

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему: Дослідження можливості використання п'єзоелектричних елементів для генерації електричної енергії

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи ЕТм-61 спеціальності 141 електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (шифр і назва спеціальності)

	(підпис)	Воробець В. Ю.	(прізвище та ініціали)
Керівник	(підпис)	Бабюк С. М.	(прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	(підпис)	Коваль В. П.	(прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	(підпис)	Коваль В. П.	(прізвище та ініціали)
Рецензент	(підпис)	Золотий Р. З	(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра Електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Коваль В. П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

« 12 » листопада 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

студенту Воробцю Володимирі Юрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження можливості використання п'єзоелектричних елементів для генерації електричної енергії

Керівник роботи Бабюк Сергій Миколайович, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 12 » листопада 2025 року № 4/7-966

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи характеристики п'єзокерамічних елементів, геометричні параметри п'єзоелемента, інтенсивність руху пішоходів, параметри полотна пішохідної зони, кількість та потужність світильників, тарифи та сезонні режими роботи освітлення.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітичний розділ

2. Розрахунково-дослідницький розділ

3. Проектно-конструкторський розділ

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Вступ. Багат шаровий п'єзогенератор на основі поздовжнього п'єзоефекту. П'єзогенератор на основі вигинових мод коливань. Схема п'єзоелектричного генератора. Загальний вигляд світильника ДСУ10В. Гістограма потужності одного п'єзоелемента. Гістограма добової генерації електричної енергії. Розташування полотна на пішохідній зоні. Загальний вигляд конструкції п'єзоелектричного генератора. Гістограма генерації та споживання енергії в зимовий час. Гістограма навантаження у зимовий час. Гістограма генерації та споживання енергії у літній час. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Гурик О. Я., к.т.н., доцент		
	Стручок В. С, старший викладач		

7. Дата видачі завдання 12 листопада 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	15.11.2025	
2	Аналітичний розділ	25.11.2025	
3	Розрахунково-дослідницький розділ	05.12.2025	
4	Проектно-конструкторський розділ	15.12.2025	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	20.12.2025	
6	Висновки	20.12.2025	
7	Оформлення пояснювальної записки	20.12.2025	
8	Оформлення графічної частини	20.12.2025	

Студент

(підпис)

Воробець В. Ю.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Бабюк С. М.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Воробець Володимир Юрійович – Дослідження можливості використання п'єзоелектричних елементів для генерації електричної енергії.

141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Стор.– 64; рис. - 33; табл. - 7; слайдів - ____; джерел - 26; додатків - _.

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягає в розробці системи вироблення електроенергії для автономної системи вуличного освітлення. Джерелом живлення для цієї системи є п'єзоелектричний генератор, що працює на основі п'єзоелектричного ефекту.

У ході роботи було розглянуто сам п'єзоелектричний ефект та класифікацію п'єзогенераторів, а також було обрано п'єзоелектричний елемент. Розглянуто різні варіанти електрогенерації для віддалених приймачів енергії. Було виконано розрахунок п'єзоелектричного генератора, за результатами якого складено оптимальний варіант системи та проведено остаточний розрахунок. Також було складено графік навантаження та визначено економічну складову проєкту.

Перелік ключових слів: П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ ЕФЕКТ; П'ЄЗОПЕРЕТВОРЮВАЧ; СЕНСОРНІ СИСТЕМИ; ЕЛЕКТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ; П'ЄЗОМАТЕРІАЛИ; ЕНЕРГЕТИЧНІ ПРИСТРОЇ; ЕЛЕКТРИЧНІ СХЕМИ; РЕЗОНАНС; ІМПЕДАНС.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Варіанти малої електрогенерації для живлення малопотужних приймачів	8
1.2 П'єзокерамічні елементи в якості перетворювачів енергії	11
1.3 Використання п'єзоелектричних генераторів для живлення малопотужних об'єктів	13
1.4 Світові аналоги п'єзогенераторів	14
1.5 Висновки до розділу 1	16
2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	17
2.1 Класифікація п'єзоелектричних генераторів	17
2.2 Підбір п'єзоелектричного елемента	19
2.3 Моніторинг механічної дії на полотно пішохідної зони	22
2.4 Розрахунок електричного потенціалу від механічного впливу	22
2.5 Висновки розділу 2	32
3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	33
3.1 Розташування полотна на пішохідній зоні	33
3.2 Конструкція п'єзоелектричного генератора	34
3.3 Вибір типу накопичувача практичної реалізації	37
3.4 Енергетичне навантаження набережної	41
3.5 Економічна оцінка використання п'єзоелектричних генераторів	46
3.6 Висновки розділу 3	49
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	51
4.1 Основні причини ураження людини електричним струмом	51
4.2 Захисне заземлення та занулення	52
4.3 Ліквідація наслідків надзвичайних ситуацій	55
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	61

ВСТУП

Стан проблеми. Проблема забезпечення електроенергією малонаселених пунктів та віддалених малопотужних об'єктів, куди підключення до централізованої мережі є економічно недоцільним, стимулює розвиток малої та автономної енергетики. Сучасні дослідження та практичні розробки зосереджені на кількох ключових напрямках, що використовують переважно відновлювані джерела енергії [1,2].

Аналіз існуючих рішень показує, що хоча технології сонячної та вітрової генерації є добре розвиненими, вони мають залежність від погодних умов. П'єзоелектрична генерація пропонує альтернативу, використовуючи стабільне джерело енергії в людних місцях — кінетичну енергію пішоходів. Існуючі проекти підтверджують життєздатність цієї технології для малопотужних застосувань. Однак бракує комплексних досліджень, які б адаптували цей підхід до конкретних умов певного міського об'єкта, враховуючи кліматичні особливості, сезонні коливання пішохідного трафіку та економічну доцільність створення повністю автономної системи освітлення [1]. Дана робота спрямована на заповнення цієї прогалини.

Актуальність теми. У сучасному світі потреба в електричній енергії існує в кожному куточку планети, проте її виробництво та доставка пов'язані з низкою глобальних викликів. На початку XXI століття близько 80% світового енергопостачання забезпечувалося за рахунок викопного палива, такого як вугілля, нафта та природний газ. Ці ресурси є вичерпними, і за більшістю оцінок, наявних запасів вистачить лише до середини століття, що ставить під загрозу енергетичну безпеку майбутніх поколінь [3].

Окрім обмеженості, спалювання викопного палива завдає значної шкоди навколишньому середовищу. Електростанції та транспорт викидають в атмосферу діоксид сірки, оксиди азоту, тверді частинки та токсичні хімікати. Ці викиди є причиною кислотних дощів, які руйнують водні екосистеми, а також призводять до утворення смогу в містах. Ключовою проблемою є викид

вуглекислого газу (CO_2), основного парникового газу, що спричиняє глобальне потепління та незворотні зміни клімату.

У відповідь на ці виклики людство активно розвиває так звану «зелену енергетику», що базується на відновлюваних джерелах: сонячних батареях, вітрових установках та гідроелектростанціях. Однак, попри їхні переваги, традиційні відновлювані джерела також мають суттєві недоліки. Великі ГЕС можуть порушувати природний стік річок і затоплювати території, завдаючи шкоди місцевій флорі та фауні. Ефективність сонячних панелей залежить від погодних умов і часу доби, а для їх розміщення потрібні великі площі. Вітрогенератори вимагають стабільно сильних вітрів і часто викликають скарги через шум та візуальний вплив на ландшафт [4,5].

У цьому контексті особливої актуальності набуває пошук та дослідження альтернативних, інноваційних методів генерації енергії, зокрема для живлення малопотужних об'єктів міської інфраструктури, куди прокладання централізованих мереж є економічно не вигідним. Одним із таких перспективних напрямів є використання п'єзоелектричних генераторів, які перетворюють механічну енергію (наприклад, кроки пішоходів) на електричну. Ця технологія дозволяє генерувати енергію безпосередньо в місці її споживання, не залежить від погодних умов і не має шкідливого впливу на довкілля [6]. Дослідження можливості застосування п'єзогенераторів для живлення вуличного освітлення є важливим кроком до створення енергоефективних та екологічно чистих міст.

Мета роботи полягає в розробці та обґрунтуванні системи вироблення електроенергії на основі п'єзогенераторів для забезпечення автономної роботи системи вуличного освітлення.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі **основні задачі**:

- дослідити фізичні основи п'єзоелектричного ефекту та розглянути існуючі класифікації п'єзогенераторів;
- проаналізувати варіанти малої електрогенерації для живлення віддалених малопотужних приймачів;

- виконати підбір оптимального п'єзоелектричного елемента для проектованої системи;
- провести розрахунок електричного потенціалу системи на основі моніторингу механічного впливу на пішохідну зону;
- розробити конструкцію п'єзоелектричного генератора та визначити оптимальне місце його розташування;
- скласти графік навантаження системи освітлення та визначити економічну складову проекту.

Об'єкт дослідження – Автономні системи живлення на основі п'єзоелектричних генераторів.

Предмет дослідження – Характеристики та ефективність п'єзоелектричного методу перетворення енергії.

Наукова новизна отриманих результатів: полягає в комплексному обґрунтуванні можливості використання п'єзогенераторів для живлення освітлювальної системи конкретного міського об'єкта. з урахуванням сезонної інтенсивності руху, розроблено 3D-модель конструкції генераторного модуля та визначено оптимальні параметри системи (площа покриття, характеристики п'єзоелементів) для забезпечення повної енергетичної автономності світильників.

Практичне значення полягає у створенні готового технічного рішення для проектування та впровадження систем автономного вуличного освітлення.

Апробація. Основні положення та результати досліджень доповідались та обговорювались на науковій конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“, присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (2025), на базі Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Варіанти малої електрогенерації для живлення малопотужних приймачів

Як первинне джерело енергії для організації автономного електропостачання можуть використовуватися:

- сонячні батареї;
- вітрогенератори;
- електрогенератори, що працюють на різних видах палива.

Останні для систем електропостачання, що розглядаються, найменш переважні через високу вартість кіловату електроенергії, що виробляється, а також значного рівня шуму.

Перший вид автономної енергосистеми можна назвати енергетичним островом (або сільською автономною енергосистемою). Він використовується там, де немає можливості підключення до мережі, переважно далеко від населених пунктів, а також де існує можливість застосування вітротурбіни з горизонтальною віссю (HAWT). Горизонтальна вітротурбіна може бути більшого розміру через більший простір. Системи цього виду складніше підключити до мереж через значну відстань між ними. Другий тип автономної енергосистеми – це міські автономні енергосистеми (або муніципальні автономні енергосистеми). Цей тип системи повинен бути адаптований до використання вітротурбіни з вертикальною віссю (VAWT) і повинен мати можливість підключення до інших автономних систем. Вертикальні вітротурбіни використовуються через менший простір і нестійкі умови вітру.

Основне джерело живлення має забезпечувати систему енергією в діапазоні від 60% до 80% від потреби. У більшості випадків вони використовуватимуть фотоелектричні панелі для прямого виробництва енергії. Резервна система подачі енергії в діапазоні від 20% до 40% від навантаження.

Він повинен використовувати інший вид енергії, ніж основне джерело. Аварійне джерело електроенергії для системи працює в момент збою або нестачі первинної/ вторинної енергії до відновлення живлення з відновлюваних джерел.

Залежно від потреб і технічних умов накопичувач енергії може бути акумуляторною батареєю або конденсатором. Джерела енергії та накопичувачі енергії, підключені до загальної лінії в буферній системі, забезпечують двонаправлену передачу енергії. У той час, коли енергія, що виробляється в джерелі, не використовується для живлення приймачів, вона накопичується в батареї. У разі нестачі енергії від основного джерела або резервного джерела живлення навантаження вона береться з блоку живлення.

Якщо основним джерелом енергії є фотоелектричний елемент, який працює протягом дня, резервне джерело у вигляді вітряної турбіни може успішно замінити основне джерело, якщо це необхідно.

У сучасній науково-технічній літературі широко висвітлюються питання, пов'язані з використанням відновлюваних джерел енергії для автономного електропостачання малопотужних об'єктів. Серед основних технологій, що розглядаються в дослідженнях, виділяють:

- Фотоелектричні системи — це пристрої, які перетворюють енергію сонячного випромінювання на електричну. Фотоелементи (сонячні батареї) працюють на основі напівпровідникових матеріалів, здатних генерувати електричний струм під дією світла. Їх ефективність залежить від типу матеріалу, умов освітлення та конструктивних особливостей.

- Хімічні джерела живлення — це елементи, в яких електроенергія утворюється внаслідок хімічних реакцій. До них належать акумулятори, гальванічні елементи та паливні комірки.

- Радіоізотопні джерела енергії — використовуються переважно в космічній галузі та спеціалізованих автономних системах. Вони забезпечують довготривалу генерацію електроенергії за рахунок розпаду радіоактивних ізотопів.

- Електричні генератори — це пристрої, що перетворюють механічну енергію (рух, тиск, вібрації) на електричну. Вони можуть працювати на основі різних принципів: електромагнітної індукції, термоелектричного ефекту або п'єзоелектрики. Зокрема, п'єзогенератори.

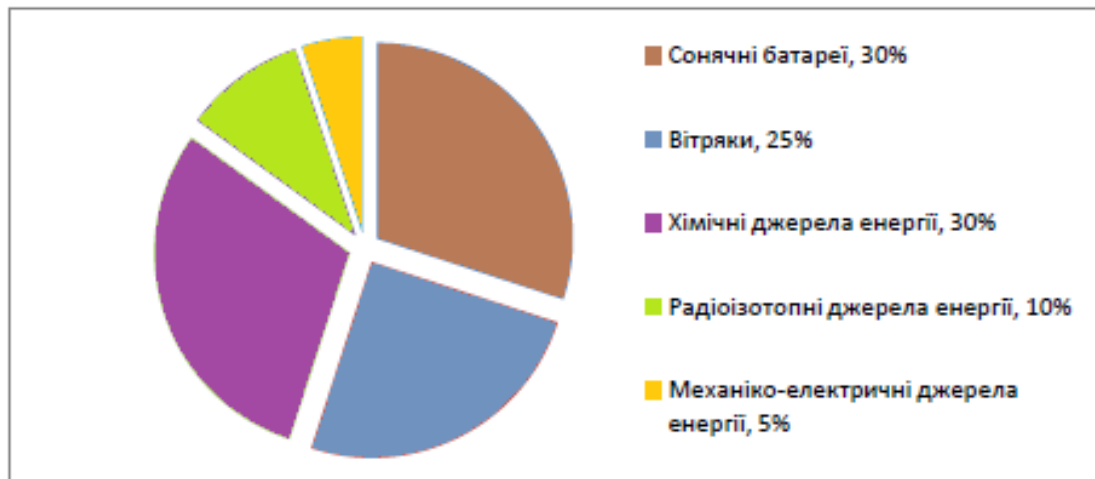


Рисунок 1.1 – Способи генерації відновлюваної енергії

Таблиця 1.1 – Порівняння технологій автономної генерації.

Джерело енергії	Принцип роботи	Переваги	Недоліки
Фотоелектричні системи	Перетворення сонячного світла на електроенергію за допомогою напівпровідників	Екологічність, низькі експлуатаційні витрати, простота встановлення	Залежність від погодних умов, потреба у великій площі для панелей
Хімічні джерела живлення	Генерація струму внаслідок хімічних реакцій	Компактність, можливість накопичення енергії	Обмежений термін служби, потреба в утилізації, залежність від температур
Радіоізотопні джерела	Вивільнення енергії при розпаді радіоактивних ізотопів	Довготривала автономна робота, незалежність від зовнішніх умов	Радіаційна небезпека, висока вартість, обмежене застосування
Електричні генератори	Перетворення механічної енергії (руху, тиску) в електричну	Надійність, можливість використання в міському середовищі (п'єзогенерація)	Низька потужність, залежність від інтенсивності механічного впливу

Таким чином, аналіз літературних джерел свідчить про активний розвиток технологій автономної генерації, серед яких п'єзоелектричні системи займають

особливе місце завдяки своїй компактності, екологічності та здатності працювати в умовах обмеженого доступу до традиційних джерел живлення.

1.2 П'єзокерамічні елементи в якості перетворювачів енергії

На сьогоднішній день п'єзоелектричні джерела енергії знаходять застосування в різних типах електронних пристроїв. Серед них можна виокремити компактні бездротові системи з тривалим терміном експлуатації, малопотужні вбудовані модулі зв'язку (зокрема, для мобільних телефонів), а також побутові електронні та електромеханічні пристрої — наприклад, електронні годинники. Крім того, п'єзогенератори ефективно використовуються для живлення локальних систем освітлення та сигналізації, особливо на віддалених об'єктах інфраструктури.

Протягом останніх років було створено низку експериментальних моделей накопичувачів енергії, що використовують п'єзоефект, а також перетворювачів для різних сфер застосування. Ці пристрої умовно поділяються на два типи залежно від характеру механічних коливань, які вони використовують — поздовжні та поперечні. Конструкція п'єзогенератора, що активується поздовжніми коливаннями (спрямованими вздовж вектора поляризації), представлена на рисунку 1.2. Водночас генератор, що працює на основі вигинових (поперечних) коливань, зображено на рисунку 1.3.

