

Ефективність енергогенеруючих плиток з різними типами мультиплікаторів

Аргун Щ. В.¹, Гнатів А. В.¹, Сохін П. А.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна
Надійшла: 06.02.2024. Прийнято: 08.06.2024. Опубліковано: 11.06.2024. Відкритий доступ: CC BY 4.0.

Анотація. У статті аналізується ефективність енергогенеруючих плиток, обладнаних мультиплікаторами з косозубими та прямозубими шестернями, в умовах їх використання у пішохідних зонах для генерації електроенергії з механічної енергії кроків. В ході дослідження було розроблено та проведено експериментальні випробування двох типів енергогенеруючих плиток з метою визначення оптимальної конфігурації мультиплікатора для максимізації вироблення електроенергії. Результати експериментів показали, що плитки з прямозубими мультиплікаторами забезпечують вищу ефективність генерації енергії порівняно з плитками з косозубими мультиплікаторами. Окрім того, було виявлено, що величина генерованої енергії залежить не лише від типу мультиплікатора, а й від динаміки кроку та способу взаємодії людини з плиткою. Дослідження вносить вклад у розвиток енергоефективних технологій та відкриває перспективи для подальших розробок у сфері використання альтернативних джерел енергії в урбанізованому середовищі.

Ключові слова: енергогенеруючі плитки, мультиплікатори, косозубі шестерні, прямозубі шестерні, генерація електроенергії, альтернативні джерела енергії.

Вступ

У контексті сучасних викликів зміни клімату та необхідності зменшення вуглецевого сліду глобальна спільнота постійно шукає інноваційні рішення для забезпечення сталого розвитку. Одним із напрямів, що викликає значний інтерес, є розробка та впровадження технологій, здатних перетворювати механічну енергію людини на електричну. Використання енергогенеруючих плиток у пішохідних зонах може стати одним з рішень цієї проблеми, пропонуючи альтернативний спосіб виробництва відновлюваної енергії з мінімальними витратами та впливом на довкілля. Такі технології мають потенціал не лише забезпечити додаткове джерело електроенергії для міських потреб, а й сприяти розвитку енергоефективних рішень для громадських просторів. Впровадження енергогенеруючих плиток стимулює подальші дослідження та розробки в області екологічних технологій, відкриваючи нові можливості для підвищення стійкості міських екосистем і покращення якості життя мешканців. Отже, розробка оп-

тимальних конструкцій та механізмів для ефективного перетворення механічної енергії на електричну є актуальним завданням сучасної наукової спільноти.

Аналіз публікацій

Виклики, пов'язані з потребою в стійких джерелах енергії та зниженням залежності від викопних ресурсів, акцентують увагу на необхідності впровадження електротранспорту [1,2] та розробки інноваційних пристроїв для генерації електричного струму. Ці пристрої мають здатність перетворювати енергію, отриману з природних джерел, таких як сонячне світло, вітер та кінетика людського руху, на електричну енергію, що є ключем до підвищення енергоефективності [3].

Наголос на значенні інновацій, які трансформують міську інфраструктуру, сприяючи екологічно чистому розвитку, зробили автори роботи [4]. Вони досліджують, як новітні технічні рішення можуть оптимізувати повсякденне життя в містах.

Загалом, огляд сучасних наукових робіт

вказує на постійне зростання інтересу до використання інноваційних технологій для розвитку транспортної інфраструктури на принципах сталості. Зокрема, застосування енергогенеруючих плиток, які перетворюють кінетичну енергію пересування людей у міському середовищі на електрику, відкриває передові перспективи для забезпечення міст додатковими джерелами відновлюваної енергії. Дослідження [5] демонструє можливості для підвищення продуктивності таких плиток шляхом удосконалення їх конструкції.

Інноваційні підходи, як-от розробка плиток [6], що активно збирають кінетичну енергію за допомогою електромагнітних технологій для перетворення рухів людей на електричний струм, та експерименти з п'єзоелектричними технологіями [7–10], підкреслюють величезний потенціал інтеграції таких систем у повсякденне життя. Також, дослідження [11,12] вивчають використання п'єзоелектричних плиток у громадських приміщеннях та їх вплив на енергозбереження в будівлях у Малайзії.

Розробка [13], що дозволяє перетворювати механічний тиск на електричну енергію, демонструє потенціал п'єзоелементів у публічних просторах для збільшення обсягів вироблення чистої енергії.

Публічно доступні дослідження [14,15], що показують успішні приклади впровадження таких технологій, стимулюють нові наукові розробки та інновації у цій сфері. Огляд доступних технологій та комерційних пристроїв для збору енергії відкриває широкі можливості для подальших інновацій в області сталого енергопостачання.

Розробка інтегрованих систем для міського транспорту, що включають енергогенеруючі плитки [16], та аналіз економічно ефективних рішень для електричних плиток, чутливих до незначних вібрацій, підтверджують можливість широкого застосування цих технологій в різних середовищах і під різним навантаженням.

Використання зеленої енергії для освітлення велодоріжок [17] та інноваційні підходи до збору енергії в місцях з високою концентрацією пішохідного трафіку, як описано у розробці [18], підтверджують високу ефективність таких систем у міському середовищі. Ці технології не лише сприяють збільшенню виробництва відновлюваної енергії, але й відіграють важливу роль у формуванні

сталого міського простору.

Застосування п'єзоелектричних плиток як елемента сталого дизайну, що сприяє зменшенню споживання енергії [19], вказує на ключову роль сучасних технологій у процесах екологічного будівництва та архітектури. Це дозволяє не тільки оптимізувати використання енергії, але й значно знизити вуглецевий вплив міської інфраструктури.

