

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-63-26>

УДК 620.91

Нестерчук Богдан Олександрович, бакалавр**Федосов Сергій Анатолійович**, д.ф.-м.н., професор<https://orcid.org/0000-0003-3457-8911>**Ящинський Леонід Васильович**, к.ф.-м.н., доцент<https://orcid.org/0000-0003-3018-3904>

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

ВІБРОВОЛЬТАІЧНА ПЛАТФОРМА ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Нестерчук Б.О., Федосов С.А., Ящинський Л.В. Вібровольтаїчна платформа для генерації електричної енергії. Однією з перспективних галузей в альтернативній енергетиці є вібраційна енергетика. Для генерації електричної енергії сучасна віброенергетика використовує три основні фізичні принципи: п'єзоелектричний ефект, електромагнітна індукція і трибоелектричний ефект. Динамічні вібровольтаїчні платформи представляють окремий клас пристроїв, які функціонують завдяки встановленню п'єзоелектричних або кінетичних генераторів під поверхнею рухомих або нерухомих частин систем. При тиску на платформу чи її коливанні, ці генератори створюють електричний струм. У результаті відбувається перетворення механічної енергії на електричну. Нами було розроблено, спроектовано та виготовлено вібровольтаїчну платформу, яка ефективно перетворює кінетичну енергію поступального (коливального) руху в електричну енергію за допомогою оптимізованої системи індукційних генераторів. Запропоноване комплексне вирішення для накопичення отриманої енергії у високоефективних літій-іонних батареях. Експериментально досліджено ефективність роботи прототипу при різних режимах навантаження. Встановлено оптимальне число генераторів, що дозволяє моделювати їх з'єднання попарно послідовно для збільшення вихідної напруги та для збільшення сили вихідного струму використовуючи типові стандартні контролери заряду з вхідною напругою 5 В. Сконструйована вібровольтаїчна установка може заряджати зовнішню батарею акумуляторів в активному режимі при якому середній приріст значення енергії за одне натискання платформи становить 84 мДж, а значення середньої енергії активного заряджання за 1 с складає 252 мДж. Величина середнього значення ККД пристрою при заряджанні зовнішньої батареї становить 65 %. Для збільшення ККД необхідно апаратно зменшити пульсації струму, які виникають під час генерації.

Ключові слова: вібровольтаїчний пристрій, альтернативні джерела, енергія активного заряджання, генерація електроенергії.

Nesterchuk B., Fedosov S., Yashchynskyy L. Vibrovoltaiic platform for electrical energy generation. One of the promising areas in alternative energy is vibration energy. To generate electrical energy, modern vibration energy uses three basic physical principles: the piezoelectric effect, electromagnetic induction, and triboelectric effect. Dynamic vibrovoltaiic platforms represent a separate class of devices that function by installing piezoelectric or kinetic generators under the surface of moving or stationary parts of systems. When the platform is pressed or vibrated, these generators create an electric current. As a result, mechanical energy is converted into electrical energy. We have developed, designed, and manufactured a vibrovoltaiic platform that effectively converts the kinetic energy of translational (oscillating) motion into electrical energy using an optimized system of induction generators. A comprehensive solution is proposed for storing the resulting energy in high-performance lithium-ion batteries. The efficiency of the prototype under various load conditions has been experimentally investigated. The optimal number of generators has been established, which allows modeling their connection in pairs in series to increase the output voltage and to increase the output current using typical standard charge controllers with an input voltage of 5 V. The designed vibrovoltaiic installation can charge an external battery of batteries in an active mode in which the average increase in energy value per one press of the platform is 84 mJ, and the average energy of active charging per 1 s is 252 mJ. The average value of the efficiency of the device when charging an external battery is 65 %. To increase the efficiency, it is necessary to hardware reduce the current ripples that occur during generation.

Keywords: vibrovoltaiic device, alternative sources, active charging energy, electric energy generation.