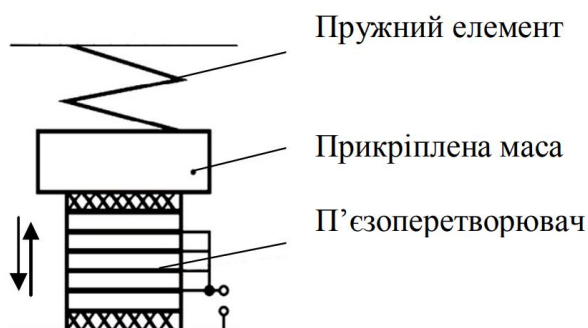


Рисунок 1.2 Багат шаровий п'єзогенератор на основі використання поздовжнього п'єзоефекту.

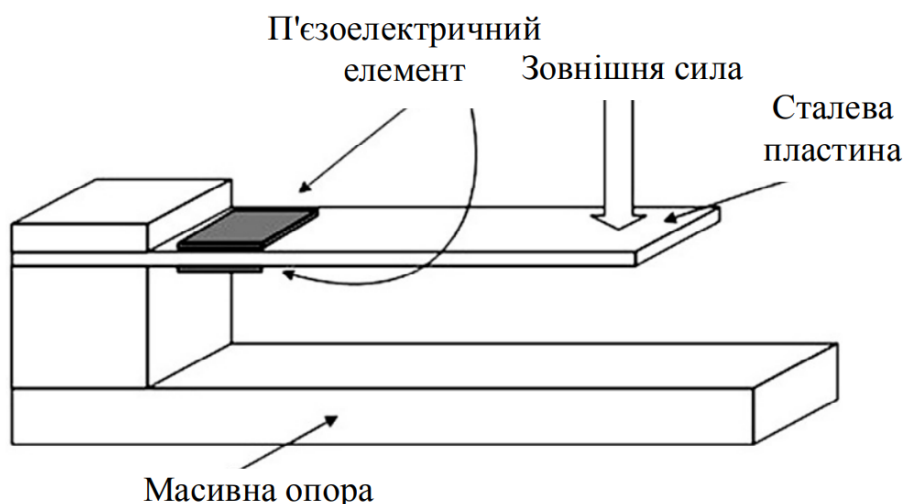


Рисунок 1.3 – П'єзогенератор на основі використання вигинових моди коливань.

Чутливий елемент п'єзогенератора першого типу може бути реалізований у двох варіантах: як окремий п'єзоелемент або як багат шаровий п'єзоперетворювач, що також показано на рисунку 1.2.

Другий конструктивний тип п'єзогенераторів забезпечує вищу вихідну потужність, що обумовлює його більш широке застосування в практиці. Прототипи малопотужних п'єзогенераторів відомі вже тривалий час і використовувалися, зокрема, як виконавчі елементи в антенних системах супутникового спрямування. Наразі розроблено експериментальні багат шарові моделі п'єзогенераторів, здатні забезпечити значну вихідну потужність, які розглядаються як потенційні автономні джерела живлення для освітлення дорожньої інфраструктури. Водночас слід зазначити, що ці розробки перебувають на стадії стартапів, і результати їх практичних випробувань поки що не оприлюднені.

Окрему увагу заслуговують п'єзогенератори, що працюють на основі згинальних коливань (рис. 1.3). Вони мають специфічну геометрію та конструктивні особливості. Залежно від функціонального призначення, такі пристрої досліджувалися у вигляді різних схем — мікроп'єзогенераторів (МкПГ) та макроп'єзогенераторів (ПГ). Серед перших технічних реалізацій мікроп'єзогенераторів варто згадати схему, запропоновану Lu F. і Lee H. P. у 2004 році.

Експериментальні дані свідчать, що мікроп'єзогенератор з кантилевером товщиною 0,1 мм і розмірами 5×1 мм, при амплітуді коливань 0,1 мм на вільному кінці, здатен генерувати електричну потужність на рівні 1,6 мВт.

1.3 Використання п'єзоелектричних генераторів для живлення малопотужних об'єктів

На двох найжвавіших станціях Токіо [6] вчені використовують пасажирів для вироблення енергії за допомогою спеціальних килимків. П'єзоелектричний килимок, встановлений біля популярного японського залізничного вокзалу, знайомить пасажирів з користю енергії, що самогенерується. Килимок площею 90 квадратних сантиметрів завтовшки 2,5 сантиметра на станції Сібуя в Токіо, Японія, виробляє електрику щоразу, коли на нього ступає людина, запалюючи світловий дисплей на одній зі стін станції. Він також живить світлодіодну плату, яка в режимі реального часу оновлює загальну кількість електроенергії. Підраховано, що 2,4 мільйона людей щодня проходять через величезну станцію Сібуя.

П'єзоелектричний мат створює енергетичну напругу, прикладаючи заряд між аркушами матеріалу під час удару. Енергія накопичується всередині конденсаторів та передається на дисплеї.



Рисунок 1.4 – П'єзоелектричний килимок

За словами планувальника Йошіакі Такуї [5] із Soundpower Corp., компанії, яка створила килимок, людина вагою близько 62 кілограм генерує 0,1 Вт за одну секунду, яку він зазвичай витрачає на те, щоби наступити на плитку. Однак, якщо вони займатимуть велику площу і тисячі людей наступатимуть чи стрибатимуть на них, тоді система зможе генерувати значну кількість енергії за словами Такуї.

Mat – це спільний проект уряду округу Сібуя та Soundpower, спрямований на забезпечення більшої громадської підтримки ініціатив у галузі екологічно чистої енергії, а також надання компанії хороших можливостей для досліджень.

На іншому великому токійському залізничному вокзалі перед квитковими турнікетами також була встановлена спеціальна керамічна плитка для підлоги, яка викликає невеликі вібрації, що накопичуються у вигляді енергії.

Керамічна плитка під шаром гумових листів, що поглинають вібрації. Оскільки, за оцінками, 400 000 осіб щодня користуються цією другою станцією, компанія сподівається, що такий варіант використання п'єзоелектрики, принаймні, генеруватиме достатньо електроенергії, щоб покрити обсяг, який використовується турнікетами та декількома світлодіодними вивісками на станції.

1.4 Світові аналоги п'єзогенераторів

Існує безліч компаній розробників п'єзогенераторів по всьому світу, нижче ми розглянемо деякі з них.

П'єзогенератор компанії Pavegen

Одним із видатних розробників п'єзогенератора є компанія Pavegen Systems. Їх технологія являє собою плитку для підлоги у формі трикутника, розташована на трьох п'єзогенераторах, яка показана на рис. 1.5. При механічному впливі на цю плитку, в цьому випадку крок людини, виробляється невелика кількість енергії. Ця система здатна генерувати близько 5 Вт за один крок людини.



Рисунок 1.5 – П'єзогенератор компанії Pavegen

П'єзогенератор від розробників Energy Floors

Іншим, не менш відомим розробником, є голландська компанія Energy Floors. Вони представляють свій п'єзогенератор у трьох варіантах: Dancer, Gamer, Walker. Кожен з варіантів розміщується в місцях, для яких він призначений, наприклад, Walker встановлюється в місцях прогулянок наприклад парки, сквери або алеї. Структура генератора показано на рис. 1.6

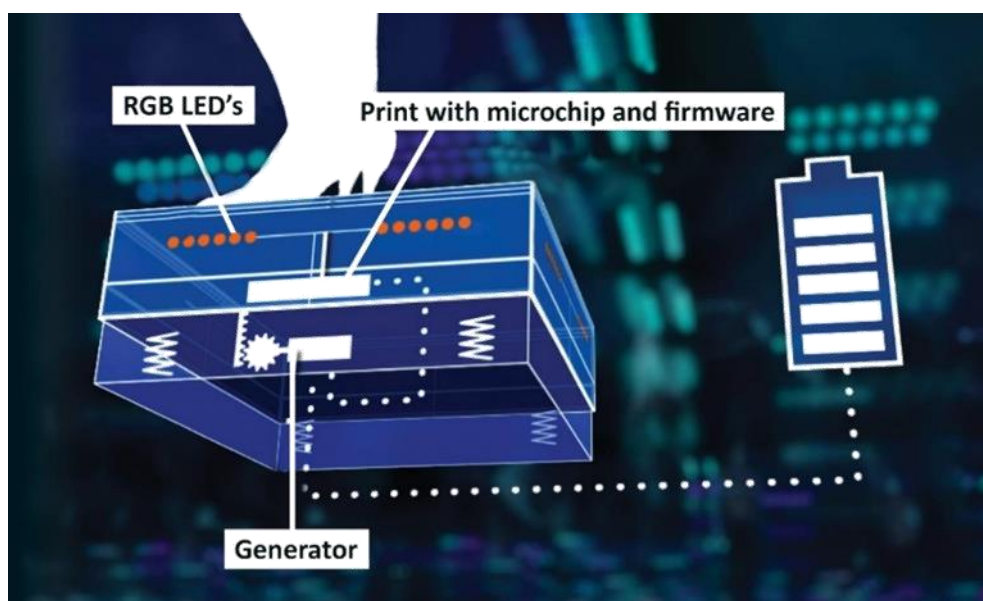


Рисунок 1.6 – П'єзогенератор компанії Energy Floors

1.5 Висновки до розділу 1

У межах аналітичного розділу проведено комплексний огляд сучасних технологій автономної генерації електроенергії для живлення малопотужних приймачів. Встановлено, що найбільш перспективними джерелами енергії для таких систем є фотоелектричні панелі, вітрогенератори та п'єзоелектричні перетворювачі. Зокрема, п'єзогенератори демонструють високу ефективність у міському середовищі, де механічна енергія від кроків чи вібрацій може бути перетворена на електричну.

Проаналізовано принципи роботи різних типів п'єзогенераторів – на основі поздовжніх та згинальних коливань – і наведено приклади їх практичного застосування в інфраструктурних об'єктах, зокрема на залізничних станціях Токіо. Вивчено світовий досвід реалізації п'єзотехнологій, зокрема розробки компаній Pavegen та Energy Floors, що підтверджує актуальність і прикладну цінність досліджуваної тематики.

Отримані результати свідчать про високий потенціал п'єзоелектричних систем як джерел живлення для автономних освітлювальних і сигнальних пристроїв, особливо в умовах обмеженого доступу до традиційних енергетичних ресурсів. Це створює передумови для подальших досліджень і впровадження таких технологій у практику енергозабезпечення міських і віддалених об'єктів.

2 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Класифікація п'єзоелектричних генераторів

Це важливий та інноваційний метод отримання електричної енергії з механічної енергії без необхідності використання обертального ефекту генераторів. Таким чином, п'єзоелектричний генератор забезпечує спосіб прямого перетворення електричної енергії на механічну енергію без типового руху при обертанні. Він не має рухомих частин, що робить його більш простим у використанні, компактним та надійним.

На виході п'єзоелектричного кристала виходить змінний сигнал. Щоб використовувати цю напругу для електронних пристроїв з низьким енергоспоживанням, її необхідно спочатку перетворити на цифровий сигнал [6]. Це робиться за допомогою перетворювача змінного струму на постійний, як показано на рис. 2.1 [7].

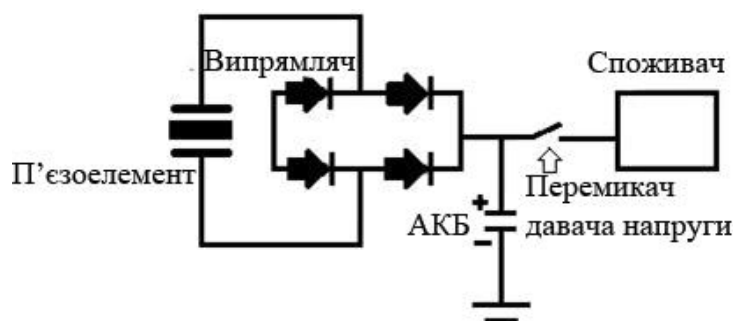


Рисунок 2.1 – Схема п'єзоелектричного генератора

П'єзоелектричні матеріали поділяються на природні та штучні елементи [8]. Хорошими прикладами п'єзоелектричних елементів є:

- Природні матеріали кварц, сіль Рошель (тартрат натрію калію) та цукроза
- Штучно одержані матеріали: кераміка, оксид цинку, титанат барію та титанат цирконату свинцю, який більш поширений під назвою ЦТС.

Переваги п'єзоелектричних генераторів:

- П'єзоелектричні генератори мають невеликі розміри та універсальні завдяки своїй плоскій та гнучкій формі.

- П'єзоелектричні генератори дуже корисні для отримання непотрібної енергії, такої як енергія від вібрацій або невеликих джерел. П'єзоелектричний генератор забезпечує метод прямого

перетворення механічної енергії на електричну енергію без типового руху при обертанні, тому він також компактний і надійний. Недоліки п'єзоелектричні генератори

- П'єзоелектричні матеріали не можуть бути використані для статичних умов експлуатації та мають чутливість до температури.

- Необхідне точне налаштування системи, щоб уловити момент впливу механічної сили та перетворити її.

Враховуючи всі ці аспекти можна сказати, що п'єзоелектричний генератор обходить інші варіанти генераторів відновлюваних джерел енергії в плані компактності, так як вітрогенератори і сонячні батареї займають великі площі, також варто розуміти, що жоден з цих способів не має досить високий ККД, за винятком ГЕС, тому складно сказати який з способів буде найбільш перспективним. Однак це тільки в даний час, у майбутньому можливе поліпшення та модернізація як самих джерел енергії, так і комплектуючих до них.

Функції генератора аналогічні до функцій п'єзоелектричного елемента. Тут п'єзоелектричний елемент, що є комбінацією цирконату свинцю і титанату, розташований між електродами. Просте розташування елемента не створить електричного струму. При додатку механічного тиску на елемент усередині кристала створюватимуться електричні заряди. Додаткові позитивні та негативні заряди створюються по обидва боки граней кристала. Металева пластина, розташована на п'єзо-електричному елементі, збирає ці позитивні та негативні заряди, які використовуються для генерації напруги та подачі електричного струму по колу.

2.2 Підбір п'єзоелектричного елемента

П'єзоелектричний елемент – ключовий компонент. Відповідає за перетворення електричної енергії на пружну, і навпаки. Зазвичай є пластиною з п'єзокераміки, яка виготовляється з порошкових матеріалів.



Рисунок 2.2 – П'єзоелектричний елемент мембранного типу

П'єзокераміка – штучний матеріал, що має п'єзоелектричні та сегнетоелектричні властивості, що має полікристалічну структуру.

П'єзокераміка не належить до класичних видів кераміки, оскільки синтезуються з оксидів металів. Порівняно з монокристалічними п'єзоелектриками п'єзокераміки відрізняються технологічністю, дешевизною та виразністю п'єзоелектричних та діелектричних властивостей. З п'єзокераміки можна виготовляти вироби будь-якої форми — пластини, диски, циліндри, трубки, сфери тощо.

У більшості сучасних п'єзокерамічних матеріалів основу становлять тверді розчини титанату - цирконату свинцю, які також можуть бути покращені, змінені або модифіковані різними добавками. Крім основи титанату – цирконату свинцю також випускаються п'єзокерамічні матеріали на основі титанату барію, титанату свинцю, метоніобату свинцю, титанату вісмуту. П'єзокерамічні матеріали поділяються на функціональні групи та підгрупи залежно від основного призначення. Також для збору енергії, використовуючи п'єзоелектричний ефект, згідно з дослідженнями [9] теоретично можливо використовувати п'єзоелектричні полімери та композити.

Сегнетом'які матеріали – це матеріали, що характеризуються високими п'єзомодулями, діелектричною проникністю, коефіцієнтами електромеханічного зв'язку. У той же час ці матеріали мають малу механічну добротність і мають відносно великі діелектричні втрати. До п'єзокерамічних елементів, які виготовляються з даного виду матеріалу, не пред'являються особливо сильних вимог до тимчасової стабільності їх електрофізичних параметрів. П'єзокерамічні елементи на основі сегнетом'яких матеріалів застосовуються при виробництві високочутливих приймальних пристроїв, гідроакустичних систем, медичних датчиків, телефонних компонентів, витратомірів, відносно слабких випромінювачів та ін. *НЦТБС – 1, НЦТС – 2, ЦТС – 46, ЦТС – 50, ЦТС – 51.*

Матеріали середньої сегнетожорсткості та сегнетожесткіє – це матеріали, що характеризуються високою механічною добротністю, малими діелектричними втратами у тому числі в сильних електричних полях. До п'єзокерамічних елементів, виготовлених з даних матеріалів, пред'являються жорсткі вимоги до їх електрофізичних параметрів за умови їх роботи у сильних електричних полях та за великих механічних напруг. П'єзокерамічні елементи на основі даних п'єзокерамічних матеріалів, як правило, застосовуються при виробництві гідролокаторів, ультразвукових мийок, розпилювачів рідин, акселерометрів, гіроскопів, п'єзотрансформаторів та ін. *7, ЦТС – 8, ЦТС – 42, ЦТС – 43, ЦТС – 47, ЦТС – 47М, ЦТС C_m – 3, ЦТС – 48.* Високостабільні матеріали – це матеріали, що характеризуються підвищеною стабільністю частотних характеристик у температурному та часовому інтервалі. П'єзокерамічні елементи на основі даних п'єзокерамічних матеріалів застосовуються при виробництві частотно-селективних пристроїв на поверхневих та об'ємних акустичних хвилях, фільтрів, резонаторів, гіроскопів та ін. Високостабільними матеріалами є: *ЦТС – 38, ЦТС – 39, ЦТС – 53 ЦТС – 32.*

Високотемпературні матеріали – це п'єзокерамічні елементи на основі матеріалів, які здатні виносити високі температури у робочому режимі при 250 °С і вище. Застосовуються для датчиків вібрації та інших приладів. До

високотемпературних матеріалів відносяться: *TNaB – 1*, *TNaB – 1м*, *TNB – 1*, *TNbB – 1*, *ЦТС – 26*, *ЦТС – 26М*, *ЦТС – 21*, *ТСВС – 2*.