Огляд наукових робіт свідчить про непересічний інтерес до використання енергогенеруючих плиток у якості інструменту для вирішення екологічних викликів, покращення стійкості міської інфраструктури та забезпечення ефективної альтернативи традиційним джерелам енергії. Продовження розвитку та інтеграція таких технологій є важливим кроком до досягнення цілей сталого розвитку, підвищення енергонезалежності міст та поліпшення якості життя їх мешканців.

Таким чином, енергогенеруючі плитки являють собою інноваційне рішення, яке дозволяє перетворювати енергію руху в електричний струм, відкриваючи шлях для їх використання в місцях з високою концентрацією людей. Різноманітність типів таких плиток, включаючи п'єзоелектричні та електромагнітні, забезпечує гнучкість у виборі найбільш підходящого варіанту для конкретних умов експлуатації. Важливим аспектом є врахування всіх переваг та обмежень кожного типу плиток для досягнення максимальної ефективності та економічної вигоди від їх впровадження.

Мета та постановка задачі

Мета дослідження полягає у порівняльній оцінці ефективності енергогенеруючих плиток з мультиплікаторами різних конструктивних типів для визначення оптимальної конструкції, яка дозволить отримувати максимум електроенергії в умовах їх експлуатації у пішохідних зонах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробка та створення експериментальних зразків енергогенеруючих плиток з двома типами мультиплікаторів: косозубим та прямозубим;

- проведення серії експериментальних випробувань для оцінки ефективності генерації електроенергії обома типами плиток за однакових умов використання;

– аналіз впливу конструктивних особливостей мультиплікаторів на кількість генерованої електроенергії, включаючи оцінку залежності від динаміки кроку та способу взаємодії людини з плиткою;

– вивчення потенціалу застосування розроблених енергогенеруючих плиток в урбанізованому середовищі для підвищення стійкості міських екосистем та ефективного використання міського простору;

– розробка рекомендацій щодо впровадження ефективних енергогенеруючих плиток у міські інфраструктурні проекти на основі отриманих результатів дослідження.

Енергогенеруюча плитка із мультиплікатором на основі косозубих шестерень

Принцип роботи енергогенеруючої плитки (ЕП) полягає у наступному. Людина наступає на ЕП, викликаючи механічний рух в шестернях мультиплікатора. Механічний рух перетворюється на обертальний рух, який передається кроковим двигунам, підключеним до

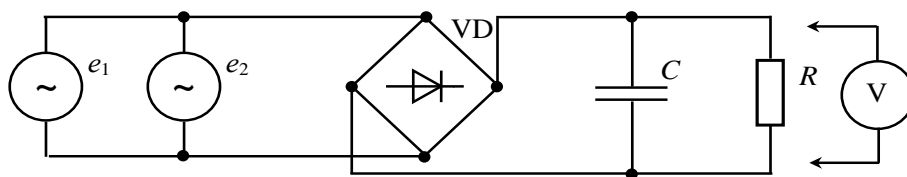


Рис. 1. Схема електрична енергогенеруючої плитки

Енергогенеруюча плитка включає в себе електромашинний вузол із двома кроковими двигунами (КД), які підключені паралельно відносно електричного навантаження, а отже, функціонують за схемою паралельного з'єднання на однакове навантаження.

У ході досліджень на енергогенеруючій плитці особлива увага зосереджується на аналізі електричних параметрів, генерованих кроковими двигунами (КД), рис. 2. Вимірювання напруги, яка з'являється на активному опорі R із статорної обмотки КД, дає змогу детально розглянути процеси всередині системи. Вивчення змін напруги у часі, $u=f(t)$, за заданого опору навантаження, дозволяє використовувати закон Ома для визначення як змінюється згенерована потужність з часом, $P=f(t)$, що є вирішальним для оцінки ефективності генерації енергії [20]:

$$u(t) = R \cdot i(t), \quad (1)$$

плитки. При цьому крокові двигуни працюють як генератори, перетворюючи механічну енергію на електричну.

Ця ЕП представляє собою інноваційне рішення для інтеграції різних електромеханічних модулів з метою вироблення електричного струму. Ці модулі можуть бути укомплектовані набором крокових моторів або об'єднаними у єдиний блок з декількома електромоторами. Ключовим аспектом дослідження є аналіз впливу кількості електромоторів в такому блоку на обсяги виробленої енергії.

Електрична схема енергогенеруючої плитки, яка ілюструє її конструкцію та принцип роботи, представлена на рис. 1. На основі цієї схеми було розроблено експериментальний прототип, показаний на рис. 2, що забезпечило можливість проведення практичних випробувань і експериментів. Це дозволило визначити найбільш ефективну конфігурацію електромеханічних елементів для оптимізації вироблення електроенергії.

де $u(t)$ – змінна напруга, В; R – активний опір навантаження, Ом; $i(t)$ – змінний струм, А.

Миттєва потужність P , що виділяється на опорі навантаження, може бути виражена через величини напруги та струму:

$$P = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R}; \quad (2)$$

$$u = u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u);$$

$$i = i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

де P – миттєва потужність, Вт.

Відомо, що для резистора $\psi_u = \psi_i$, тоді для потужності p отримаємо:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = U_m I_m \sin^2(\omega t + \psi_u). \quad (3)$$

З рівняння (3) видно, що миттєва потужність завжди більше нуля і змінюється у часі.

