

## РОЗРОБКА МЕТОДУ ОЦІНКИ ДЕМПФУВАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ 3D-ДРУКОВАНИХ TPU-ЛАЙНЕРІВ ДЛЯ ПРОТЕЗІВ

**Б.С. Місан, Д.О. Нікітін, І.Ш. Невлюдов**

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: bohdan.misan@nure.ua, dmytro.nikitin@nure.ua, igor.nevliudov@nure.ua

**Анотація:** У роботі запропоновано та експериментально апробовано метод оцінки демпфувальних властивостей адитивно виготовлених TPU-прокладок на основі аналізу вільних затухаючих коливань після ударного збудження. Метод дозволяє кількісно визначати ефективність гасіння вібрацій без застосування складних вібростендів та є придатним для швидкого порівняльного аналізу конструктивних варіантів демпфувальних елементів. Дослідження виконано для TPU-прокладок різної жорсткості та внутрішньої структури. Показано, що запропонований підхід забезпечує високу відтворюваність результатів і може бути використаний для інженерної оптимізації демпфувальних елементів у вузлах машин та робототехнічних системах.

**Ключові слова:** вібрації, демпфування, TPU, ударний метод, вільні коливання.

## DEVELOPMENT OF A METHOD FOR EVALUATING THE DAMPING PROPERTIES OF 3D-PRINTED TPU LINERS FOR PROSTHESES

**B. Misan, D. Nikitin, I. Nevliudov**

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Science Avenue 14

E-mail: bohdan.misan@nure.ua, dmytro.nikitin@nure.ua, igor.nevliudov@nure.ua

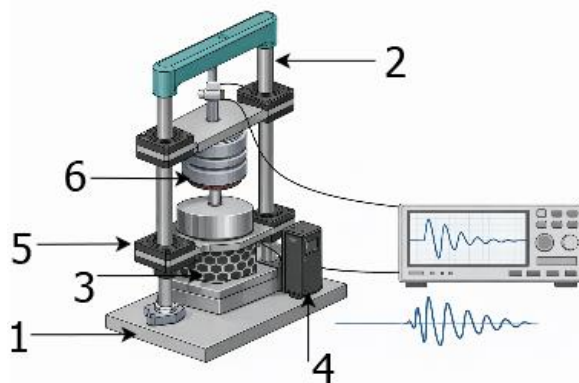
**Annotation:** This paper presents an experimental approach for evaluating the damping properties of additively manufactured TPU pads based on the analysis of free decaying vibrations excited by an impulse load. The proposed impact method allows quantitative assessment of vibration attenuation without the use of complex vibration test rigs and is suitable for rapid comparative analysis of damping elements with different design parameters. The method demonstrates good repeatability and practical applicability for engineering optimization of vibration-damping components used in mechanical and robotic systems.

**Key words:** vibrations, damping, TPU, impact method, free vibrations.

Лайнери з термопластичних поліуретанів є ключовим елементом протезно-ортопедичних систем, оскільки саме вони сприймають динамічні навантаження та мікровібрації, що передаються від протеза до м'яких тканин кукси під час ходьби. Недостатнє гасіння вібрацій у зоні контакту призводить до локальних перевантажень, дискомфорту та зниження толерантності пацієнтів до використання протеза. Адитивні технології дозволяють виготовляти TPU-лайнери з керованою внутрішньою структурою, однак відсутність простих і відтворюваних експериментальних методів кількісної оцінки їх демпфувальних властивостей обмежує можливості раціонального проектування [1]. У зв'язку з цим актуальним є застосування методу вільних затухаючих коливань для оцінки ефективності гасіння вібрацій TPU-лайнерів, що створює основу для їх подальшої інженерної та клінічної оптимізації.

Метою дослідження є експериментальна оцінка демпфувальних властивостей адитивно виготовлених TPU-лайнерів шляхом застосування методу вільних затухаючих коливань з метою визначення впливу матеріальних та структурних параметрів на ефективність гасіння вібрацій.