Матеріали з підвищеною анізотропією коефіцієнтів електромеханічного зв'язку – це матеріали, які з певними поєднаннями інших параметрів використовуються в п'єзокерамічних елементах для високочастотних випромінювачів та приймачів, для датчиків зі зниженою бічною чутливістю, що застосовуються для дефектоскопії, товщинометрії, рівніметрії, медичної діагностичної. Матеріали із підвищеною анізотропією: *ТКС-21*, *ТКС-22*.

Пористі матеріали – це матеріали, які мають широкий діапазон робочих температур та застосовуються для виробництва п'єзокерамічних елементів, що використовуються в ультразвукових перетворювачах дефектоскопів, товщинометрії, віброметрії, гідроакустиці, діагностичній та терапевтичній медичній апаратурі. До цих матеріалів належать: *ЦТС – 19*, *ЦТС – 19П*, *ЦТС – 36*, *ЦТС – 36П*, *ЦТБС – 8*, *ЦТБС – 8П*.

Композитні матеріали – це матеріали, які застосовуються для виробництва п'єзокерамічних елементів, що застосовуються в перетворювачах ультразвукових дефектоскопів і товщиномірів, в приладах ультразвукової медичної діагностичної апаратури, в ультразвукових рівнемірах і витратомірах, в об'ємочутливих гідрофонах, в звуко *КІІМ – 1*, *КІІМ – 2*.

Виходячи з нашого поставленого завдання найбільш підходящим п'єзокерамічним матеріалом буде сегнетомягкий матеріал, оскільки він має всі необхідні властивості для розрахунку та успішного генерування електричної енергії нашої системи. П'єзоелектричний елемент вибрати у формі диска чи мембранного типу. Цей вибір матеріалу обумовлений його простотою використання та експлуатації, а також дешевизною матеріалу. Розрахунок буде проводитись для кількох елементів, щоб отримати наочне порівняння кожного покоління елементів.

2.3 Моніторинг механічної дії на полотно пішохідної зони

Спостереження за рівнем прохідності по пішохідній зоні показали, що в будні дні за одну годину по набережній ходить близько 70-72 осіб, у той час як у вихідні дні ходить приблизно в 2 рази більше людей, тобто 140-144 людини, проте варто врахувати, що збирання інформації в бути більше. До того ж, на набережній будуються різні кавові та ресторанні заклади, що також збільшує потік людей. ▬

Також пропонується для встановлення нові світильники типу ДСУ10В, виробництва заводу «Ватра» . зовнішній вигляд якого зображений на рис 2.3.

Їхня кількість дорівнює 56, а один світильник споживає до 0,08 кВт · год .



Рисунок 2.3 – Загальний вигляд світильника ДСУ10В.

Сама набережна довжиною дорівнює 430 метрів і завширшки 3,3 метра, проте ми будемо використовувати лише частину заданої довжини, оскільки покрити всю довжину п'єзоелектричними елементами є ресурсозатратно.

2.4 Розрахунок електричного потенціалу від механічного впливу

Як матеріал для розрахунку приймемо сегнетомакі матеріали, такі як ЦТС – 19, ЦТС – 36, НЦТС – 1, ЦТС – 46, ЦТС – 51, так як вони мають досить хороші якості та характеристики, придатні для розрахунку та успішного застосування в нашій системі для генерації електричної енергії. Характеристики

кожного елемента наведені у табл. 2.1. Розрахунок електричного потенціалу було виконано у програмі MathCad. –

Таблиця 2.1 – Характеристики п'єзокерамічних елементів

Позначення	Одиниця вимір.	<i>ЦТС – 19</i>	<i>ЦТС – 36</i>	<i>ЦТС – 46</i>	<i>НЦТС – 1</i>	<i>ЦТС – 51</i>
ε_{33}	-	1750	670	2100	4000	2180
K	-	0.6	0.7	0.73	0.73	0.73
d_{31}	$10^{-12} \text{ Кл} / \text{В}$	-170	-90	-190	-260	-216
d_{33}	$10^{-12} \text{ Кл} / \text{В}$	350	220	450	550	560
ρ	$10^3 \text{ кг} / \text{м}^3$	7.5	7.7	7.5	7.4	7.5

де d_{31} , d_{33} – п'єзоелемент;

K – коефіцієнт електромеханічного зв'язку;

ε_{33} – відносна діелектрична проникність ρ – щільність

Приклад розрахунку показаний для п'єзоелемента *ЦТС – 19*. Прийmemo, що радіус п'єзоелемента $R_{\text{ПЕ}} = 25 \text{ мм}$, товщина $L = 0,25 \text{ м}$, площа покриття $S_{\text{пок}} = 15 \text{ м}^2$, а прохідність зменшимо до мінімального значення 36 осіб на годину.

Знайдемо площу перерізу п'єзоелектричного елемента:

$$S = \pi \cdot R_{\text{ПЕ}}^2 = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Електрична ємність одного п'єзоелемента:

$$C = \varepsilon_{33} \cdot \varepsilon_0 \cdot (1 - K^2) \frac{L}{S} = 1,262 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}.$$

Заряд одного п'єзоелемента:

$$Q = d_{33} \cdot F = 2,746 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$$

Вихідна напруга:

$$U_{\text{вих}} = \frac{Q}{C} = 217,582 \text{ В}$$

Вихідний струм:

$$I_{\text{вих}} = j \cdot \omega \cdot \varepsilon_{33} \cdot \varepsilon_0 \frac{S}{L} \cdot U_{\text{вих}} - j \cdot \omega \cdot F \cdot (2 \cdot d_{31} + d_{33}) = 1,098 \cdot 10^{-4} \text{ А}$$

Потужність одного п'єзоелементу:

$$P = U_{вих} \cdot I_{вих} = 0,024 \text{ Вт}$$

Кількість елементів, які зачепить один крок:

$$N = \frac{S_{стопи}}{S} \cdot 0,7 = 7,13 \approx 7$$

де $S_{стопи} \approx 0,02 \text{ м}$.

Кількість кроків однієї людини по полотну:

$$N_{крок} = \frac{S_{пок}}{0,5} = 30$$

Потужність за прохід однієї людини:

$$P_1 = P \cdot N_{крок} \cdot N = 5,111 \text{ Вт}$$

Потужність в залежності від прохідності:

$$P_2 = P_1 \cdot 36 = 183,987 \text{ Вт}$$

Енергія, отримана за одну годину:

$$E = \frac{P_2}{1000} = 0,184 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Енергія за один день:

$$E_1 = E \cdot 8 = 1,472 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Потужність ламп:

$$P_{сум.л} = P_{л} \cdot N_{л} = 4,48 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

де $P_{л}$ – потужність однієї лампи рівна 80 Вт ;

$N_{л}$ – кількість ламп

Кількість ламп, які можна заживити, використовуючи дані, отримані при цьому розрахунку:–

$$N_{3.л} = \frac{E \cdot 1000}{P_{л}} = 2,3$$

Таблиця 2.2 – Підсумки розрахунку потужності та енергії

П'єзокераміка	<i>ЦТС – 19</i>	<i>ЦТС – 36</i>	<i>НЦТС – 1</i>	<i>ЦТС – 46</i>	<i>ЦТС – 51</i>
Потужність <i>P, Вт</i>	0.024	0.006	0.05	0.028	0.017
Енергія <i>W, кВт·год</i>	1.472	0.45	3.1	1.729	1.076

За отриманими даними побудуємо гістограму за кожною характеристикою, щоб побачити різницю між елементами. Найбільше виділяється елемент НЦТС-1.

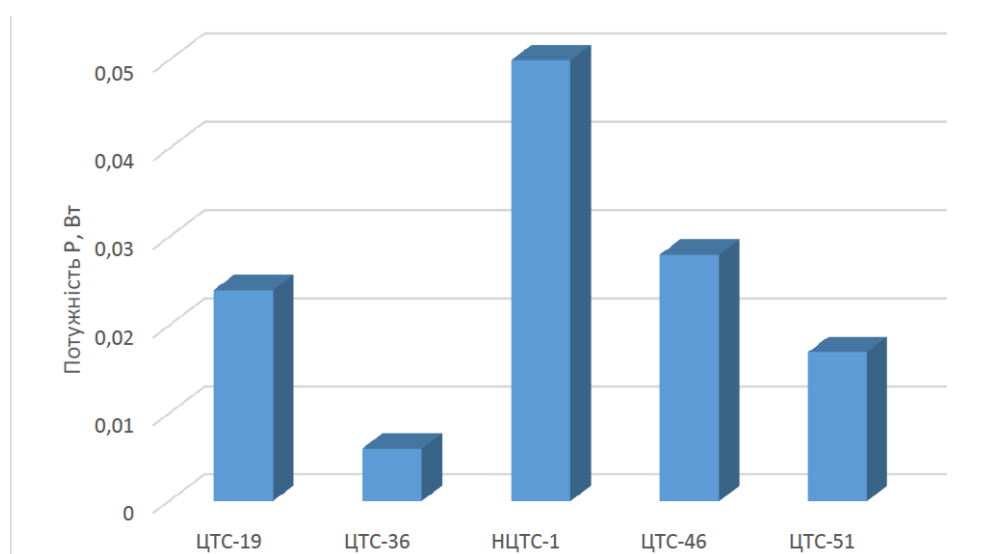


Рисунок 2.4 – Гістограма потужності одного п'єзoeлемента

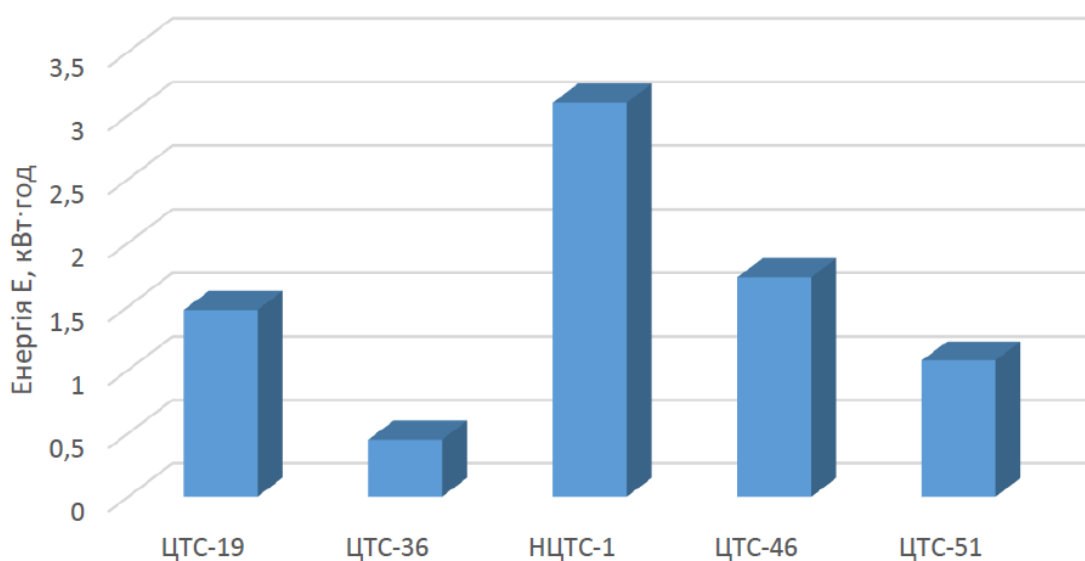


Рисунок 2.5 – Гістограма генерованої за один день електричної енергії.

Виходячи з отриманих результатів можна зробити очевидний висновок, що п'єзокераміка *НЦТС-1* є найкращим з усіх представлених. Вона здатна генерувати $3,1 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ при розрахунку з найгіршою прохідністю. ──

Однак ми можемо змінити деякі характеристики системи та спробувати збільшити вихідну енергію. Для подальших розрахунків будуть використані характеристики п'єзокераміки *НЦТС-1*, оскільки заздалегідь саме вона показала найкращі результати. ──

Розглянемо залежність зміни енергії від зміни площі полотна. Для цього ми поступово збільшуємо довжини покриття на 5 метрів та проведемо розрахунок для п'єзокерамічного елемента *НЦТС-1*, оскільки він виробляє найбільшу кількість енергії порівняно з іншими п'єзокерамічними елементами.

Таблиця 2.3 – Розрахунок потужності та енергії в залежності від площі полотна.

Площа, $S, \text{ м}^2$	15	30	45	60	75
Потужність $P, \text{ Вт}$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Енергія $W, \text{ кВт} \cdot \text{год}$	3.1	6.202	9.303	12.403	15.504

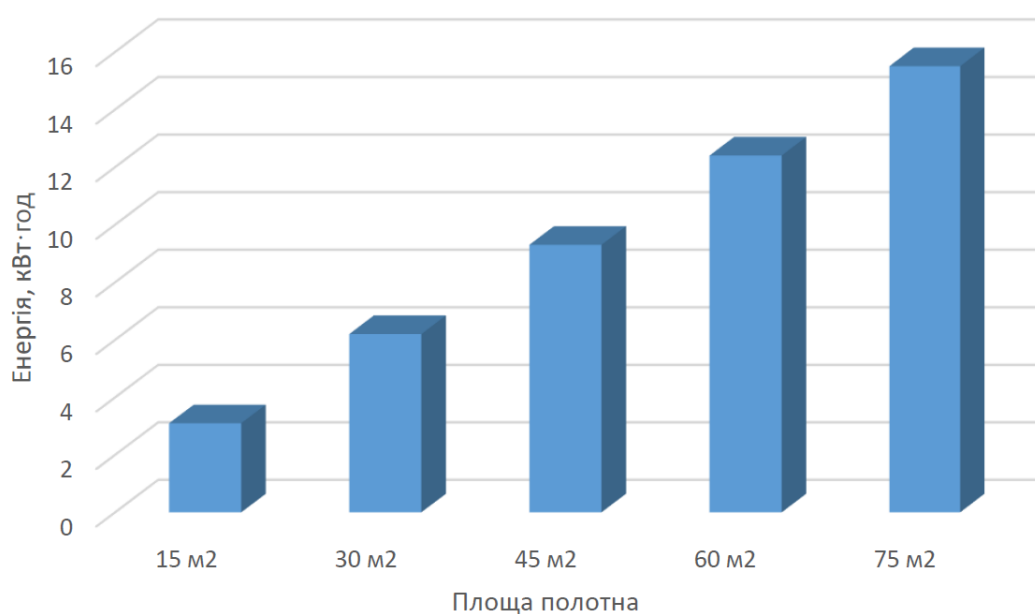


Рисунок 2.6 – Гістограма залежності генерованої енергії від полотна.

З отриманих результатів видно, що при збільшенні площі полотна, яким проходять пішоходи відбувається збільшення вироблення енергії, проте потужність залишається незмінною тому що п'єзокерамічний елемент не змінювався. При збільшенні площі полотна в 5 разів вироблення енергії збільшилося в 5 разів відповідно, тому можна зробити висновок, що розмір покриття безпосередньо впливає на кінцеву генерацію електричної енергії. —

Далі ми розглянемо вплив товщини кераміки, яка є важливою частиною п'єзоелектричного елемента, на вихідну потужність та вироблення енергії. Початкове значення товщини дорівнює $L = 0,25 \text{ мм}$ будемо збільшувати рівномірно. Побудуємо гістограму, щоб наочно розглянути отримані значення.