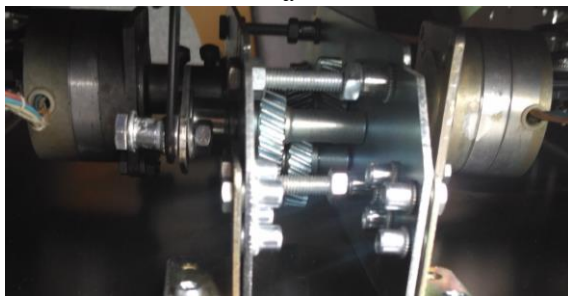
Оскільки миттєва потужність варіюється, для аналізу ефективності системи часто використовується середня за період T потужність, яка визначається шляхом інтегрування функції $P=f(t)$ за часом:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{U_m I_m}{T} \int_0^T \sin^2(\omega t + \psi_u) dt. \quad (4)$$

Інтегруючи отримані графіки $p = f(t)$, можна визначити обсяг виробленої потужності. На рис. 2 представлено експериментальний прототип ЕП. Цей зразок забезпечує можливість детального аналізу функціонування крокових двигунів, як окремо, так і у груповому режимі на спільне навантаження. Дизайнерські рішення та можливість проведення всебічних тестів кожного двигуна індивідуально або в поєднанні з іншими, розкривають великий потенціал для дослідження та вдосконалення енергогенеруючих систем. Це допомагає покращити їх загальну продуктивність і виробничі показники.



а



б

Рис. 2. Енергогенеруюча плата з косозубим типом зубчатих коліс у мультиплікаторі: а – зовнішній вигляд; б – електромашинний вузол

Експериментальні дослідження електромашинного вузла ЕП

Експериментальні дослідження електромашинного вузла енергогенеруючої плати були виконані з метою оцінки ефективності використання одного або двох крокових двигунів (КД) у її конструкції. Основна мета цих

експериментів полягає у визначенні доцільності застосування двох КД у електромашинному вузлі та оцінці обсягів електроенергії, згенерованої ЕП при одноразовому натисканні на неї.

Експериментальні умови включали в себе наступні пункти:

- дослідження роботи електромашинного вузла ЕП при підключенні одного крокового двигуна;

- дослідження роботи електромашинного вузла ЕП при одночасному підключенні двох крокових двигунів.

У відповідності до електричної схеми, рис. 1, в обох випадках було визначено опір навантаження $R=18$ Ом. Це дозволило здійснювати точні вимірювання напруги на опорі навантаження за допомогою цифрового вольтметра V та розрахунок струму навантаження відповідно до закону Ома. На основі отриманих даних про напругу та струм проводився розрахунок потужності, що виділяється на опорі навантаження.

Для підвищення точності результатів, експерименти були розділені на 100 серій, кожна з яких включала 30 кроків на ЕП. У дослідженні брали участь 10 осіб з масою тіла від 50 до 90 кг. Темп та швидкість кроків були встановлені таким чином, щоб відповідати звичайному темпу ходьби зі швидкістю 5 км/год.

В ході експерименту кожен крок генерував два імпульси напруги: перший імпульс фіксувався під час переміщення верхньої кришки системи генерації електроенергії вниз під впливом зовнішньої ваги, а другий – коли верхня кришка поверталася вгору під дією пружин, до яких вона була прикріплена. На рис. 3 показано хід експериментальних досліджень.

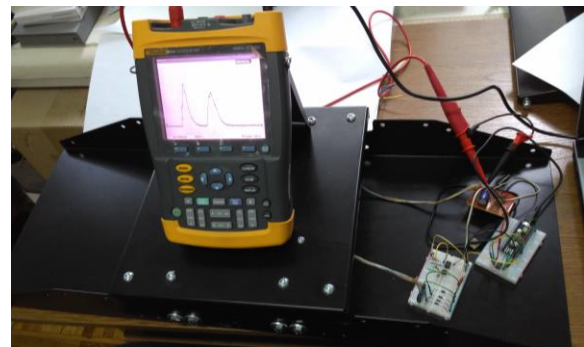


Рис. 3. Хід експериментальних досліджень енергогенеруючої плати

Розрахунок згенерованої потужності проводився шляхом інтегрування вимірних осцилограм напруги як функції від часу, $u=f(t)$, що дозволило отримати графік згенерованої потужності в залежності від часу, відповідно до виразів (2) та (4).

Інтегрування осцилограм проведено у відповідності до методу трапецій [5]:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{2} \times \left(f(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(x_n) \right), \quad (5)$$

де $[a; b]$ – відрізок (межі) інтегрування; $h = \frac{a-b}{n}$ – крок розбиття; $i = 0, 1, \dots, n$; $f(x)$ – значення підінтегральної функції.

Вираз (5), може бути записаний у вигляді:

$$P = \int_0^T p(t)dt \approx \frac{h}{2} \times \left(p(t_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} p(t_i) + p(t_n) \right). \quad (6)$$

У відповідності до виразу (6) проведемо інтегрування вимірних осцилограм $u = f(t)$.

На рис. 4 представлено отриману графічну залежність $p = f(t)$ при одному кроці на ЕП. Графіки, рис. 4(а, в) відповідають руху пішоходів у прямому напрямку, графіки рис. 4(б, г) – у зворотному напрямку.

На рис. 5 представлено отриману графічну залежність $p = f(t)$ при 30 кроках на ЕП з косозубим типом зубчастих коліс.