Об'єктом дослідження є демпфувальні TPU-лайнери, призначені для використання у ножних протезах та виготовлені методом адитивного 3D-друку. Лайнери розглядаються як в'язкопружні елементи, що сприймають ударні та вібраційні навантаження, які передаються від опорної поверхні до м'яких тканин кукси під час ходьби. Для забезпечення коректного порівняльного аналізу всі зразки мали однакові зовнішні геометричні розміри, а варіація властивостей досягається шляхом зміни матеріальних та внутрішніх структурних параметрів [2, 3]. Для кількісної оцінки демпфувальних властивостей TPU-лайнерів застосовано ударний метод, що базується на аналізі вільних затухаючих коливань після імпульсного збудження. Даний підхід є розвитком раніше запропонованого методу тестування амортизувальних вкладишів для ножних протезів і орієнтований на відтворення реальних експлуатаційних умов динамічного навантаження. Експериментальний макет формував механічну систему типу «жорстка опора – TPU-лайнер – інерційне навантаження», де лайнер встановлювався між металевою плитою та інерційним тілом сталої маси. Коливальний процес збуджувався одиночним механічним ударом, після чого система переходила у режим вільних затухаючих коливань, характерних для в'язкопружних матеріалів. Реєстрація коливальної відповіді здійснювалася за допомогою акселерометра, закріпленого на інерційному навантаженні. Сигнал прискорення  $a(t)$  фіксувався у часовій області та піддавався автоматизованій обробці з використанням фільтрації низькочастотної складової, що дозволило зменшити вплив вимірювальних і механічних шумів та виділити інформативну складову затухаючого процесу (рис. 1).

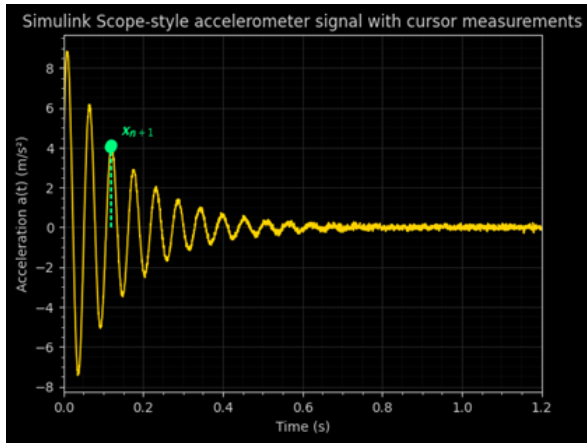


а) б)  
 1 – основа макету; 2 – напрямна для ударного молота; 3 – тестовий зразок; 4 – блок для датчику акселерометра; 5 – ударна площадка; 6 – ударний молот.  
 Рисунок 1 – Принцип дії макету для ударного тестування зразків (а) та розроблений макет за цією схемою (б)

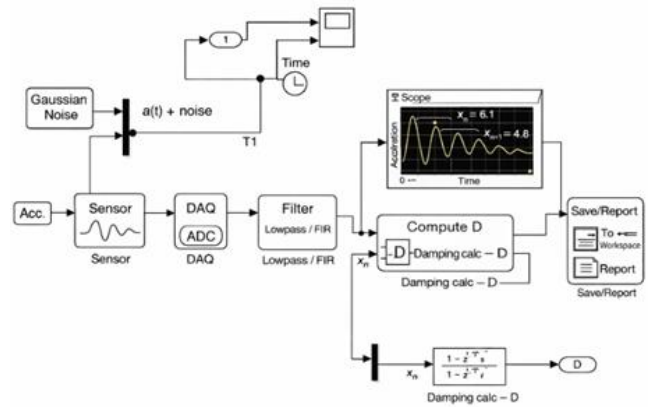
Кількісна оцінка демпфування виконувалася на основі амплітуд двох послідовних піків коливань  $x_n$  та  $x_{n+1}$ . Як узагальнений інженерний показник використовувався відсоток гасіння вібрацій  $D$ , який характеризує відносне зменшення амплітуди коливань за один період. Такий показник є зручним для порівняльного аналізу лайнерів з різними матеріальними та конструктивними параметрами і не потребує складної спектральної обробки сигналу.

$$D = \left(1 - \frac{x_{n+1}}{x_n}\right) \cdot 100\% \quad (1)$$

Експериментальна процедура для кожного зразка включала серію повторних вимірювань з однаковими умовами ударного збудження, після чого визначалися середні значення показників демпфування [4]. Це забезпечило відтворюваність результатів і мінімізувати вплив випадкових похибок (рис. 2).



а)



б)

Рисунок 2 – Обробка сигналу з акселерометра (а) та схема фільтрації сигналу з акселерометру(б)

Отримані результати підтвердили, що метод вільних затухаючих коливань є чутливим до змін демпфувальних властивостей TPU-лайнерів і дозволяє надійно фіксувати вплив матеріальних та структурних параметрів. Запропонований підхід може бути використаний як універсальний інструмент експериментальної оцінки та попередньої оптимізації амортизувальних лайнерів у медико-біомеханічних застосуваннях.

