

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ

Бакалавр

Освітній рівень

Автономна система живлення електронних пристроїв

Назва теми

КПЕК.023035.01.07 ПЗ

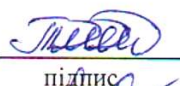
Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації
Шифр і назва галузі

Спеціальність 172 Електронні комунікації та радіотехніка
Шифр і назва спеціальності

Освітня програма «Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі»
Назва освітньої програми

Виконав:

здобувач 3 курсу, група ЕКРс-23-1


підпис

Павло ТОМУСЯК

Ініціали, прізвище

Керівник: к. техн. наук, доцент


підпис

Леся КАРПОВА

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, професор


підпис

Сергій ПІДЧЕНКО

Ініціали, прізвище

«7» Червня 2026р.

Хмельницький, 2026

Хмельницький національний університет

Факультет	<u>інформаційних технологій</u>
Кафедра	<u>телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій</u>
Освітній рівень:	<u>бакалавр</u>
Галузь знань:	<u>17 Електроніка та телекомунікації</u>
Спеціальність:	<u>172 Електронні комунікації та радіотехніка</u>
Освітня програма:	<u>Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедру ТМІТ

 Сергій ПІДЧЕНКО

«23» січня 2026 р.

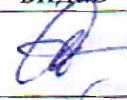
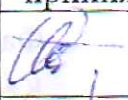
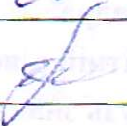
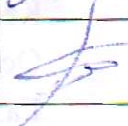
ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ

ТОМУСЯК Павлу Вікторовичу

Прізвище, ім'я по батькові здобувача

- 1 Тема роботи: «Автономна система живлення електронних пристроїв»
керівник роботи: КАРПОВА Леся Вікторівна, к. техн. наук, доцент
Затверджено наказом по університету від «20» січня 2026р. № 7
- 2 Строк подання здобувачем роботи на кафедру 02 червня 2026 року
- 3 Вихідні дані до роботи: є необхідність забезпечення автономного живлення світлофорного об'єкта потужністю 10 Вт та можливості заряджання мобільних пристроїв напругою 5 В із використанням п'єзоелектричних перетворювачів як джерела генерації електроенергії. Номінальна напруга акумуляторної батареї – 12 В, розрахунковий режим роботи – цілодобовий.
- 4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Аналітичний огляд сучасних автономних систем живлення. Теоретичні основи функціонування системи. Проектування та розрахунок автономної системи живлення. Розробка та дослідження електричної схеми
- 5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень):
1. Структурна схема системи зарядного пристрою. 2. Структурна схема автономної системи живлення та блок-схема роботи зарядного кола. 3. Принципова схема заряджання акумуляторної батареї.

6 Консультанти розділів кваліфікаційного проекту

Розділ	Прізвища, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Нормоконтроль	СТЕЦЮК Віктор к.т.н., доцент		
Антиплагіат	ПИВОВАР Олег к.т.н., доцент		

7 Дата видачі завдання 09 лютого 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Найменування виду роботи	Форма звітності, термін виконання	Відмітка наукового керівника
1.	Розробка завдання на кваліфікаційний проект	09.02.2026р.	виконано
2.	Складання індивідуального плану на кваліфікаційний проект	15.02.2026р.	виконано
3.	Написання першого (теоретичного) розділу	10.03.2026р.	виконано
4.	Написання другого розділу	26.03.2026р.	виконано
5.	Написання третього розділу	15.04.2026р.	виконано
6.	Написання четвертого розділу	30.04.2026р.	виконано
7.	Написання вступу і загальних висновків та пропозицій до кваліфікаційного проекту	10.05.2026р.	виконано
8.	Оформлення кваліфікаційного проекту	15.05.2026р.	виконано
9.	Рецензування кваліфікаційного проекту	20.05.2026р.	виконано
10.	Презентаційні матеріали за результатами виконання кваліфікаційного проекту	28.05.2026р.	виконано

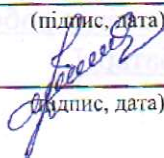
Здобувач



(підпис, дата)

Павло ТОМУСЯК

Науковий керівник



(підпис, дата)

Леся КАРПОВА

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційного проекту: «Автономна система живлення електронних пристроїв»

Автор проекту: ТОМУСЯК Павло Вікторович

Керівник проекту: КАРПОВА Леся Вікторівна, к. техн. наук, доцент.

Пояснювальна записка: 66 сторінок, 10 рисунків, 4 таблиці, 40 джерел.

Графічна частина: технічні креслення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АВТОНОМНА СИСТЕМА ЖИВЛЕННЯ, П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, СВІТЛОФОРНИЙ ОБ'ЄКТ, АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ, СТАБІЛІЗАЦІЯ НАПРУГИ, ТРАНСПОРТНА ІНФРАСТРУКТУРА.

Об'єктом дослідження є автономна система живлення електронних пристроїв на основі п'єзоелектричного перетворення механічної енергії..

Метою кваліфікаційного проекту є проектування та дослідження автономної системи живлення електронних пристроїв із використанням п'єзоелектричних перетворювачів для забезпечення стабільного електроживлення в умовах транспортної інфраструктури.

У кваліфікаційному проєкті розглянуто питання проектування автономної системи живлення електронних пристроїв на основі п'єзоелектричного перетворення механічної енергії транспортного потоку. Виконано аналіз сучасних технологій автономного енергозабезпечення, досліджено фізичні та математичні основи п'єзоелектричного ефекту, здійснено розрахунок енергетичних параметрів системи та визначено необхідну ємність акумуляторної батареї. Розроблено принципову електричну схему автономної системи живлення, реалізовано вузли випрямлення, стабілізації та контролю зарядного процесу.

02.06.2026 р.



ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП.....	5
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ	7
1.1 Проблема енергетичної автономності електронних пристроїв	7
1.2 Аналіз існуючих технологій автономного енергозабезпечення.....	7
1.3 П'єзоелектричні матеріали та їх енергетичний потенціал.....	8
1.4 Огляд сучасних систем збору механічної енергії	9
1.5 Постановка задачі та технічні вимоги до системи.....	11
1.6 Висновки до першого розділу.....	12
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ	14
2.1 Фізична та електрична модель п'єзоелектричного перетворювача.....	14
2.2 Математичні основи перетворення механічної енергії в електричну	16
2.3 Теоретичні основи перетворення, стабілізації та акумулювання електричної енергії.....	19
2.5 Висновки до другого розділу	22
3 ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ	23
3.1 Обґрунтування вибору області застосування.....	23
3.2 Структурна схема та принцип дії автономної системи живлення	24
3.2.1 Функціональна блок-схема роботи системи.....	27
3.2.2 Блок-схема роботи зарядного кола.....	29
3.3 Вибір елементної бази автономної системи живлення	31
3.4 Розрахунок енергоспоживання автономної системи.....	34

КПЕК.023035.01.07 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Томусяк П.В.		05.06.16
Перевір.		Карпова Л.В.		05.06.16
Реценз.				
Н. Контр.		Стецюк В.		06.06.16
Затверд.		Підченко С.К.		06.06.16
Автономна система живлення електронних пристроїв				
Пояснювальна записка				
			Лім.	Арк.
				2
			Акруїтів	
			66	
ХНУ, гр. ЕКРс-23-1				

3.4	Розрахунок енергоспоживання автономної системи.....	34
3.4.1	Вибір і розрахунок ємності акумуляторної батареї.....	34
3.4.2	Розрахунок добового енергоспоживання	35
3.4.3	Визначення сумарної добової енергії.....	36
3.4.4	Визначення необхідної ємності акумулятора	36
3.4.5	Урахування запасу ємності	37
3.5	Розрахунок генерованої потужності п'єзоелектричними елементами.....	37
3.5.1	Визначення миттєвої потужності одного перетворювача	37
3.5.2	Визначення коефіцієнта пропорційності	38
3.5.3	Розрахунок потужності при середній масі транспортного засобу.....	38
3.5.4	Розрахунок добової генерації.....	39
3.6	Розрахунок напруги холостого ходу п'єзоелектричного перетворювача .	41
3.7	Розрахунок еквівалентної ємності п'єзоелектричного елемента	44
3.8	Аналіз отриманих результатів та висновки до розділу 3	45
3.9	Висновки до третього розділу.....	47
4	РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ.....	48
4.1	Проектування генераторного вузла автономної системи живлення.....	48
4.2	Схема з'єднання п'єзоелектричних перетворювачів.....	50
4.3	Розробка схеми зарядного пристрою акумуляторної батареї.....	52
4.4	Моделювання роботи системи в середовищі Proteus	54
4.5	Аналіз результатів моделювання.....	55
4.6	Економічний аналіз розробленої системи	56
4.7	Висновки до четвертого розділу.....	58
	ВИСНОВКИ.....	59
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	60

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

РЛС	-	Радіолокаційна система
АСЖ	-	Автономна система живлення
PZT	-	Титанат-цирконат свинцю (п'єзоелектричний матеріал)
PV	-	Фотоелектрична (сонячна) система
АКБ	-	Акумуляторна батарея
ККД	-	Коефіцієнт корисної дії
LM317	-	Інтегральний регульований стабілізатор напруги
LCD	-	Рідкокристалічний дисплей
USB	-	Універсальна послідовна шина

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сучасна транспортна інфраструктура характеризується високою інтенсивністю руху та зростанням вимог до безпеки дорожнього руху. Одним із ключових елементів організації руху є світлофорні об'єкти, які забезпечують регулювання транспортних потоків і безпечний перехід пішоходів. Безперервність їх функціонування є критично важливою умовою стабільної роботи дорожньої мережі.

У більшості випадків світлофорні системи живляться від централізованої електромережі. Однак перебої електропостачання, аварійні відключення або перевантаження енергосистеми призводять до зупинки їх роботи, що спричиняє порушення організації дорожнього руху, підвищення аварійності та створення небезпечних ситуацій. Забезпечення енергетичної автономності таких об'єктів є актуальною інженерною задачею.

Перспективним напрямом вирішення цієї проблеми є використання альтернативних джерел енергії, зокрема систем збору механічної енергії транспортного потоку. Механічне навантаження, що створюється транспортними засобами під час руху, може бути перетворене в електричну енергію за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів із подальшим її накопиченням та використанням для живлення електронних пристроїв.

Об'єктом дослідження є автономна система живлення електронних пристроїв на основі п'єзоелектричного перетворення механічної енергії.

Предметом дослідження є процеси перетворення, стабілізації та акумулювання електричної енергії, що генерується п'єзоелектричними елементами в умовах динамічного навантаження транспортного потоку.

Метою кваліфікаційного проекту є проектування автономної системи живлення електронних пристроїв із використанням п'єзоелектричних

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перетворювачів, здатної забезпечити стабільне живлення світлофорного об'єкта та заряджання мобільних пристроїв.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз сучасних технологій автономного енергозабезпечення;
- дослідити фізичні та математичні основи п'єзоелектричного перетворення енергії;
- здійснити розрахунок енергетичних параметрів системи;
- визначити необхідну ємність акумуляторної батареї;
- розробити принципову електричну схему автономної системи;
- провести моделювання роботи системи та оцінити її ефективність.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення надійності функціонування транспортної інфраструктури, впровадження енергоефективних технологій та використання відновлюваних джерел енергії в умовах сучасного міського середовища.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ

1.1 Проблема енергетичної автономності електронних пристроїв

Сучасні електронні системи дедалі активніше впроваджуються у транспортну інфраструктуру, системи безпеки, моніторингу та міського управління. Значна частина таких пристроїв працює в умовах, де відсутнє або нестабільне централізоване електропостачання. Особливо це стосується світлофорних об'єктів, сенсорних вузлів, інформаційних табло, IoT-пристроїв та систем екстреного зв'язку.

Проблема енергетичної автономності полягає у необхідності забезпечення безперервного живлення електронних пристроїв незалежно від стану електромережі. Відмова системи живлення у транспортній інфраструктурі може призводити до порушення організації дорожнього руху, підвищення аварійності та створення небезпечних ситуацій.

Традиційні джерела резервного живлення, такі як дизельні генератори або акумуляторні блоки з підзарядкою від мережі, потребують регулярного обслуговування, мають обмежений ресурс та не завжди забезпечують повну автономність. У зв'язку з цим актуальним є пошук альтернативних способів отримання електроенергії безпосередньо в місці експлуатації системи.

1.2 Аналіз існуючих технологій автономного енергозабезпечення

Серед сучасних технологій автономного енергозабезпечення найбільш поширеними є:

- сонячні фотоелектричні системи;

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- вітрогенератори малої потужності;
- термоелектричні перетворювачі;
- системи рекуперації механічної енергії;
- гібридні системи з акумулюванням енергії.

Сонячні панелі широко використовуються для живлення автономних об'єктів, однак їх ефективність залежить від погодних умов, пори року та географічного розташування. В умовах недостатньої інсоляції продуктивність таких систем істотно знижується.

Вітроенергетичні установки характеризуються нерівномірністю вироблення енергії та потребують механічно складної конструкції. Термоелектричні генератори мають обмежену ефективність і застосовуються переважно в спеціалізованих умовах.

Альтернативним напрямом є використання механічної енергії навколишнього середовища, зокрема вібрацій та тиску, що створюються транспортними засобами. У міських умовах дорожнє покриття зазнає регулярного динамічного навантаження, яке потенційно може бути використане як джерело енергії.

Таким чином, актуальним є дослідження технологій перетворення механічної енергії транспортного потоку в електричну.

1.3 П'єзоелектричні матеріали та їх енергетичний потенціал

Одним із перспективних способів перетворення механічної енергії є використання п'єзоелектричного ефекту. П'єзоелектричні матеріали здатні генерувати електричний заряд під дією механічної деформації. Зворотний ефект полягає у виникненні механічної деформації під впливом електричного поля.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найбільш поширеними матеріалами є кварц, титанат-цирконат свинцю (PZT), а також полімерні п'єзоматеріали. Серед них матеріали на основі PZT характеризуються високими коефіцієнтами електромеханічного перетворення, значною механічною міцністю та стабільністю параметрів у широкому температурному діапазоні.

Енергетичний потенціал п'єзоелектричних перетворювачів залежить від:

- прикладеної сили або маси навантаження;
- частоти механічних впливів;
- геометричних параметрів елемента;
- способу електричного з'єднання перетворювачів.

У транспортній інфраструктурі динамічні навантаження від автомобілів можуть досягати значних значень, що створює передумови для ефективного використання п'єзоелектричних генераторів у дорожньому покритті.

1.4 Огляд сучасних систем збору механічної енергії

Системи збору механічної енергії (energy harvesting systems) активно досліджуються у напрямку автономного живлення малопотужних електронних пристроїв. Найбільш поширені реалізації включають:

- вібраційні генератори на основі п'єзоелементів;
- електромагнітні мікрогенератори;
- системи збору енергії тиску в дорожньому покритті;
- платформи з інтегрованими п'єзоелектричними модулями.

Аналіз сучасних технологій автономного енергозабезпечення дозволяє систематизувати існуючі підходи за принципом перетворення енергії. Узагальнену класифікацію автономних джерел енергії наведено на рис. 1.1.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.1 – Класифікація сучасних автономних джерел енергії

Як видно з рис. 1.1, автономні системи живлення поділяються на сонячні, вітрові, термоелектричні, механічні (системи збору механічної енергії) та гібридні. Особливий інтерес у межах даної роботи становлять механічні джерела, зокрема п'єзоелектричні перетворювачі, що дозволяють безпосередньо перетворювати механічні навантаження у електричну енергію.

Практичні реалізації таких систем демонструють можливість живлення світлодіодних пристроїв, сенсорних вузлів та інформаційних табло. Проте основними проблемами залишаються низький коефіцієнт перетворення, необхідність накопичення енергії та забезпечення стабільного рівня напруги.

Ефективність подібних систем значною мірою залежить від правильної побудови генераторного вузла, вибору способу з'єднання елементів, наявності ефективного випрямляючого та стабілізуючого каскаду, а також застосування акумуляторного накопичувача.

Одним із перспективних напрямів є інтеграція п'єзоелектричних елементів у дорожнє покриття для перетворення механічного навантаження від транспортних засобів у електричну енергію. Концептуальну модель такої системи збору енергії в транспортній інфраструктурі наведено на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Концепція збору механічної енергії в транспортній інфраструктурі

Як видно з рис. 1.2, механічна енергія тиску автомобілів передається п'єзоелектричним елементам, перетворюється в електричну, накопичується в акумуляторному блоці та використовується для живлення споживачів, зокрема світлофорних об'єктів та інших електронних пристроїв.

Саме комплексне вирішення цих задач дозволяє отримати функціонально завершену автономну систему живлення.

1.5 Постановка задачі та технічні вимоги до системи

На основі проведеного аналізу встановлено доцільність розроблення автономної системи живлення, що використовує механічну енергію транспортного потоку як первинне джерело.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Метою роботи є проектування автономної системи живлення електронних пристроїв на основі п'єзоелектричного перетворення енергії з забезпеченням накопичення, стабілізації та контролю параметрів заряджання акумуляторної батареї.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- обґрунтувати вибір п'єзоелектричних матеріалів та структури генераторного вузла;
- виконати розрахунок енергоспоживання навантаження;
- визначити необхідну ємність акумуляторної батареї;
- розробити принципову електричну схему;
- реалізувати схему стабілізації та індикації стану заряджання;
- провести комп'ютерне моделювання роботи системи;
- здійснити економічну оцінку розробленого рішення.