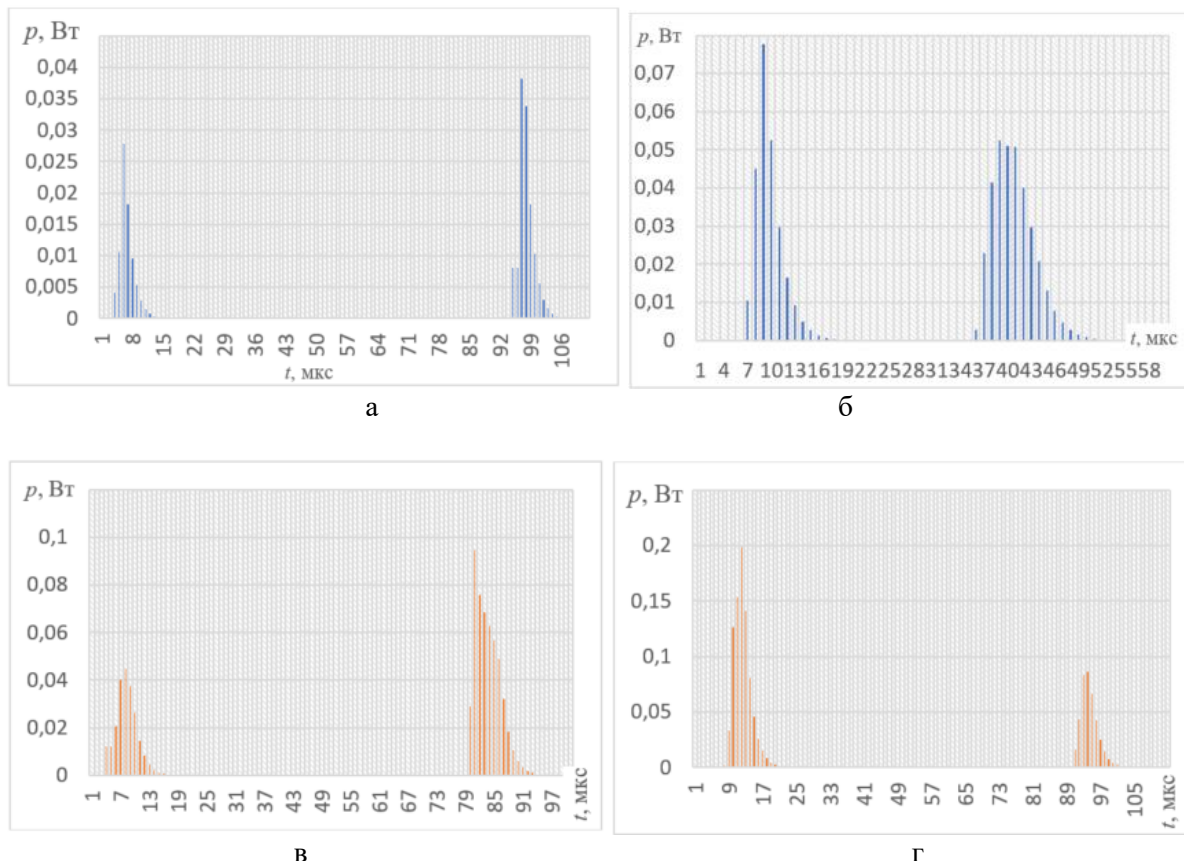
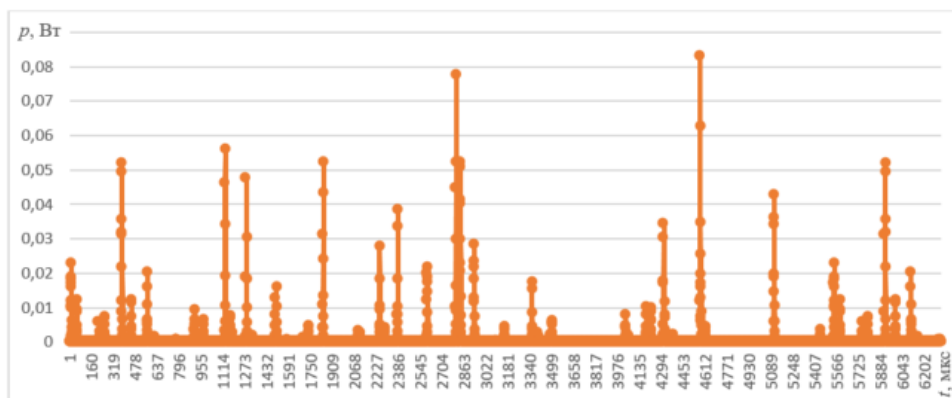
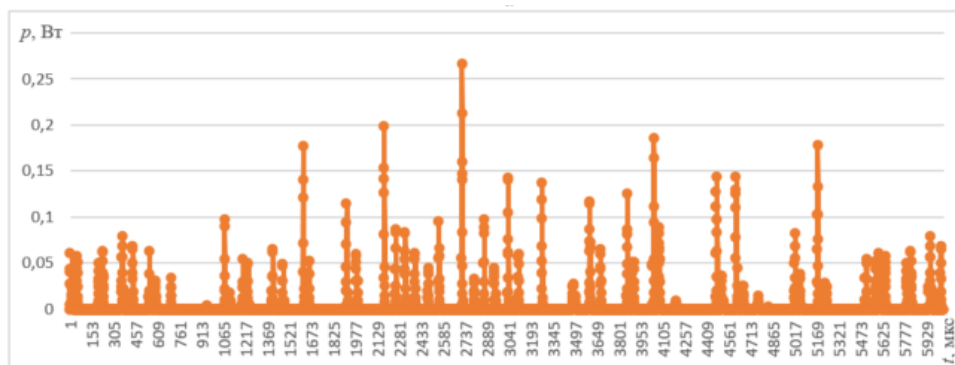


Рис. 4. Залежність генерованої потужності від часу при одному кроці на ЕП: а, б – при підключенні одного КД; в, г – при підключенні двох КД



а



б

Рис. 5. Залежність згенерованої потужності від часу при тридцяти кроках на ЕП з косозубим типом зубчастих коліс: а – при підключенні одного КД; б – при підключенні двох КД