**ВИСНОВКИ.** У роботі обґрунтовано доцільність застосування методу вільних затухаючих коливань після ударного збудження для оцінки демпфувальних властивостей TPU-лайнерів, що використовуються у протезно-ортопедичних системах. Запропонований підхід дозволяє кількісно охарактеризувати здатність лайнерів зменшувати ударні та вібраційні навантаження, які передаються на м'які тканини під час експлуатації протезів. Було також доведено, що використання даного методу забезпечує стабільність та відтворюваність експериментальних результатів за стандартизованих умов навантаження, що створює можливість коректного порівняння лайнерів з різними матеріальними та внутрішніми структурними параметрами. При цьому застосування відсотка гасіння вібрацій як узагальненого показника спрощує інтерпретацію результатів і є зручним для інженерної та прикладної оцінки демпфувальних характеристик. Отримані результати підтверджують придатність методу вільних затухаючих коливань для використання на етапі експериментальної перевірки та попередньої оптимізації TPU-лайнерів, виготовлених методами адитивного виробництва. Запропонований підхід може бути використаний як методична основа для подальших медико-біомеханічних досліджень, спрямованих на підвищення комфорту та безпеки користувачів протезно-ортопедичних виробів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Ahn, S.J., Lee, H. and Cho, K.-J. (2024) "3D printing with a 3D printed digital material filament for programming functional gradients", Nature Communications, 15, 3605. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47480-5>

2. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S. and Filippenko, I. (2020) "Development of an architectural-logical model to automate the management of the process of creating complex cyber-physical industrial systems", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/3(106), pp. 52–58. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.210761>
3. Нікітін, Д. О., Невлюдов, І. Ш., Жарікова, І. В., Бронніков, А. І., & Стрілець, Р. Є. (2025). Розробка методу контролю виробів під час фотополімерного 3D-друку. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1 (136)), 42–54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335706>
4. Rudenko O., Bezsonov O., Plyunin O., Demirskiy O., Serdiuk N., Arsenyeva O., Semenenko O., 2023, Using a Neural Network Approach to Predict Deposits on the Surfaces of Heat Exchange Equipment, *Chemical Engineering Transactions*, 103, 697-702. <https://doi.org/10.3303/CET23103117>
5. Yevsieiev, V. Comparative Analysis of the Characteristics of Mobile Robots and Collaboration Robots Within INDUSTRY 5.0. / V. Yevsieiev, D. Gurin // Sectoral research XXI : characteristics and features : collection of scientific papers "SCIENTIA" with proceedings of the VI International Scientific and Theoretical Conference, September 8, 2023. - Chicago : European Scientific Platform, 2023. - P. 92-94.
6. Attar, H., & et al.. (2022). Zoomorphic Mobile Robot Development for Vertical Movement Based on the Geometrical Family Caterpillar. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, Article ID 3046116, <https://doi.org/10.1155/2022/3046116>.
7. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Demska, N., Kolesnyk, K., & Miliutina, O. (2022, September). Object Recognition for a Humanoid Robot Based on a Microcontroller. In 2022 IEEE XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH) PP. 61-64. DOI: 10.1109/MEMSTECH55132.2022.10002906
8. Невлюдов, І., Євсєєв, В., Максимова, С., & Артюх, Р. (2025). Математична модель адаптивного ієрархічного високорівневого керування триланкового колаборативного робота-маніпулятора. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, (2 (32)), 58-68.
9. Yevsieiev, V. Using the Triangulation Method to Measure the Distance to Objects in the Working Area of a Collaborative Manipulator Robot / V. Yevsieiev, S. Starikova // *Manufacturing & Mechatronic Systems 2024 : Proceedings of VIII st International Conference*, October 25-26, 2024. - Kharkiv, 2024. - P.107-109.
10. Yevsieiev V. Simulation of the operation of the sensor system of a mobile robot in the Autodesk tinkercad environment / V. Yevsieiev, S. Starikova // *Комп'ютерні ігри і мультимедіа як інноваційний підхід до комунікації-2023 : матеріали III Всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів*, Одеса, 28-29 жовтня 2023 р. - Одеса : ОНТУ, 2023 . – С. 21-23.
11. 2. Yevsieiev, V., & Gurin, D. (2023). COMPARATIVE ANALYSIS OF THE BASIC METHODS USED IN INDUSTRY 4.0 AND INDUSTRY 5.0. *Collection of Scientific Papers «ΛΟΓΟΣ»*, (September 29, 2023; Bologna, Italy), 113–115. <https://doi.org/10.36074/logos-29.09.2023.31>
12. Yevsieiev, V., & Gurin, D. (2024). Study of Methods of Dynamic Description of The Environment for Collaborative Robots-Manipulators in the Concepts of Industry 5.0 (Doctoral dissertation, Collection of scientific papers «SCIENTIA»).