДУ грант: 2023.03/0255): Вібраційний захист пристроїв, апаратури, вантажів та людей від динамічних впливів в надзвичайних умовах на основі дослідження нелінійних коливань систем складної структури з керованими і пасивними елементами.

Список використаних джерел

1. Bonadies S., Lefcourt A., Gadsden S. A. A survey of unmanned ground vehicles with applications to agricultural and environmental sensing. *Proceedings of SPIE*. – 2016. – Vol. 9866. – P. 98660Q. – DOI: 10.1117/12.2224248.
2. Delmerico J., Mintchev S., Giusti A. та ін. The current state and future outlook of rescue robotics. *Journal of Field Robotics*. – 2019. – Vol. 36, № 7. – P. 1171–1191. – DOI: 10.1002/rob.21887.
3. Lin S., Liu H., Wu C., Huang L., Chen Y. Anti-falling of wheeled humanoid robots based on a novel variable stiffness mechanism. *Smart Materials and Structures*. – 2025. – DOI: 10.1088/1361-665x/adf37f.
4. Kalay E., Özkul İ. The role of vibrations in unmanned aerial vehicles efficiency measurement techniques and performance effects. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*. – 2024. – DOI: 10.51534/tiha.1576860.
5. Karoliya N. N. M. Structural rigidity in autonomous vehicle camera mounting: Critical determinant of perception system accuracy and safety. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*. – 2025. – Vol. 15, № 3. – P. 2027–2037. – DOI: 10.30574/wjaets.2025.15.3.1134.
6. Yamaguchi H., Furukawa Y., Yoshida H. Study of linear friction damper consisting of tilt lever supported with leaf spring and cylindrical block. *Transactions of the JSME*. – 2014. – Vol. 80, № 814. – DOI: 10.1299/transjsme.2014dr0158.
7. Liu L., Wu G. Active vibration suppression and precision pointing control of Piezo-based platforms and their applications to flexible spacecrafts. *Proceedings of the International Conference on Control Applications*. – 2013. – P. 890–895. – DOI: 10.1109/icca.2013.6565088.
8. Mehta D., Kosaraju K. C., Krovi V. N. Actively articulated wheeled architectures for autonomous ground vehicles: opportunities and challenges. *SAE Technical Paper Series*. – 2023. – DOI: 10.4271/2023-01-0109.
9. Liu C., Yu K. Accurate modeling and analysis of a typical nonlinear vibration isolator with quasi-zero stiffness. *Nonlinear Dynamics*. – 2020. – Vol. 100. – P. 2141–2165. – DOI: 10.1007/s11071-020-05642-2.
10. Kovacic I., Brennan M. J., Waters T. P. A study of a nonlinear vibration isolator with a quasi-zero stiffness characteristic. *Journal of Sound and Vibration*. – 2008. – Vol. 315. – P. 700–711. – DOI: 10.1016/j.jsv.2007.12.019.
11. Tan X., Wang B., Chen S., Zhu S., Sun Y. A novel cylindrical negative stiffness structure for shock isolation. *Composite Structures*. – 2019. – Vol. 214. – P. 397–405.

12. Fulcher B. A., Shahan D. W., Haberman M. R., Seepersad C. C., Wilson P. S. Analytical and experimental investigation of buckled beams as negative stiffness elements for passive vibration and shock isolation systems. *Journal of Vibration and Acoustics*. – 2014. – DOI: 10.1115/1.4026888.
13. Che K., Yuan C., Wu J., Jerry Qi H., Meaud J. Three-dimensional-printed multistable mechanical metamaterials with a deterministic deformation sequence. *Journal of Applied Mechanics*. – 2017. – Vol. 84, № 1.
14. Izard A. G., Alfonso R. F., McKnight G., Valdevit L. Optimal design of a cellular material encompassing negative stiffness elements for unique combinations of stiffness and elastic hysteresis. *Materials & Design*. – 2017. – Vol. 135. – P. 37–50.
15. Ren C., Yang D., Qin H. Mechanical performance of multidirectional buckling-based negative stiffness metamaterials: an analytical and numerical study. *Materials*. – 2018. – Vol. 11, № 7. – P. 1078.
16. Yang H., Ma L. Multi-stable mechanical metamaterials by elastic buckling instability. *Journal of Materials Science*. – 2019. – Vol. 54, № 4. – P. 3509–3526.
17. Tan X., Chen S., Zhu S., Wang B., Xu P., Yao K. Reusable metamaterial via inelastic instability for energy absorption. *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2019. – Vol. 155. – P. 509–517.
18. Ha C. S., Lakes R. S., Plesha M. E. Design, fabrication, and analysis of lattice exhibiting energy absorption via snap-through behavior. *Materials & Design*. – 2018. – Vol. 141. – P. 426–437.
19. Bouna H. S., Nbandjo B. R. N., Woafu P. Isolation performance of a quasi-zero stiffness isolator in vibration isolation of a multi-span continuous beam bridge under pier base vibrating excitation. *Nonlinear Dynamics*. – 2020. – Vol. 100. – P. 1125–1141. – DOI: 10.1007/s11071-020-05580-z.
20. Shu J., He E., Li Y., Zhang C. The Quasi-Zero Stiffness Seat Vibration Isolator design to improve cockpit vibration comfort. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. – 2023. – Vol. 12, № 4. – P. 5999–6014. – DOI: 10.1007/s42417-023-01232-9.
21. Cao D., Liang L., Wang G., Guan X., Shao-Fan T., Chen X., Zheng G. Parameter design and experimental study of a bifunctional isolator for optical payload protection and stabilization. *International Conference on Space Optics – ICSO*. – 2020. – P. 1–10. – DOI: 10.1117/12.2309098.
22. Ri I., Kang H. Study on the Micro-Vibration isolation in High-Resolution Satellite Optical Camera using a quasi-zero stiffness system. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. – 2025. – Vol. 13, № 5. – DOI: 10.1007/s42417-025-01843-4.
23. Potopalska K., Larin O., Grinchenko E., Razumovska N., Vasylchenko N. Development of calculation models of passive structural suspension elements with quasi-zero stiffness made of composite materials. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series Dynamics and Strength of Machines*. – 2024. – № 2. – P. 77–84. – DOI: 10.20998/2078-9130.2024.2.198573.

Рецензент: Виноградов Станіслав Андрійович, заступник начальника навчально-наукового інституту оперативно-рятувальних сил Національного університету цивільного захисту України, кандидат технічних наук, доцент.