Постановка наукової проблеми. Однією з перспективних галузей в альтернативній енергетиці є вібраційна енергетика, в основі якої лежить використання біомеханічного збору енергії руху та ваги пасажирів і транспортних засобів, що є новаторським методом для створення сталих рішень у міському середовищі. Сучасна вібраційна енергетика використовує три основні фізичні принципи для генерації електричної енергії: п'єзоелектричний ефект, що базується на здатності певних матеріалів генерувати електричний заряд при механічній деформації, з лінійною залежністю між густиною заряду та контактною механічною напругою; електромагнітна індукція, яка реалізується через відносний рух магніту та котушки, що дозволяє перетворювати механічну енергію в електричну згідно із законом Фарадея; трибоелектричний ефект, що виникає при контакті та роз'єднанні різних матеріалів із формуванням статичного електричного заряду, який електростатичною індукцією забезпечує генерацію струму при зміні відстані між зарядженими поверхнями.

Динамічні вібровольтаїчні платформи представляють окремий клас пристроїв, які функціонують завдяки встановленню п'єзоелектричних або кінетичних генераторів під поверхнею

рухомих або нерухомих частин систем. Під час тиску на платформу чи її коливань під дією пасажирів або руху транспорту ці генератори створюють електричний струм. У результаті відбувається перетворення механічної енергії на електричну.

Аналіз досліджень. Побутова електронна техніка стає невеликими портативними пристроями, які надають користувачам широкий спектр функціональності, від зв'язку до відтворення музики. Технологія акумуляторів і споживання енергії пристроєм обмежують розмір, вагу та автономний термін служби. Однією з перспективних альтернатив акумуляторам (і паливним елементам, які також необхідно заряджати) є використання паразитної енергії, що розсіюється під час руху користувача пристроєм, для його живлення [1]. У даній роботі проаналізовано сучасний стан і майбутні перспективи перетворення енергії від механічного руху в середовищі людини до електричної енергії на основі п'єзоелектричного ефекту. Це міждисциплінарна галузь, де технологія матеріалів та відповідні електричні схеми повинні розвиватися разом, щоб покращити ефективність перетворення та задовольнити енергетичні потреби типових побутових електронних пристроїв, які таким чином стануть автономними і портативними. Ці пристрої стають дедалі потужнішими. Однак, покращення продуктивності пристроїв призвело до потреби у значно більшій потужності для роботи електроніки. Це питання ще більше ускладнилося через стагнацію розвитку технології акумуляторів протягом останнього десятиліття [2]. Щоб збільшити термін служби цієї електроніки почались дослідження методів генерації енергії з навколишніх джерел. Новітні інноваційні проекти в цій галузі призвели до розробки низки механізмів, які можна використовувати для генерації електричної енергії з різних джерел, включаючи теплову, сонячну, деформаційну, інерційну тощо [3]. Багато з цих джерел енергії доступні для використання людьми, але їх використання має бути ретельно розглянуто, щоб уникнути паразитичних ефектів.

Таким чином, стале енергопостачання без підзарядки та заміни пристроєм накопичення заряду стає все більш важливим. Серед різних збирачів енергії трибоелектричний наногенератор (TENG) привернув значну увагу завдяки своїй високій миттєвій вихідній потужності, широкому вибору доступних матеріалів, екологічно чистому та недорогому процесу виготовлення, а також різним режимам роботи, адаптованим для цільових застосувань [4]. TENG збирає електричну енергію з втраченої механічної енергії в навколишньому середовищі. Розглянуто три типи режимів роботи, засновані на розриві контактів, ковзанні та окремому положенні, для двох різних конфігурацій з подвійною та одноелектродною структурою в TENG.

У роботі [5] розроблено детальну методологію проектування мікромасштабного пристрою для збору енергії з 2 ступенями свободи, який може збирати енергію руху людини низької частоти та широкої смуги пропускання. На основі концепції вібраційного поглинача з 2 ступенями свободи параметри пристрою вибрано для збору енергії на частотах 1 – 10 Гц і широкій смузі пропускання з $\pm 20\%$ від середньої частоти, що відповідає руху людини. Розміри пристрою обмежені до $40 \times 30 \times 10 \text{ мм}^3$. Розроблено модель скінченних елементів для дослідження продуктивності системи з вибраними параметрами. Запропонований пристрій з 2 ступенями свободи здатний забезпечити потужність щонайменше 10 мкВт між двома близькими резонансними піками 4 Гц і 6 Гц, що є цільовим діапазоном частот. Пристрій демонструє дуже високу потужність на квадрат частоти порівняно з іншими подібними пристроями.