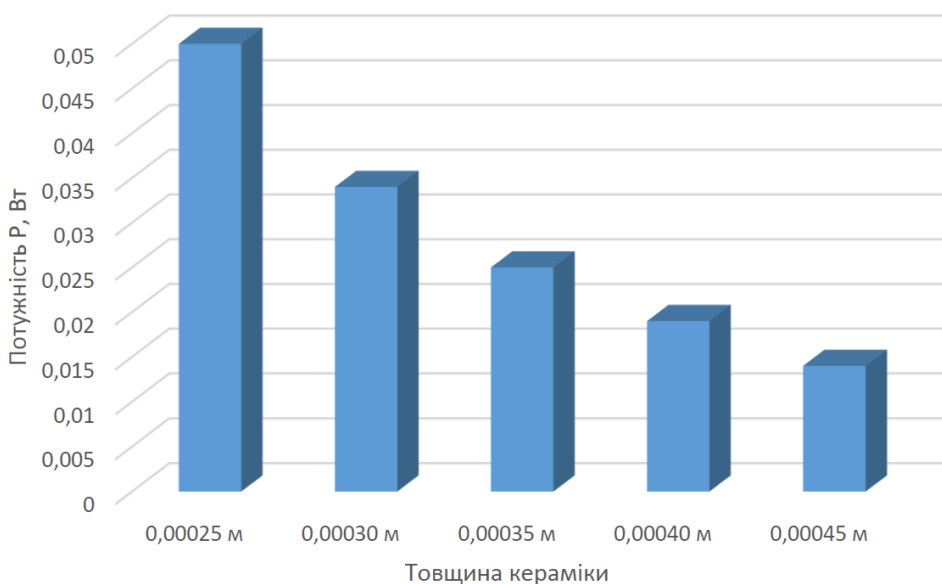


Рисунок 2.7 – Гістограма залежності потужності від товщини кераміки

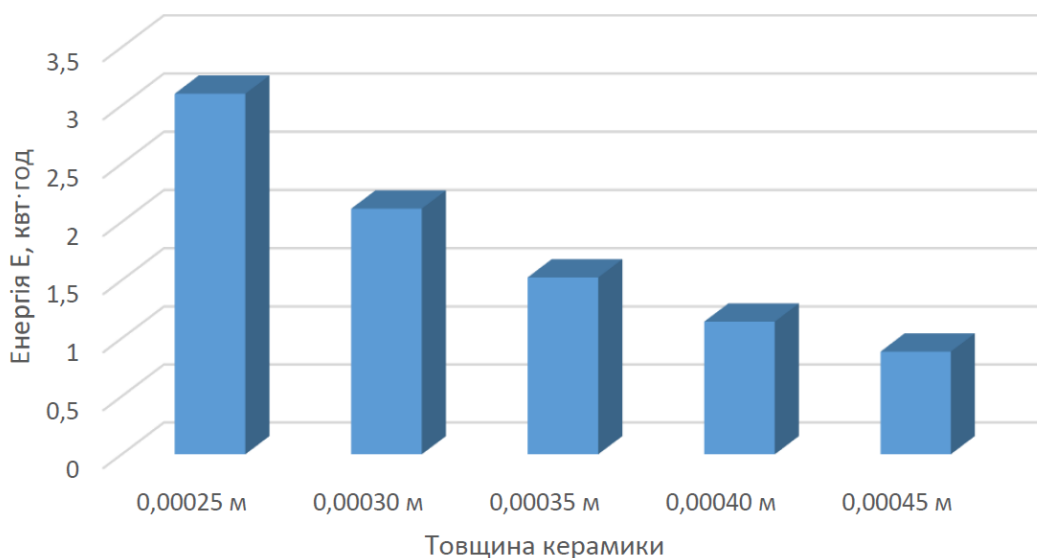


Рисунок 2.8 – Гістограма залежності генерованої енергії від товщини кераміки

З отриманих результатів бачимо, що з поступовому збільшенні товщини кераміки вихідна потужність і енергія також поступово знижується. Можна зробити висновок, що чим менше товщина, тим ефективніше працює п'єзoeлектричний генератор, проте варто розуміти, що занадто тонкий матеріал має властивість переламуватися, тому необхідно правильно підібрати товщину, щоб міцності кераміки вистачило на довгострокову роботу.

Далі розглянемо залежність вихідної потужності та енергії від величини радіусу кераміки. Також будемо поступово підвищувати значення радіусу і спостерігати за результатом розрахунків.

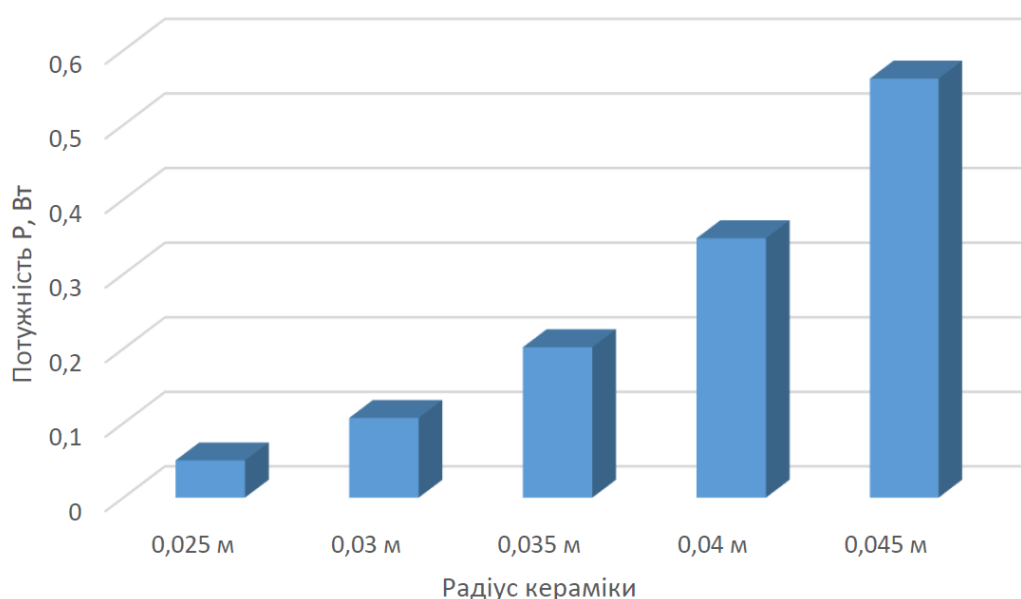


Рисунок 2.9 – Гістограма залежності потужності п'єзоелемента від радіусу кераміки.

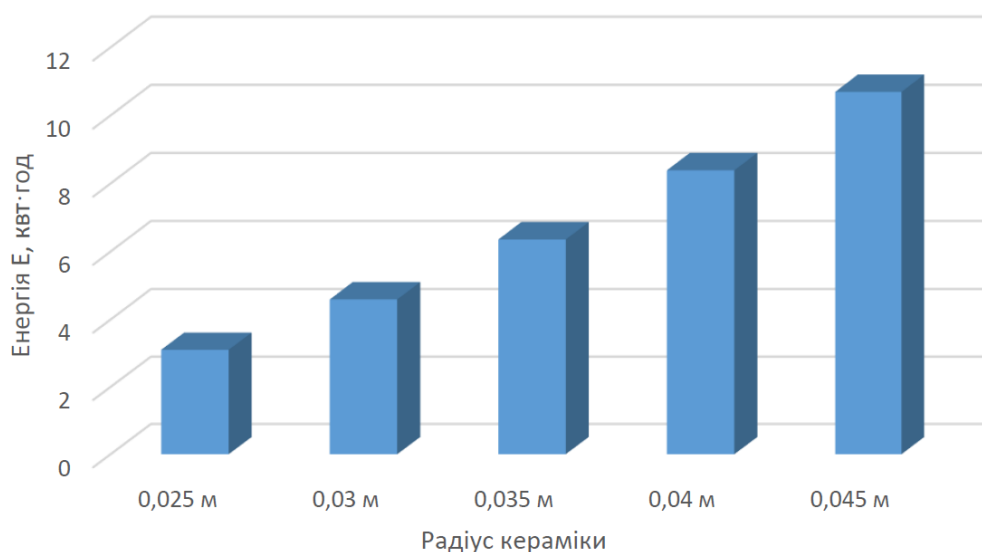


Рисунок 2.10 – Гістограма залежності генерованої енергії від радіусу кераміки.

Виходячи з отриманих результатів можна зробити висновок, що величина радіусу досить сильно впливає на енергію, що виробляється. Варто розуміти, що збільшення радіусу кераміки зменшує кількість п'єзоелектричних елементів у системі, що, у свою чергу, може зменшити вироблення енергії в перспективі, оскільки один або кілька елементів можуть вийти з ладу. Навіть не дивлячись на паралельне підключення, якщо один елемент зламається, інші продовжать роботу, великий радіус кераміки робить систему сильно залежною від кожного елемента, на відміну від системи з керамікою малого радіуса, коли п'єзоелектричних елементів в рази більше. ────

Залишилося подивитися залежність вироблюваної енергії від кількості людей, що проходять по полотну, вихідна потужність не зміниться, так як характеристики п'єзоелектричного елемента залишаються незмінними. Почнемо розрахунок з найгіршого показника поступово збільшуючи потік прохідності, щоб побачити, як змінюються значення. ─

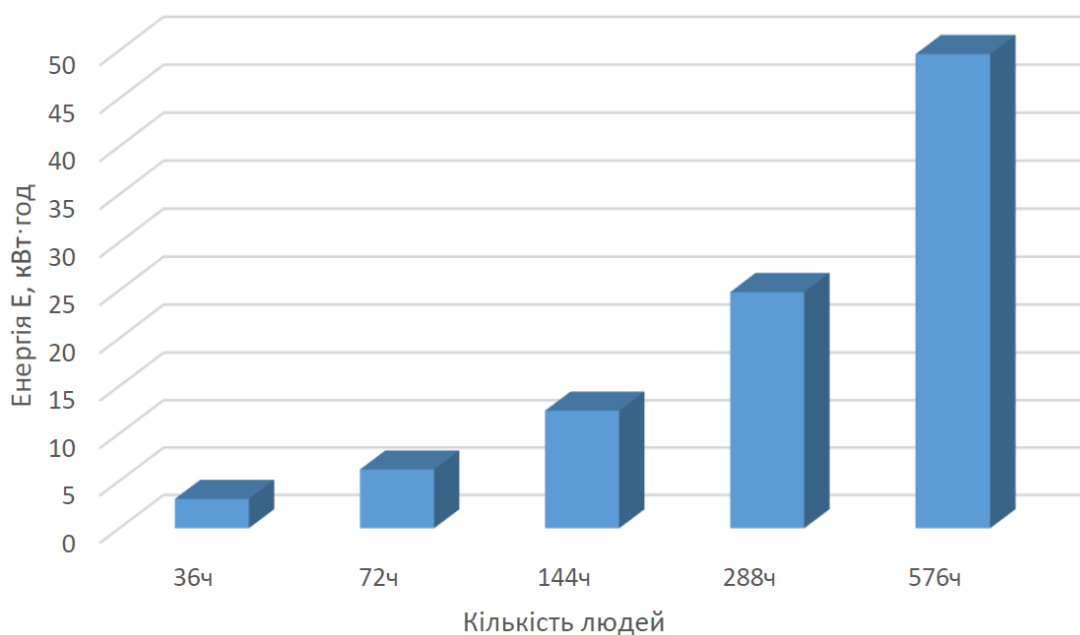


Рисунок 2.11 – Гістограма залежності генерованої енергії від потоку людей

Як видно з підсумків розрахунку збільшення прохідності людей по полотну багаторазово збільшує генеровану енергію з 3,1 кВт·год до 49,6 кВт·год, проте варто розуміти, що велика кількість людей як 576 осіб, або малоймовірно, або неможливо для цієї локації, тому слід зробити остаточних

розрахунок при реальних значеннях прохідності характеристик п'єзокерамічного елемента та розміру полотна.

Для прийнятної генерації енергії було обрано характеристики системи, які розміщені у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Характеристики системи.

Кераміка	Товщина кераміки, мм	Радіус кераміки, мм	Площа полотна, m^2	Прохідність, к-сть людей
НЦТС – 1	0.2	30	45	144

потужності та здатності запитати необхідну кількість світильників, результати показані в таблиці 3.5 та наступній гістограмі

Знайдемо площу перерізу п'єзоелектричного елемента:

$$S = \pi \cdot R_{п\epsilon}^2 = 2,82 \cdot 10^{-3} m^2$$

Електрична ємність одного п'єзоелемента:

$$C = \epsilon_{33} \cdot \epsilon_0 \cdot (1 - K^2) \frac{L}{S} = 1,17 \cdot 10^{-9} \Phi.$$

Заряд одного п'єзоелемента:

$$Q = d_{33} \cdot F = 4,315 \cdot 10^{-7} Кл$$

Вихідна напруга:

$$U_{вих} = \frac{Q}{C} = 368,925 В$$

Вихідний струм:

$$I_{вих} = j \cdot \omega \cdot \epsilon_{33} \cdot \epsilon_0 \frac{S}{L} \cdot U_{вих} - j \cdot \omega \cdot F \cdot (2 \cdot d_{31} + d_{33}) = 4,602 \cdot 10^{-4} А$$

Потужність одного п'єзоелементу:

$$P = U_{вих} \cdot I_{вих} = 0,17 Вт$$

Кількість елементів, які зачепить один крок:

$$N = \frac{S_{стопи}}{S} \cdot 0,7 = 4,951 \approx 5$$

де $S_{стопи} \approx 0,02 м.$

Кількість кроків однієї людини по полотну:

$$N_{\text{крок}} = \frac{S_{\text{пок}}}{0,5} = 90$$

Потужність за прохід однієї людини:

$$P_1 = P \cdot N_{\text{крок}} \cdot N = 75,664 \text{ Вт}$$

Потужність в залежності від прохідності:

$$P_2 = P_1 \cdot 36 = 1,09 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

Енергія, отримана за одну годину:

$$E = \frac{P_2}{1000} = 10,826 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Енергія за один день:

$$E_3 = E \cdot 8 = 87,625 \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

$$E_{\text{л}} = E \cdot 12 = 129,912 \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

$$E_{\text{о}} = E \cdot 9 = 97,434 \text{ кВт} \cdot \text{год};$$

$$E_{\text{в}} = E \cdot 10 = 108,26 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Сумарна потужність ламп:

$$P_{\text{сум.л}} = P_{\text{л}} \cdot N_{\text{л}} = 4,48 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

де $P_{\text{л}}$ – потужність однієї лампи рівна 80 Вт ;

$N_{\text{л}}$ – кількість ламп

Кількість ламп, які можна заживити, використовуючи дані, отримані при цьому розрахунку:–

$$N_{\text{з.л}} = \frac{E \cdot 1000}{P_{\text{л}}} = 136$$

Таблиця 2.5 – Характеристики системи.

Кераміка	Енергія за одну годину, кВт · год	Потужність за людину, Вт	Кількість підключених світильників	Прохідність, к-сть людей
НЦТС – 1	10.826	75.664	136	144

За підсумками розрахунку можна зробити висновок, що п'єзоелектричний генератор з такими параметрами здатний забезпечити енергією всі світильники, що знаходяться на набережній у кількості 56 штук. Енергію, що залишилася, необхідно акумулювати, для підтримки роботи світильників у нічний час, коли прохідність людей зменшується, тим самим, дозволяючи системі забезпечувати саму себе і по можливості створити її автономною. ┐┐┐

2.5 Висновки розділу 2

У розрахунково-дослідницькому розділі було проведено комплексний аналіз можливостей застосування п'єзоелектричних генераторів для перетворення механічної енергії від кроків пішоходів у корисну електричну енергію. Розглянуто класифікацію та характеристики п'єзоелектричних матеріалів, визначено їхні переваги та обмеження, здійснено підбір оптимального типу п'єзоелектричного елемента для створення енергетичної системи.

Проведені розрахунки показали, що найбільш ефективними для обраної системи є сегнетом'які п'єзокерамічні матеріали, які поєднують високу чутливість і достатню механічну міцність при відносно низькій вартості. Було змодельовано вплив ключових параметрів (товщини та радіуса кераміки, площі покриття, інтенсивності руху пішоходів) на вихідну потужність і добову генерацію енергії.

Результати досліджень підтвердили, що система здатна забезпечувати електроенергією встановлені на набережній світильники у повному обсязі. При цьому надлишок енергії доцільно акумулювати для подальшого використання в умовах зниженої прохідності. Встановлено, що оптимізація параметрів елементів та площі покриття дозволяє суттєво підвищити ефективність роботи системи та зробити її більш автономною.

Таким чином, доведено технічну можливість і перспективність використання п'єзоелектричних генераторів як альтернативного джерела

живлення для освітлення громадських просторів, що відкриває шляхи до подальшої модернізації та масштабування таких систем.

3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Розташування полотна на пішохідній зоні

Для того щоб наша система, заснована на п'єзогенераторі працювала, необхідно розмістити полотно в такому місці, де буде найбільша прохідність. Необхідне місце на пішохідній зоні виділено на рис 3.1, оскільки цей відрізок ділянки з'єднує два мікрорайони («центр» та «дружба»), а також знаходиться поряд парк, тому прохідність тут висока протягом усього року.