До технічних вимог системи віднесено:

- забезпечення стабільної вихідної напруги 12 В для живлення світлофорного об'єкта;
- формування стабілізованої напруги 5 В для USB-порту;
- автоматичне відсікання зарядного струму при досягненні граничної напруги;
- наявність світлодіодної та цифрової індикації стану;
- використання доступної елементної бази.

1.6 Висновки до першого розділу

У першому розділі проаналізовано сучасні автономні системи живлення та обґрунтовано актуальність забезпечення енергетичної автономності електронних пристроїв у транспортній інфраструктурі. Розглянуто існуючі

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

технології автономного енергозабезпечення та встановлено перспективність використання механічної енергії транспортного потоку.

Окрему увагу приділено п'єзоелектричним матеріалам як ефективному засобу перетворення механічної енергії в електричну. На основі проведеного аналізу сформульовано мету, задачі та технічні вимоги до розроблюваної автономної системи живлення, що стало підґрунтям для подальшого проектування у наступних розділах роботи.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ

2.1 Фізична та електрична модель п'єзоелектричного перетворювача

П'єзоелектричний перетворювач є електромеханічною системою, у якій відбувається безпосереднє перетворення механічної енергії деформації в електричну енергію. Основою його роботи є прямий п'єзоелектричний ефект, що полягає у виникненні електричного заряду на поверхні матеріалу під дією механічного напруження.

Фізична модель перетворювача

У фізичному сенсі п'єзоелектричний матеріал характеризується наявністю кристалічної структури без центру симетрії. Під дією зовнішньої сили F матеріалі виникає механічне напруження T , яке спричиняє зміщення центрів позитивних і негативних зарядів. У результаті на електродах перетворювача формується електричний заряд Q .

Зв'язок між механічними та електричними величинами описується системою рівнянь електромеханічного зв'язку. У спрощеному вигляді для прямого п'єзоелектричного ефекту:

$$D = d \cdot T, \quad (2.1)$$

де D – електрична індукція;

d – п'єзоелектричний коефіцієнт матеріалу;

T – механічне напруження.

Механічне напруження визначається як:

$$T = \frac{F}{A}, \quad (2.2)$$

де F – прикладена сила;

A – площа поперечного перерізу п'єзоелемента.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Таким чином, генерований заряд пропорційний прикладеній силі та п'єзоелектричним характеристикам матеріалу.

Формування електричної напруги

Електрична напруга на електродах п'єзоелемента визначається через відношення заряду до ємності елемента:

$$U = \frac{Q}{C}, \quad (2.3)$$

де C – власна електрична ємність перетворювача.

Ємність п'єзоелектричного елемента визначається геометричними параметрами та діелектричними властивостями матеріалу:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{t}, \quad (2.4)$$

де ϵ_r – відносна діелектрична проникність матеріалу; ϵ_0 – електрична стала; A – площа електродів; t – товщина елемента.

Отже, рівень генерованої напруги залежить як від прикладеної сили, так і від конструктивних параметрів п'єзоелектричного елемента.

Електрична еквівалентна модель

З точки зору електротехнічного аналізу п'єзоелектричний перетворювач моделюється як джерело змінної напруги $U_{\text{ген}}$, з'єднане послідовно з внутрішньою ємністю C . Така модель враховує накопичення заряду в діелектрику та є адекватною для аналізу роботи перетворювача в режимі генерації.

Еквівалентна схема дозволяє застосовувати класичні методи аналізу електричних кіл для визначення:

- вихідної напруги,
- струму навантаження,
- миттєвої потужності,
- умов узгодження з випрямлячем та накопичувачем енергії.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Миттєва електрична потужність, що генерується перетворювачем, визначається як

$$P = U \cdot I, \quad (2.5)$$

де U – вихідна напруга; I – струм навантаження.

Особливості роботи в умовах динамічного навантаження

У транспортній інфраструктурі механічний вплив має імпульсний характер.

Це означає, що вихідна напруга перетворювача є змінною та залежить від:

- маси транспортного засобу,
- швидкості руху,
- площі контакту,
- частоти проходження автомобілів.

Тому для практичного використання необхідне подальше випрямлення, фільтрація та акумулювання отриманої електричної енергії.

Таким чином, фізична та електрична модель п'єзоелектричного перетворювача дозволяє описати процес перетворення механічної енергії в електричну та створює теоретичне підґрунтя для подальших розрахунків і проектування автономної системи живлення.

2.2 Математичні основи перетворення механічної енергії в електричну

Перетворення механічної енергії в електричну в п'єзоелектричному перетворювачі базується на взаємозв'язку між механічними напруженнями, деформаціями та електричними величинами. Математичний опис цього процесу дозволяє оцінити рівень генерованої напруги, струму та потужності, а також визначити ефективність перетворення енергії в умовах динамічного навантаження.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Механічна робота, що виконується силою F при деформації п'єзоелемента на величину Δx , визначається як

$$A_{\text{мех}} = F \cdot \Delta x, \quad (2.6)$$

де $A_{\text{мех}}$ – механічна робота; F – прикладена сила; Δx – лінійна деформація елемента.

У випадку транспортного навантаження сила визначається через масу транспортного засобу:

$$F = m \cdot g, \quad (2.7)$$

де m – маса; g – прискорення вільного падіння.

Отже, механічна енергія, що передається п'єзоелементу, прямо пропорційна масі навантаження та величині його деформації.

Відповідно до рівнянь п'єзоелектричного зв'язку, електричний заряд, що генерується на електродах, визначається як

$$Q = d \cdot F, \quad (2.8)$$

де d – п'єзоелектричний коефіцієнт; F – прикладена сила.

Таким чином, збільшення маси транспортного засобу призводить до пропорційного зростання генерованого заряду.

Напруга холостого ходу п'єзоелектричного перетворювача визначається через відношення заряду до ємності елемента:

$$U_{\text{хх}} = \frac{Q}{C}. \quad (2.9)$$

З урахуванням виразу для ємності

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{t}, \quad (2.10)$$

отримуємо, що напруга залежить як від прикладеної сили, так і від геометричних параметрів перетворювача.

В альтернативному вигляді напруга може бути виражена через п'єзоелектричний коефіцієнт напруги g :

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$U_{xx} = g \cdot \frac{F \cdot t}{A}, \quad (2.11)$$

де g – коефіцієнт напругової чутливості матеріалу; t – товщина елемента;
 A – площа електродів.

При динамічному навантаженні, коли сила змінюється в часі, генерується змінний струм:

$$I = \frac{dQ}{dt}. \quad (2.12)$$

Якщо прикладене навантаження має імпульсний характер (що характерно для транспортного потоку), струм залежить від швидкості зміни сили. Отже, при однаковій масі, але різній швидкості руху транспортних засобів, генерований струм може відрізнятися.

Миттєва електрична потужність визначається як

$$P = U \cdot I. \quad (2.13)$$

Для оцінювання середньої потужності при періодичному навантаженні використовується вираз

$$P_{\text{сеп}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t)I(t) dt, \quad (2.14)$$

де T – період навантаження.

З огляду на практичні умови експлуатації, потужність прямо пропорційна масі транспортного засобу та частоті проходження транспортних засобів через ділянку з інтегрованими п'єзоелементами.

Ефективність перетворення механічної енергії в електричну визначається:

$$\eta = \frac{A_{\text{ел}}}{A_{\text{мех}}}, \quad (2.15)$$

де $A_{\text{ел}}$ – електрична енергія, отримана на виході; $A_{\text{мех}}$ – підведена механічна енергія.

У реальних умовах коефіцієнт корисної дії є обмеженим через втрати в матеріалі, механічне демпфування та електричні втрати у випрямляючому колі.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, математичний опис процесу перетворення механічної енергії в електричну дозволяє встановити кількісні залежності між масою транспортного навантаження, геометричними параметрами п'єзоелемента та генерованими електричними величинами. Отримані співвідношення є основою для подальших інженерних розрахунків автономної системи живлення, виконаних у наступному розділі.

2.3 Теоретичні основи перетворення, стабілізації та акумулювання електричної енергії

Електрична енергія, що генерується п'єзоелектричним перетворювачем, має змінний та імпульсний характер, що обумовлено динамічним механічним навантаженням. Для практичного використання така енергія потребує перетворення у стабільну форму постійної напруги з подальшим накопиченням у системі зберігання енергії. Теоретичні основи цього процесу охоплюють випрямлення змінної напруги, її фільтрацію, стабілізацію та узгодження з акумуляторною батареєю й навантаженням.

Випрямлення змінної напруги

П'єзоелектричний перетворювач формує змінну напругу $u(t)$, що змінюється у часі відповідно до характеру механічного впливу. Для перетворення змінної напруги в постійну використовується випрямляч, найчастіше мостовий діодний.

Середнє значення випрямленої напруги при повнохвильовому випрямленні визначається як

$$U_{\text{сер}} = \frac{2U_m}{\pi}, \quad (2.16)$$

де U_m – амплітудне значення змінної напруги.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У реальних умовах слід враховувати падіння напруги на діодах випрямляча, що зменшує ефективне значення вихідної напруги.

Фільтрація пульсацій

Після випрямлення напруга містить пульсації. Для їх зменшення застосовується згладжувальний конденсатор ємністю C_f . Амплітуда пульсацій визначається приблизним співвідношенням:

$$\Delta U = \frac{I_H}{f \cdot C_f}, \quad (2.17)$$

де I_H – струм навантаження; f – частота пульсацій; C_f – ємність фільтрувального конденсатора.

Збільшення ємності конденсатора зменшує амплітуду пульсацій, що сприяє стабільнішій роботі системи заряджання.

Стабілізація напруги

Оскільки рівень напруги, генерованої п'єзоелектричним вузлом, може змінюватися залежно від інтенсивності транспортного потоку, необхідним є застосування стабілізатора напруги. Стабілізація забезпечує підтримання вихідної напруги на заданому рівні незалежно від коливань вхідного сигналу та зміни навантаження.

Коефіцієнт стабілізації визначається як

$$K_{ст} = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta U_{вих}}, \quad (2.18)$$

де $\Delta U_{вх}$ – зміна вхідної напруги; $\Delta U_{вих}$ – зміна вихідної напруги.

Високе значення коефіцієнта стабілізації забезпечує ефективне узгодження генераторного вузла з акумуляторною батареєю та споживачами.

Теоретичні засади акумулювання енергії

Накопичення електричної енергії в автономній системі здійснюється за допомогою акумуляторної батареї. Енергія, накопичена в акумуляторі, визначається як

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W = U \cdot I \cdot t, \quad (2.19)$$

де U – напруга; I – струм заряджання; t – час заряджання.

Ємність акумулятора в ампер-годинах визначається співвідношенням

$$C_{\text{ак}} = \frac{W}{U}. \quad (2.20)$$

Процес заряджання має відбуватися з урахуванням допустимого струму та граничної напруги, що забезпечує довговічність акумулятора та безпечний режим експлуатації.

Енергетичний баланс системи

Функціонування автономної системи живлення можливе лише за умови виконання енергетичного балансу, який визначається співвідношенням між генерованою та споживаною енергією:

$$W_{\text{ген}} \geq W_{\text{сп}} + W_{\text{втрат}}, \quad (2.21)$$

де $W_{\text{ген}}$ – енергія, згенерована п'єзоелектричним вузлом; $W_{\text{сп}}$ – енергія, спожита навантаженням; $W_{\text{втрат}}$ – втрати у випрямлячі, стабілізаторі та акумуляторі.

Забезпечення позитивного енергетичного балансу є основною умовою стабільної роботи автономної системи. У разі недостатньої генерації необхідно або збільшувати кількість п'єзоелементів, або оптимізувати схему узгодження та стабілізації.

Таким чином, процес функціонування автономної системи живлення включає послідовне перетворення змінної електричної енергії в стабілізовану постійну напругу з подальшим її накопиченням в акумуляторній батареї. Теоретичні положення цього підрозділу створюють основу для розрахунків та схемотехнічної реалізації, розглянутих у наступних розділах роботи.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.5 Висновки до другого розділу

У другому розділі розглянуто теоретичні основи функціонування автономної системи живлення на базі п'єзоелектричного перетворення енергії. Проаналізовано фізичну та електричну модель п'єзоелектричного перетворювача, встановлено математичні залежності між механічним навантаженням і генерованими електричними величинами.

Розкрито теоретичні засади перетворення змінної напруги в стабілізовану постійну, з урахуванням процесів випрямлення, фільтрації та стабілізації. Окрему увагу приділено принципам акумулювання електричної енергії та забезпеченню позитивного енергетичного балансу системи.

Отримані теоретичні положення є підґрунтям для виконання інженерних розрахунків та розробки електричної схеми автономної системи живлення у наступному розділі.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

3 ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ

3.1 Обґрунтування вибору області застосування

Одним із ключових напрямів розвитку сучасних електронних систем є підвищення їх енергетичної автономності, що забезпечує безперервність функціонування в умовах нестабільного або відсутнього централізованого електропостачання. Особливої актуальності ця проблема набуває в об'єктах транспортної інфраструктури, де від надійності електроживлення залежить безпека руху транспортних засобів і пішоходів.

Серед таких об'єктів важливе місце займають світлофорні системи регулювання дорожнього руху, які функціонують цілодобово та характеризуються постійним енергоспоживанням. У разі аварійного вимкнення електромережі або перевантаження енергосистеми світлофорні об'єкти втрачають працездатність, що призводить до порушення організації дорожнього руху, утворення заторів та зростання рівня аварійності. Таким чином, впровадження автономних систем живлення для світлофорних комплексів є технічно та соціально обґрунтованим.

Додатковим фактором, що визначає вибір області застосування, є зростання кількості мобільних електронних пристроїв, які активно використовуються учасниками дорожнього руху. Забезпечення можливості підзаряджання мобільних пристроїв у зонах з підвищеною транспортною активністю (зупинки громадського транспорту, автостанції, перехрестя) підвищує рівень комунікаційної доступності та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

З огляду на специфіку транспортної інфраструктури, доцільним є використання механічної енергії транспортних засобів як вторинного енергетичного ресурсу. Під час руху автомобілі створюють значне динамічне

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

навантаження на дорожнє покриття, яке може бути використане для генерування електричної енергії за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів.

Перевагами вибору саме транспортної інфраструктури як області застосування автономної системи живлення є:

- наявність регулярного механічного навантаження;
- прогнозована інтенсивність транспортного потоку;
- можливість інтеграції енергогенеруючих модулів у конструкцію дорожнього покриття;
- відносно стабільний режим експлуатації протягом доби.

Крім того, на відміну від сонячних або вітрових систем, п'єзоелектрична генерація не залежить від погодних умов, рівня освітленості чи швидкості вітру. Генерація відбувається безпосередньо під час руху транспортних засобів, що дозволяє забезпечити прив'язку вироблення енергії до періодів підвищеного споживання.

Таким чином, область застосування автономної системи живлення визначається як світлофорні об'єкти та зони транспортної інфраструктури з інтенсивним рухом, де можливе ефективне використання механічної енергії транспортних засобів для генерування електричної енергії. Обрана область забезпечує практичну доцільність розроблення, відповідність технічним вимогам та потенційну економічну ефективність впровадження системи.