Мета. Метою роботи є проектування та виготовлення вібровольтаїчної платформи, яка ефективно перетворюватиме кінетичну енергію поступального (коливального) руху в електричну енергію за допомогою оптимізованої системи індукційних генераторів. Розробити комплексне вирішення для накопичення отриманої енергії у вискоелективних літій-іонних батареях. Експериментально дослідити ефективність роботи прототипу при різних режимах навантаження.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Для конструювання вібровольтаїчної установки обрано чотири 9-ти полюсних трифазних безщіткових генератори змінного струму з вихідною напругою 1 – 5 В, потужністю 0,2 – 1,2 Вт. Матеріалом магніту є NdFeB, який виготовлений у формі кільця, що щільно прилягає до внутрішньої обертальної частини генератора. Активний опір обмотки генератора 6,3 Ом. Передача обертального моменту здійснюється за допомогою системи зубчастих шестерень – планетарний механізм з двома внутрішніми щепленнями, що дозволяє збільшити швидкість обертання рухомої частини (магніту) генератора і збільшити його потужність. Розподіл зусиль, що передаються між декількома кінематичними парами зменшує навантаження на елементи пар, що дозволяє істотно зменшувати

габарити та масу механізмів. Багатоточкова взаємодія ланок механізму істотно збільшує його жорсткість (рис. 1).

Згенерований трифазний змінний струм надходить до електричної схеми (рис. 2), де випрямляється та заряджає NiMH (нікель-метал-гібридну) батарею акумуляторів ємністю 80 мА год з вихідною ЕРС 3,6 В [6].

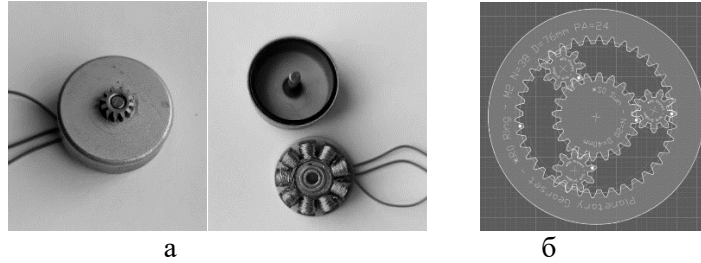


Рис. 1. Трифазний безщітковий генератор змінного струму (а) і планетарний механізм (б)

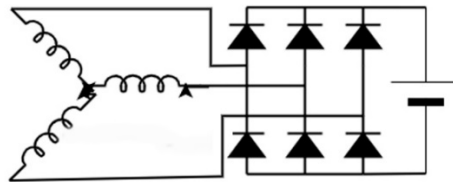


Рис. 2. Схема з'єднання генератора і випрямляча

Електромагнітний осьовий генератор і плата розміщені в циліндричному пластиковому корпусі. До рухомої (обертальної) частини генератора напресовано зубчасту шестерню для виконання рейкової передачі. На електричній платі виконані відводи «+» та «-» в місцях включення акумуляторної батареї 3,6 В для з'єднання генераторів (попередньо, паралельно) з метою отримання необхідної вихідної напруги.

Конструкцію вібровольтаїчної установки виготовлено з плити ДСП розмірами $500 \times 350 \times 150 \text{ мм}^3$ з відкритою передньою частиною (рис. 3а). Зворотній механізм установки виконано з використанням сталевих пружин, гумових втулок, пластикових направляючих і циліндричних труб. Чотири електромагнітні генератори закріплені попарно на нерухомій частині вібровольтаїчної установки за допомогою хомутів таким чином, щоб пластикова зубчата рейка проходила між шестернями генераторів обертаючи їх (рис. 3б).