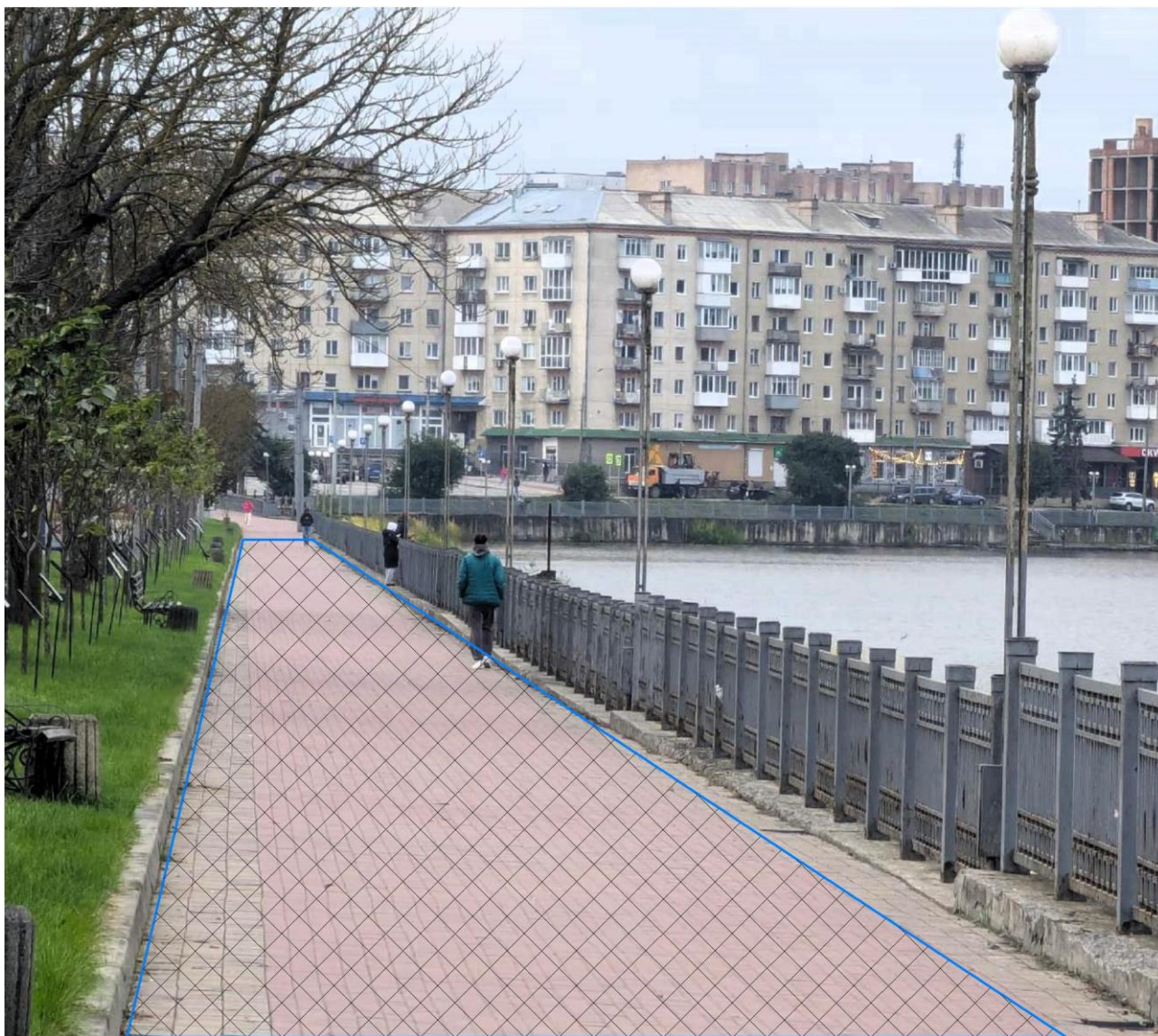


Рисунок 3.1 – Розташування полотна

3.2 Конструкція п'єзоелектричного генератора

Відповідним варіантом для нашої системи буде використання п'єзогенератора мембранного типу, оскільки ми вже вибрали необхідний для цього п'єзоелемент, до того ж подібний тип генератора дозволить використовувати поперечні коливання, а не лише поздовжні. Конструкція п'єзогенератора це покриття для підлоги, на яке буде впливати механічна сила. Саме покриття складається з гнучких компонентів, а між ними п'єзоелементи. Робота зі створення конструкції проводилась у комплексі програм SolidWorks.---

Створення конструкції п'єзогенератора шляхом моделювання окремих елементів, а потім їхнє об'єднання в одну цільну 3D модель. На рис. 3.2 представлена конструкція у загальному вигляді.---

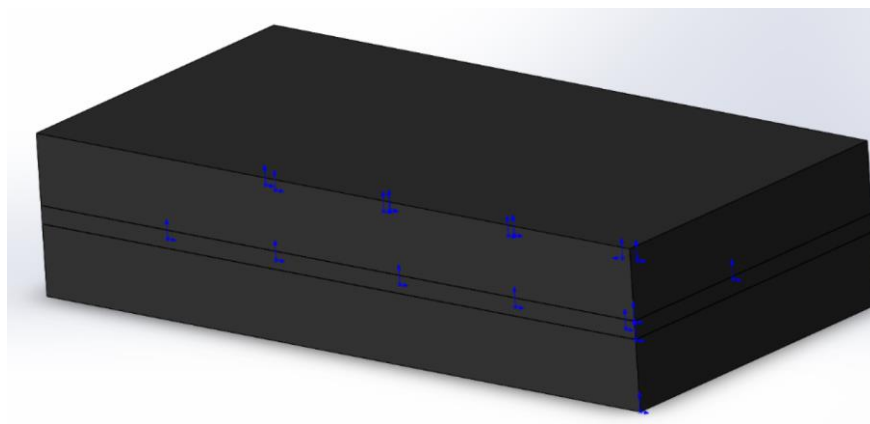


Рисунок 3.2 – Загальний вигляд конструкції.

Усередині конструкції п'єзогенератора знаходяться 3 шари елементів. На першому шарі знаходяться гнучкі компоненти, на які впливає механічна сила у вигляді кроків, і вони починають тиснути на другий шар, на якому розташовані п'єзоелементи. На третьому шарі знаходяться також гнучкі компоненти, проте вони розташовані зі зміщенням щодо вертикальної осі по відношенню до першого шару, що дозволяє при зусиллі на систему впливати на більшу кількість п'єзоелементів.---

На рисунках 3.3 показано внутрішню конструкцію моделі, розташування гнучких компонентів та п'єзоелементів. Можна наочно побачити, як відносно один одного знаходяться гнучкі компоненти, щоб максимізувати вплив механічної сили на п'єзоелементи.

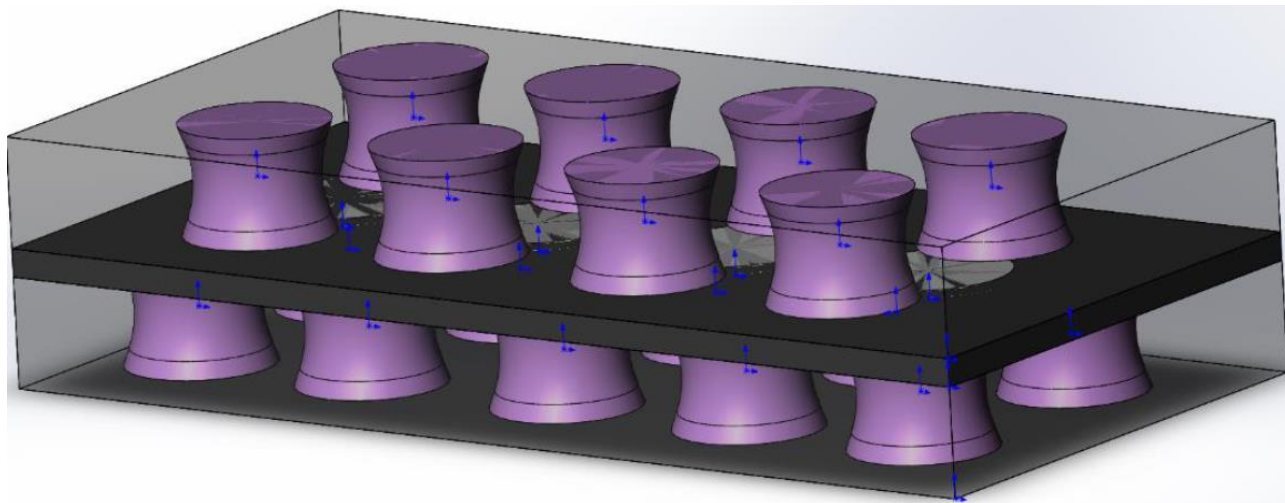


Рисунок 3.3 – Внутрішня конструкція моделі із п'єзоелементами.

На рис. 3.4 зображений гнучкий компонент, який при рівномірному розташуванні конструкції дозволяє максимізувати вплив механічної сили на другий шар, в якому знаходяться п'єзоелементи, для більш ефективної генерації.

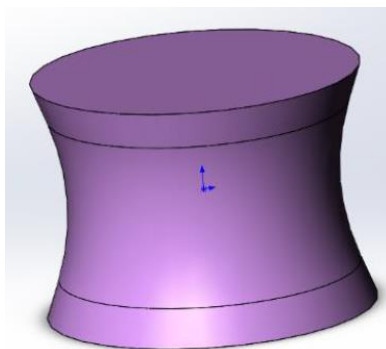


Рисунок 3.4 – Гнучкий компонент.

На рис 3.5 зображено модель п'єзоелемента, яка відображає існуючий аналог п'єзоелемент мембранного типу.

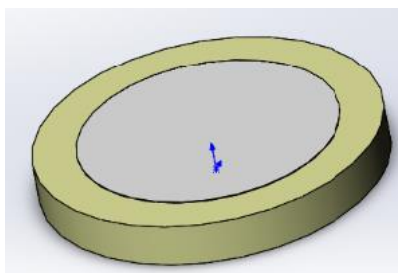


Рисунок 3.5 – П'єзоелемент.

Другий шар, де розташовані п'єзоелементи показаний на рис. 3.6, загальним виглядом у просторі.

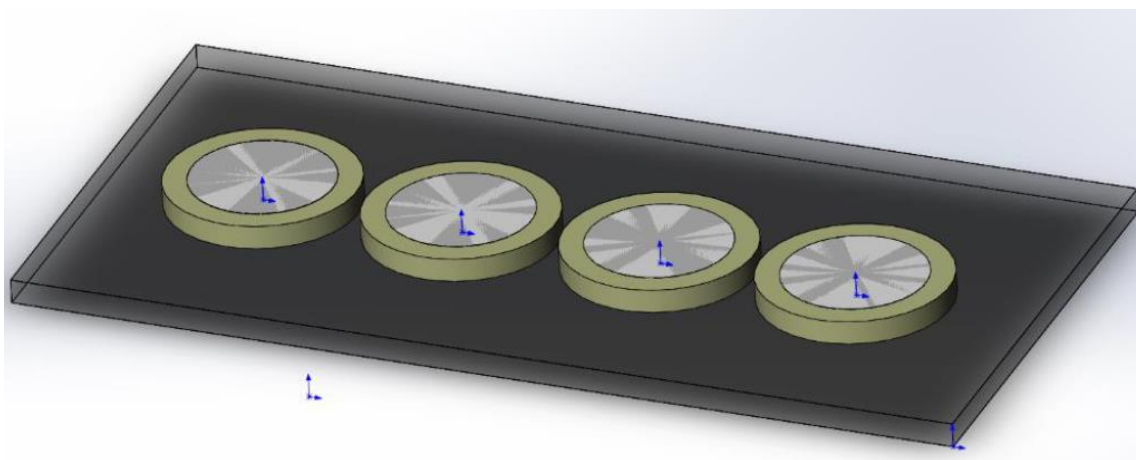


Рисунок 3.6 – Другий шар вигляд у просторі.

На рис. 3.7 показано більш виразне розташування гнучких компонентів та п'єзоелементів щодо один одного. Як бачимо гнучкі компоненти, які у більш раціональному порядку, чіпляють більшу частину п'єзоелемента для ефективнішої генерації.

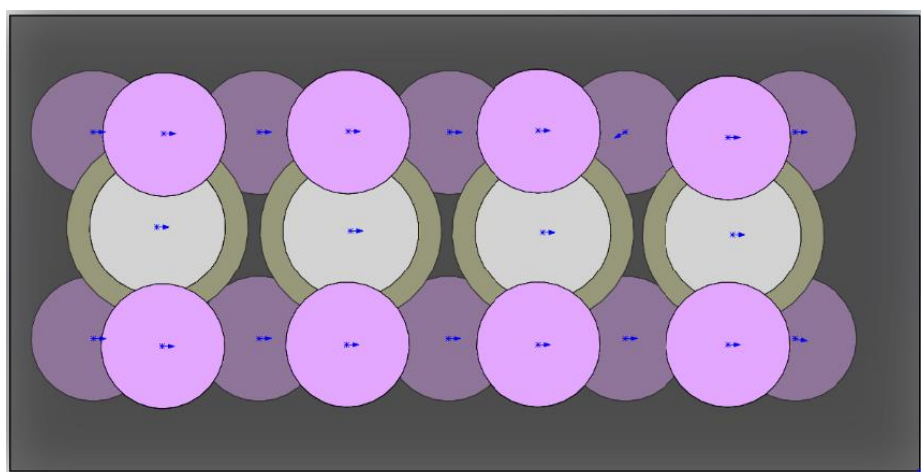


Рисунок 3.7 – Розташування гнучких компонентів та п'єзоелементів.

Таким чином була показана структура тільки частини покриття для підлоги, щоб розуміти з чого воно складається. Як бачимо п'єзоелементи розташовані між шарами гнучких компонентів, які у свою чергу розташовані особливим чином. Також варто відзначити, що якщо підключити п'єзоелементи один з одним паралельно, то це буде більш ефективно тому, що в системі використовується велика кількість п'єзоелементів і якщо один з них вийде з ладу, то продовжать роботу і при цьому втрати у генерації енергії будуть незначними.

3.3 Вибір типу накопичувача практичної реалізації

П'єзоелектричну систему збирання енергії можна поділити на три частини: джерело енергії, збирання енергії та сховище.

Сучасні тенденції розвитку енергетики зумовлюють необхідність створення ефективних систем накопичення енергії, які дозволяють забезпечити стабільність роботи енергомереж, підвищити надійність живлення споживачів і оптимізувати використання відновлюваних джерел енергії. Найважливішим елементом таких систем є акумуляторні батареї, тип і характеристика яких визначають ефективність та економічність роботи всієї системи.

Найпоширенішими типами акумуляторних батарей, які сьогодні застосовуються для накопичення енергії, є літій-іонні, літій-залізо-фосфатні, натрієві, свинцево-кислотні (у тому числі AGM-модифікації), а також ванадієві редокс-флюїди системи. Кожен тип має власні переваги та недоліки, які визначають сферу його застосування.

Літій-іонні акумулятори (Li-ion) посідають провідне місце на сучасному ринку. Вони характеризуються високою питомою енергією, високим коефіцієнтом корисної дії (до 95 %) та порівняно невеликими габаритами. Основними підвидами є системи на основі літій-нікель-марганець-кобальт-оксиду (NMC) і літій-нікель-кобальт-алюмінієвого оксиду (NCA), що мають високу щільність енергії, проте нижчий ресурс циклів (приблизно 1000–3000) і більшу чутливість до температурних коливань.

Літій-залізо-фосфатні батареї (LiFePO_4) відзначаються підвищеною стабільністю і безпечністю. Їхній термін служби сягає 4000–6000 циклів, що значно перевищує показники більшості інших типів. Вони допускають глибокий розряд до 90–95 % від номінальної ємності, мають високу термічну стабільність, меншу схильність до перегріву і термічного розгону. Ефективність перетворення енергії в таких системах становить 90–95 %. Завдяки цим властивостям акумулятори LiFePO_4 стали базовим рішенням для домашніх, комерційних і промислових систем накопичення енергії.

Ванадієві редокс-флоу батареї (VRFB) належать до нового покоління накопичувачів енергії. Їхньою особливістю є те, що енергія зберігається у рідкому електроліті, який циркулює між резервуарами. Такі системи забезпечують практично необмежену кількість циклів заряду-розряду (до десятків тисяч) і дозволяють гнучко масштабувати ємність за рахунок збільшення об'єму електроліту. ККД становить 65–85 %, що дещо нижче, ніж у літій-іонних акумуляторів, однак вони придатні для тривалого зберігання енергії (від кількох годин до доби). Основними перевагами є висока безпека, відсутність ризику займання та можливість повної переробки електроліту.

Натрієві акумулятори (Na-ion) є новим перспективним напрямом. Їхня технологія подібна до літій-іонної, однак натрій є значно дешевшим і поширенішим елементом. Питома енергія натрієвих елементів поки що нижча (150–175 Вт·год/кг), але ці акумулятори мають потенціал для здешевлення систем накопичення великої потужності, особливо для стаціонарних установок.

Свинцево-кислотні акумулятори залишаються найбільш доступними за ціною, проте їхня енергетична щільність невисока (30–50 Вт·год/кг), ефективність становить близько 70–85 %, а термін служби зазвичай не перевищує 500–800 циклів. Через ці обмеження вони переважно використовуються в резервних або допоміжних системах, де не потрібне часте циклування.

