

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

КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ

Бакалавр
Освітній рівень

Система живлення телекомунікаційного обладнання
Назва теми

КПТР.210120.01.03 ПЗ

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»
Шифр і назва

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
Шифр і назва

Освітня програма «Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі»
Назва

Виконав:
здобувач 4 курсу, група ТР2-21-1


підпис

Ілля ГАБРУСЬКИЙ
Ініціали, прізвище


Керівник: к. техн. наук, доцент


підпис

Віктор МІШАН
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

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


підпис

Сергій ПІДЧЕНКО
Ініціали, прізвище

«9» червня 2025р.

Хмельницький, 2025

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 Телекомунікації та радіотехніка</u>
Освітня програма:	<u>Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедру ТМІТ

Сергій ПІДЧЕНКО

«10» 02 2025 р.





**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ**

ГАБРУСЬКИЙ Ілля Романович

Прізвище, ім'я по батькові здобувача

- 1 Тема роботи: Система живлення телекомунікаційного обладнання
Керівник роботи: МІЩАН Віктор Володимирович, к. техн. наук, доцент
Затверджено наказом по університету від «07» лютого 2025р. № 20
- 2 Строк подання здобувачем роботи на кафедру 02 червня 2025 року
- 3 Вихідні дані до роботи: _____
- 4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
Аналіз існуючих систем живлення телекомунікаційного обладнання. Огляд та аналіз технологій енергозбирання у системах живлення. Теоретичне обґрунтування та проектування системи живлення. Моделювання та аналіз результатів роботи системи живлення
- 5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень):
 1. Структурна схема гібридної системи енергозбирання для телекомунікаційного обладнання.
 2. Функціональна блок-схема РЧ-сонячної системи.
 3. Принципова електрична схема модуля РЧ-енергозбирання з DC-DC перетворенням та стабілізацією напруги.
 4. Графіки динаміки та ефективності гібридної системи енергозбирання

6 Консультанти розділів кваліфікаційного проекту

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

7 Дата видачі завдання « 10 » 02 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


№ п/п	Найменування виду роботи	Форма звітності, термін виконання	Відмітка наукового керівника
1.	Розробка завдання на кваліфікаційний проект	01.02.2025р.	виконано
2.	Складання індивідуального плану на кваліфікаційний проект	15.02.2025р.	виконано
3.	Написання першого (теоретичного) розділу	10.03.2025р.	виконано
4.	Написання другого розділу	26.03.2025р.	виконано
5.	Написання третього розділу	15.04.2025р.	виконано
6.	Написання четвертого розділу	30.04.2025р.	виконано
7.	Написання вступу і загальних висновків та пропозицій до кваліфікаційного проекту	10.05.2025р.	виконано
8.	Оформлення кваліфікаційного проекту	15.05.2025р.	виконано
9.	Рецензування кваліфікаційного проекту	20.05.2025р.	виконано
10.	Презентаційні матеріали за результатами виконання кваліфікаційного проекту	28.05.2025р.	виконано

Здобувач


(підпис, дата)

Ілля ГАБРУСЬКИЙ

Науковий керівник


(підпис, дата)

Віктор МІШАН

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційного проекту: «Система живлення телекомунікаційного обладнання»

Автор проекту: ГАБРУСЬКИЙ Ілля Романович

Керівник проекту: МПШАН Віктор Володимирович, к. техн. наук, доцент.

Пояснювальна записка: 68 сторінок, 14 рисунків, 3 таблиці, 40 джерел.

Графічна частина: технічні креслення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: БПЛА, СОНЯЧНІ ЕЛЕМЕНТИ, ЗБІР ЕНЕРГІЇ З РАДІОЧАСТОТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ, ГІБРИДНЕ ЗБИРАННЯ ЕНЕРГІЇ, АКУМУЛЯТОРНІ БАТАРЕЇ

Об'єктом дослідження є система живлення телекомунікаційного обладнання на базі відновлюваних джерел енергії.

Мета кваліфікаційного проекту полягає в удосконаленні гібридної системи живлення телекомунікаційного обладнання на базі відновлюваних джерел енергії.

Кваліфікаційний проект присвячений аналізу, проектуванню та дослідженню гібридної системи енергозбирання, що включає семиступеневий множник напруги для РЧ-енергії, сонячну панель та DC-DC перетворювач із стабілізацією напруги. Запропонована система орієнтована на застосування в телекомунікаційних системах на базі БПЛА з метою продовження часу автономної роботи за рахунок ефективного збору та перетворення енергії з навколишнього середовища.

«05» 06 2025 р.