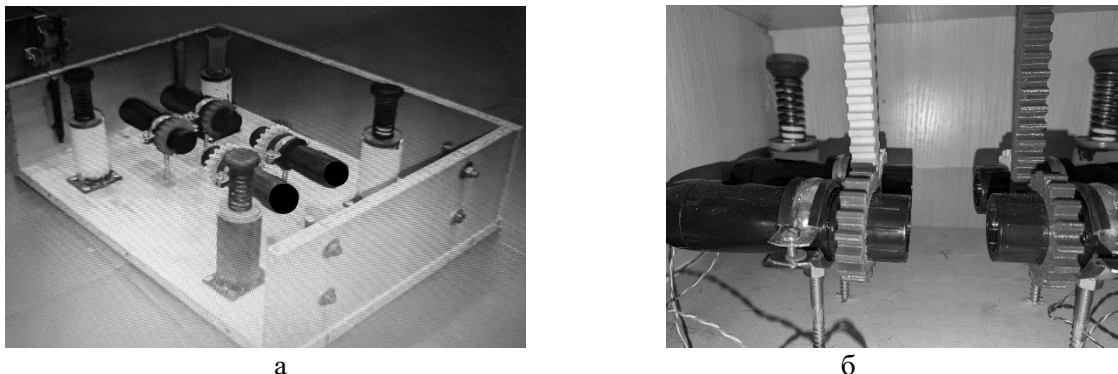


Рис. 3. (а) Конструкція вібровольтаїчної установки. (б) Схема розташування генераторів. Рейкова передача

Електричне коло за схемою генерації і акумуляування електричного струму вібровольтаїчною установкою складається з чотирьох генераторів з випрямлячами струму (6 напівпровідникових діодів) і внутрішніми акумуляторами на 3,6 В, контролера заряду типу 134N3P, літій-іонних акумуляторів типу 18650 – 2 шт. Контролер заряду необхідний для запобігання розрядження акумуляторів нижче 3,2 В і їх перезарядження більше 4,2 В. Через порт мікро USB

контролер заряду приєднано до зовнішньої схеми генерації. Відомо, що контролер працює за поданої на нього напруги не менше 4,4–5,5 В (встановлено експериментальним шляхом), а внутрішні акумулятори генераторів розраховані на 3,6 В, тому генератори були з'єднані попарно послідовно для збільшення вихідної напруги та паралельно для збільшення сили вихідного струму (рис. 4).

Дослідження створеної вібровольтаїчної установки на предмет оцінки кількості енергії, яку можна отримати при активному заряджанні зовнішньої батареї літій-іонних акумуляторів типу 18650 через контролер 134N3P дали наступні результати.

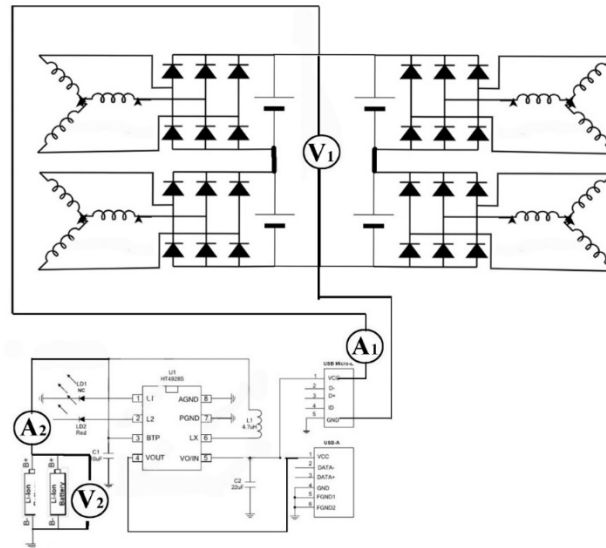


Рис. 4. Електрична схема вібровольтаїчної установки

Вихідні дані: початкова напруга на внутрішній акумуляційній системі – 3 В (біля кожного генератора влаштовано NiMH-акумулятори з ЕРС 3,6 В кожен з ємністю 80 мА·год). Запропоноване нами з'єднання генераторів дозволяє використовувати стандартні контролери заряду з вхідною напругою 5 В. Мінімальна пропускна напруга контролера 4,4 В. Тривалість одного натискання на рухому платформу 0,35 с. Середня частота натискань 3 Гц.

Залежність сили струму та напруги від часу при активному заряджанні представлено на рис. 5 і 6.