Серед свинцево-кислотних технологій слід окремо розглянути AGM-акумулятори (Absorbent Glass Mat). Це вдосконалена версія традиційних

свинцево-кислотних батарей, у яких електроліт абсорбований у скловолоконний сепаратор. Завдяки цьому акумулятори AGM є герметичними, не потребують обслуговування і можуть працювати у будь-якому положенні. Вони мають кращу струмовіддачу та довший термін служби (до 1000–1200 циклів) порівняно зі звичайними свинцевими батареями. Проте за щільністю енергії, ефективністю та глибиною розряду AGM суттєво поступаються літєвим технологіям. Для систем, які часто піддаються глибоким розрядам, AGM не є економічно доцільним рішенням, оскільки деградація пластин відбувається досить швидко. Їх доцільно застосовувати у невеликих автономних або резервних системах, де важлива простота, низька початкова вартість та надійність.

Порівняльний аналіз характеристик свідчить, що літій-залізо-фосфатні акумулятори (LiFePO_4) мають оптимальне співвідношення між ціною, безпечністю, довговічністю та ефективністю. Вони забезпечують стабільну роботу при великій кількості циклів, мають високий коефіцієнт корисної дії та невелику деградацію ємності впродовж тривалого часу експлуатації. Крім того, LiFePO_4 -технологія не містить токсичних і дорогих елементів, таких як кобальт, що знижує її екологічні ризики та залежність від дефіцитних ресурсів.

Флоу-батареї мають перевагу при необхідності тривалого зберігання енергії (4–12 годин і більше), однак їхня нижча енергетична щільність і складність конструкції робить їх більш доцільними для великих промислових або комунальних проєктів. Для побутових і малих комерційних систем найраціональнішим варіантом залишається використання літій-залізо-фосфатних батарей.

З екологічної точки зору літій-іонні системи підлягають переробці, а LiFePO_4 -батареї мають нижчий рівень токсичності порівняно з NMC чи NCA-варіантами. Розвиток технологій переробки літію та заліза сприятиме ще більшій екологічній ефективності цих систем у майбутньому.

Проведений аналіз показує, що серед усіх розглянутих типів акумуляторів найбільш доцільним вибором для систем накопичення енергії є літій-залізо-фосфатні (LiFePO_4) батареї. Вони забезпечують високу ефективність

перетворення енергії, тривалий термін служби, стабільну роботу при глибоких розрядах і мінімальні ризики займання. На відміну від свинцево-кислотних та AGM-аккумуляторів, LiFePO₄ не вимагають технічного обслуговування, мають більшу кількість циклів і значно кращу питому ємність. У порівнянні з літій-іонними NMC-модифікаціями вони є безпечнішими, стійкішими до температурних коливань і менш залежними від дефіцитних матеріалів. Таким чином, технологія LiFePO₄ є найоптимальнішою для побутових, комерційних та промислових систем накопичення електроенергії, тоді як AGM-аккумулятори можуть розглядатися лише як економічний варіант для короткочасного резервного живлення.

Зупинимо наш вибір на накопичувачах енергії – літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) батареї фірми Redodo [13], який показано на рис. 3.8. Характеристики даного аккумулятора представлено в таблиці 3.1.



Рисунок 3.8 – Накопичувач енергії Redodo 12V 200Ah Plus LiFePO₄.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики Redodo 12V 200Ah Plus LiFePO₄

Номинальна напруга	12,8 В
Ємність	200 Ах
Корисна енергія	2 560 Вт·год
Максимальна вихідна потужність	2 560 Вт
Максимальний безперервний зарядний / розрядний струм	200 А
Піковий струм розряду (1 секунда)	600 А
Рекомендований струм заряджання	40 А
Кількість циклів (гарантованих)	≥ 4 000 циклів при 100 % DOD
Кількість циклів при помірному DOD	до 15 000 циклів (при 60 % DOD)
Температурний діапазон заряджання	0 °C ... +50 °C
Температурний діапазон розряджання	–20 °C ... +60 °C
Температура зберігання	–10 °C ... +50 °C
Тип клем	M8 (болти)
Габарити	590 × 305 × 290 мм
Маса	20,7 кг
Захист корпусу / клас	IP65
Матеріал корпусу	ABS (вогнестійкий пластик)
Сертифікації / стандарти	UL1973, CE, FCC, RoHS, UN38.3

3.4 Енергетичне навантаження набережної

Оскільки світильники на набережній працюють у змінному режимі, то можна скласти гістограми генерації, споживання та навантаження у робоче для кожного сезону року. Буде наочно показано скільки споживає система, і скільки відбувається щогодинної генерації. Також буде більш зрозуміло наскільки генерація перевищує споживання.

Перша гістограма показує час роботи світильників за одну добу в зимовий час, а також час, коли світильники вимикаються і починається денна генерація енергії.

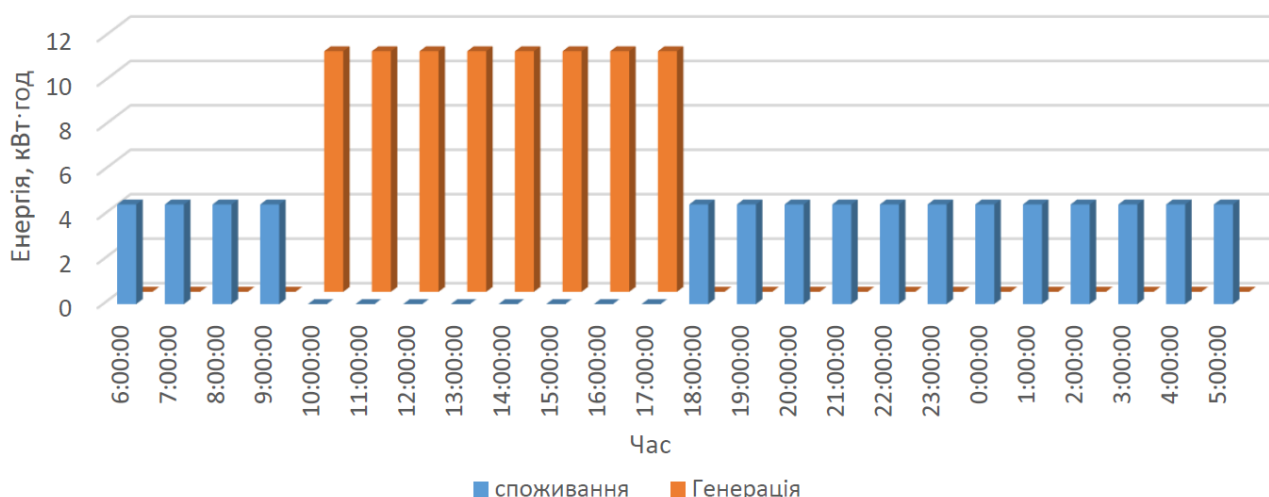


Рисунок 3.9 – Гістограма генерації та споживання енергії в зимовий час

Як видно з гістограми взимку світильники працюють дуже довгий час, починаючи з 18:00 вечора до 9:00 ранку, а після починається генерація енергії, оскільки генерація електроенергії залежить від механічної енергії, то починаючи з 10:00 потік людей може бути достатнім для генерації та подальшого накопичення отриманої енергії для забезпечення.

Друга гістограма показує скільки щогодини накопиченої енергії може віддаватися для забезпечення споживання енергією світильників для їхньої безперебійної роботи.

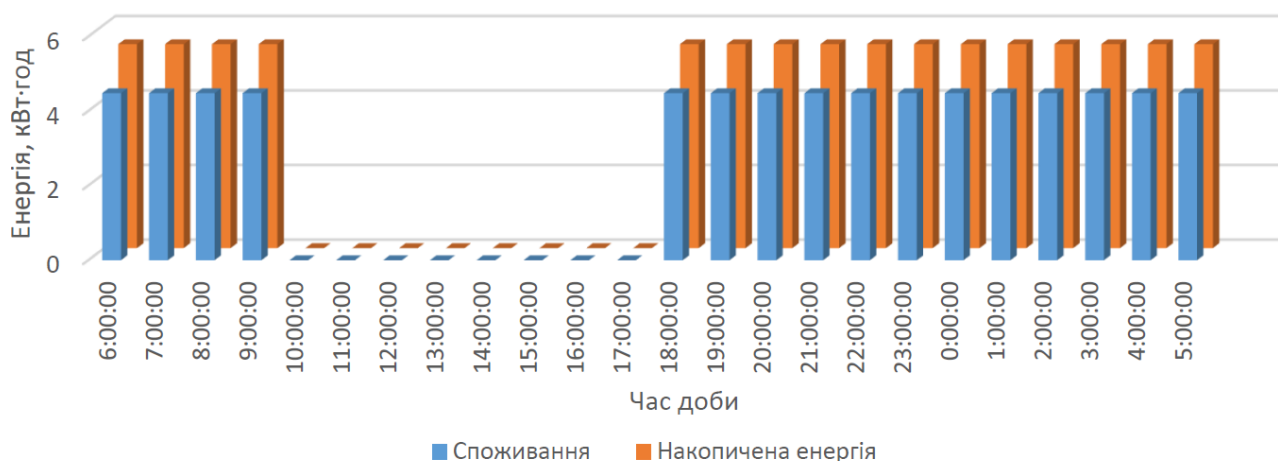


Рисунок 3.10 – Гістограма навантаження у зимовий час.

Як видно на гістограмі накопиченої енергії вистачає для забезпечення безперебійної роботи світильників з максимальним споживанням до

5,47 $\text{kВт} \cdot \text{год}$, а враховуючи, що споживання світильників на набережній споживає до 4,48 $\text{kВт} \cdot \text{год}$, то накопиченої енергії цілком вистачає для забезпечення їх електроенергією в зимовий час. ▯

Наступна гістограма покаже добову генерацію та споживання електроенергії влітку. ▯

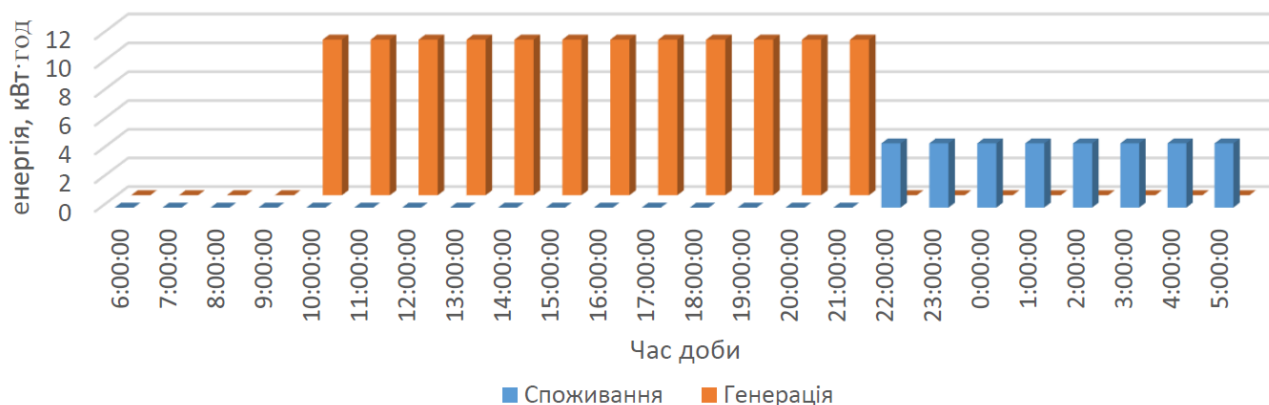


Рисунок 3.11 – Гістограма генерації та споживання енергії у літній час.

У літній сезон світильники працюють найменше за часом, тому що захід Сонця відбувається пізно ввечері, а схід рано вранці. Тому світильники також включаються пізно ввечері і вимикаються рано-вранці, а, отже, час роботи набагато менше, ніж тієї ж зимою.

Друга діаграма по літньому сезону покаже, наскільки вистачить накопиченої енергії, щоб покрити споживання світильників.

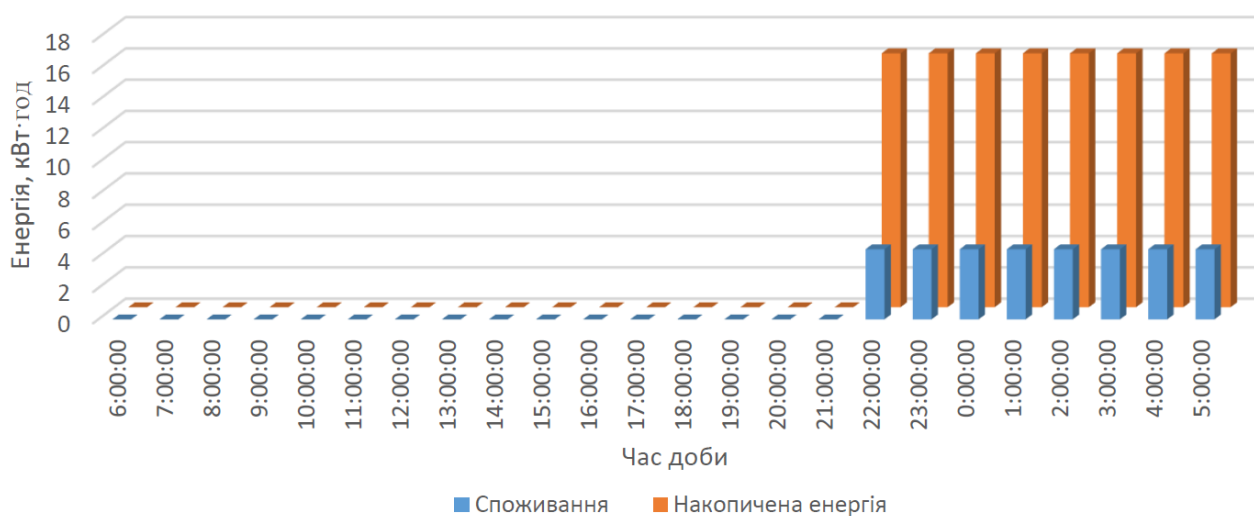


Рисунок 3.12 – Гістограма навантаження у літній час

Ми бачимо, що в літній сезон накопиченої енергії для безперебійної роботи світильників набережної вистачає із запасом, так як максимальне щогодинне споживання через короткий робочий час може досягати до $16,23 \text{ кВт} \cdot \text{год}$, а враховуючи споживання світильників в $4,48 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ неважко зробити висновок про те, що накопиченої енергії вистачить із надлишком на робочий час. ▯

Далі розглянемо добову генерацію та споживання в осінній сезон року.

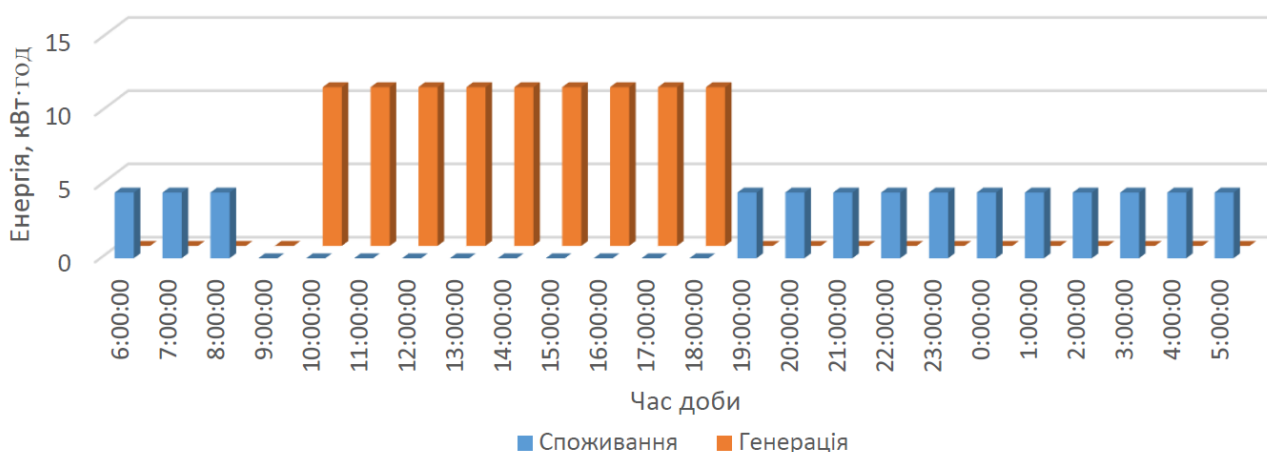


Рисунок 3.13 – Гістограма генерації та споживання енергії в осінній період.

Як видно з гістограми о 9:00 генерація та споживання порожнє, це пояснюється тим, що середньостатистичний час вимкнення світильників восени відбувається о 8:00, а генерація електроенергії починається приблизно о 10:00, оскільки це час, коли більшість людей у місті вже прокинулися і починаються впливати на полотно. ▯

Далі розглянемо різницю між накопиченою енергією та споживаною в осінній період і подивимося наскільки більше її вистачає.

По гістограмі можна зрозуміти, що накопиченої енергії, розподіленої на кожну годину споживання світильників вистачає для забезпечення електроенергією. Споживана енергія $4,48 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ проти накопиченої енергії дорівнює $6,95 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. ▯

Розглянемо гістограми весняного сезону року, що залишився. Першою ми розглянемо також добову генерація та споживання електроенергії.