Таблиця 1 – Значення згенерованої потужності ЕП та мультиплікатором з косозубим типом зубчастих коліс

| | Серії по 30 кроків | | | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Прямий напрямок | | | | | | | | | | |
| 1 КД, Вт | 10,59 | 9,96 | 10,88 | 9,13 | 9,32 | 10,66 | 11,30 | 11,91 | 10,13 | 10,61 |
| 2 КД, Вт | 22,26 | 23,59 | 22,90 | 22,88 | 20,16 | 23,12 | 20,38 | 21,87 | 22,54 | 23,29 |
| Коефіцієнт посилення, k | 2,10 | 2,37 | 2,10 | 2,50 | 2,16 | 2,17 | 1,80 | 1,84 | 2,23 | 2,19 |
| Зворотній напрямок | | | | | | | | | | |
| 1 КД, Вт | 7,24 | 6,93 | 7,08 | 7,16 | 6,30 | 6,73 | 8,48 | 6,62 | 7,40 | 7,06 |
| 2 КД, Вт | 12,88 | 11,86 | 12,21 | 14,28 | 12,14 | 12,07 | 16,26 | 13,03 | 13,92 | 12,58 |
| Коефіцієнт посилення, k | 1,78 | 1,71 | 1,72 | 2,00 | 1,93 | 1,79 | 1,92 | 1,97 | 1,88 | 1,78 |

Значення генерованої потужності, які були розраховані на основі обробки даних експериментальних досліджень згідно з формулою (6) для перших десяти серій по 30 кроків на ЕП, представлено в таблиці 1. В таблиці використовується коефіцієнт посилення k , який ілюструє, у скільки разів потужність, генерована ЕП з двома підключеними кроковими двигунами, перевищує потужність з

одним двигуном.

Щоб експеримент максимально відтворював реальні умови, вплив на енергогенеруючій плитці здійснюють як у прямому, так і в оберненому напрямках. Це обумовлено рухом пішоходів по тротуару, які можуть ступати на плитку з різних боків, що для зручності умовно називаємо прямим і оберненим напрямками.

Аналіз ефективності енергогенеруючої плитки із застосуванням мультиплікатора з прямозубими шестернями

Аналіз роботи енергогенеруючої плитки з мультиплікатором, що використовує косозубі зубчаті колеса, показав відносно низьку продуктивність у виробництві електроенергії. Попереднє дослідження натякає на те, що причиною зниження продуктивності може бути саме застосування косозубого з'єднання в механізмі мультиплікатора. Тому була розроблена нова версія мультиплікатора з прямозубими зубчатими колесами для покращення працездатності ЕП і збільшення її ефективності у виробництві електричного струму. За новою конструкцією ЕП та враховуючи проєктований мультиплікатор з прямозубими зубчатими колесами, було сконструйовано експериментальний зразок ЕП. Зовнішній вигляд цієї енергогенеруючої плитки та конструкція її електромашинного вузла зображені на рис. 6.



а



б

Рис. 6. Енергогенеруюча плитка: а – зовнішній вид; б – мультиплікатор з прямозубими шестернями

Конструкція розробленої енергогенеруючої плитки дозволяє дослідити роботу кожного крокового мотора як окремо, так і їх колективну роботу в паралельній схемі для виробництва електроенергії. Мета цього експерименту полягає в оцінці ефективності використання двох крокових двигунів як генераторів

електроенергії у складі електромашинного вузла та визначенні кількості енергії, генерованої енергогенеруючою плиткою з прямозубим мультиплікатором при одному обороті.

Основні цілі та параметри експерименту охоплюють:

- оцінку можливості виробництва електроенергії енергогенеруючою плиткою з прямозубим мультиплікатором при включенні одного крокового двигуна в електромашинний вузол;

- вивчення потенціалу генерації електроенергії плиткою при паралельній роботі двох крокових двигунів;

- визначення кількості електроенергії, виробленої плиткою з прямозубим мультиплікатором при обороті в обох напрямках.

Опір навантаження R (рис. 1), становить 18 Ом. Використання вольтметра V для вимірювання напруги на шунті R дозволяє розрахувати струм навантаження i , відповідно, потужність, що виділяється на цьому опорі.

Умови проведення експерименту з прямозубим мультиплікатором відповідають умовам, що були застосовані при дослідженні плитки з косозубим зубчатим з'єднанням, що забезпечує однорідні умови для порівняльного аналізу результатів.

На рис. 7 представлені графіки тиску p від часу t для одного кроку на плитці, активованій одним і двома кроковими двигунами. Графіки, позначені як рис. 7,а та 7,в, відображають рух у прямому напрямку, а рис. 7,б та 7,г – у зворотному.

Рис. 8 демонструє графічну залежність $p = f(t)$ за 30 кроків на плитці з прямозубим мультиплікатором. Кількість електроенергії, генерованої на шунті плитки, розраховується згідно з формулою (6) для десяти експериментальних серій по 30 кроків кожна. Результати розрахунків зведено в таблиці 2.

Обробка даних, отриманих під час експериментального аналізу, показала, що енергогенеруюча плитка генерує різні кількості електроенергії, коли одні й ті ж люди пересуваються по ній вперед і назад. Зміна мультиплікатора з косозубих зубчатих коліс на прямозубі привела до очікуваного підвищення виробленої потужності. Цей результат вказує на важливість конструктивних характеристик мультиплікатора в процесі оптимізації виробництва електроенергії енергогенеруючою плиткою.

