

Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Факультет інформаційних технологій
Кафедра інформаційних систем та технологій



3-я Міжнародна науково-практична конференція

«ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ:
РЕЗУЛЬТАТИ І ПЕРСПЕКТИВИ»
(IST 2026)



10 березня 2026 р.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНА СИСТЕМА АВТОНОМНОГО ЖИВЛЕННЯ СВІТЛОФОРНИХ ОБ'ЄКТІВ

Павло Томусяк, Юлій Бойко, Леся Карпова

***Анотація.** Розглянуто автономну систему живлення світлофорного об'єкта на основі п'єзоелектричного перетворення механічної енергії транспортного потоку в електричну. Запропоновано структурну та принципову електричну схеми генераторного і зарядного вузлів. Виконано розрахунок параметрів п'єзоелектричних елементів та акумуляторної батареї, проведено оцінку енергетичного балансу та коефіцієнта корисної дії системи. Результати моделювання підтвердили працездатність схеми та можливість автономного живлення світлофора з додатковою функцією заряджання мобільних пристроїв.*

Ключові слова: автономна система живлення, п'єзоперетворювач, акумуляторна батарея, стабілізація напруги.

I. ВСТУП

Забезпечення безперебійної роботи світлофорних об'єктів є важливою складовою організації безпечного дорожнього руху та функціонування міської транспортної інфраструктури. Світлофорні системи виконують регулювальну та попереджувальну функції, мінімізуючи конфліктні ситуації між транспортними потоками та пішоходами. У більшості випадків їх живлення здійснюється від централізованої електромережі, що робить такі об'єкти залежними від стану енергосистеми [1]. У разі аварійних відключень, перевантажень або перебоїв електропостачання виникає ризик втрати працездатності світлофорів, що призводить до дезорганізації руху, зростання аварійності, утворення заторів та суттєвих соціально-економічних втрат.

У сучасних умовах розвитку енергетики та підвищених вимог до енергоефективності актуальним напрямом є впровадження автономних або резервних систем живлення критично важливих об'єктів інфраструктури [2]. Одним із перспективних підходів є використання альтернативних і відновлюваних джерел енергії, які дозволяють зменшити залежність від централізованих мереж. Зокрема, значний науковий інтерес викликає застосування п'єзоелектричних перетворювачів [3], здатних генерувати електричну енергію під дією механічного навантаження. Використання енергії транспортного потоку, що неминуче виникає під час руху автомобілів, створює можливість ефективної утилізації механічної енергії без додаткового споживання традиційних паливно-енергетичних ресурсів.

Перевагою п'єзоелектричного підходу [4] є компактність системи, відсутність необхідності у великій площі встановлення (на відміну від сонячних панелей), а також можливість роботи незалежно від погодних умов і часу доби. Водночас реалізація такої системи потребує вирішення низки технічних завдань, зокрема узгодження параметрів генерації, випрямлення, стабілізації та накопичення електричної енергії [5].

II. ДАНІ ТА МЕТОДИ

З метою реалізації автономного живлення світлофорного об'єкта розроблено функціонально завершену систему перетворення, накопичення та розподілу електричної енергії, що генерується за рахунок механічного навантаження транспортних засобів. Структурна організація системи передбачає послідовне поєднання вузлів генерації, випрямлення, стабілізації та споживання енергії.

На рисунку 1 представлено структурну схему запропонованої автономної системи живлення світлофорного об'єкта. Первинним джерелом енергії є п'єзоелектричний

перетворювач, вмонтований у дорожнє покриття. Під дією механічного навантаження, що створюється колесами транспортних засобів під час руху, у п'єзоелектричному елементі генерується змінна електрична напруга. Інтенсивність генерування енергії залежить від маси транспортного засобу, частоти проходження автомобілів та характеристик п'єзоелектричного матеріалу.

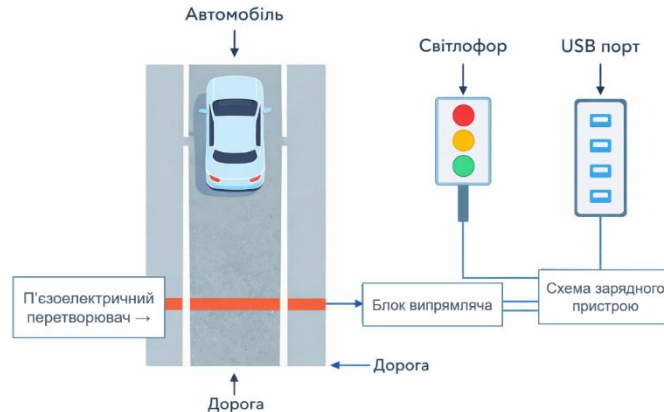


Рисунок 1. Структурна схема автономного п'єзоелектричного живлення світлофора

Згенерована напруга надходить до блоку випрямляча, де відбувається її перетворення у постійну. Після випрямлення електрична енергія подається до схеми зарядного пристрою, яка забезпечує накопичення енергії та стабілізацію вихідних параметрів.