3.2 Структурна схема та принцип дії автономної системи живлення

Запропонована конструктивна схема автономної системи живлення наведена на рис. 3.1. Архітектура системи побудована за модульним принципом та включає такі основні функціональні вузли: п'єзоелектричний генераторний модуль, блок випрямлення, вузол стабілізації напруги, акумуляторний накопичувач та навантаження у вигляді світлофорного об'єкта і USB-модуля для заряджання мобільних пристроїв.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

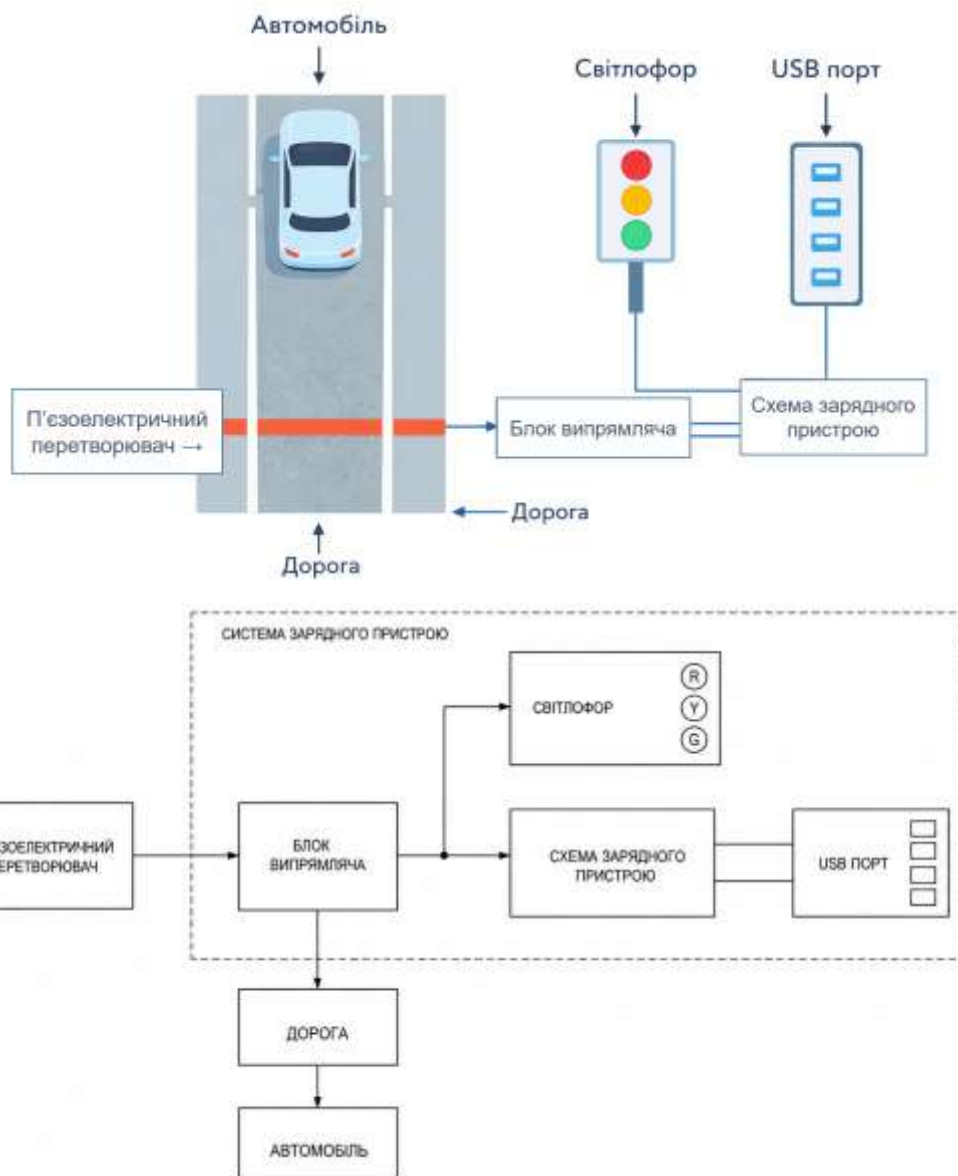


Рисунок 3.1 – Структурна схема запропонованої конструкції

У розробленій системі використано п'єзоелектричний перетворювач типу III на основі матеріалу PZT (lead zirconate titanate). Даний тип матеріалу характеризується підвищеною механічною міцністю, здатністю витримувати значні циклічні механічні навантаження, високими допустимими рівнями електричного збудження, підвищеною питомою потужністю та відносно високою температурою Кюрі, що забезпечує стабільність електрофізичних параметрів у широкому температурному діапазоні. Сукупність зазначених характеристик робить PZT типу III доцільним для використання в умовах

транспортної інфраструктури, де перетворювач зазнає регулярних динамічних навантажень.

Принцип дії системи ґрунтується на прямому п'єзоелектричному ефекті. Під дією механічного тиску, створюваного транспортними засобами під час руху проїзною частиною, у п'єзоелектричному елементі виникає електричний заряд, що призводить до формування змінної електричної напруги на його виводах. Оскільки механічний вплив має імпульсний характер, сформована напруга також є змінною та нерівномірною в часі.

Згенерована змінна напруга надходить до блоку випрямлення, реалізованого на основі мостової діодної схеми. У цьому вузлі відбувається перетворення змінної напруги в пульсуючу постійну. Для зменшення коефіцієнта пульсацій та згладжування вихідного сигналу застосовується фільтрувальний конденсатор, який виконує функцію первинного накопичення енергії та забезпечує часткову стабілізацію рівня напруги.

Після випрямлення та фільтрації електрична енергія подається на свинцево-кислотну акумуляторну батарею, яка виконує роль буферного накопичувача. Використання акумулятора дозволяє компенсувати нерівномірність генерації, обумовлену змінною інтенсивністю транспортного потоку, а також забезпечити безперервне живлення навантаження в періоди відсутності механічного впливу.

Накопичена в акумуляторі енергія використовується для живлення світлофорного об'єкта, що функціонує у безперервному режимі. Частина енергії через стабілізатор напруги перетворюється до рівня 5 В постійного струму для забезпечення можливості заряджання мобільних телефонів через USB-порт. Застосування стабілізатора є необхідним для підтримання стандартного рівня напруги заряджання незалежно від коливань напруги акумулятора.

Таким чином, запропонована структурна схема забезпечує послідовне перетворення механічної енергії транспортних засобів у стабілізовану електричну енергію з можливістю її накопичення та подальшого використання

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

для живлення електронних пристроїв. Концепція побудови системи відповідає вимогам автономності, енергоефективності та технічної надійності, що є визначальними для експлуатації в умовах транспортної інфраструктури.

3.2.1 Функціональна блок-схема роботи системи

На рисунку 3.2 наведено алгоритм функціонування зарядного модуля автономної системи живлення, який реалізується мікроконтролерним блоком керування.



Рисунок 3.2 – Блок-схема роботи зарядного кола автономної системи живлення

Робота системи розпочинається з етапу ініціалізації, під час якого здійснюється налаштування портів мікроконтролера, запуск модуля вимірювання напруги, ініціалізація LCD-дисплея та встановлення початкових значень робочих параметрів. На цьому етапі система переходить у режим моніторингу стану акумуляторної батареї.

Після ініціалізації активується режим заряду акумулятора. Енергія, що надходить від п'єзоелектричного генераторного модуля через випрямляючий і стабілізуючий каскади, подається на акумуляторну батарею. Одночасно мікроконтролер здійснює безперервне вимірювання напруги на клеммах акумулятора за допомогою аналогового входу.

Під час процесу заряджання на дисплеї відображається повідомлення про поточний стан системи – «зарядка акумулятора», що забезпечує інформування користувача про активний режим роботи.

Далі алгоритм переходить до блоку перевірки умови – визначення рівня заряду акумулятора. Порівнюється виміряне значення напруги з попередньо встановленим граничним рівнем, що відповідає повному заряду батареї.

- Якщо напруга не досягла порогового значення, система повертається до режиму заряджання та продовжує цикл контролю.
- Якщо напруга досягає встановленого рівня повного заряду, відбувається перехід до завершального етапу.

У випадку повного заряду на дисплеї відображається повідомлення «акумулятор заряджений», після чого зарядний струм відсікається (або обмежується), що запобігає перезаряду та передчасній деградації акумуляторної батареї.

Завершальним етапом є перехід системи у режим очікування або повторного моніторингу, що забезпечує безперервний контроль стану енергетичного накопичувача.

Таким чином, блок-схема відображає циклічний алгоритм керування процесом заряджання, який забезпечує:

- автоматичний контроль рівня заряду;
- запобігання перезаряду акумулятора;
- індикацію поточного режиму роботи;
- підвищення надійності автономної системи живлення.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Представлений алгоритм є базовим програмним механізмом функціонування зарядного вузла та інтегрується у загальну структуру автономної енергетичної системи.

3.2.2 Блок-схема роботи зарядного кола

Блок-схема роботи зарядного кола автономної системи живлення наведена на рис. 3.3. Вона відображає алгоритм перетворення та розподілу електричної енергії, що генерується п'єзоелектричним перетворювачем, а також логіку живлення кінцевих споживачів.



Рисунок 3.3 – Блок-схема роботи зарядного кола автономної системи живлення

Відповідно до рис. 3.3, робота системи розпочинається з етапу ініціалізації, під час якого здійснюється підготовка електронних вузлів до функціонування. На цьому етапі активуються модулі вимірювання напруги, встановлюються

початкові режими стабілізатора та готуються до роботи каскади випрямлення й накопичення енергії.

Після ініціалізації відбувається генерація електричної енергії п'єзоелектричним перетворювачем. Під дією механічного навантаження, створеного транспортними засобами, у перетворювачі формується змінна напруга, яка надходить до випрямляючого вузла. У результаті повнохвильового випрямлення утворюється пульсуюча постійна напруга, що далі згладжується фільтрувальними елементами.

Наступним етапом є заряд акумуляторної батареї. Енергія, отримана після випрямлення та фільтрації, подається на акумулятор через стабілізуючий каскад, який забезпечує підтримання допустимого рівня напруги заряджання. Таким чином формується енергетичний буфер, що компенсує нерівномірність механічного впливу та гарантує безперервність живлення навантаження.

Після накопичення енергії відбувається її розподіл між споживачами. Згідно з блок-схемою (рис. 3), енергія з акумулятора спрямовується за двома напрямками:

- безпосередньо на живлення світлофорного об'єкта, який працює при номінальній напрузі 12 В;
- через стабілізатор напруги на рівень 5 В для забезпечення можливості заряджання мобільних пристроїв через USB-порт.

Таким чином, блок-схема демонструє послідовність процесів від генерації енергії до її кінцевого використання, а також відображає розгалуження потоків енергії залежно від типу навантаження. Представлений алгоритм роботи зарядного кола забезпечує енергетичну узгодженість між джерелом генерації, накопичувачем та споживачами, що є необхідною умовою стабільного функціонування автономної системи живлення в умовах транспортної інфраструктури.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3 Вибір елементної бази автономної системи живлення

Вибір елементної бази автономної системи живлення є визначальним етапом проектування, оскільки саме технічні параметри окремих компонентів формують енергетичні, експлуатаційні та економічні характеристики всієї системи. Підбір елементів у межах даної роботи здійснювався з урахуванням специфіки функціонування в умовах транспортної інфраструктури, де система зазнає циклічних механічних навантажень, температурних коливань та нерівномірного режиму генерації. Крім того, враховувалися вимоги до енергоефективності, стабільності вихідних параметрів та довготривалої безвідмовної роботи.

Вибір п'єзоелектричного перетворювача. Як первинне джерело електричної енергії обрано п'єзоелектричний перетворювач на основі керамічного матеріалу PZT типу III. Такий вибір зумовлений необхідністю забезпечення стабільної роботи в умовах значних та багаторазових механічних навантажень, що виникають під час руху транспортних засобів по дорожньому покриттю. Матеріали на основі цирконат-титанату свинцю характеризуються високими п'єзоелектричними коефіцієнтами, що забезпечують ефективне перетворення механічної енергії в електричну, а також достатньо високою температурою Кюрі, що гарантує збереження поляризаційних властивостей у широкому температурному діапазоні.

PZT типу III відзначається підвищеною механічною міцністю та здатністю працювати при значних циклічних деформаціях без втрати функціональних характеристик. У порівнянні з кварцом або полімерними п'єзоматеріалами, керамічні елементи на основі PZT забезпечують вищий рівень генерованої напруги та потужності при однаковому рівні прикладеного навантаження. Це особливо важливо для систем з обмеженим механічним впливом, де кожен цикл навантаження повинен максимально ефективно перетворюватися на електричну

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

енергію. Таким чином, вибір PZT типу III є технічно обґрунтованим з позицій надійності, енергетичної віддачі та довговічності.

Вибір випрямляючого вузла. Оскільки п'єзоелектричний перетворювач генерує змінну електричну напругу імпульсного характеру, обов'язковим є використання випрямляючого каскаду для перетворення її у постійну складову, придатну для заряджання акумулятора. У роботі застосовано мостову діодну схему повнохвильового випрямлення, що забезпечує використання обох півперіодів вхідного сигналу та підвищує ефективність перетворення.

При виборі діодів враховувалися допустима зворотна напруга, максимальний прямий струм та величина падіння напруги на p–n переході. З огляду на відносно невисокий рівень генерованої потужності, особливу увагу приділено мінімізації втрат на випрямляючих елементах. Саме тому доцільним є застосування діодів із малим прямим падінням напруги, зокрема типу Шотткі, що дозволяє підвищити загальний коефіцієнт корисної дії системи. Таким чином, випрямляючий вузол забезпечує ефективне перетворення змінної енергії у постійну при мінімальних енергетичних втратах.

Вибір стабілізатора напруги. Для забезпечення стабільного рівня напруги заряджання акумуляторної батареї та формування стандартної напруги 5 В для USB-порту використано інтегральний регульований стабілізатор типу LM317T. Застосування стабілізатора є необхідним, оскільки напруга, що надходить після випрямлення, має змінний характер і залежить від інтенсивності транспортного потоку.

LM317T дозволяє задавати необхідний рівень вихідної напруги за допомогою зовнішнього дільника, що забезпечує гнучкість налаштування режимів роботи. Крім того, цей стабілізатор містить вбудовані механізми захисту від перевантаження по струму та перегріву, що підвищує надійність системи в умовах можливих пікових навантажень. Використання такого рішення забезпечує стабільність параметрів живлення та зменшує ризик деградації акумуляторної батареї або підключених електронних пристроїв.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Вибір акумуляторної батареї. У якості накопичувача енергії обрано свинцево-кислотну акумуляторну батарею з номінальною напругою 12 В. Такий вибір зумовлений специфікою стаціонарного розміщення системи та необхідністю забезпечення значного запасу енергії для безперервної роботи світлофорного об'єкта.

Свинцево-кислотні акумулятори характеризуються відносно низькою вартістю, високою механічною надійністю та здатністю витримувати циклічний режим роботи з глибокими розрядами. Вони менш чутливі до короткочасних перевантажень та простіші з точки зору алгоритмів заряджання у порівнянні з літій-іонними аналогами. Хоча їхня питома енергоємність є нижчою, для стаціонарного застосування це не є критичним фактором. Таким чином, свинцево-кислотна батарея забезпечує оптимальне співвідношення вартості, надійності та експлуатаційної довговічності.

Вибір мікроконтролерного модуля. Для реалізації функцій моніторингу та індикації стану системи використано мікроконтролерну платформу Arduino Uno. Обрання даної платформи обумовлене її функціональною достатністю, простотою програмування та широкими можливостями інтеграції з периферійними модулями.

Arduino Uno має достатню кількість аналогових входів для вимірювання напруги акумулятора через резистивний подільник, що дозволяє реалізувати контроль рівня заряду. На основі отриманих значень мікроконтролер обчислює відсотковий стан заряду та керує світлодіодною індикацією або LCD-дисплеєм. Таким чином забезпечується елемент інтелектуального керування системою, що підвищує її експлуатаційну зручність та інформативність.

Пасивні та допоміжні компоненти. До складу системи входять також пасивні елементи, зокрема згладжувальні конденсатори, резистори обмеження струму, захисні діоди та транзисторний ключ для відсікання зарядного струму при досягненні граничного рівня напруги. Параметри цих компонентів

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

визначалися на основі розрахованих значень струмів та напруг, а також з урахуванням допустимих теплових режимів роботи.

Конденсатори забезпечують зменшення коефіцієнта пульсацій після випрямлення, резистори формують необхідні режими струмів керування, а захисні діоди запобігають зворотному розряду акумулятора через генераторний каскад. Сукупність допоміжних елементів забезпечує стабільність, безпечність та довговічність функціонування всієї системи.

Таким чином, обрана елементна база відповідає вимогам енергетичної ефективності, надійності та технічної доцільності. Вибір компонентів здійснено з урахуванням умов експлуатації, розрахованої потужності системи та можливості подальшої модернізації, що забезпечує практичну реалізованість запропонованого технічного рішення.

3.4 Розрахунок енергоспоживання автономної системи

Одним із визначальних етапів проектування автономної системи живлення є визначення її добового енергоспоживання. Коректний розрахунок споживаної енергії дозволяє обґрунтовано підібрати параметри акумуляторної батареї, оцінити необхідний рівень генерації та забезпечити енергетичну збалансованість системи в умовах змінного навантаження.

У межах даної роботи до складу навантаження автономної системи входять:

- світлофорний об'єкт, що функціонує у безперервному режимі;
- модуль заряджання мобільних пристроїв через USB-порт.

3.4.1 Вибір і розрахунок ємності акумуляторної батареї

Акумуляторна батарея в автономній системі живлення виконує функцію буферного накопичувача електричної енергії, забезпечуючи безперервність

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

живлення навантаження в умовах нерівномірної генерації. Визначення необхідної ємності акумулятора здійснюється на основі сумарного добового енергоспоживання системи.

У роботі використано свинцево-кислотну акумуляторну батарею номінальною напругою 12 В. Такий вибір зумовлений її високою експлуатаційною надійністю, стійкістю до циклічних режимів заряду-розряду, невисокою вартістю та здатністю працювати в умовах вібраційних навантажень. Конструктивні особливості даного типу акумуляторів забезпечують низький рівень саморозряду та достатню приймальну здатність до зарядного струму, що є важливим для систем з імпульсним характером генерації.

3.4.2 Розрахунок добового енергоспоживання

Добова споживана енергія визначається за формулою

$$W = U \cdot I \cdot t \cdot \eta, \quad (3.1)$$

де W – споживана енергія, Вт·год;

U – напруга живлення, В;

I – струм навантаження, А;

t – тривалість роботи, год;

η – коефіцієнт корисної дії.