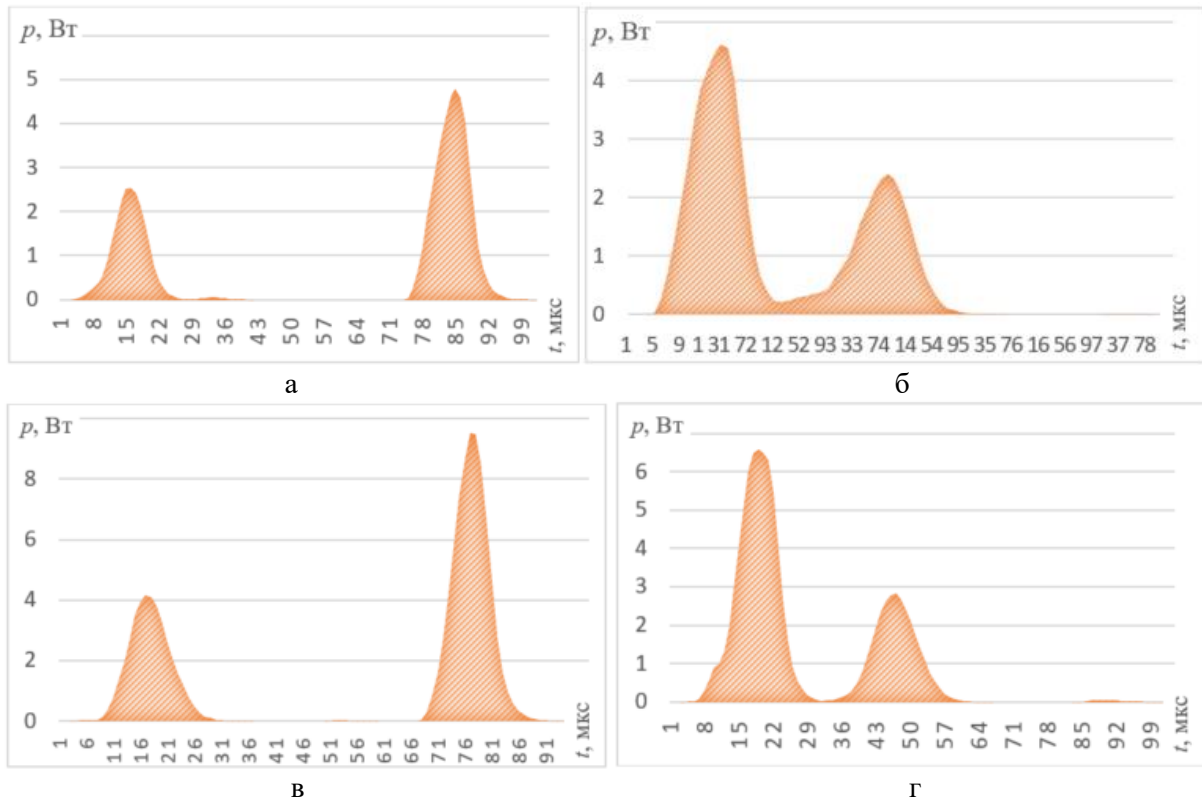


Рис. 7. Графік залежності електричної потужності, згенерованої енергогенеруючою плиткою, від часу при реалізації одного кроку: а, б – при підключенні одного КД; в, г – при підключенні двох КД

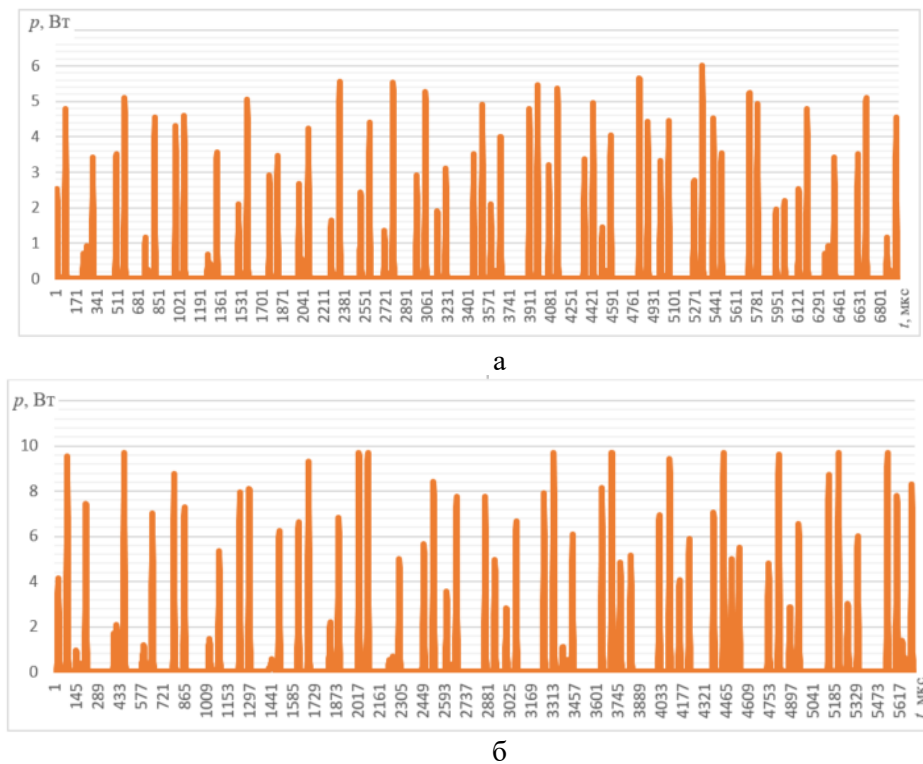


Рис. 8. Графічна залежність електричної потужності, згенерованої ЕП з мультиплікатором прямозубого типу зубчастих коліс, від часу за 30 кроків: а – при роботі з одним кроковим двигуном (КД); б – при паралельному підключенні двох КД

Таблиця 2 – Значення генерованої потужності ЕП та мультиплікатором з прямозубим типом зубчастих коліс

| | Серії по 30 кроків | | | | | | | | | |
|---------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Прямий напрямок | | | | | | | | | | |
| 1 КД, Вт | 18,92 | 19,15 | 21,76 | 19,03 | 19,82 | 20,12 | 20,54 | 19,85 | 18,76 | 20,02 |
| 2 КД, Вт | 31,80 | 33,23 | 32,57 | 32,26 | 32,00 | 32,56 | 30,88 | 31,24 | 30,88 | 33,27 |
| Коефіцієнт посилення, k | 1,68 | 1,74 | 1,50 | 1,70 | 1,61 | 1,62 | 1,50 | 1,57 | 1,65 | 1,66 |
| Зворотній напрямок | | | | | | | | | | |
| 1 КД, Вт | 12,48 | 15,06 | 12,88 | 13,50 | 14,00 | 14,02 | 14,87 | 14,40 | 15,11 | 13,32 |
| 2 КД, Вт | 20,06 | 16,96 | 19,69 | 19,05 | 18,68 | 18,86 | 21,68 | 20,05 | 19,89 | 19,97 |
| Коефіцієнт посилення, k | 1,61 | 1,13 | 1,53 | 1,41 | 1,33 | 1,34 | 1,46 | 1,39 | 1,32 | 1,50 |