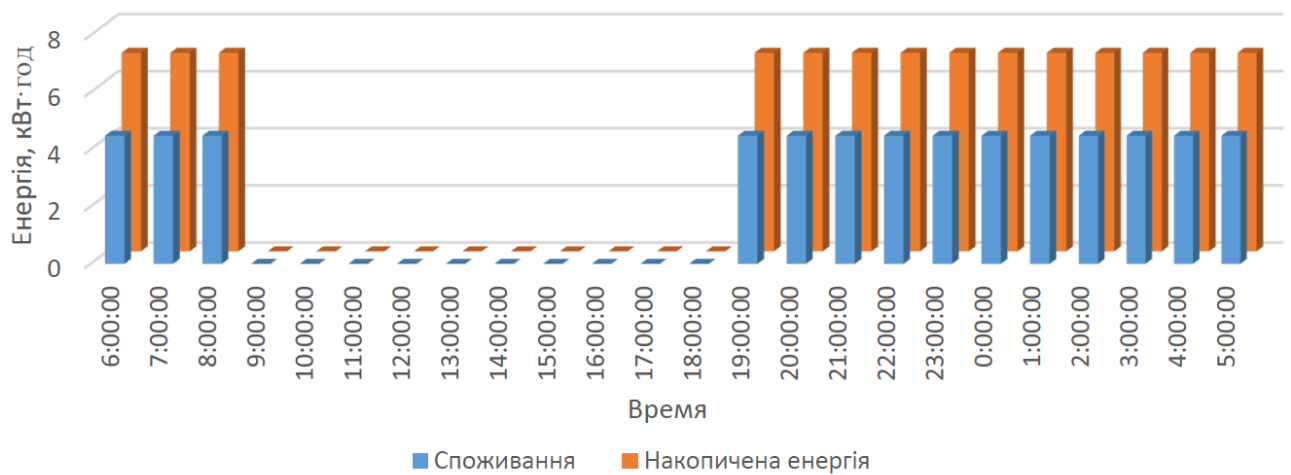


Рисунок 3.14 – Гістограма навантаження в осінній період.

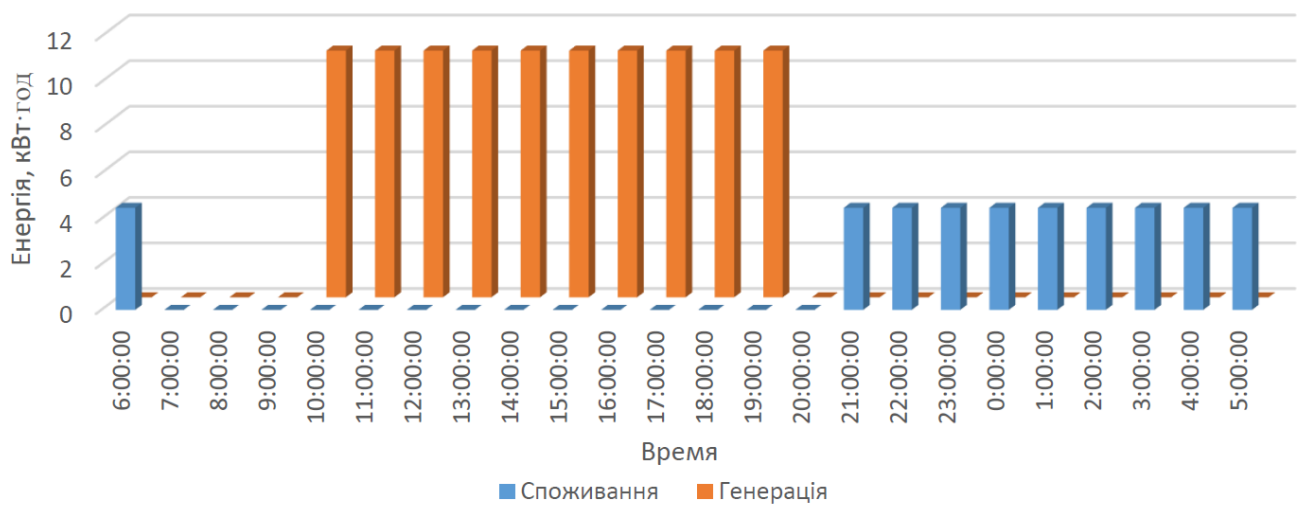


Рисунок 3.15 – Гістограма генерації та споживання енергії у весняний час.

Виходячи з даних гістограми видно, що час роботи світильників трохи більший, ніж у літній час, проте далеко від зимового часу. Вироблення енергії зменшується до 20:00, оскільки потік людей до ночі починає зменшуватися і незабаром відбудеться включення освітлення. Відключення відбувається приблизно ближче до 7:00, а наступне виробництво починається як ми вже знаємо близько 10:00.─

Далі розглянемо гістограму накопиченої енергії та споживання, і розберемося наскільки енергії, яку ми накопичили, вистачить для покриття споживання світильниками енергії.─

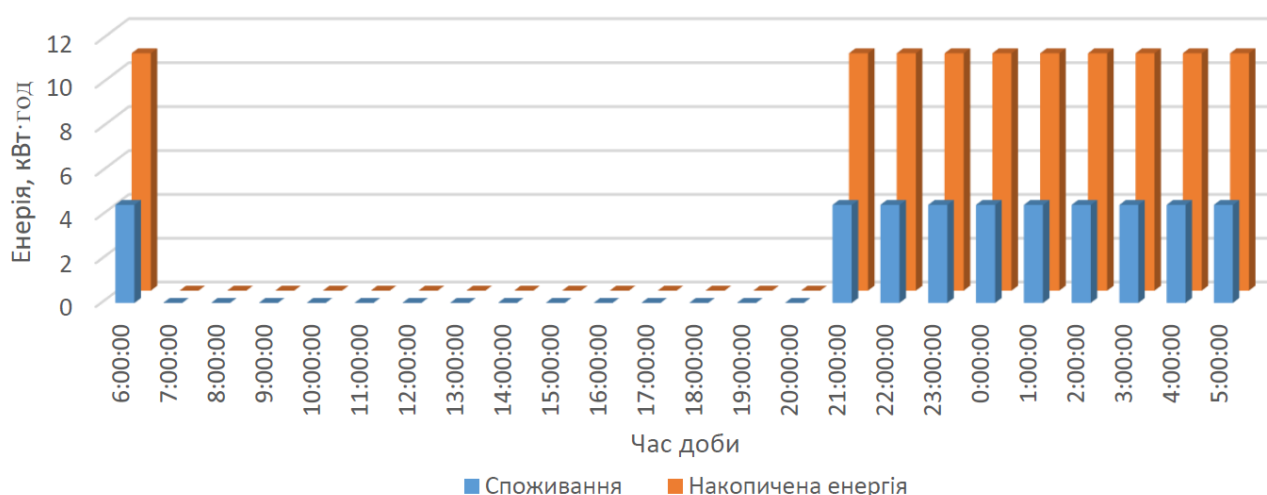


Рисунок 3.16 – Гістограма навантаження навесні.

Як ми бачимо у весняний період акумульованої енергії, розподіленої на кожну годину роботи дорівнює $10,82 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ вистачить для щогодинного живлення світильників, споживання якого дорівнює $4,48 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

3.5 Економічна оцінка використання п'єзоелектричних генераторів

Як і для будь-якої іншої системи генерація електроенергії за допомогою відновлюваних джерел необхідне економічне обґрунтування для створення розробленого способу генерації, а саме його вартість комплектуючих, вартість установки, а також економія на електроенергії, враховуючи скільки зможе покрити споживану енергію наша вироблена енергія.

Прийmemo для розрахунку оплати за спожиту електричну енергію в розмірі $10 \text{ грн} / \text{кВт} \cdot \text{год}$.

Так як на набережній розташовані 56 світильників, кожен з яких споживає до $0,08 \text{ кВт} \cdot \text{год}$, то загальне споживання за одну годину складе $4,48 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Залежно від пори року, добове споживання світильників відрізняється, оскільки час їх роботи змінюється, взимку вони включені набагато довше, ніж, наприклад, влітку.

Виходячи з попередніх результатів розрахунків, ми знаємо, що генерованої електричної енергії, достатньо, щоб покрити споживану, а це означає, що ми можемо розрахувати економію на електроенергії, оскільки система теоретично є автономною і може забезпечувати себе сама.

Загальне споживання електроенергії за зимовий сезон для роботи світильників:—

$$E_z = E_{z,д} \cdot D = 6451,2 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

де $E_{z,д}$ – споживана енергія взимку за добу;

D – загальна кількість днів узимку.

Вартість електроенергії за зимовий період:

$$N_z = E_z \cdot N_E = 64,512 \text{ тис.грн},$$

де N_E – вартість електроенергії за тарифом.

Загальне споживання електроенергії за весняний сезон для роботи світильників:—

$$E_b = E_{b,д} \cdot D = 4126,6 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

де $E_{b,д}$ – споживана енергія навесні за добу;

D – загальна кількість днів навесні.

Вартість електроенергії за весняний період:

$$N_b = E_b \cdot N_E = 41,266 \text{ тис.грн},$$

де N_E – вартість електроенергії за тарифом.

Аналогічно розрахуємо загальне споживання електроенергії за літній сезон для роботи світильників:

$$E_l = E_{l,д} \cdot D = 3297,2 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

де $E_{l,д}$ – споживана енергія влітку за добу;

D – загальна кількість днів влітку.

Вартість електроенергії за літній період:

$$N_l = E_l \cdot N_E = 32,972 \text{ тис.грн}$$

де N_E – вартість електроенергії за тарифом.

Також розрахуємо загальне споживання електроенергії за осінній сезон для роботи світильників:

$$E_O = E_{O,д} \cdot D = 5707,5 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

де $E_{O,д}$ – споживана енергія восени за добу;

D – загальна кількість днів восени.

Вартість електроенергії за осінній період:

$$N_O = E_O \cdot N_E = 57,075 \text{ тис. грн.}$$

Загальна вартість електроенергії за один рік:

$$N = N_3 + N_B + N_Л + N_O = 195,825 \text{ тис. грн}$$

Таким чином ми розрахували приблизні щорічні витрати коштів на забезпечення електричною енергією світильників на набережній.

Для нашої системи необхідно близько 15 500 п'єзокерамічних елементів, вироблених на замовлення, тому що їх габаритні характеристики дещо відрізняються від тих, що виробник надає у каталозі. Таким чином приблизна ціна за 10 елементів складатиме близько 500 грн. Значить вартість всіх п'єзокерамічних елементів становитиме 775 тис. грн., також необхідно врахувати, що виробник зважаючи на велике оптове замовлення може зробити знижку, як це часто буває у компаній, які продають товари у великій кількості. –

Вартість накопичувачів електричної енергії становить 18,8 тис. грн.. Для нашої системи потрібно близько 30 штук, отже, ціна акумуляторів буде становити 564 тис. грн.

Також для даного проекту необхідно врахувати вартість інвертора та інших матеріалів для впровадження даної системи. Врахуємо ще додаткові витрати у сумі 100 тис. грн.

Таким чином, орієнтовні загальні витрати на впровадження даної системи електропостачання освітлення набережної потрібно приблизно 1,5 млн. грн.

Розрахуємо термін окупності даного проекту:

$$T_{ок} = \frac{B}{E_{річ}},$$

де B – орієнтовні загальні витрати;

$E_{річ}$ – річна економія коштів від використання системи, грн/рік. В нашому випадку – це витрати на електричну енергію протягом року, які становлять 195,825 тис.грн

$$T_{ок} = \frac{1,5}{0,196} \approx 7,7 \text{ роки.}$$

Проведені розрахунки не є остаточними, так, як потрібно врахування багатьох чинників, проте вже можна дійти висновку, що електропостачання пішохідних зон у межах за рахунок пропонованих пристроїв з урахуванням п'єзогенераторів може бути досить привабливим для інвесторів, рекламодавців, туристичних організацій та самих жителів міста.

З огляду на те, що таких зон у місті є багато, можна говорити про доцільність використання системи освітлення на основі проведених досліджень.

3.6 Висновки розділу 3

В даному розділі було розроблено конструкцію п'єзоелектричної системи для автономного живлення освітлювальних приладів на пішохідній зоні. Визначено оптимальне місце розташування енергогенеруючого полотна з урахуванням високої прохідності, що забезпечує стабільне надходження механічної енергії.

Запропонована конструкція п'єзогенератора мембранного типу дозволяє ефективно використовувати поперечні коливання для генерації електроенергії. Моделювання системи в середовищі SolidWorks дало змогу візуалізувати внутрішню структуру пристрою, оптимізувати розташування гнучких компонентів і п'єзоелементів, а також забезпечити максимальну ефективність перетворення енергії.

На основі порівняльного аналізу типів накопичувачів енергії обґрунтовано вибір літій-залізо-фосфатних акумуляторів (LiFePO_4), які мають високу ефективність, тривалий термін служби, термічну стабільність і екологічну безпечність. Обраний накопичувач Redodo 12V 200Ah Plus відповідає технічним вимогам системи та забезпечує надійне зберігання енергії.

Проведено аналіз сезонного енергетичного навантаження на систему освітлення набережної. Побудовані гістограми підтверджують, що генерація електроенергії за допомогою п'єзогенераторів у поєднанні з накопичувачем забезпечує безперебійну роботу світильників упродовж року.

Економічна оцінка показала, що впровадження п'єзоелектричної системи дозволяє суттєво скоротити витрати на електроенергію, забезпечуючи автономність та енергоефективність освітлення міської інфраструктури.

Таким чином, розроблена система має високий потенціал для практичного застосування в умовах міського середовища, сприяє розвитку екологічно чистих технологій та відповідає сучасним вимогам до енергоефективності.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Основні причини ураження людини електричним струмом

До основних причин ураження електричним струмом відносять:

- а) випадкове доторкання або приближення на небезпечну відстань до частин електрообладнання, що знаходяться під напругою;
- б) виникнення напруги на металічних конструктивних частинах електрообладнання - корпусах, кожухах, в результаті пошкодження ізоляції чи інших причин;
- в) виникнення напруги на відключених струмоведучих частинах, на яких працюють люди, внаслідок випадкового включення установки;
- г) виникнення крокової напруги на поверхні землі в результаті замикання провідника на землю.

Основними заходами захисту від ураження електричним струмом являються: забезпечення недоступності частин електрообладнання, що знаходяться під напругою, від випадкового до нього доторкання; захисне розділення кола; усунення небезпеки ураження електричним струмом при виникненні напруги на корпусах, кожухах і інших частинах електрообладнання, що досягається завдяки використанню малих напруг та подвійної ізоляції, вирівнюванням потенціалу, захисним заземленням, зануленням, захисним відключенням, використання спеціальних захисних пристроїв - переносних приладів і засобів; організація безпечної експлуатації електрообладнання.

Захисне розділення кола. В розкиданих електричних колах або з великою протяжністю навіть справна ізоляція може мати досить маленький опір, а ємність провідників відносно землі - велику величину. Ці обставини можуть становити велику небезпеку, так як в таких колах до 1000 В із ізольованою нейтраллю втрачається захисна функція ізоляції провідників і виникає небезпека ураження людини електричним струмом у випадку її доторкання до провідника електричного кола або до іншого предмету, що знаходився під фазною напругою.

Цей недолік електричного кола може бути усунений шляхом захисного розділення кола, тобто розділення досить протяжних гілок електричного кола на декілька менш протяжних і електрично між собою не з'єднаних. Розділення виконують за допомогою спеціальних розділяючих трансформаторів. В результаті такого розділення ізолювані ділянки електричного кола мають великий опір ізоляції та малу ємність провідників відносно землі, завдяки чому можна покращити умови безпеки загалом.

4.2 Захисне заземлення та занулення

Захисне заземлення - спеціальне з'єднання із землею металевих частин обладнання, що не знаходяться під напругою в звичайних умовах, але які можуть опинитися під напругою в результаті пошкодження ізоляції електрообладнання.

Основна мета захисного заземлення - усунення небезпеки ураження людей електричним струмом при виникненні напруги на конструктивних частинах електрообладнання тобто при "замиканні на корпус".

Принцип роботи захисного заземлення – зниження до безпечних значень напруг доторкнення та кроку, зумовлених "замиканням на корпус". Це досягається зменшенням потенціалу заземленого обладнання, а також вирівнюванням потенціалів за рахунок підйому потенціалу основи, на якій стоїть людина, до потенціалу, близького по величині до потенціалу заземленого обладнання.

Застосовують захисне заземлення у трифазних колах з напругою до 1000 В з ізолюваною нейтраллю і більше 1000 В з любым режимом нейтралі.

Заземлюючим пристроєм називають сукупність заземлювача – металевих провідників, що мають електричний зв'язок із землею, і заземлюючих провідників, що з'єднують заземлені частини електрообладнання із заземлювачем. Відрізняють два типи заземлюючих пристроїв: виносні та контурні.