1) Енергоспоживання світлофорного об'єкта

Вихідні дані:

- напруга живлення $U = 12\text{В}$;
- струм споживання $I = 0,833\text{А}$;
- тривалість роботи $t = 24\text{год}$;
- коефіцієнт корисної дії $\eta = 0,85$.

Підставляючи значення у формулу (3.1), отримаємо:

$$W_{\text{CB}} = 12 \cdot 0,833 \cdot 24 \cdot 0,85.$$

$$W_{\text{CB}} = 204 \text{ Вт}\backslash\text{год}. \quad (3.2)$$

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2) Енергоспоживання USB-модуля

Вихідні дані:

- напруга заряджання $U = 5\text{В}$;
- струм заряджання $I = 1,5\text{А}$;
- тривалість заряджання $t = 8\text{год}$.

$$W_{\text{usb}} = 5 \cdot 1,5 \cdot 8.$$

$$W_{\text{usb}} = 60 \text{ Вт}\cdot\text{год}. \quad (3.3)$$

3.4.3 Визначення сумарної добової енергії

Сумарна добова енергія визначається як

$$W_{\Sigma} = W_{\text{св}} + W_{\text{usb}}, \quad (3.4)$$

$$W_{\Sigma} = 204 + 60 = 264 \text{ Вт}\cdot\text{год}. \quad (3.5)$$

Отже, мінімальна добова потреба автономної системи в електричній енергії становить 264 Вт·год.

3.4.4 Визначення необхідної ємності акумулятора

Оскільки акумуляторні батареї нормуються в ампер-годинах, виконується перерахунок за формулою

$$C_{\text{акб}} = \frac{W_{\Sigma}}{U_{\text{ном}}}, \quad (3.6)$$

де $C_{\text{акб}}$ – ємність акумулятора, А·год;

W_{Σ} – сумарна енергія, Вт·год;

$U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга акумулятора, В.

$$C_{\text{акб}} = \frac{264}{12}.$$

$$C_{\text{акб}} = 22 \text{ А}\cdot\text{год}. \quad (3.7)$$

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

3.4.5 Урахування запасу ємності

Для забезпечення стабільної роботи системи, компенсації втрат у перетворювальних каскадах та врахування старіння акумулятора вводиться запас ємності 15–20 %. Приймаючи коефіцієнт запасу $k = 1,2$, отримаємо

$$C_{\text{розр}} = C_{\text{акб}} \cdot k, \quad (3.8)$$

$$C_{\text{розр}} = 22 \cdot 1,2 = 26,4 \text{ А}\cdot\text{год.}$$

Таким чином, для забезпечення надійної роботи автономної системи живлення доцільно обрати акумуляторну батарею номіналом 12 В, 26 А·год.

Проведений розрахунок показав, що мінімально необхідна ємність акумуляторної батареї становить 22 А·год, однак з урахуванням експлуатаційного запасу доцільно застосувати батарею ємністю 26 А·год. Обраний тип акумулятора забезпечує енергетичну достатність, надійність та відповідність режимам роботи автономної системи живлення.

3.5 Розрахунок генерованої потужності п'єзоелектричними елементами

Одним із визначальних параметрів автономної системи живлення є величина електричної потужності, що генерується п'єзоелектричними перетворювачами під дією механічного навантаження транспортних засобів. Розрахунок цього параметра дозволяє оцінити енергетичний потенціал системи та визначити кількість необхідних генераторних елементів.

3.5.1 Визначення миттєвої потужності одного перетворювача

Електрична потужність, що генерується п'єзоелектричним елементом, визначається співвідношенням

$$P = U \cdot I, \quad (3.9)$$

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де P – електрична потужність, Вт;

U – напруга на виході перетворювача, В;

I – струм, що генерується, А.

Згідно з експериментальними даними, при прикладанні навантаження масою 50 кг п'єзоелектричний перетворювач генерує напругу 3 В і струм 0,0015 А.

Підставляючи значення у формулу (3.9), отримаємо

$$P = 3 \cdot 0,0015 = 0,0045 \text{ Вт.} \quad (3.10)$$

Отже, при навантаженні 50 кг один п'єзоелектричний перетворювач генерує потужність 4,5 мВт.

3.5.2 Визначення коефіцієнта пропорційності

Експериментальні дослідження показують, що генерована потужність є пропорційною прикладеному навантаженню. Таким чином,

$$P \propto W_t,$$

де W_t – прикладене механічне навантаження (кг).

Вводячи коефіцієнт пропорційності K , отримаємо

$$P = K \cdot W_t. \quad (3.11)$$

Коефіцієнт K визначається з відомих експериментальних даних:

$$K = \frac{P}{W_t}. \quad (3.12)$$

$$K = \frac{0,0045}{50} = 9 \cdot 10^{-5}. \quad (3.13)$$

Отже, коефіцієнт пропорційності становить

$$K = 9 \cdot 10^{-5}.$$

3.5.3 Розрахунок потужності при середній масі транспортного засобу

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Середня маса транспортного засобу приймається рівною 1817 кг.

Підставляючи це значення у формулу (3.11), отримаємо

$$P = 9 \cdot 10^{-5} \cdot 1817.$$

$$P = 1,64 \text{ Вт.} \quad (3.14)$$

Отже, один п'єзоелектричний перетворювач при навантаженні, еквівалентному середній масі автомобіля, здатний генерувати приблизно 1,64 Вт миттєвої потужності.

3.5.4 Розрахунок добової генерації

Припустимо, що за добу через контрольовану ділянку проходить 1400 транспортних засобів. Тоді сумарна добова потужність, що генерується одним перетворювачем, визначається як

$$P_{\text{доб}} = P \cdot N, \quad (3.15)$$

де N – кількість транспортних засобів за добу.

$$P_{\text{доб}} = 1,64 \cdot 1400.$$

$$P_{\text{доб}} = 2296 \text{ Вт} \approx 2,3 \text{ кВт.} \quad (3.16)$$

У системі використано 16 п'єзоелектричних елементів, з'єднаних паралельно. Тоді сумарна добова генерація становить

$$P_{\text{заг}} = 2296 \cdot 16. \quad (3.17)$$

$$P_{\text{заг}} = 36\,736 \text{ Вт} \approx 36,7 \text{ кВт.} \quad (3.18)$$

Отримані результати свідчать, що за умови використання 16 п'єзоелектричних перетворювачів система має значний енергетичний потенціал, який перевищує розраховану добову потребу навантаження (264 Вт·год). Це створює необхідний запас потужності для компенсації втрат, нерівномірності транспортного потоку та деградації елементів у процесі експлуатації.

Для оцінювання енергетичних характеристик п'єзоелектричного перетворювача використано експериментальні дані, що відображають

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

залежність генерованої потужності від величини прикладеного механічного навантаження. Результати наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Залежність генерованої потужності від прикладеного навантаження

№ з/п	Потужність, Вт	Навантаження, кг
1	0,0009	10
2	0,0018	20
3	0,0036	40
4	0,0045	50
5	0,00675	75
6	0,00765	85
7	0,009	100

Аналіз таблиці 3.1 свідчить про близьку до лінійної залежність між прикладеним навантаженням і величиною генерованої потужності. Зі збільшенням маси навантаження спостерігається пропорційне зростання електричної потужності, що підтверджує можливість масштабування генерації в умовах дії значних механічних сил.

Для адаптації експериментальних результатів до реальних умов експлуатації автономної системи враховано типові маси транспортних засобів, що рухаються автомобільними дорогами загального користування. Узагальнені дані наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Маса транспортних засобів за класами

№ з/п	Клас транспортного засобу	Маса, кг
1	Компактний легковий автомобіль	1354
2	Середній легковий автомобіль	1590
3	Великий легковий автомобіль	1985
4	Компактний вантажний автомобіль	1577
5	Середній вантажний автомобіль	1936
6	Великий вантажний автомобіль	2460
Середня маса транспортного засобу		1817

Середнє значення маси транспортного засобу становить 1817 кг і використовується у подальших розрахунках генерованої потужності системи. Таке усереднення дозволяє отримати репрезентативну оцінку енергетичного потенціалу для умов змішаного транспортного потоку.

Для визначення добового обсягу генерованої енергії необхідно врахувати кількість транспортних засобів, що проходять через контрольовану ділянку дороги. Типовий розподіл інтенсивності руху протягом доби наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 –Інтенсивність руху транспортних засобів протягом доби

№ з/п	Часовий інтервал	Кількість транспортних засобів
1	05:00 – 09:59	500
2	10:00 – 14:59	200
3	15:00 – 19:59	500
4	20:00 – 04:49	200
Загальна кількість за добу		1400

З аналізу таблиці 3.3 видно, що максимальна інтенсивність руху припадає на ранкові та вечірні години, що відповідає типовому режиму функціонування міської транспортної інфраструктури. Загальна кількість транспортних засобів за добу становить 1400 одиниць, що використовується у розрахунках добової генерації електричної енергії.

Поєднання експериментальної залежності «навантаження–потужність» із реальними характеристиками транспортного потоку дозволяє перейти від лабораторних умов до інженерної оцінки роботи системи в експлуатаційному середовищі. Такий підхід забезпечує універсальність розробленої моделі та можливість її адаптації до будь-якої ділянки транспортної інфраструктури з подібними параметрами руху.

3.6 Розрахунок напруги холостого ходу п'єзоелектричного перетворювача

Для обґрунтування параметрів перетворювального та зарядного каскадів автономної системи живлення необхідно визначити очікуване значення напруги холостого ходу, що формується на виході п'єзоелектричного перетворювача під дією механічного навантаження. Напруга холостого ходу є важливим показником, оскільки вона визначає граничний рівень напруги, який може виникати на виході генераторного вузла за відсутності навантаження або при незначному струмі, а також впливає на вибір елементів випрямляча, стабілізатора та захисту.

Напруга холостого ходу п'єзоелектричного перетворювача визначається виразом

$$U_{x.x.} = \frac{g_{33} \cdot t \cdot F}{A}, \quad (3.19)$$

де $U_{x.x.}$ – напруга холостого ходу, В;

g_{33} – п'єзоелектричний коефіцієнт напруги (для випадку прикладання сили вздовж напрямку поляризації), В·м/Н;

t – товщина п'єзоелектричного елемента, м;

F – прикладена стискаюча сила, Н;

A – площа поперечного перерізу п'єзоелектричного елемента, м².

У межах спрощеного інженерного розрахунку механічне навантаження задається через еквівалентну масу транспортного засобу. Середня маса транспортного засобу приймається рівною 1817 кг. Для подальших обчислень необхідно врахувати, що у формулі (3.21) використовується сила F , яка в загальному випадку визначається як

$$F = m \cdot g, \quad (3.20)$$

де m – маса, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с² ($g \approx 9,81$).

Разом із тим, у розрахунках, наведених у вихідному матеріалі, навантаження підставлялося у спрощеному вигляді як числове значення маси. Для забезпечення методичної узгодженості подальші підстановки виконано за

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аналогічним підходом (з розумінням того, що отримане значення має оцінювальний характер і потребує уточнення під час експериментальної перевірки або детального механічного моделювання розподілу навантаження по площі перетворювача).

З технічних характеристик п'єзоелектричного перетворювача прийнято:

- $g_{33} = 24,0 \cdot 10^{-3}$;
- $t = 0,002\text{м}$;
- діаметр перетворювача $d = 0,035\text{м}$.

Площа поперечного перерізу визначається як площа круга

$$A = \pi r^2, \quad (3.21)$$

де $r = \frac{d}{2}$.

$$r = \frac{0,035}{2} = 0,0175 \text{ м}. \quad (3.22)$$

$$A = \pi \cdot (0,0175)^2 = 9,621 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2. \quad (3.23)$$

Підставляючи отримані значення у формулу (3.19), отримаємо

$$U_{\text{х.х.}} = \frac{24,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,002 \cdot 1817}{9,621 \cdot 10^{-4}}.$$
$$U_{\text{х.х.}} = 90,65 \text{ В} \approx 91 \text{ В}. \quad (3.24)$$

Отже, розрахункове значення напруги холостого ходу п'єзоелектричного перетворювача становить приблизно 91 В.

Отримане значення напруги холостого ходу підтверджує необхідність застосування випрямляючого та стабілізуючого каскадів, а також елементів захисту від перенапруги у складі зарядного вузла. Крім того, високий рівень $U_{\text{х.х.}}$ при імпульсному характері генерації вказує на доцільність використання фільтрації та узгодження навантаження для зменшення амплітудних коливань напруги та підвищення енергоефективності процесу заряджання акумулятора.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

3.7 Розрахунок еквівалентної ємності п'єзоелектричного елемента

П'єзоелектричний перетворювач у складі автономної системи живлення характеризується не лише здатністю генерувати електричну напругу під дією механічного навантаження, але й наявністю виражених ємнісних властивостей. Це зумовлено фізичною природою п'єзоелектричного матеріалу, який у електричному еквіваленті може бути поданий як джерело змінної напруги, з'єднане послідовно з власною ємністю. Визначення еквівалентної ємності є важливим для оцінювання динаміки процесів заряджання, узгодження з випрямляючим каскадом і вибору параметрів фільтрувальних елементів.

Еквівалентна ємність п'єзоелектричного елемента визначається залежністю

$$C = \frac{K_{T33} \varepsilon_0 A}{t}, \quad (3.25)$$

де C – ємність п'єзоелектричного елемента, Ф;

K_{T33} – відносна діелектрична проникність матеріалу;

ε_0 – електрична стала (діелектрична проникність вакууму), Ф/м;

A – площа електродованої поверхні, м²;

t – товщина п'єзоелектричного елемента, м.

Згідно з технічними даними п'єзоелектричного перетворювача прийнято:

$$K_{T33} = 1000, \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}, t = 0,002 \text{ м}. \quad (3.26)$$

Площа поперечного перерізу елемента була визначена у підрозділі 3.7 та становить

$$A = 9,621 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2. \quad (3.27)$$

Підставляючи значення (3.26)–(3.27) у формулу (3.25), отримаємо

$$C = \frac{1000 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 9,621 \cdot 10^{-4}}{0,002}.$$

$$C = 4,257 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}. \quad (3.28)$$

Переходячи до зручніших одиниць, одержуємо

$$C \approx 4,3 \text{ нФ}. \quad (3.29)$$

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Отже, еквівалентна ємність одного п'єзоелектричного перетворювача становить приблизно 4,3 нФ.

Розраховане значення ємності підтверджує, що п'єзоелектричний елемент має виражений ємнісний характер, який впливає на форму вихідної напруги та струму в режимі роботи з випрямляючим каскадом. У практичній реалізації це вимагає врахування ємнісних параметрів при виборі діодів, фільтрувальних конденсаторів і режимів стабілізації напруги, оскільки власна ємність перетворювача бере участь у процесах накопичення та віддачі електричного заряду під час імпульсних механічних навантажень.

3.8 Аналіз отриманих результатів та висновки до розділу 3

У межах третього розділу виконано повний інженерний цикл проєктування автономної системи живлення на основі п'єзоелектричного перетворення енергії — від обґрунтування області застосування до визначення параметрів основних елементів системи. Проведені розрахунки дозволяють здійснити комплексний аналіз енергетичної достатності та технічної доцільності запропонованого рішення.

Розрахунок добового енергоспоживання показав, що сумарна потреба системи становить 264 Вт·год, включаючи живлення світлофорного об'єкта та USB-модуля для заряджання мобільних пристроїв. Отримане значення стало базовим параметром для визначення необхідної ємності акумуляторної батареї. З урахуванням експлуатаційного запасу встановлено, що доцільним є використання свинцево-кислотної батареї номіналом 12 В та ємністю 26 А·год, що забезпечує енергетичну автономність системи навіть у випадках нерівномірного транспортного потоку.

Розрахунок генерованої потужності п'єзоелектричних перетворювачів підтвердив пропорційний характер залежності між прикладеним механічним навантаженням та електричною потужністю. При середній масі транспортного

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

засобу 1817 кг миттєва потужність одного перетворювача становить приблизно 1,64 Вт. За умови використання 16 елементів сумарний енергетичний потенціал системи суттєво перевищує добову потребу навантаження, що формує необхідний запас для компенсації втрат та забезпечує стабільність роботи.

Визначення напруги холостого ходу показало, що при імпульсному механічному впливі можливе формування напруги порядку 91 В. Це свідчить про необхідність використання ефективного випрямляючого та стабілізуючого каскадів, а також елементів захисту від перенапруги. Отримане значення підтверджує технічну можливість подальшого перетворення та акумулювання енергії без додаткового підвищення напруги.

Розрахунок еквівалентної ємності п'єзоелектричного елемента (приблизно 4,3 нФ) дозволив уточнити електричну модель генераторного вузла та врахувати вплив ємнісної складової на процеси випрямлення і згладжування напруги. Це забезпечує коректний вибір параметрів фільтрувальних та стабілізуючих компонентів у складі зарядного модуля.