Аналіз результатів, отриманих під час експериментів з енергогенеруючою плиткою при використанні мультиплікаторів різних типів, дозволяє сформулювати декілька висновків. Спостереження показали, що кількість виробленої енергії змінюється залежно від того, активовано два крокових двигуни чи лише один. Конкретно, при прямому русі зміни становлять: 47% з косозубим мультиплікатором та 62% з прямозубим мультиплікатором.

При зворотному русі ці відсотки становлять 55% і 72% відповідно.

Використання двох крокових двигунів значно збільшує потенціал енергогенерації енергогенеруючої плитки. Різниця в ефективності генерації енергії при русі вперед і назад зумовлена конструктивними особливостями плитки. Оскільки передавальний механізм знаходиться не по центру відносно поверхні на яку відбувається натиск, сила впливу на кроковий двигун варіюється залежно від місця тиску на платформу, тобто залежить від того, в яке місце людина наступить. При цьому, рух вперед сприяє більшій генерації електроенергії, а при русі назад – спостерігається зменшення вироблення енергії, що можна пояснити особливостями конструкції плитки та динамікою руху людини.

Експерименти також показали, що кількість генерованої енергії з одного кроку залежить не стільки від ваги особи, скільки від швидкості і енергії кроку. Швидкість кроку та його сила (інтенсивність натискання на ЕП) сприяє виробленню більшої кількості

енергії. Цей фактор важливо враховувати при виборі місця встановлення плитки, адже правильне розташування в місцях з інтенсивним потоком пішоходів може суттєво збільшити ефективність енергогенерації.

Отже, знаючи потенціал енергогенеруючої плитки та її характеристики, можливо прорахувати очікувану кількість генерованої електроенергії в залежності від інтенсивності руху. Таке розуміння дозволяє оцінити ефективність використання плитки в конкретних локаціях, наприклад, на зупинках громадського транспорту або як сходинки, визначити кількість необхідних плиток для повного забезпечення енергією окремих елементів міської інфраструктури, як-от освітлення зупинки.

Висновки

Дослідження ефективності енергогенеруючих плиток з різними типами мультиплікаторів – косозубими та прямозубими шестернями – дозволило отримати наступні висновки:

- плитки з прямозубими мультиплікаторами продемонстрували вищу ефективність генерації електроенергії порівняно з плитками, обладнаними косозубими мультиплікаторами. Це підтверджує припущення про переваги прямозубих шестерень з точки зору мінімізації втрат енергії під час передачі крутного моменту;

- ефективність перетворення механічної енергії на електричну залежить не лише від типу мультиплікатора, але й від характеристик руху людини – швидкості та сили кроку.

Оптимізація конструкції плиток під типові параметри руху може забезпечити додаткове збільшення кількості генерованої енергії;

– встановлено, що плитки з мультиплікаторами обох типів є перспективними для використання в умовах великих міських агломерацій, де щоденно фіксується великий потік пішоходів. Вони можуть стати значущим джерелом відновлюваної енергії для потреб міської інфраструктури;

– реалізація енергогенеруючих плиток у міському середовищі вимагає детального аналізу потенційних місць їх розміщення, врахування специфіки пішохідних потоків та інтеграції з іншими елементами міської інфраструктури з метою максимізації ефективності використання генерованої енергії;

– результати дослідження вказують на необхідність подальших розробок в області конструктивного вдосконалення енергогенеруючих плиток та мультиплікаторів, зокрема, щодо підвищення їх довговічності, зниження вартості виготовлення та експлуатації, а також розробки стандартів для широкого впровадження цієї технології.