На етапі стабілізації формується контрольований рівень напруги, придатний для заряджання акумуляторної батареї та живлення навантаження. Накопичення енергії в акумуляторі дозволяє компенсувати нерівномірність транспортного потоку та забезпечити безперервність живлення навіть за зниження інтенсивності руху. Таким чином, система працює не лише як генератор, а і як буферний енергетичний модуль із функцією згладжування пікових навантажень.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ТА АНАЛІЗ

Оцінювання ефективності запропонованої автономної системи живлення виконано з урахуванням енергетичного балансу на всіх етапах перетворення енергії: генерація – випрямлення – стабілізація – накопичення – споживання.

Змінна напруга, сформована п'єзоелектричними перетворювачами, має імпульсний характер та нестабільну амплітуду. Під час випрямлення в мостовому діодному випрямлячі виникають втрати, зумовлені падінням напруги на напівпровідникових переходах. За типової величини прямого падіння напруги 0,7–1 В на кожному діоді сумарні втрати в мостовій схемі становлять близько 10–15 % від генерованої потужності.

Додаткові втрати виникають у фільтрувальному каскаді та стабілізаторі напруги. Лінійний стабілізатор, застосований у схемі, характеризується ККД, що визначається на основі формули 1:

$$\eta_{\text{стаб}} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} \quad (1)$$

За умови значної різниці між вхідною та вихідною напругою частина енергії розсіюється у вигляді тепла. Сукупні втрати на етапі стабілізації можуть становити 10–20 % залежно від режиму роботи.

Таким чином, загальний коефіцієнт корисної дії системи можна представити як добуток коефіцієнтів корисної дії окремих функціональних каскадів, що визначається формулою 2:

$$\eta_{\text{сист}} = \eta_{\text{ген}} \cdot \eta_{\text{випр}} \cdot \eta_{\text{стаб}} \cdot \eta_{\text{акум}} \quad (2)$$

З урахуванням втрат на випрямлення ($\approx 0,85$), стабілізацію ($\approx 0,8-0,9$) та заряд акумулятора ($\approx 0,85$) сумарний ККД системи оцінюється в межах 55–65 %. Незважаючи на

наявність втрат, енергетичний потенціал масиву з 16 п'єзоелектричних перетворювачів є достатнім для компенсації добового енергоспоживання світлофорного об'єкта.

Аналіз розрахункової напруги холостого ходу (≈ 91 В) свідчить про наявність достатнього запасу за напругою для ефективного випрямлення та стабілізації з урахуванням пульсацій і динамічних змін навантаження.

Працездатність системи підтверджено в різних режимах функціонування: у режимі генерації та заряджання акумуляторної батареї, у режимі повного заряду з автоматичним обмеженням струму, а також у режимі живлення навантаження. У кожному з зазначених режимів забезпечується стабільність вихідних параметрів, коректна робота захисних елементів та безперервність електроживлення світлофорного об'єкта.

Отримані результати свідчать про технічну реалізованість запропонованої системи та її енергетичну достатність для автономного живлення світлофornoї інфраструктури з додатковою функцією заряджання мобільних пристроїв.

Запропонована електрична схема складається з двох основних функціональних вузлів: блоку генерації електроенергії та кола заряджання акумуляторної батареї.

На рисунку 2 наведено еквівалентну електричну схему одного п'єзоелектричного модуля, що включає джерело змінної напруги, внутрішню ємність елемента та випрямний каскад із фільтрувальним конденсатором. Генераторний блок системи сформовано з 16 ідентичних модулів, з'єднаних паралельно, що дозволяє збільшити сумарний вихідний струм без зміни рівня напруги.

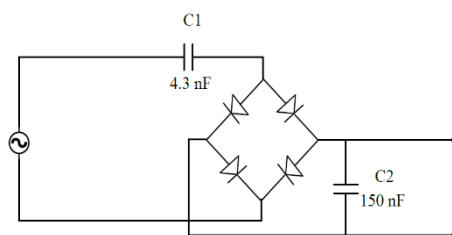


Рисунок 2. Еквівалентна схема заміщення п'єзоелектричного перетворювача

Змінна напруга від генераторного блоку надходить до зарядного кола, де здійснюється її випрямлення мостовим діодним випрямлячем та згладжування фільтрувальним конденсатором. Подальша стабілізація напруги виконується інтегральним регулятором, який забезпечує підтримання необхідного рівня зарядної напруги та коректний режим заряджання акумуляторної батареї.