Загалом результати розрахунків підтверджують енергетичну спроможність запропонованої автономної системи живлення забезпечувати безперервну роботу світлофорного об'єкта та додаткових споживачів. Встановлено, що при раціональному підборі кількості п'єзоелектричних елементів та коректному узгодженні параметрів акумуляторного блоку система має достатній резерв потужності, що підвищує її надійність та експлуатаційну стабільність.

Таким чином, виконано обґрунтований вибір області застосування, визначено структуру системи, здійснено підбір елементної бази та проведено розрахунок ключових електричних параметрів. Отримані результати є достатньою теоретичною основою для переходу до наступного етапу — розробки принципової електричної схеми та дослідження її роботи засобами комп'ютерного моделювання.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

3.9 Висновки до третього розділу

У третьому розділі виконано проектування та розрахунок автономної системи живлення на основі п'єзоелектричного перетворення енергії. Обґрунтовано вибір області застосування, визначено структуру системи та підібрано елементну базу з урахуванням умов експлуатації в транспортній інфраструктурі.

Проведено розрахунок добового енергоспоживання, яке становить 264 Вт·год, та визначено необхідну ємність акумуляторної батареї – 26 А·год із урахуванням експлуатаційного запасу. Розраховано генеровану потужність п'єзоелектричних елементів, напругу холостого ходу та їх еквівалентну ємність, що дозволило підтвердити енергетичну достатність запропонованого рішення.

Отримані результати свідчать про технічну реалізованість автономної системи живлення та створюють основу для подальшої розробки принципової електричної схеми та її моделювання у наступному розділі.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ

4.1 Проектування генераторного вузла автономної системи живлення

Розроблена електрична схема автономної системи живлення складається з двох основних функціональних частин: генераторного вузла, що забезпечує перетворення механічної енергії в електричну, та зарядного кола акумуляторної батареї, яке здійснює випрямлення, стабілізацію та накопичення енергії.

Генераторний вузол реалізовано на основі п'єзоелектричних перетворювачів типу PZT III. Для аналізу електричних процесів у системі використовується еквівалентна схема п'єзоелектричного елемента, наведена на рис. 4.1.

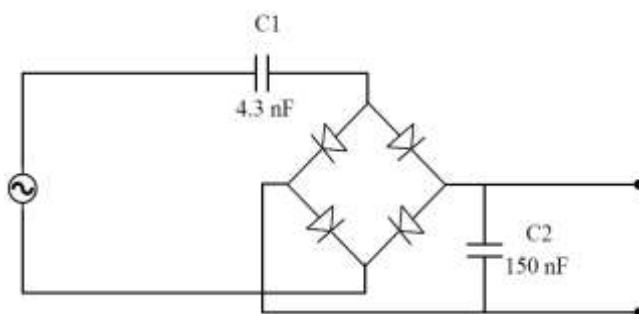


Рисунок 4.1 – Еквівалентна електрична схема п'єзоелектричного перетворювача

Відповідно до еквівалентної моделі, п'єзоелектричний перетворювач представлено у вигляді джерела змінної напруги, з'єднаного послідовно з власною ємністю C_1 . Така модель пояснюється фізичною природою п'єзоелектричного ефекту: під дією механічного навантаження в матеріалі виникає електрична поляризація, що супроводжується накопиченням заряду на електродах, тобто проявляються ємнісні властивості.

Визначення ємності п'єзоелектричного елемента

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Ємність п'єзоелектричного диска визначається за співвідношенням

$$C = \frac{K_{T33} \cdot \varepsilon_0 \cdot \pi r^2}{t}, \quad (4.1)$$

де C – ємність п'єзоелектричного елемента, Ф;

K_{T33} – відносна діелектрична проникність матеріалу;

ε_0 – електрична стала, Ф/м;

r – радіус п'єзоелектричного диска, м;

t – товщина елемента, м.

Згідно з технічними характеристиками перетворювача прийнято:

$$\begin{aligned} K_{T33} &= 1000, \\ \varepsilon_0 &= 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}, \\ r &= 0,0175 \text{ м}, \\ t &= 0,002 \text{ м}. \end{aligned}$$

Площа поперечного перерізу становить

$$A = \pi r^2 = 9,621 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2. \quad (4.2)$$

Підставляючи числові значення у формулу (4.1), отримуємо

$$\begin{aligned} C &= \frac{1000 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 9,621 \cdot 10^{-4}}{0,002}, \\ C &= 4,257 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Переходячи до зручнішої одиниці вимірювання,

$$C \approx 4,3 \text{ нФ}. \quad (4.4)$$

Отже, ємність одного п'єзоелектричного перетворювача становить приблизно 4,3 нФ.

Отримане значення ємності підтверджує виражений ємнісний характер п'єзоелектричного елемента, що необхідно враховувати при виборі параметрів випрямляючого моста та фільтрувального конденсатора. Наявність власної ємності впливає на форму імпульсної напруги та процес накопичення заряду в системі.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Еквівалентна схема, наведена на рис. 4.1, використовується надалі при моделюванні роботи генераторного вузла у програмному середовищі.

4.2 Схема з'єднання п'єзоелектричних перетворювачів

Генераторний вузол автономної системи живлення реалізовано на основі масиву п'єзоелектричних перетворювачів, електрично з'єднаних між собою. У розробленій схемі використано 16 еквівалентних п'єзоелектричних елементів, з'єднаних паралельно. Принципову схему з'єднання наведено на рис. 4.2.

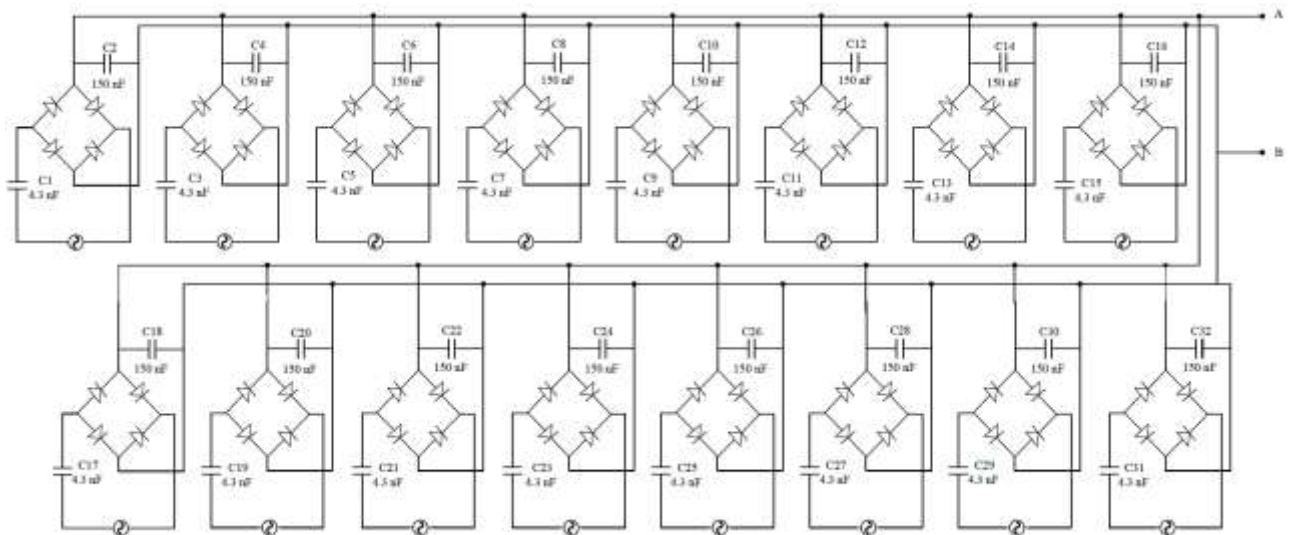


Рисунок 4.2 – Схема з'єднання п'єзоелектричних перетворювачів

Загалом при побудові п'єзоелектричних генераторів можливе використання послідовного, паралельного або змішаного (послідовно-паралельного) способів з'єднання. Послідовне з'єднання дозволяє підвищити вихідну напругу системи, тоді як паралельне – збільшити сумарний струм. Змішана схема застосовується для досягнення оптимального співвідношення між напругою та струмом з метою отримання максимальної вихідної потужності.

У даній роботі обрано паралельне з'єднання всіх 16 перетворювачів. Такий вибір обумовлений тим, що напруга, яка формується одним п'єзоелектричним

елементом під дією навантаження, є достатньою для подальшого випрямлення та стабілізації в зарядному каскаді. Водночас струм, що генерується окремим елементом, має незначну величину, тому його збільшення є пріоритетним завданням.

При паралельному з'єднанні зберігається рівень вихідної напруги окремого перетворювача, тоді як сумарний струм визначається як сума струмів усіх елементів:

$$I_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n I_i, \quad (4.5)$$

де I_{Σ} – сумарний струм генераторного вузла;

I_i – струм окремого п'єзоелектричного елемента;

n – кількість елементів (у даному випадку $n = 16$).

Таким чином, використання 16 паралельно з'єднаних перетворювачів забезпечує збільшення сумарного струму в 16 разів порівняно з одним елементом за збереження номінального рівня напруги. Це створює необхідні умови для ефективного заряджання акумуляторної батареї.

Згенерована змінна напруга з виходу масиву п'єзоелектричних елементів надходить до випрямляючого каскаду зарядного кола, принципова схема якого наведена на рис. 4.3. Саме в цьому вузлі здійснюється перетворення змінної напруги у постійну та її подальша стабілізація для накопичення енергії в акумуляторі.

Обрана схема з'єднання забезпечує конструктивну простоту, надійність та масштабованість системи: за необхідності підвищення потужності кількість паралельно з'єднаних перетворювачів може бути збільшена без суттєвої зміни структури зарядного модуля.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

4.3 Розробка схеми зарядного пристрою акумуляторної батареї

Схема заряджання акумуляторної батареї є ключовим функціональним вузлом автономної системи живлення, оскільки забезпечує перетворення, стабілізацію та контроль параметрів електричної енергії, що надходить від генераторного модуля. Принципову схему зарядного кола наведено на рис. 4.3.

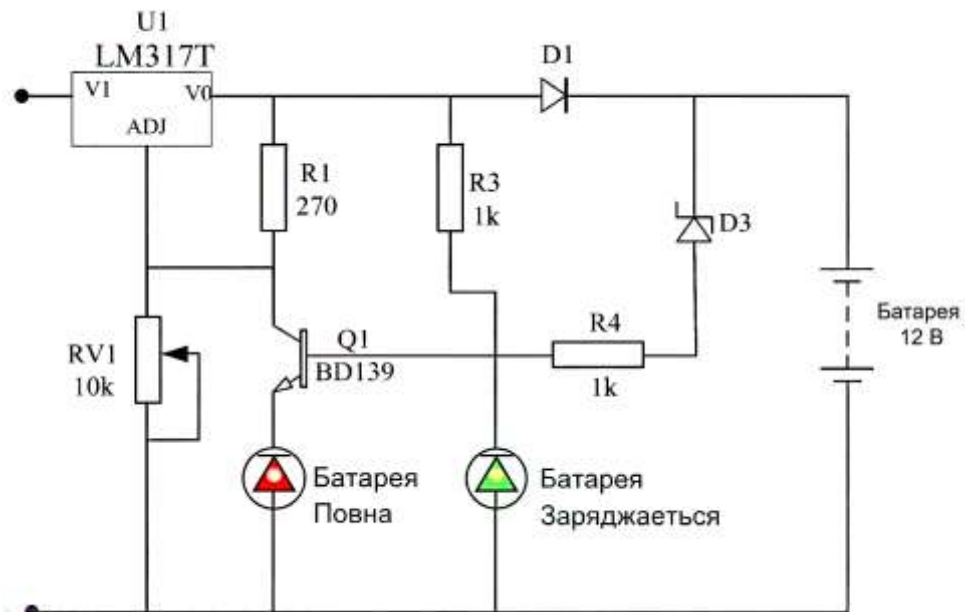


Рисунок 4.3 – Схема заряджання акумуляторної батареї

У початковій частині зарядного вузла змінна напруга, що формується масивом п'єзоелектричних перетворювачів, подається на мостовий діодний випрямляч. Використання повнохвильового випрямлення дозволяє ефективно перетворити змінну напругу на пульсуючу постійну, що підвищує коефіцієнт використання генерованої енергії порівняно з однонапівперіодними схемами.

Після випрямлення напруга містить залишкові пульсації, зумовлені імпульсним характером генерації. Для їх зменшення застосовується фільтрувальний конденсатор, який згладжує амплітудні коливання та формує більш стабільний рівень постійної напруги. Наявність згладжувального каскаду

є особливо важливою з огляду на імпульсний режим роботи п'єзоелектричного генератора.

Подальша стабілізація напруги здійснюється за допомогою інтегрального регульованого стабілізатора типу LM317T. Застосування даного стабілізатора забезпечує підтримання необхідного рівня напруги заряджання акумуляторної батареї незалежно від коливань напруги на вході. Крім того, LM317T має вбудований захист від перегріву та перевантаження по струму, що підвищує надійність роботи системи.

Вихід стабілізатора підключено до акумуляторної батареї через захисний діод D1. Цей діод запобігає протіканню зворотного струму у випадку відсутності генерації, що виключає можливість розряджання акумулятора через генераторний вузол.

Контроль завершення процесу заряджання реалізовано за допомогою стабілітрона D3 та біполярного транзистора BD139 (NPN). Після досягнення напруги повного заряду стабілітрон переходить у режим пробою та формує керуючий сигнал на базі транзистора. Відкриття транзистора призводить до шунтування зарядного струму, що фактично обмежує подальше підвищення напруги на акумуляторі. Така схема дозволяє реалізувати простий і надійний механізм відсікання зарядного струму.

Світлодіодна індикація забезпечує візуальний контроль стану системи. Зелений світлодіод сигналізує про активний процес заряджання, тоді як червоний світлодіод вказує на досягнення повного заряду акумуляторної батареї. Для обмеження струму через світлодіоди застосовано резистори R1 та R3, що запобігає їх пошкодженню. Резистор R4 виконує функцію обмеження струму бази транзистора BD139, забезпечуючи коректний режим його роботи.

Додатково в систему інтегровано мікроконтролерний модуль, який здійснює вимірювання напруги акумуляторної батареї за допомогою

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

аналогового входу. На основі отриманого значення обчислюється відсотковий рівень заряду, який відображається на рідкокристалічному дисплеї (LCD). Це дозволяє реалізувати функцію цифрового моніторингу стану енергетичного накопичувача.

Таким чином, розроблене зарядне коло забезпечує повний цикл перетворення та контролю енергії: від випрямлення та фільтрації до стабілізації, захисту від зворотного струму та індикації режимів роботи. Запропонована схема характеризується простотою реалізації, надійністю та відповідністю вимогам автономної системи живлення транспортної інфраструктури.

4.4 Моделювання роботи системи в середовищі Proteus

Для перевірки працездатності розробленої електричної схеми автономної системи живлення було виконано комп'ютерне моделювання у програмному середовищі Proteus. Метою моделювання було дослідження режимів заряджання акумуляторної батареї, перевірка роботи вузла стабілізації напруги, а також аналіз функціонування системи індикації та мікроконтролерного контролю.

Результати моделювання наведено на рис. 4.4 та рис. 4.5.