Дослідження підкреслило значний потенціал використання енергогенеруючих плиток з оптимізованими мультиплікаторами як ефективного джерела відновлюваної енергії для міських умов, сприяючи сталому розвитку міських територій та покращенню екологічного стану довкілля.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Arhun, S., Borodenko, Y., Hnatov, A., Popova, A., Hnatova, H., Kunicina, N., Ziravecka, A., Zabasta, A., & Ribickis, L. (2020). Choice of Parameters for the Electrodrive Diagnostic System of Hybrid Vehicle Traction. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 57(4), 3–11. <https://doi.org/10.2478/lpts-2020-0017>
2. Van Mierlo, J., Maggetto, G., & Lataire, P. (2006). Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles. *Energy Conversion and Management*, 47(17), 2748-2760. doi: 10.1016/j.enconman.2006.02.004
3. Arhun, S., Hnatov, A., Hnatova, H., Patlins, A., & Kunicina, N. (2020). Problems that have arisen in universities in connection with COVID-19 on the example of the Double Degree Master's Program "Electric Vehicles and Energy-Saving Technologies." 1–6. <https://doi.org/10.1109/RTUCON51174.2020.9316601>
4. Galkin, A., Obolentseva, L., Balandina, I., Kush, E., Karpenko, V., & Bajdor, P. (2019). Last-mile delivery for consumer driven logistics. *Transportation Research Procedia*, 39, 74–83.
5. Patlins, A., Hnatov, A., Arhun, S. C., Bogdan, D., & Dzyubenko, O. (2019). Development of an energy generating platform for converting kinetic energy into electrical energy using the kinematic synthesis of a three-stage multiplier. *Transport Means 2019: Proceedings of the 23rd International Scientific Conference, 2019-October*, 403–408.
6. Jintanawan, T., Phanomchoeng, G., Suwankawin, S., Kreepoke, P., Chetchatree, P., & U-viengchai, C. (2020). Design of kinetic-energy harvesting floors. *Energies*, 13(20), 5419.
7. Moussa, R. R. (2020). *Installing piezoelectric tiles in children outdoor playing areas to create clean & healthy environment; case study of el-shams sporting club, Cairo_Egypt*.
8. Ismail, N. I. N., Abd Rahman, N. A., Yaccob, A. A., Muhamad, N. S., & Jamaludin, S. U. (2020). Feasibility study on potential of pedestrians' footstep based energy harvesting (case study: UiTM Pulau Pinang). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 849(1), 012056.
9. Solban, M. M., & Moussa, R. R. (2019). Piezoelectric Tiles Is a Sustainable Approach for Designing Interior Spaces and Creating Self-Sustain Projects. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 397(1), 012020.
10. Akib, T. B. A., Mehedi, H., & Nazmuschayadat, M. (2019). Electrical energy harvesting from the foot stress on foot overbridge using piezoelectric tile. *2019 1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology (ICASERT)*, 1–5.
11. Moussa, R., & Solban, M. (2021). Investigating the potential of using human movements in energy harvesting by installing piezoelectric tiles in Egyptian public facilities. *Journal of Engineering Research*, 9(4A). doi:10.36909/jer.9517
12. Puteri Aisyah, M. S. (2022). *Piezoelectric energy floor tiles performance and effectiveness as building energy conservation measures for different types of buildings in Malaysia*. UTAR.
13. Ruman, M. R., Das, M., & Mahmud, S. I. (2019). Human footsteps for energy generation by using piezoelectric tiles. *2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), 1*, 1–6. DOI:10.1109/i-PACT44901.2019.8960068
14. *These high-tech tiles generate energy from our footsteps—And they could change how we power our cities.* (2023, October 6). Yahoo News. <https://news.yahoo.com/high-tech-tiles-generate-energy-161737905.html>

15. Hawkins, J. (2022, July 13). This company created floor tiles that convert footsteps into energy. *BGR*. <https://bgr.com/science/this-company-created-floor-tiles-that-convert-footsteps-into-energy/>
16. Hnatov, A., Patlins, A., Arhun, S., Kunicina, N., Hnatova, H., Ulianets, O., & Romanovs, A. (2020). Development of a unified energy-efficient system for urban transport. *2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon)*, 248–253. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236606>
17. Patlins, A., Hnatov, A., & Arhun, S. (2018). *Using of green energy from sustainable pavement plates for lighting bikeways*. *2018-Octob-3–5*, 574–579. <https://ortus.rtu.lv/science/en/publications/27845>
18. Patil, S., Parsewar, S., Pranav, B., Aade, S., & Hanmante, S. (2019). Energy generation and implementation of power floor (pavegen). *Energy*, 6(04).
19. Mustafa, S. F. (2021). Applying Piezoelectric Tiles as a Sustainable Design Solution to Reduce Energy Consumption in Egypt. *International Journal of Environmental Sustainability*, 17(2). DOI:10.18848/2325-1077/CGP/v17i02/33-46
20. Patlins, A., Hnatov, A., Arhun, S., & Dzyubenko, O. (2019). Design and research of constructive features of paving slabs for power generation by pedestrians. *Transportation Research Procedia*, 40, 434–441. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.063>

Аргун Щасяна Валіковна¹, д.т.н., проф. каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0993780451, shasyana@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

Гнатів Андрій Вікторович¹, д.т.н., проф., завідувач каф. автомобільної електроніки, тел. +38 0667430887, kalifus76@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>

Сохін Павло Андрійович¹, аспірант кафедри автомобільної електроніки, тел. +38 0633473433, info@elektrocar.com.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2823-2239>

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Efficiency of energy-generating tiles with different types of multipliers

Abstract. Problem. *With the urgent need for sustainable and renewable energy solutions, the integration of energy-harvesting technologies in urban infrastructure has become a focal point of innovation. Energy-generating tiles, transforming*

pedestrian movement into electricity, offer a viable path forward. Yet, their efficiency hinges on the internal design, particularly the type of multipliers used. Goal. *This study aims to assess and compare the efficiency of energy-generating tiles equipped with helical and straight-cut gear multipliers, to identify the optimal design for maximizing energy conversion in urban environments. Methodology.* *An experimental setup was created to test prototypes of the energy-generating tiles under controlled foot traffic conditions. The study measured and analyzed the electrical output and efficiency of tiles with both types of gear multipliers, simulating real pedestrian traffic scenarios. Results.* *Energy-generating tiles featuring straight-cut gears outperformed those with helical gears in energy output and conversion efficiency. The research also illuminated the influence of pedestrian dynamics, like step force and frequency, on tile performance. Originality.* *This research advances renewable energy technology by offering a comprehensive analysis of energy-generating tile efficiency with different gear multipliers. It introduces an innovative method for evaluating tile performance, underscoring the significance of gear design in energy conversion. Practical value.* *The findings have considerable implications for sustainable urban development, suggesting that implementing energy-generating tiles in areas with high foot traffic could significantly enhance urban renewable energy sources. This study not only guides the design of more efficient energy-harvesting tiles but also encourages their broader adoption, supporting urban sustainability goals and the reduction of carbon emissions.*

Key words: *energy-generating tiles, multipliers, helical gears, spur gears, electricity generation, alternative energy sources.*

Shchasyana Arhun¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 0993780451, shasyana@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-8661>

Andrii Hnatov¹, professor, Doct. of Science, Head of Vehicle Electronics Department, tel. +38 0667430887, kalifus76@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0932-8849>

Pavlo Sokhin¹, postgraduate, Vehicle Electronics Department, e-mail: info@elektrocar.com.ua, tel. +38 0633473433,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2823-2239>

¹Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.