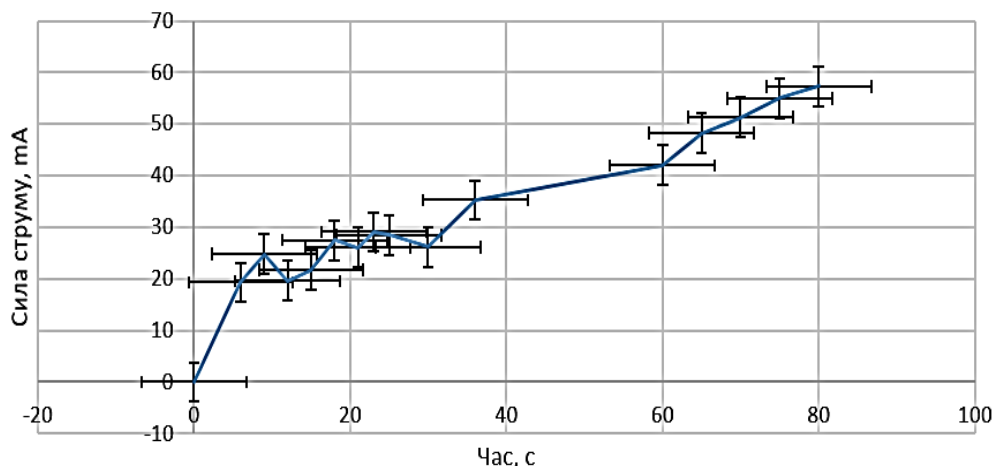


Рис. 5. Залежність вхідної сили струму на контролер від часу при активному заряджанні

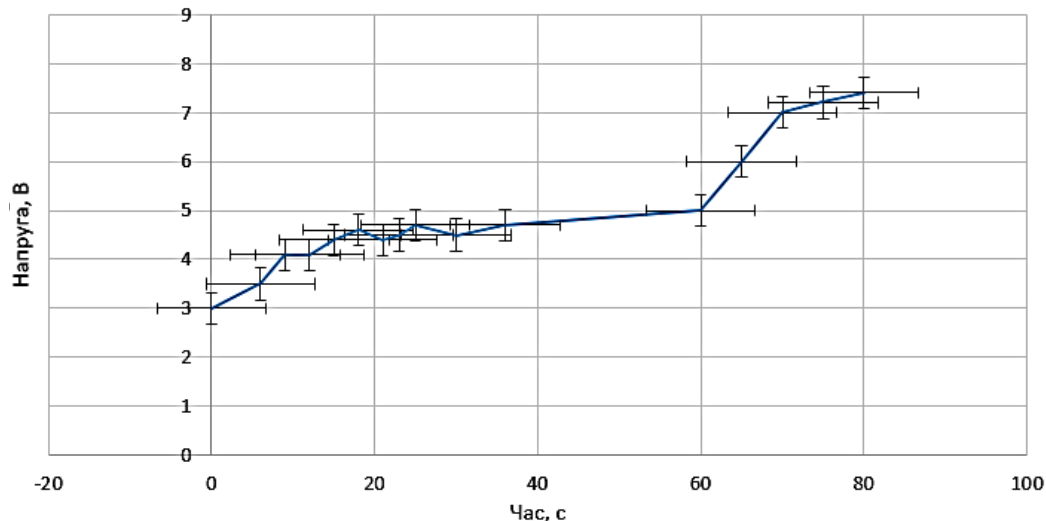


Рис. 6. Залежність вхідної напруги на контролер від часу при активному заряджанні

Під час руху платформи спостерігається пульсуюча зростаюча сила згенерованого струму, який надходить на контролер та заряджає зовнішню батарею акумуляторів. За даними експериментальних досліджень визначено кількість електричної енергії, яку можна отримати під час активного режиму роботи вібровольтаїчної платформи:

середній приріст енергії за одне натискання становить 84 мДж;

середня енергія активного заряджання за 1 с складає 252 мДж.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Запропоноване оптимальне число генераторів (чотири) дозволяє: моделювати їх з'єднання попарно послідовно для збільшення вихідної напруги та для збільшення сили вихідного струму використовуючи типові стандартні контролери заряду з вхідною напругою 5 В. Сконструйована вібровольтаїчна установка може заряджати зовнішню батарею акумуляторів в активному режимі при якому середній приріст енергії за одне натискання платформи становить 84 мДж, середня енергія активного заряджання за 1 с складає 252 мДж. Середній ККД пристрою при заряджанні зовнішньої батареї складає 65 %. Для збільшення величини ККД необхідно апаратно зменшити пульсації струму, які виникають під час генерації.