Виносний заземлюючий пристрій характеризується тим, що його заземлювач поміщений за територію де розміщено заземлююче обладнання, або заземлювач розташовують на невеликій частині цієї території. Недоліком виносного заземлюючого пристрою являється віддалення заземлювача від заземлюючого електрообладнання, внаслідок чого коефіцієнт $a=1$. Тому такий тип заземлення застосовують при малих струмах замикання на землю і частково в установках до 1000 В, де потенціал заземлювача не перевищує допустимої напруги доторкування. Перевагою являється те, що можна вибрати місце розміщення електродів із найменшим опором ґрунту.

Контурний заземлюючий пристрій характеризується тим, що його одиночні заземлювачі розміщуються по контуру або периметру території, на якій знаходиться заземлююче обладнання, або розподіляються по всій території рівномірно. При контурному заземленні забезпечується вирівнювання потенціала на території до такої величини, щоб максимальне значення напруг доторкання та кроку не перевищували допустимих. Це досягається шляхом відповідного розміщення одиночних заземлювачів. Всередині приміщення вирівнювання потенціалу відбувається природнім шляхом через металічні конструкції, трубопроводи, кабелі і інші струмопровідні елементи, що зв'язані із колом заземлення.

Розрізняють штучні заземлювачі, що використовують виключно для заземлення та природні - металічні предмети для іншого призначення, що знаходяться в землі. Для штучного заземлення використовують зазвичай вертикальні і горизонтальні електроди. В якості вертикальних електродів використовують металічні труби діаметром 3-5 см і металічні кутники розміром від 40x40 до 60x60 мм і довжиною 2,5-3 м. В останні роки всечастіше почали використовувати металічні прутки 10-12 мм і довжиною до 10м. Для зв'язку вертикальних електродів і в якості горизонтального електрода використовують полосну сталь січенням не менше 4x12 мм або сталь круглого січення діаметром не менше 6 мм. Для розміщення вертикальних заземлювачів риють траншею

глибиною 0,7 - 0,8 м, після чого за допомогою механізмів забивають труби або кутники.

В якості природних заземлювачів можна використовувати проложені в землі водопровідні труби і інші металічні трубопроводи, за виключенням труб, що проводять горючі суміші, газ, а також не можна використовувати в якості природних заземлювачів трубопроводи, що покриті ізоляцією для захисту від корозії. Також використовують металічні конструкції і арматуру залізобетонних конструкцій будинків, що мають з'єднання із землею; свинцеві оболонки кабелів, що проходять під землею.

Відповідно до ПУЕ, опір захисного заземлення в будь-яку пору року не повинно перевищувати 4 Ом в установках із напругою до 1000 В, але якщо потужність джерела струму (генератора або трансформатора) менше 100 кВ·А тоді опір заземлення допускається 10 Ом. Для установок із напругою вище 1000 В та з великими струмами замикання на землю (більше 500 А) опір заземлення не повинен перевищувати 0,5 Ом. Не більше 10 Ом опір заземлення повинен бути для установок більше 1000 В із малими струмами замикання на землю і без компенсації ємнісних струмів; якщо заземлююче обладнання одночасно використовується для електроустановок напругою до 1000 В, то опір заземлення не повинен перевищувати $125/I_3$, але не більше 10 Ом (або 4 Ом, якщо це вимагається для установок до 1000 В).

Захисне заземлення необхідне при експлуатації обладнання, яке може опинитися під напругою в результаті пошкодження ізоляції самого електрообладнання. При цьому в приміщеннях із підвищеною небезпекою або заземлення являється обов'язковою умовою при номінальній напрузі електрообладнання вище 36 В змінного і ПО В постійного струму, а в приміщеннях без підвищеної небезпеки - при напрузі 500 В і вище. Тільки у вибухонебезпечних приміщеннях заземлення використовують незалежно від величини напруги. Отже, за допомогою захисного заземлення можна уникнути небезпеки ураження людини електричним струмом при виникненні напруги на конструктивних частинах електрообладнання тобто при "замиканні на корпус".

Занулення

Зануленням називають приєднання до не однократного заземленого нульового проводу живлячих кола корпусів і інших конструктивних сталевих елементів електрообладнання, які у звичайних умовах не знаходяться під напругою, але внаслідок пошкодження ізоляції можуть опинитися під напругою. Принципова схема заземлення показана на рис 4.1. Основна функція занулення така ж як у захисного заземлення: унеможливлення небезпеки ураження людей струмом при пробії на корпус. Вирішується така задача автоматичним відключенням пошкодженого обладнання від кола живлення.

Принцип дії занулення - перетворити пробій на корпус в однофазне коротке замикання, тобто замикання між фазним і нульовим проводами, із метою створення великого по величині струму, що зможе забезпечити ввімкнення захисту і тим самим відключити обладнання від кола живлення. До такого захисту можна віднести: плавкі вставки чи автоматичні вимикачі, що ставлять перед користувачами електричної енергії для захисту від струмів короткого замикання. Швидкість відключення пошкодженого обладнання, тобто час з моменту виникнення напруги на корпусі до моменту відключення установки від кола живлення, складає 5-7 с при захисті обладнання плавкими вставками і 1-2 с при захисті автоматами. Область застосування занулення до 1000 В із глухозаземленою нейтраллю. Зазвичай це кола напругою 380/220 і 220/127 В.

4.3 Ліквідація наслідків надзвичайних ситуацій

Проблема запобігання виникнення надзвичайних ситуацій техногенного походження та ліквідації їх наслідків в Україні є однією з найактуальніших.

Керівництво підприємств, установ та організацій незалежно від форм власності і підпорядкування забезпечує своїх працівників засобами індивідуального та колективного захисту, організовує здійснення евакуаційних заходів, створює сили для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій та

забезпечує їх готовність до практичних дій, виконує інші заходи з ЦО і несе пов'язані з цим матеріальні та фінансові витрати.

Сутність рятувальних та інших невідкладних робіт – це усунення безпосередньої загрози життю та здоров'ю людей, відновлення життєзабезпечення населення, запобігання або значні зменшення матеріальних збитків. Рятувальні та інші невідкладні роботи включають також усунення пошкоджень, які заважають проведенню рятувальних робіт, створення умов для наступного проведення відновлювальних робіт. РіНР поділяють на рятувальні роботи та невідкладні роботи.

До рятувальних робіт відносять:

- розвідка маршруту руху сил, визначення обсягу та ступеню руйнувань, розмірів зон зараження, швидкості і напрямку розповсюдження зараженої хмари чи пожежі;
- локалізація та гасіння пожеж на маршруті руху сил та ділянках робіт;
- визначення об'єктів і населених пунктів, яким безпосередньо загрожує небезпека;
- визначення потрібного угруповання сил і засобів запобігання і локалізації небезпеки;
- пошук уражених та звільнення їх з-під завалів, пошкоджених та палаючих будинків, із загазованих та задимлених приміщень;
- розкриття завалених захисних споруд та рятування з них людей;
- вивіз або вивід населення із небезпечних місць у безпечні райони;
- організація комендантської служби, охорона матеріальних цінностей і громадського порядку;
- відновлення життєздатності населених пунктів та об'єктів;
- санітарна обробка уражених;
- знезараження одягу, взуття, засобів індивідуального захисту, територій, споруд, а також техніки;
- соціально-психологічна реабілітація населення.

До невідкладних робіт відносять:

- прокладання колонних шляхів та улаштування проїздів (проходів) у завалах та на зараженій території;
- локалізація аварій на водопровідних, енергетичних, газових і технологічних мережах;
- ремонт та тимчасове відновлення роботи комунально-енергетичних систем та мереж зв'язку для забезпечення рятувальних робіт;
- зміцнення або руйнування конструкцій, які загрожують обвалом і безпечному веденню робіт;

РіНР здійснюють у три етапи. На першому етапі вирішуються завдання:

- щодо екстреного захисту населення;
- з запобігання розвитку чи зменшення впливу наслідків;
- з підготовки до виконання РіНР.
- Основними заходами щодо захисту населення є:
- оповіщення про небезпеку;
- використання засобів захисту;
- додержання режимів поведінки;
- евакуація з небезпечних у безпечні райони;
- здійснення санітарно-гігієнічної, протиепідемічної профілактики і надання медичної допомоги;
- локалізація аварій;
- зупинка чи заміна технологічного процесу виробництва;
- попередження (запобігання) і гасіння пожеж.

На другому етапі проводять:

- пошук потерпілих;
- витягання потерпілих з-під завалів, з палаючих будинків, пошкоджених транспортних засобів;
- евакуація людей із зони лиха, аварії, осередку ураження;
- надання медичної допомоги;
- санітарна обробка людей;
- знезараження одягу, майна, техніки, території;

- проведення інших невідкладних робіт, що сприяють і забезпечують здійснення рятувальних робіт;
- надання потерпілим першої допомоги та евакуація їх (при необхідності) у лікувальні заходи.

На третьому етапі вирішуються завдання щодо забезпечення життєдіяльності населення у районах, які потерпіли від наслідків НСБ

- відновлення чи будівництво житла;
- відновлення енерго-, тепло-, водо- та газопостачання, ліній зв'язку;
- організація медичного обслуговування;
- забезпечення продовольством і предметами першої необхідності;
- знезараження харчів, води, фуражу, техніки, майна, територій;
- соціально-психологічна реабілітація;
- відшкодування збитків;

Відновлювальні роботи ЦО не виконує, їх здійснює спеціально створені підрозділи (бригади). Залежно від рівня надзвичайної ситуації (загальнодержавного, регіонального, місцевого, чи об'єктового) для проведення РіНР залучають сили та засоби ЦО центрального, регіонального або об'єктового підпорядкування.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження процесів генерації електричної енергії за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів та можливості їх практичного використання в автономних системах вуличного освітлення.

У результаті роботи:

Проведено аналіз сучасних технологій малої електрогенерації та визначено, що п'єзоелектричний метод є перспективним напрямом для отримання енергії в умовах міської інфраструктури, зокрема на пішохідних зонах і набережних.

Досліджено фізичні основи п'єзоелектричного ефекту, розглянуто класифікацію п'єзоелектричних матеріалів та обґрунтовано вибір сегнетом'яких п'єзокерамічних елементів як найбільш ефективних для створення системи.

Виконано розрахунок основних параметрів п'єзоелектричного генератора та визначено залежність потужності системи від інтенсивності руху пішоходів, площі покриття та характеристик матеріалу.

Розроблено 3D-модель конструкції п'єзоелектричного полотна мембранного типу, оптимізовано розташування елементів і визначено місце встановлення з урахуванням прохідності зони.

Обґрунтовано вибір накопичувача енергії типу LiFePO₄ Redodo 12V 200Ah Plus, що забезпечує стабільну роботу освітлювальних приладів упродовж року.

Проведено енергетичний аналіз системи для різних сезонів року та побудовано графіки генерації й споживання енергії, які підтвердили здатність системи забезпечувати автономну роботу світильників.

Виконано попередню економічну оцінку впровадження системи, яка показала доцільність використання п'єзоелектричних генераторів у муніципальній інфраструктурі, зокрема для скорочення витрат на

електроенергію та підвищення енергоефективності міських об'єктів.

Отримані результати підтверджують ефективність застосування п'єзоелектричних генераторів як джерела живлення для автономних систем освітлення. Запропоноване технічне рішення може бути використане при проектуванні сучасних енергоощадних міських систем, що відповідають принципам «розумного міста» та сталого розвитку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Актуальні проблеми сучасної енергетики: матеріали IX Всеукраїнської наук.практ. інтернет-конф. студентів, аспірантів і молодих вчених (22 травня 2025 р., м. Хмельницький) / за наук. ред. В.В. Курака, О.В. Андронові. – Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2025. – 214 с.
2. Воробець В. Ю., Бабюк С. М. Забезпечення електроенергією об'єктів вуличного освітлення за допомогою п'єзоелектричних генераторів // Матеріали МНТК „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“, Тернопіль, 28-29 травня 2025 року. 2025. С. 19–21.
3. Hnatov, A., Arhun, S., & Ulyanets, O. (2017). ВЛАСТИВОСТІ ТА СПОСОБИ ЗАСТОСУВАННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЯК ГЕНЕРАТОРІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ. Автомобільний транспорт, (41), 178. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2017.41.0.178>
4. Radović G. et al. Solar power supply for remote objects of historical heritage in Montenegro //Journal of Applied Engineering Science. – 2014. – Т. 12. – №. 4. – С. 277-284.
5. Nixon J. D. et al. Analysis of standalone solar streetlights for improved energy access in displaced settlements //Renewable Energy. – 2021. – Т. 177. – С. 895-914.
6. Бабюк С. М. Проблеми та переваги інтеграції технологій відновлюваної енергії в енергосистему змінного струму / Сергій Миколайович Бабюк, Я. В. Пліс // Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 24-25 листопада 2021 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2021. — Том II. — С. 7–8. — (Електротехніка та енерго-збереження).
7. Takeuchi M. et al. P6F-2 Piezoelectric Generator as Power Supply for RFID-Tags and Applications //2007 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. – IEEE, 2007. – С. 2558-2561.

8. Pratibha Arun V., Mehta D. Eco-friendly electricity generator using scintillating piezo //International Journal of Engineering Research and Applications. – 2013. – Т. 3. – №. 5. – С. 478-482.
9. Sirohi J., Chopra I. Fundamental behavior of piezoceramic sheet actuators //Journal of Intelligent Material Systems and Structures. – 2000. – Т. 11. – №. 1. – С. 47-61. 9. Grzybek D. Piezoelectric generators: materials and structures //Pomiary au-tomatyka robotyka. – 2013. – Т. 17. – №. 10. – С. 123--129.
10. Basics of Piezo-ceramic Technology // Матеріали сайту – 2016. – Режим доступу: <http://www.ceramtec.en/ceramicmaterials/piezoceramics/basics/>.
11. Вуличне освітлення : ДСУ10В. ВАТРА - освітлення професійно!. URL: <https://vatra.ua/ukr/street-lighting/dsu10v-VATRA> (дата звернення: 02.10.2025).
12. П'єзокераміка, П'єзодіафрагма, виробники та компанія, що виробляє туман - Ціна - PZT Electronic. П'єзокераміка, П'єзодіафрагма, виробники та компанія, що виробляє туман - Ціна - PZT Electronic. URL: <https://ua.piezodisc.com/> (дата звернення: 02.10.2025).
13. Redodo Official Store - Best Lithium Batteries for RV, Marine, Solar. Redodo Power. URL: <https://www.redodopower.com/> (date of access: 06.10.2025).
14. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Видавництво "Форт", 2017. - 760 с.
15. Orobchuk, B., Sysak, I., Babiuk, S., Rajba, T., Karpinski, M., Klos-Witkowska, A., ... & Gancarczyk, J. (2017, September). Development of simulator automated dispatch control system for implementation in learning process. In 2017 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS) (Vol. 1, pp. 210-214). IEEE.
16. Оробчук, Б. та Сисак, І. та Бабюк, С. (2024) Розробка системи освітлення для навчальної лабораторії на базі WI-FI контролера. In: Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні технології в світлотехніці та електроенергетиці», 16–17 травня 2024 р., м. Харків.

17. Буняк, О., Бабюк, С., & Сисак, І. (2019). Інтелектуальний пристрій автоматичного регулювання параметрів електромережі. Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій “присвячена 80-ти річчю з дня народження професора ЯІ Проця, 268-270.
18. Orobchuk, B., Buniak, O., Sysak, I., Babiuk, S., Bodnarchuk, I., & Koval, V. (2024). Development of Software for the Implementation of Automated Reserve Input Modes Operation.
19. Євтух П. Облік електроенергії при несинусоїдальних і несиметричних режимах у мережах електропостачання міст / П. Євтух, С. Бабюк, Т. Кислиця // Вісник ТНТУ. — 2013. — Том 70. — № 2. — С.183-189.
20. Movchan L., Lupenko A., Zakordonets V., Babiuk S. (2024) Determining the stability region in the plane of parameters and quality indicators of linear discrete automatic control systems by D-partitioning method. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol. 113, no 1, pp. 71-80.
21. Babiuk, Serhiy, et al. "Algorithms for automatic of metrological characteristics of transducers." Вісник Тернопільського національного технічного університету 107.3 (2022): 67-75.
22. Енергоощадна інтелектуальна система керування механічною системою / Богдан Оробчук, Іван Сисак, Ярослав Осадца, Вадим Коваль, Сергій Бабюк // МММТЕС, 22-23 листопада 2022 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2022. — С. 128–130. — (Прикладні застосування механіки в задачах енергозбереження).
23. Buniak O., Babiuk S., Sysak I. (2019) Intelktualnyi prystrii avtomatychnoho rehuliuвання parametriv elektomerezhi [Intelligent device for automatic regulation of electricity parameters]. Materialy IV Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Teoretychni ta prykladni aspekty radiotekhniki, pryladobuduvannia i komp'uternykh tekhnolohii" prysviachena 80-ty richchiu z dnia narodzhennia profesora Ya.I. Protsia (Tern., 20-21 June 2019), pp. 268-270 [in Ukrainian].

24. Гандзюк М.П., Желібо Є.П., Халімовський М.О. Основи охорони праці: Підручник. 5-е вид. / За ред. М.П. Гандзюка. - К.: Каравела, 2011. - 384 с.

25. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання «БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ» / В.С. Стручок –Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., –156 с.

26. Коваль В.П. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с.