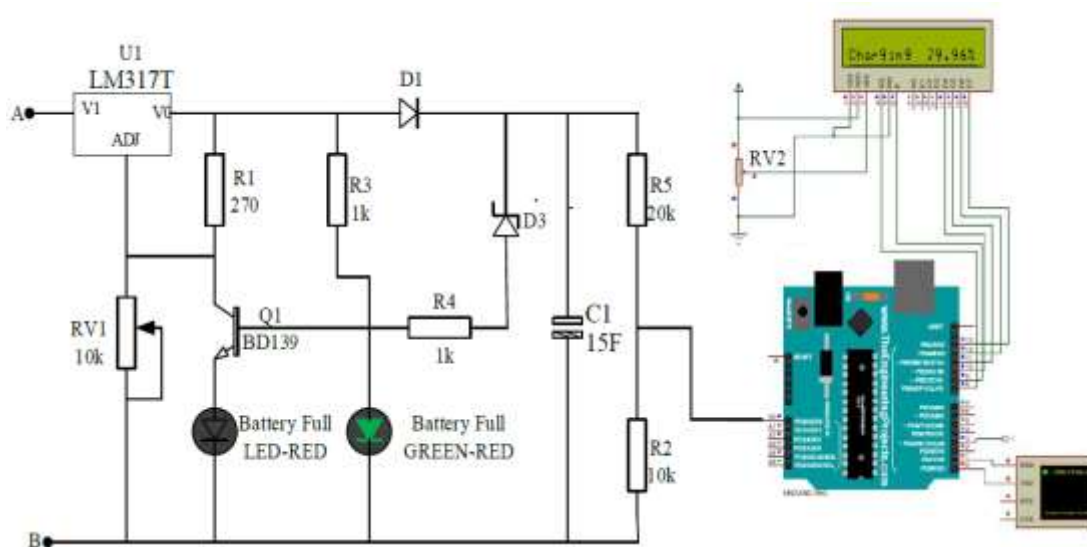


Рисунок 4.4 – Результат моделювання в режимі заряджання акумулятора

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

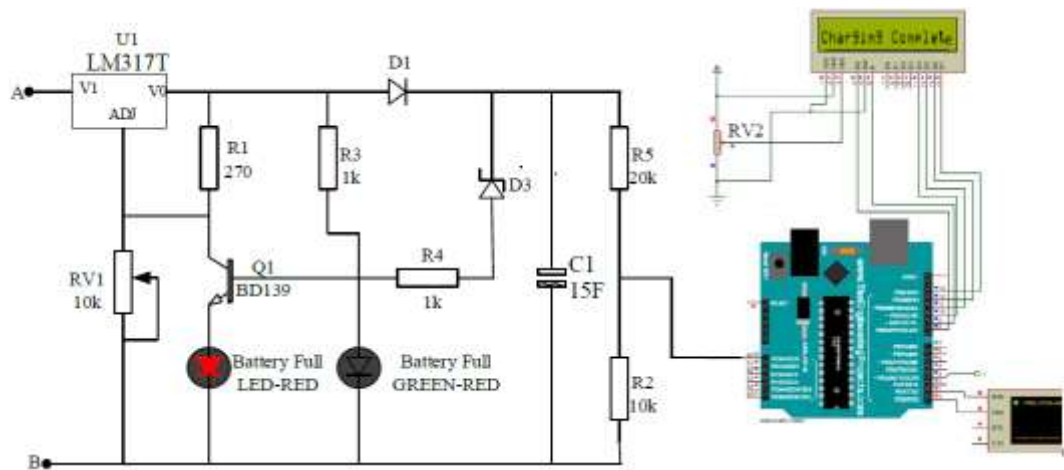


Рисунок 4.5 – Результат моделювання при повністю зарядженому акумуляторі

4.5 Аналіз результатів моделювання

У середовищі Proteus відсутня можливість повноцінного фізичного моделювання електрохімічних процесів, що відбуваються у свинцево-кислотній акумуляторній батареї. З цієї причини замість реальної батареї в моделі було використано еквівалентний конденсатор ємністю 15 Ф з номінальною напругою 12 В. Такий підхід дозволяє імітувати процес накопичення заряду та відобразити характер зміни напруги у процесі заряджання.

Під час моделювання встановлено, що у режимі активного заряджання після подачі напруги від генераторного вузла через випрямляч та стабілізатор формується зростаюча напруга на накопичувальному елементі. У цей момент спрацьовує схема індикації: зелений світлодіод перебуває у ввімкненому стані, що свідчить про протікання зарядного струму. Одночасно мікроконтролер вимірює напругу на клеммах накопичувача та обчислює відсотковий рівень заряду, який відображається на рідкокристалічному дисплеї (рис. 4.4).

У процесі досягнення встановленого граничного значення напруги заряджання спрацьовує вузол відсікання струму на основі стабілітрона та транзистора. Після цього зарядний струм зменшується до мінімального значення, зелений світлодіод вимикається, а червоний світлодіод переходить у активний стан, сигналізуючи про повне заряджання акумулятора. На дисплеї відображається відповідне повідомлення про завершення процесу заряджання (рис. 4.5).

Отримані результати підтверджують:

- коректність роботи випрямляючого та стабілізуючого каскадів;
- працездатність схеми автоматичного відсікання зарядного струму;
- правильність алгоритму мікроконтролерного контролю;
- адекватність світлодіодної індикації режимів роботи системи.

Таким чином, комп'ютерне моделювання продемонструвало функціональну реалізованість розробленої автономної системи живлення та підтвердило відповідність її роботи розрахунковим параметрам.

4.6 Економічний аналіз розробленої системи

Економічна оцінка автономної системи живлення виконана з урахуванням середніх роздрібних цін на електронні компоненти, доступні на ринку України (зокрема в м. Хмельницький через локальні магазини радіодеталей та національні онлайн-платформи).

Загальна вартість комплектуючих визначається сумарною вартістю всіх елементів системи без урахування витрат на монтаж, транспортні витрати та встановлення. Орієнтовна вартість розробленої системи становить:

73,34 USD \approx 2934 грн.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Таблиця 4.1 – Кошторисна вартість елементної бази автономної системи живлення (ринок України)

№ з/П	Найменування компонента	Кількість	Ціна за одиницю, грн	Загальна вартість, грн
1	П'єзоелектричний перетворювач PZT	16	40	640
2	Мікроконтролерна плата Arduino Uno	1	800	800
3	Пасивні компоненти (резистори, конденсатори, діоди, стабілітрон, транзистор)	1 комплект	270	270
4	Свинцево-кислотна акумуляторна батарея 12 В, 26 А·год	1	1000	1000
5	USB-роз'єм	1	5	5
6	Друкована плата (PCB)	1	220	220
Загальна вартість				2935 грн

Отримана собівартість автономної системи живлення становить приблизно 2900–3000 грн, що є відносно невисоким показником для інженерного рішення, здатного забезпечити автономне живлення світлофорного об'єкта та додаткових електронних пристроїв.

Для порівняння, вартість промислових автономних систем живлення або сонячних рішень аналогічного призначення є суттєво вищою. Крім того, розроблена система використовує локально доступні компоненти, що спрощує обслуговування та ремонт у регіональних умовах.

З огляду на відсутність витрат на традиційні джерела електроенергії та можливість масштабування конструкції, запропонована система є економічно доцільною для впровадження в міській транспортній інфраструктурі.

4.7 Висновки до четвертого розділу

У четвертому розділі виконано розробку принципової електричної схеми автономної системи живлення та проведено дослідження її роботи засобами комп'ютерного моделювання. Сформовано генераторний вузол на основі масиву п'єзоелектричних перетворювачів, обґрунтовано спосіб їх паралельного з'єднання та розроблено зарядне коло акумуляторної батареї із випрямленням, стабілізацією напруги та захистом від зворотного струму.

Реалізовано схему автоматичного відсікання зарядного струму після досягнення граничної напруги, а також систему світлодіодної та цифрової індикації стану заряду. Проведене моделювання в середовищі Proteus підтвердило працездатність розробленої схеми, коректність алгоритму керування та відповідність режимів роботи розрахунковим параметрам.

Виконаний економічний аналіз показав, що запропонована система має помірну собівартість та може бути реалізована з використанням доступної елементної бази на ринку України. Отримані результати свідчать про технічну реалізованість, функціональну завершеність та практичну доцільність розробленої автономної системи живлення.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційному проєкті запропоновано автономну систему живлення електронних пристроїв на основі п'єзоелектричного перетворення механічної енергії транспортного потоку. Обґрунтовано актуальність забезпечення енергетичної автономності світлофорних об'єктів у транспортній інфраструктурі та доцільність використання технологій збору механічної енергії.

У роботі виконано аналітичний огляд сучасних автономних джерел енергії та визначено переваги п'єзоелектричних матеріалів для роботи в умовах динамічного навантаження. Розглянуто фізичні та математичні основи процесу перетворення механічної енергії в електричну, сформовано електричну модель п'єзоелектричного перетворювача та встановлено залежності між масою навантаження, геометричними параметрами елемента та генерованою потужністю.

Виконано розрахунок добового енергоспоживання навантаження, визначено сумарний енергетичний баланс системи та обґрунтовано вибір акумуляторної батареї номінальною напругою 12 В. Розроблено принципову електричну схему автономної системи, що включає генераторний вузол, випрямляч, фільтрувальний каскад, стабілізатор напруги та мікроконтролерний блок контролю зарядного процесу.

Проведено моделювання роботи системи в середовищі Proteus, яке підтвердило коректність функціонування схеми в режимі заряджання та при досягненні повного заряду акумулятора. Виконана економічна оцінка показала доцільність впровадження запропонованого технічного рішення.

Результати роботи можуть бути використані при проєктуванні автономних систем живлення об'єктів транспортної інфраструктури та інших електронних пристроїв, що потребують незалежного енергозабезпечення.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бойко Ю. М. Основи електроніки та схемотехніки : навч. посіб. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
2. Руденко О. Г. Теорія електричних кіл : навч. посіб. – Харків : ХНУРЕ, 2019.
3. Слободянюк П. В. Електричні кола та сигнали : підручник. – Львів : Новий Світ, 2020.
4. Назаренко С. А. Силова електроніка : підручник. – Київ : Ліра-К, 2020.
5. Довбня М. В. Джерела живлення електронної апаратури : навч. посіб. – Київ : НУХТ, 2021.
6. Мельник І. О. Акумуляторні батареї та системи зберігання енергії : навч. посіб. – Львів : Сполом, 2022.
7. Кулик М. М. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії : підручник. – Київ : Наукова думка, 2018.
8. Гончаренко В. І. Відновлювані джерела енергії : навч. посіб. – Київ : Центр учбової літератури, 2022.
9. Пелешенко С. М. П'єзоелектричні матеріали та перетворювачі : навч. посіб. – Львів : ЛПНУ, 2020.
10. Притула М. В. Теоретичні основи електромеханічного перетворення енергії : навч. посіб. – Київ : КПІ, 2019.
11. Ткаченко О. М. Мікроконтролерні системи : навч. посіб. – Київ : Каравела, 2022.
12. Козловський В. О. Напівпровідникові прилади : навч. посіб. – Харків : ХНУ, 2018.
13. Биков В. П. Електронні пристрої та системи : підручник. – Харків : Фоліо, 2019.
14. Іванов В. П. Системи збору енергії (Energy Harvesting) : навч. посіб. – Одеса : ОНАЗ, 2021.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

15. Лисенко С. П. Електроживлення радіоелектронних пристроїв : навч. посіб. – Київ : КПІ, 2020.
16. Шевченко М. П. Основи силової електроніки : навч. посіб. – Дніпро : НТУ «ДП», 2021.
17. Конспект лекцій з дисципліни «Теорія електричних кіл». – Хмельницький : ХНУ, 2023.
18. Конспект лекцій з дисципліни «Силова електроніка». – Хмельницький : ХНУ, 2023.
19. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи за спеціальністю 172 «Електронні комунікації та радіотехніка». – Хмельницький, 2024.
20. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Мікроконтролерні системи». – Хмельницький : ХНУ, 2024.
21. Галкін Ю. О. Проблемні питання радіолокаційного виявлення малорозмірних БПЛА // Збірник наукових праць ХНУПС. – 2021. – С. 45–52.
22. Коваль В. М. Аналіз ефективності п'єзоелектричних генераторів у транспортній інфраструктурі // Вісник НТУУ «КПІ». – 2022. – С. 78–84.
23. Романюк Л. І. Дослідження систем збору механічної енергії для автономного живлення // Радіоелектроніка та енергетика. – 2023. – С. 112–118.
24. Середа А. О. П'єзоелектричні сенсори та генератори в системах енергозабезпечення // Електроніка та зв'язок. – 2022. – С. 56–63.
25. Левченко П. М. Розрахунок акумуляторних систем для автономних установок // Енергетика і автоматика. – 2021. – С. 34–40.
26. Олійник Д. С. Стабілізатори напруги в автономних джерелах живлення // Вісник ХНУРЕ. – 2022. – С. 91–97.
27. Баранов І. Ю. П'єзоелектричні матеріали в енергетичних застосуваннях // Фізика і техніка. – 2020. – С. 102–109.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

28. Кравченко С. В. Математичне моделювання п'єзоелектричних перетворювачів // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2021. – С. 67–73.

29. Дяченко Р. О. Відновлювана енергетика в умовах міської інфраструктури // Енергетичні системи та комплекси. – 2023. – С. 15–21.

30. Шаповал О. І. Аналіз автономних систем живлення світлофорних об'єктів // Транспортні системи і технології. – 2022. – С. 58–64.

31. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання.

32. ДСТУ 3587:2013. Джерела струму хімічні. Загальні технічні умови.

33. ДСТУ EN 60598-2-3:2017. Світильники. Частина 2-3. Додаткові вимоги до дорожніх та вуличних світильників.

34. ДСТУ EN 61000-6-2:2015. Електромагнітна сумісність.

35. ДСТУ 4210:2003. Акумулятори свинцеві. Загальні технічні умови.

36. Шумейко О. І. Основи електротехніки : підручник. – Київ : Центр учбової літератури, 2019.

37. Гаврилюк М. В. Енергетичні перетворювачі : навч. посіб. – Львів : ЛПНУ, 2021.

38. Кириленко О. В. Електричні машини та перетворювачі енергії : підручник. – Київ : НАН України, 2018.

39. Савченко В. П. Автономні енергетичні системи : навч. посіб. – Харків : ХПІ, 2022.

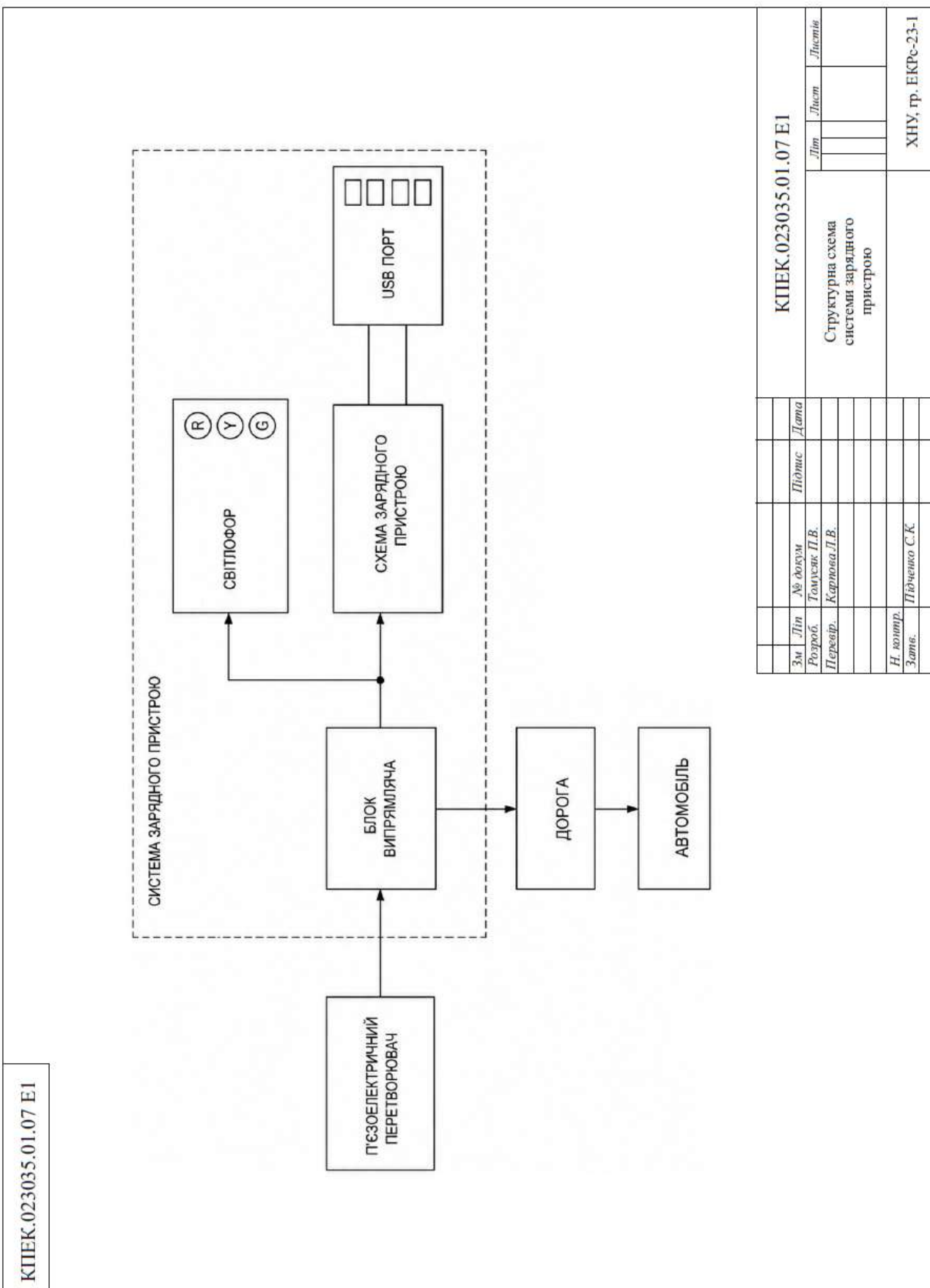
40. Федоренко С. М. Проектування електронних пристроїв : навч. посіб. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.