Запропонована нами модель вібровольтаїчної установки, як автономного джерела альтернативної енергії, може бути впроваджена для освітлення у місцях з великим потоком людей, а також як альтернативне джерело зарядки різноманітних побутових пристроїв.

Список бібліографічного опису

1. Гонсалес Х.-Л., Рубіо А., Молл Ф. П'єзоелектричні батареї, що живляться людиною, для живлення носимих електронних пристроїв. *Міжнародний журнал Товариства матеріалознавства для ресурсів*. 2002. Т. 10, № 1. С. 34–40. <https://doi.org/10.5188/ijmsmer.10.34>
2. Гранстром Дж., Фінстра Дж., Содано Х. А., Фарінгольт К. Збір енергії з рюкзака, оснащеного п'єзоелектричними плечовими ремнями. *Розумні матеріали та конструкції*. 2007. Т. 16, № 5. С. 1810–1820. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/5/036>
3. Кудря С. О., Бурдюк В. І. Вступ до спеціальності. Нетрадиційні та відновлені джерела енергії : курс лекцій. К. : НТУУ «КПІ», 2013. 387 с.
4. Вон-Гук Кім, До-Ван Кім, Ль-Вунг Чо, Джін-Кі Кім, Мун-Сок Кім, Ян-Кю Чой. Трибоелектричний наногенератор: структура, механізм та застосування. *ACS Nano*. 2021. Т. 15, № 1. С. 258–287. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c09803>
5. Магді М., Ель-Баб А., Ассал С. Методологія проектування мікромасштабного пристрою збору енергії з 2 ступенями свободи для низької частоти та широкої смуги пропускання. *Журнал сенсорних технологій*. 2014. Т. 4, № 2. С. 37–47. <http://dx.doi.org/10.4236/jst.2014.42005>
6. Грабовський В. І. Основи енергетичних технологій: альтернативні джерела. Київ : Наукова думка, 2009. 208 с.

References

1. González J.-L., Rubio A., Moll F. Human powered piezoelectric batteries to supply power to wearable electronic devices. *International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources*. 2002. Vol. 10, № 1. P. 34–40. <https://doi.org/10.5188/ijmsmer.10.34>

2. Granstrom J., Feenstra J., Sodano H. A., Farinholt K. Energy harvesting from a backpack instrumented with piezoelectric shoulder straps. *Smart Materials and Structures*. 2007. Vol. 16, № 5. P. 1810–1820. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/5/036>
3. Kudrya S. O., Budko V. I. Introduction to the specialty. Non-traditional and renewable energy sources : a course of lectures. K. : NTUU «KPI», 2013. 387 p.
4. Weon-Guk Kim, Do-Wan Kim, Il-Woong Tcho, Jin-Ki Kim, Moon-Seok Kim, Yang-Kyu Choi. Triboelectric Nanogenerator: Structure, Mechanism, and Applications. *ACS Nano*. 2021. Vol. 15, № 1. P. 258–287. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c09803>
5. Magdy M., El-Bab A., Assal S. Design methodology of a micro-scale 2-DOF energy harvesting device for low frequency and wide bandwidth. *Journal of Sensor Technology*. 2014. Vol.4, № 2. P. 37–47. <http://dx.doi.org/10.4236/jst.2014.42005>
6. Grabovsky V. I. Fundamentals of energy technologies: alternative sources. Kyiv : Naukova Dumka, 2009. 208 p.

Історія статті:

Отримано: 19.02.2026 Доопрацьовано: 04.04.2026 Прийнято до друку: 23.05.2026 Опубліковано: 29.05.2026