Для запобігання зворотному струму використано захисний діод, що виключає розряджання акумулятора у випадку відсутності генерації. Контроль досягнення повного заряду реалізовано за допомогою вузла на основі стабілітрона та транзистора, що забезпечує автоматичне обмеження або припинення зарядного струму. Індикація режимів роботи здійснюється світлодіодами, а інформація про рівень заряду акумуляторної батареї відображається на рідкокристалічному дисплеї. Таким чином, запропонована електрична схема забезпечує ефективне випрямлення, стабілізацію, накопичення та контрольоване використання електричної енергії, генерованої п'єзоелектричними перетворювачами, що підвищує надійність та автономність системи живлення.

IV. ОБГОВОРЕННЯ ТА ВИСНОВКИ

Запропонована автономна система живлення світлофорного об'єкта на основі п'єзоелектричного перетворення механічної енергії транспортного потоку продемонструвала технічну доцільність та енергетичну спроможність для забезпечення роботи навантаження. Проведені розрахунки та результати комп'ютерного моделювання підтвердили узгодженість параметрів генерації, накопичення та споживання електроенергії.

Аналіз енергетичного балансу показав, що навіть з урахуванням втрат у випрямлячі, стабілізаторі та акумуляторній батареї сумарний коефіцієнт корисної дії системи забезпечує можливість автономного функціонування світлофорного об'єкта. Використання масиву п'єзоелектричних елементів дозволяє масштабувати систему залежно від інтенсивності транспортного потоку.

Практична реалізація запропонованої системи може бути доцільною на ділянках із високою інтенсивністю руху та в умовах обмеженого доступу до централізованих мереж електроживлення.

ДЖЕРЕЛА

1. Бойко, Ю., Карпова, Л., & Гончар, А. (2026). Інтелектуальна багаторівнева система збору для бездротової енергії. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, (1), 184–188.
2. Ковальчук, П., Бойко, Ю., & Карпова, Л. (2025). Інверторний DC-DC перетворювач для енергопостачання інформаційних систем. *Інформаційні системи та технології: результати і перспективи: матеріали 2-ї Міжнародної науково-практичної конференції (5 березня 2025 р.)* (с. 237–240). Київ: ФІТ КНУТШ.
3. Моу, К., & Ji, X. (2025). Using piezoelectric technology to harvest energy from pavement: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 12(1), 68–86.
4. He, Q., & Briscoe, J. (2024). Piezoelectric energy harvester technologies: Synthesis, mechanisms, and multifunctional applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(23), 29491–29520.
5. Al Ghazi, A., et al. (2025). Advances in interface circuits for self-powered systems: Piezoelectric energy harvesting. *Sensors*, 25(13), 4029.



ПАВЛО ТОМУСЯК

Здобувач ступеню бакалавра з електронних комунікацій та радіотехніки, група ЕКРс-23-1, у Хмельницькому національному університеті.

E-mail: boiko_julius@ukr.net

Здобувач працює над кваліфікаційною роботою на тему «Автономна система живлення електронних пристроїв». Наукові інтереси: системи збору та перетворення альтернативної енергії, п'єзоелектричні перетворювачі, автономні системи живлення об'єктів інфраструктури, оптимізація енергетичного балансу та підвищення енергоефективності електронних систем.



ЮЛІЙ БОЙКО

д.т.н., професор, професор кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій, Хмельницький національний університет.

ORCID:0000-0003-0603-7827

E-mail: boykoym@khnmu.edu.ua

Отримав ступінь доктора технічних наук за спеціальністю «Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій» у Державному університеті телекомунікацій (Київ, Україна) у 2015 році. Наукові інтереси: обробка сигналів, синхронізація, телекомунікації, кодування, електронні компоненти, діагностика, інформаційні системи.



ЛЕСЯ КАРПОВА

к.т.н., доцент, доцент кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій, Хмельницький національний університет.

ORCID ID: 0000-0001-5015-2107

E-mail: rtlesya@gmail.com

Отримала ступінь кандидата технічних наук за спеціальністю «Радіотехнічні та телевізійні системи» у Хмельницькому національному університеті у 2012 році. Наукові інтереси: телекомунікації, електронні компоненти, проєктування та оптимізація радіотехнічних систем, бездротова передача даних, антенні системи.