					КПЕКР.23035.07.07 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

ДОДАТКИ

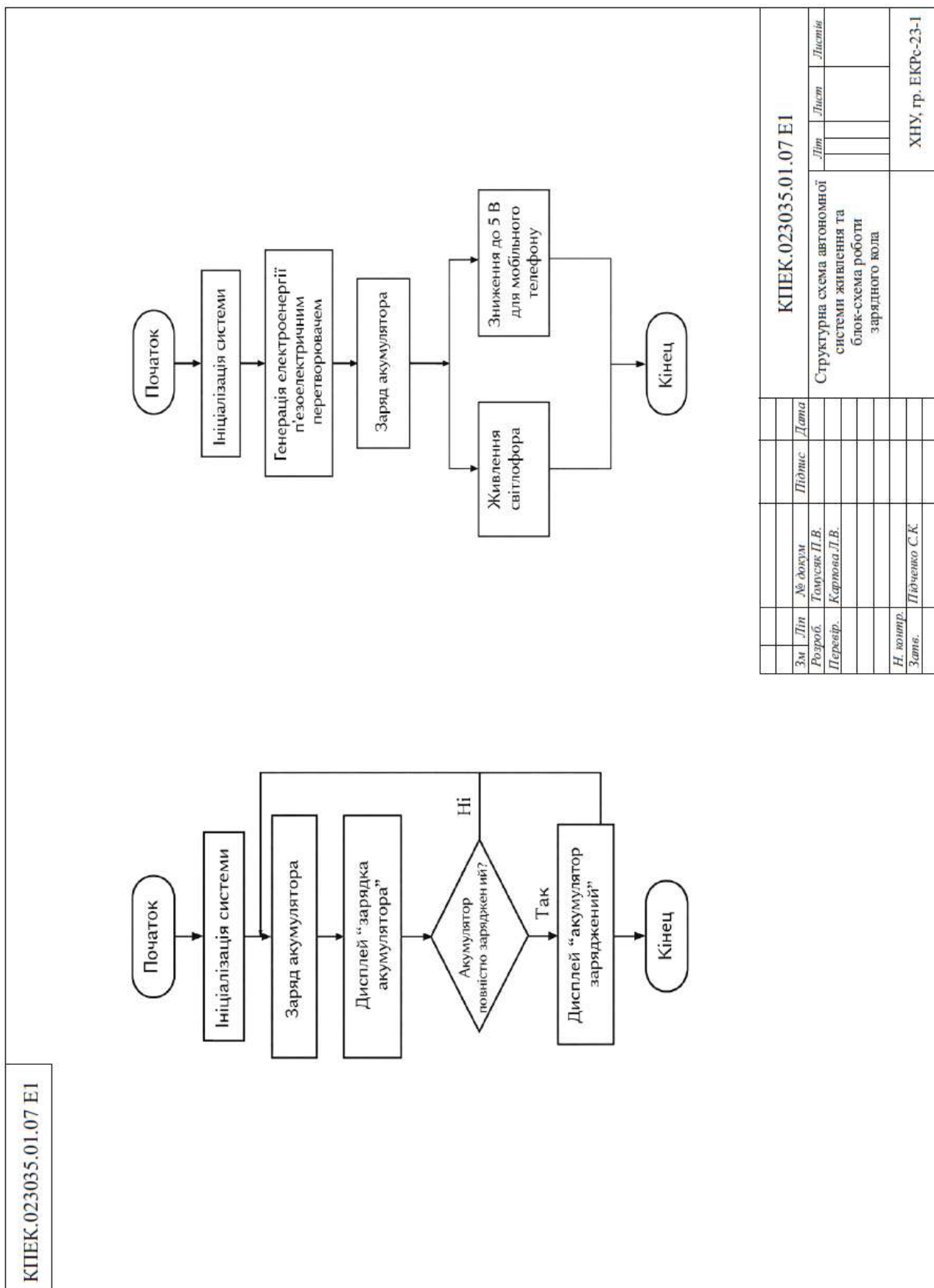
Додаток А

Структурна схема системи зарядного пристрою



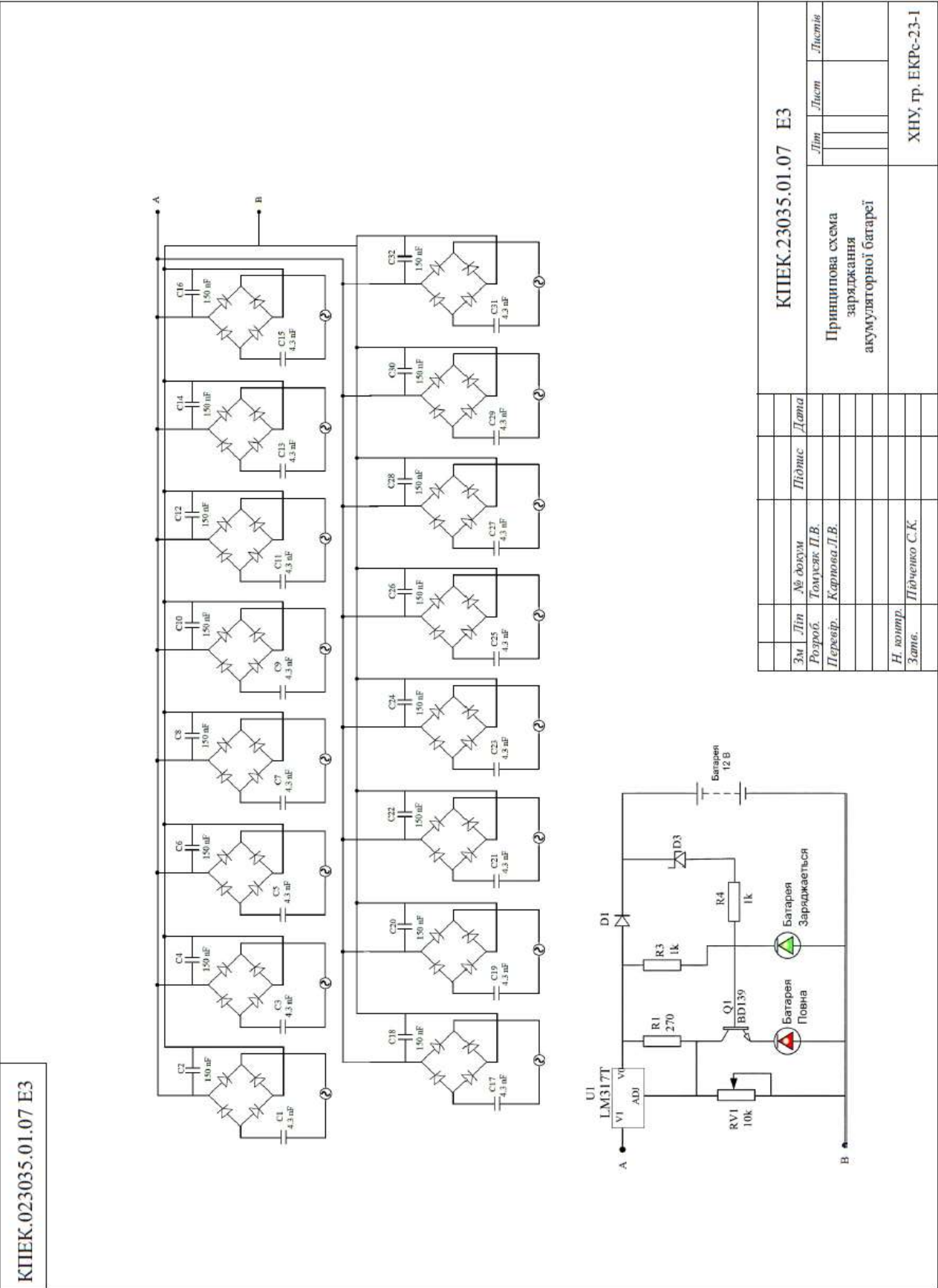
Додаток Б

Структурна схема автономної системи живлення та блок-схема роботи зарядного кола



Додаток В

Принципова схема заряджання акумуляторної батареї

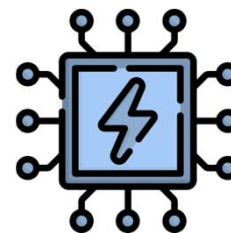




КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ

АВТОНОМНА СИСТЕМА ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

ХНУ, 2026



Виконав:
здобувач 3 курсу,
група ЕКРс-23-1
Павло ТОМУСЯК

Науковий керівник:
к.т.н., доцент
Леся КАРПОВА

АКТУАЛЬНІСТЬ

ПРОБЛЕМАТИКА

ЗАЛЕЖНІСТЬ ВІД ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ

ВІДСУТНІСТЬ РЕЗЕРВНОГО
ЖИВЛЕННЯ

НЕМОЖЛИВІСТЬ ЗВ'ЯЗКУ –
РОЗРЯДЖЕНІ ТЕЛЕФОНИ

ВІДСУТНІСТЬ ЛОКАЛЬНИХ
ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

- ✓ Світлофори забезпечують безпеку дорожнього руху
- ✓ Працюють у цілодобовому режимі
- ✓ Залежать від централізованого електропостачання
- ✓ При відключенні — втрачають функціональність
- ✓ **Наслідки:** затори, аварії, небезпека для пішоходів

МЕТА, ОБ'ЄКТ, ПРЕДМЕТ

МЕТА

Проектування автономної системи живлення на основі п'єзоелектричних перетворювачів

ОБ'ЄКТ

Автономна система живлення електронних пристроїв

ПРЕДМЕТ

Процес перетворення механічної енергії в електричну

СВІТЛОФОРНІ
ОБ'ЄКТИ

ПЕРЕХРЕСТЯ З
ІНТЕНСИВНИМ
РУХОМ

АВТОСТАНЦІЇ

ЗУПИНКИ
ТРАНСПОРТУ

ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ

3

СТРУКТУРНА СХЕМА СИСТЕМИ

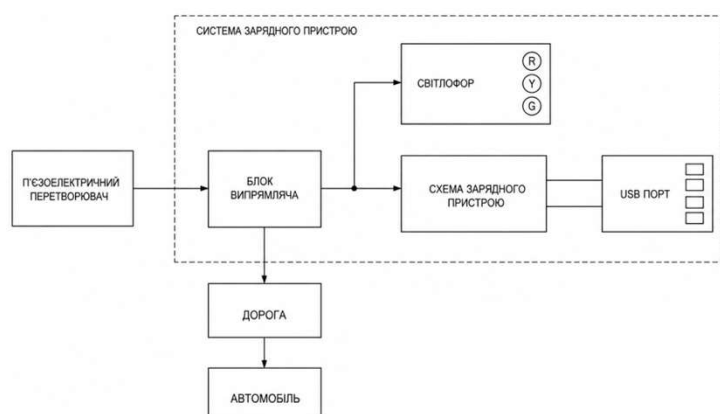


Рисунок 1. Структурна схема системи

ПРИНЦИП РОБОТИ СИСТЕМИ

- Використовується п'єзоелектричний ефект
- Механічний тиск → електрична напруга
- Генерується змінна напруга
- Далі: випрямлення та накопичення енергії

4

ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ТА ЗАРЯДНОГО КОЛА



Рисунок 2. Блок-схема роботи зарядного кола автономної системи живлення

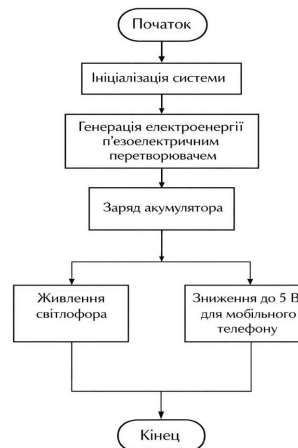


Рисунок 3. Блок-схема функціонування системи

5

Розрахунок енергоспоживання автономної системи

РОЗРАХУНОК ДОБОВОГО ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

$$W = U \cdot I \cdot t \cdot \eta, \quad (2)$$

Енергоспоживання світлофора

- напруга живлення $U = 12\text{В}$;
- струм споживання $I = 0,833\text{А}$;
- тривалість роботи $t = 24\text{год}$;
- коефіцієнт корисної дії $\eta = 0,85$.

Енергоспоживання телефону (USB-модуля)

- напруга заряджання $U = 5\text{В}$;
- струм заряджання $I = 1,5\text{А}$;
- тривалість заряджання $t = 8\text{год}$.

$$W_{\Sigma} = 204 + 60 = 264 \text{ Вт}\cdot\text{год}$$

$$W_{\text{св}} = 204 \text{ Вт}\cdot\text{год}$$

$$W_{\text{usb}} = 60 \text{ Вт}\cdot\text{год}$$

Визначення необхідної ємності акумулятора

$$C_{\text{акб}} = 22 \text{ А}\cdot\text{год}$$

$$C_{\text{акб}} = \frac{W_{\Sigma}}{U_{\text{ном}}}, \quad (3)$$

Визначення миттєвої потужності одного перетворювача

$$P = 3 \cdot 0,0015 = 0,0045 \text{ Вт}$$

$$P = U \cdot I, \quad (4)$$

Коефіцієнт пропорційності

$$K = 9 \cdot 10^{-5}$$

$$K = \frac{P}{W_t} = \frac{0,0045}{50} = 0,00009$$

W_t — прикладене навантаження (маса)

6

Таблиця 1. Залежність генерованої потужності від прикладеного навантаження

№ з/п	Потужність, Вт	Навантаження, кг
1	0,0009	10
2	0,0018	20
3	0,0036	40
4	0,0045	50
5	0,00675	75
6	0,00765	85
7	0,009	100

$$P = 0,0009 \cdot 1817 = 1,64 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{доб}} = 1,64 \cdot 1400 = 2296 \text{ Вт} \approx 2,3 \text{ кВт}$$

$$P_{\text{заг}} = 2296 \cdot 16 = 36736 \text{ Вт} \approx 36,7 \text{ кВт}$$

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ СИСТЕМИ

на основі експериментальних та експлуатаційних даних

Таблиця 2. Маса транспортних засобів за класами

№ з/п	Клас транспортного засобу	Маса, кг
1	Компактний легковий автомобіль	1354
2	Середній легковий автомобіль	1590
3	Великий легковий автомобіль	1985
4	Компактний вантажний автомобіль	1577
5	Середній вантажний автомобіль	1936
6	Великий вантажний автомобіль	2460
Середня маса транспортного засобу		1817

Таблиця 3. Інтенсивність руху транспортних засобів протягом доби

№ з/п	Часовий інтервал	Кількість транспортних засобів
1	05:00 – 09:59	500
2	10:00 – 14:59	200
3	15:00 – 19:59	500
4	20:00 – 04:49	200
Загальна кількість за добу		1400

7

ПРОЄКТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ

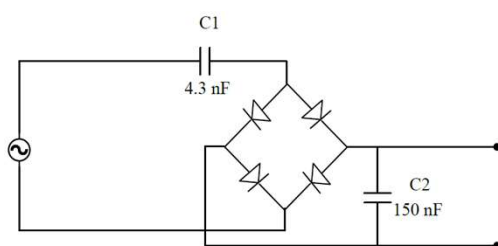


Рисунок 4. Еквівалентна схема п'єзоелектричного перетворювача

Згідно з технічним паспортом п'єзоелектричного перетворювача

- $K_{T33} = 1000$;
- $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$;
- $r = 0,0175 \text{ м}$;
- $t = 0,002 \text{ м}$;
- площа $A = 9,621 \times 10^{-4} \text{ м}^2$.

ВИЗНАЧЕННЯ ЄМНОСТІ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ЕЛЕМЕНТА

де C – ємність п'єзоелектричного елемента, Ф;
 K_{T33} – відносна діелектрична проникність матеріалу;
 ϵ_0 – електрична стала, Ф/м;
 r – радіус п'єзоелектричного диска, м;
 t – товщина елемента, м.

$$C = \frac{K_{T33} \cdot \epsilon_0 \cdot \pi r^2}{t}, \quad (1)$$

$$C = \frac{1000 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 9,621 \cdot 10^{-4}}{0,002}$$

$$C \approx 4,3 \text{ нФ}$$

8

Схема з'єднання п'єзоелектричних перетворювачів

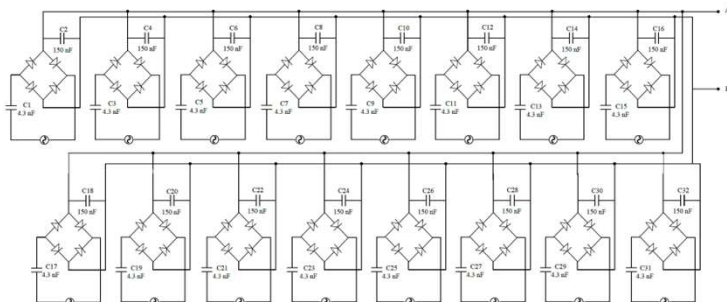


Рисунок 5. Схема з'єднання п'єзоелектричних перетворювачів

Використано **16 п'єзоелектричних перетворювачів**

Тип з'єднання: **паралельне**

- достатній рівень напруги одного елемента
- збільшення сумарного струму

Передача енергії:
до кола заряджання акумулятора

Вихідні дані:

- Середня маса ТЗ: **1817 кг**
- Кількість авто/добу: **1400**
- Кількість перетворювачів: **16**

$$P = 0,0009 \cdot 1817 = 1,64 \text{ Вт}$$

$$P_{\text{доб}} = 1,64 \cdot 1400 = 2296 \text{ Вт} \approx 2,3 \text{ кВт}$$

$$P_{\text{заг}} = 2296 \cdot 16 = 36736 \text{ Вт} \approx 36,7 \text{ кВт}$$

9

КОЛО ЗАРЯДЖАННЯ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ

Вхід

- змінна напруга від п'єзоелементів

Етапи обробки енергії:

- мостовий випрямляч
- фільтрація (згладжування пульсацій)
- стабілізація (**LM317T**)

Захист та керування:

- діод **D1** → захист від розряду АКБ
- стабілітрон + транзистор **BD139** → контроль повного заряду

Індикація:

- **зелений LED** → заряджання
- **червоний LED** → повний заряд
- **LCD** → рівень заряду

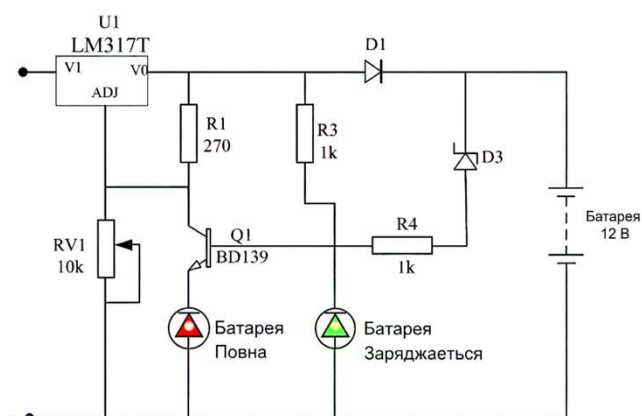


Рисунок 6. Схема заряджання акумуляторної батареї

10

Моделювання роботи системи та аналіз результатів

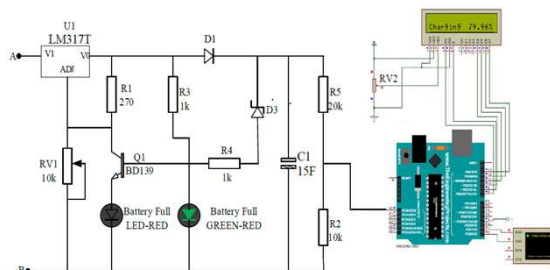


Рисунок 6. Режим заряджання акумулятора

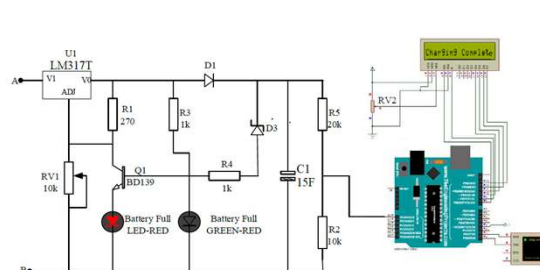
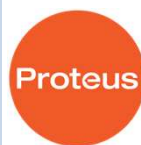


Рисунок 7. Повністю заряджений акумулятор

- підтверджено роботу випрямляча та стабілізатора
- реалізовано контроль заряду через мікроконтролер
- працює схема індикації стану батареї
- система відповідає розрахунковим параметрам



11

ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ

Таблиця 1. Вартість елементної бази автономної системи живлення (ринок України)

№ з/п	Найменування компонента	Кількість	Ціна за одиницю, грн	Загальна вартість, грн
1	П'єзоелектричний перетворювач	16	40	640
2	Мікроконтролерна плата Arduino Uno	1	800	800
3	Пасивні компоненти (резистори, конденсатори, діоди, стабілітрон, транзистор)	1 комплект	270	270
4	Свинцево-кислотна акумуляторна батарея 12 В, 26 А·год	1	1000	1000
5	USB-роз'єм	1	5	5
6	Друківана плата (PCB)	1	220	220
Загальна вартість				2935 грн

- низька собівартість порівняно з аналогами
- використання доступної елементної бази
- можливість ремонту та масштабування
- економічна доцільність впровадження

12

Конференція

Метафора 3rd International scientific and practical conference „Information Systems and Technology Results and Perspectives” (IST 2026, March 31, 2026, at 07:00 AM, 2026)

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНА П'ЕЗОЕЛЕКТРИЧНА СИСТЕМА АВТОНОМНОГО ЖИВЛЕННЯ СВІТЛОФОРНИХ ОБ'ЄКТІВ

Павло Толмусь, Юлія Бойко, Лєся Карпова

Анотація. Розроблено автономну систему живлення світлофорних об'єктів на основі п'єзоелектричних генераторів, що генерують енергію за рахунок механічної енергії транспортних засобів. Система включає механічний генератор, електричний накопичувач та контролер. Система забезпечує автономну роботу світлофорних об'єктів протягом 24 годин на день.

I. ВСТУП

Забезпечення безперервної роботи світлофорних об'єктів є важливою задачею для транспортної інфраструктури. Традиційно світлофори живляться за рахунок мережі електроенергії, що вимагає складної логістики та високих витрат. Розробка автономної системи живлення світлофорних об'єктів є актуальною задачею, яка дозволяє знизити витрати на експлуатацію та підвищити надійність роботи.

У статті розглянуто розробку автономної системи живлення світлофорних об'єктів на основі п'єзоелектричних генераторів. Система включає механічний генератор, електричний накопичувач та контролер. Система забезпечує автономну роботу світлофорних об'єктів протягом 24 годин на день.

Перевагою розробленої системи є можливість роботи в умовах відсутності мережі електроенергії. Система включає механічний генератор, електричний накопичувач та контролер. Система забезпечує автономну роботу світлофорних об'єктів протягом 24 годин на день.

II. ДАНІ ТА МЕТОДИ

У статті розглянуто розробку автономної системи живлення світлофорних об'єктів на основі п'єзоелектричних генераторів. Система включає механічний генератор, електричний накопичувач та контролер. Система забезпечує автономну роботу світлофорних об'єктів протягом 24 годин на день.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ТА АНАЛІЗ

Результатами дослідження є розробка автономної системи живлення світлофорних об'єктів на основі п'єзоелектричних генераторів. Система включає механічний генератор, електричний накопичувач та контролер. Система забезпечує автономну роботу світлофорних об'єктів протягом 24 годин на день.

IV. ОБГОВОРЕННЯ ТА ВИСНОВКИ

Розроблено автономну систему живлення світлофорних об'єктів на основі п'єзоелектричних генераторів. Система включає механічний генератор, електричний накопичувач та контролер. Система забезпечує автономну роботу світлофорних об'єктів протягом 24 годин на день.

Proceedings 3rd International scientific and practical conference „Information Systems and Technology Results and Perspectives” (IST 2026, March 31, 2026, at 07:00 AM, 2026)

Анотація. Розроблено автономну систему живлення світлофорних об'єктів на основі п'єзоелектричних генераторів, що генерують енергію за рахунок механічної енергії транспортних засобів. Система включає механічний генератор, електричний накопичувач та контролер. Система забезпечує автономну роботу світлофорних об'єктів протягом 24 годин на день.

Висновки: розроблено автономну систему живлення світлофорних об'єктів на основі п'єзоелектричних генераторів. Система включає механічний генератор, електричний накопичувач та контролер. Система забезпечує автономну роботу світлофорних об'єктів протягом 24 годин на день.

Ключові слова: автономна система живлення, п'єзоелектричний генератор, електричний накопичувач, контролер.

1. Бойко, Ю., Карпова, Л., Толмусь, П. (2024). Інтеллектуальная пьезоэлектрическая система сбора энергии для автономного функционирования светофорных объектов. *Вестник Харьковского национального университета имени Укр. Повстан. Армии*, 12(3), 48-56.

2. Карпова, Л., Толмусь, П., Бойко, Ю. (2023). Інтеллектуальна DC-DC перетворювач для автономної роботи світлофорних об'єктів. *Інформаційні системи та технології: результати науково-практичної конференції* (5 березня 2023 р.), 1(1), 1-5.

3. Мен, К., & Лі, Х. (2025). Using piezoelectric technology to harvest energy from road traffic. *Australian Journal of Engineering and Technology*, 12(3), 48-56.

4. Ні, О., & Віноку, І. (2024). Роботизована система живлення світлофорних об'єктів на основі п'єзоелектричних генераторів. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(23), 40239.

5. Ні, О., & Віноку, І. (2025). Advances in piezoelectric systems for self-powered systems. *Piezoelectrics*, 25(1), 40239.

6. Толмусь, П., Бойко, Ю., Карпова, Л. (2024). Інтеллектуальная пьезоэлектрическая система сбора энергии для автономного функционирования светофорных объектов. *Вестник Харьковского национального университета имени Укр. Повстан. Армии*, 12(3), 48-56.

7. Толмусь, П., Бойко, Ю., Карпова, Л. (2023). Інтеллектуальна DC-DC перетворювач для автономної роботи світлофорних об'єктів. *Інформаційні системи та технології: результати науково-практичної конференції* (5 березня 2023 р.), 1(1), 1-5.

8. Мен, К., & Лі, Х. (2025). Using piezoelectric technology to harvest energy from road traffic. *Australian Journal of Engineering and Technology*, 12(3), 48-56.

9. Ні, О., & Віноку, І. (2024). Роботизована система живлення світлофорних об'єктів на основі п'єзоелектричних генераторів. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(23), 40239.

10. Ні, О., & Віноку, І. (2025). Advances in piezoelectric systems for self-powered systems. *Piezoelectrics*, 25(1), 40239.

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



3-я Міжнародна науково-практична конференція

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

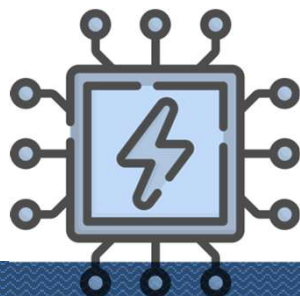


10 березня 2026 р.

ВИСНОВКИ

- Досліджено автономну систему живлення на основі п'єзоелектричних перетворювачів транспортного потоку
- Виконано розрахунок енергоспоживання, генерації та обґрунтовано вибір акумуляторної батареї
- Спроектвано електричну схему системи та підтверджено її працездатність у середовищі Proteus
- Показано економічну доцільність і можливість практичного застосування розробки





ДЯКУЮ ЗА УВАГУ

ВІДГУК

на кваліфікаційний проект

студента групи ЕКРс-23-1 Павла ТОМУСЯКА

«Автономна система живлення електронних пристроїв»

Кваліфікаційний проект присвячений актуальній інженерно-технічній проблемі – створенню автономної системи живлення електронних пристроїв на основі п'єзоелектричного перетворення механічної енергії транспортного потоку. У роботі обґрунтовано доцільність використання технологій збору механічної енергії для забезпечення енергетичної автономності світлофорних об'єктів у транспортній інфраструктурі.

У процесі виконання кваліфікаційного проекту студент продемонстрував високий рівень володіння теоретичним матеріалом, здатність до аналітичного мислення, уміння самостійно обґрунтовувати технічні рішення, а також навички роботи з сучасними програмними засобами моделювання. Важливою перевагою є комплексний підхід до створення системи, який охоплює аналітичний огляд сучасних автономних джерел енергії, розробку електричної моделі п'єзоелектричного перетворювача, розрахунок енергетичного балансу та вибір акумуляторної батареї.

Особливу увагу приділено апаратній реалізації системи: розроблено принципову електричну схему, що включає генераторний вузол, випрямляч, фільтрувальний каскад, стабілізатор напруги та мікроконтролерний блок контролю зарядного процесу. Проведене моделювання у середовищі Proteus підтвердило коректність функціонування схеми та ефективність запропонованих рішень. Виконана економічна оцінка засвідчила доцільність впровадження розробленої системи у практичних умовах.

Оформлення пояснювальної записки відповідає вимогам до кваліфікаційних робіт. Структура проекту є логічною, виклад матеріалу – послідовний, з належним рівнем технічної грамотності. Отримані результати мають як наукову новизну, так і прикладне значення.

Кваліфікаційний проект виконано на високому технічному рівні, має безперечну актуальність у сфері сучасних автономних систем живлення, а студент Павло ТОМУСЯК заслуговує оцінки «відмінно».

Керівник:
к. техн. наук, доцент



Леся КАРПОВА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ

Дипломник: ТОМУСЯК Павло Вікторович

Тема роботи: Автономна система живлення електронних пристроїв

Спеціальність 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційного проекту

Кількість листів креслень 4 Кількість сторінок записки 66

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Кваліфікаційний проєкт присвячений розробці автономної системи живлення електронних пристроїв на основі п'єзоелектричного перетворення механічної енергії транспортного потоку. У роботі виконано аналітичний огляд сучасних автономних джерел енергії, розглянуто фізичні та математичні основи процесу перетворення механічної енергії в електричну, сформовано електричну модель п'єзоелектричного перетворювача та встановлено залежності між параметрами навантаження і генерованою потужністю. Розроблено принципову електричну схему системи, проведено моделювання її роботи та виконано економічну оцінку доцільності впровадження.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Каліфікаційний проєкт відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки та техніки і передових методів роботи: Робота виконана з використанням сучасних наукових підходів та інженерних методів. У теоретичному розділі наведено аналіз автономних джерел енергії та обґрунтовано переваги п'єзоелектричних матеріалів. У конструкторському розділі розроблено електричну модель перетворювача, принципову схему системи та здійснено вибір акумуляторної батареї. У дослідницькій частині проведено моделювання роботи системи в середовищі Proteus, що підтвердило коректність функціонування схеми.

4. Позитивні сторони роботи: Робота присвячена актуальній темі створення автономних систем живлення, що має практичну значущість для транспортної інфраструктури та інших сфер. Відзначається комплексний підхід до аналізу, проектування та моделювання системи, обґрунтований вибір елементної бази, застосування сучасних програмних засобів та виконання економічної оцінки.

5. Негативні сторони роботи: Робота виконана на високому рівні, однак потребує уточнення окремих технічних параметрів п'єзоелектричних елементів та більш детального обґрунтування довготривалої надійності системи. У пояснювальній записці трапляються незначні стилістичні та форматувальні недоліки

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: графічне оформлення та пояснювальна записка відповідають вимогам до кваліфікаційних проектів

7. Відгук про роботу в цілому: У цілому кваліфікаційний проект виконаний якісно, демонструє вміння студента працювати з сучасними технічними рішеннями, застосовувати інженерні методи аналізу та проєктування. Робота має практичну значущість, відповідає поставленій меті та заслуговує позитивної оцінки..

8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка дипломної роботи: Кваліфікаційний проєкт відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки «відмінно», а її автору Павлу ТОМУСЮКУ, присвоєння кваліфікації бакалавра зі спеціальності «Електронні комунікації та радіотехніка»

10. Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, місце роботи) Єрмоєнко Олександр Іванович – к.т.н., доцент кафедри фізики, математики та інформатики

« 05 » червня 2026р.


підпис

Завідувачу кафедри телекомунікацій,
медійних та інтелектуальних технологій
д.т.н., професору ПІДЧЕНКУ Сергію
здобувача вищої освіти
Павла ТОМУСЯКА
ФІТ, гр. ЕКРс-23-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений (а). Надаю університету право на передачу мого кваліфікаційного проєкту для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом мого кваліфікаційного проєкта «Автономна система живлення електронних пристроїв» в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія мого кваліфікаційного проєкту збігається (ідентична) з друкованою.

28 травня 2026 р.
дата


підпис

Anti-Plagiarism (<http://ap.km.ua>) v-16.718**Максимальне співпадіння з одним документом 2.0%****Словники перевірки: UA, US, RU. Помилки в документах: 9%**

ID: 273201 Назва: Автономна система живлення електронних пристроїв Додано в БД: 2026-06-02 Автора: Томусак Павло Вікторович Керівник: Карпова Леся Вікторівна Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	78391	650	2455 (3%)	41 (6%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Павло ТОМУСЯК_ЕКРС-23-1

Співавтор:

Назва: Автономна система живлення електронних пристроїв

Науковий керівник: Леся КАРПОВА, к.т.н., доц.

Підрозділ: Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

Коефіцієнт подібності 1: 4.24%

Коефіцієнт подібності 2: 1.19%

Мікропробіли: 0

Заміна букв: 21

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-06-03 07:58:07.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування: Виявлені запозичення не підлягають трактуванню як плагіат, адже вони належать до термінологічних конструкцій та загальнонаукових стандартних формулювань, що є загальноприйнятими у науково-технічній літературі

Дата 03.06.2026 р.



експерт Олег ПИВОВАР

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

КАФЕДРИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ, МЕДІЙНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОГО ПРОЕКТУ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційного проекту: Автономна система живлення електронних пристроїв

Автор: Павло ТОМУСЯК

Освітня програма Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень

Спеціальність: 172 Електронні комунікації та радіотехніка

Керівник кваліфікаційного проекту: к.т.н., доцент Леся КАРПОВА

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	+
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	-
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	-
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	-
2	Інші види порушень академічної доброчесності	-

Підтвердження:

Виявленні запозичення не є плагіатом так як розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження (є власні терміни, визначення тощо), коефіцієнти подібності складають 4,2% та 1,1%, а також мають посилання на приведений список літературних джерел.

«03» червня 2026 р.

Завідувач кафедри ТМІТ

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційного проекту

Сергій ПІДЧЕНКО

Олег ПИВОВАР

Леся КАРПОВА