Поз.	Формат	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
			<u>Документація загальна</u>		
1	A4	КПТР.210120.01.03 ПЗ	Пояснювальна записка	1	68 арк.
			<u>Документація графічна</u>		
2	A3	КПТР.210120.01.03 Е1	Система живлення телекомунікаційного обладнання		
			Структурна схема гібридної системи енергозбирання	1	
3	A3	КПТР.210120.01.03 Е3	Система живлення телекомунікаційного обладнання		
			Функціональна блок-схема РЧ-сонячної системи енергоживлення для БПЛА	1	
4	A3	КПТР.210120.01.03 Е3	Система живлення телекомунікаційного обладнання		
			Принципова електрична схема модуля РЧ-енергозбирання з DC-DC перетворенням та стабілізацією напруги	1	
5	A3	КПТР.210120.01.03 Е3	Система живлення телекомунікаційного обладнання	1	
			КПТР.210120.01.03 ВП		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	
Розроб.		Габруський І.Р.		16.06.	
Перевір.		Мішан В.В.		7.06.25	
Н. контр.		Стецюк В.І.		9.06	
Затв.		Підченко С.К.			
			Система живлення телекомунікаційного обладнання	Лит.	Аркуш
			Відомість проекту		Аркушів
					1 1
				ХНУ, гр. ТР2-21-1	

ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ	8
1.1 Класифікація систем живлення	8
1.2 Вимоги до джерел живлення телекомунікаційних пристроїв	10
1.3 Огляд сучасних рішень автономного живлення	13
1.4 Проблематика живлення телекомунікаційного обладнання	15
1.5 Висновок до першого розділу	19
2 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ЕНЕРГОЗБИРАННЯ У СИСТЕМАХ ЖИВЛЕННЯ	21
2.1 Огляд сучасних досліджень	21
2.2 Переваги та недоліки традиційних та сучасних методів енергозбирання	22
2.2.1 Збір енергії з радіочастотних джерел	24
2.2.2 Збір сонячної енергії	27
2.3 Перспективи використання гібридних систем енергозбирання	30
2.4 Обґрунтування вибору гібридного підходу для системи живлення	34
2.5 Висновок до другого розділу	36
3 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ	38
3.1 Збір енергії з радіочастотного випромінювання	38
3.2 Збір сонячної енергії	42
3.3 Підвищувальний перетворювач і стабілізатор	44
3.4 Проєктування гібридної системи збору енергії	48

КПТР.2021012.01.03				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
		Габруський І.Р.		
		Мішан В.В.		2023
		Реценз.		
		Н. Контр.	Стельцук В.І.	
		Утверд	Підвишко С.К.	
Система живлення телекомунікаційного обладнання				
Пояснювальна записка				
		Лит.	Арк.	Акрюків
		2	70	
ХНУ, гр. ТР2-21-1				

3.4.1 Архітектура гібридної системи.....	46
3.5 Вибір електронних компонентів та структурна схема	47
3.6 Висновок до третього розділу	48
4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ СИСТЕМИ	
ЖИВЛЕННЯ	50
4.1 Моделювання використання сонячної енергії	50
4.2 Моделювання процесу збору енергії з радіочастотного випромінювання	52
4.3 Результати моделювання гібридної системи.....	55
4.4 Порівняльний аналіз ефективності.....	58
4.5 Висновок до четвертого розділу	63
ВИСНОВКИ.....	65
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	67

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БПЛА	–	безпілотний літальний апарат
DC	–	постійний струм
DC-DC	–	перетворювач постійної напруги
IoT	–	Інтернет речей
RF	–	радіочастотний
RF EH	–	збір радіочастотної енергії
PV	–	фотогальванічний
SOC	–	рівень заряду акумулятора
LED	–	світлодіод
MPPT	–	максимальна точка потужності
SoC	–	система на кристалі
Li-ion	–	літій-іонний акумулятор
ШИМ	–	широтно-імпульсна модуляція

					КІТР.210120.01.03	Арк.
						4
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

Сучасний розвиток телекомунікаційних систем вимагає постійного вдосконалення засобів енергозабезпечення, особливо в умовах автономної та мобільної експлуатації. Усе більшу актуальність набувають рішення, які дозволяють забезпечити стабільну та безперебійну роботу телекомунікаційного обладнання у віддалених районах, де відсутня розвинена інфраструктура, або під час надзвичайних ситуацій, коли традиційні джерела енергії стають недоступними. Особливої уваги заслуговують системи, інтегровані у безпілотні літальні апарати, які вже сьогодні відіграють ключову роль у забезпеченні зв'язку, збиранні даних, а також у виконанні ряду важливих завдань у цивільних, промислових, екологічних, військових і пошуково-рятувальних операціях.

Безпілотні літальні апарати часто використовуються як мобільні платформи для створення тимчасових телекомунікаційних вузлів, особливо у випадках надзвичайних подій, природних катастроф, або в зонах військового конфлікту. У таких умовах забезпечення тривалої автономної роботи є критичним чинником. Основним обмеженням є обмежена ємність джерел живлення та невеликий час безперервної експлуатації апарата без підзарядки. Акумуляторні батареї, які використовуються в таких пристроях, хоч і мають достатню щільність енергії, однак мають обмежений цикл перезарядки, вимагають значного часу для відновлення заряду та чутливі до температурних коливань, що знижує надійність і ефективність їх застосування.

У зв'язку з цим актуальною є розробка новітніх енергоефективних рішень, зокрема – впровадження технологій автономного енергоживлення на основі відновлюваних джерел. Особливу зацікавленість викликають гібридні системи збору енергії, які здатні комбінувати різні механізми енергозабезпечення, забезпечуючи більш гнучке, стійке та довготривале функціонування обладнання. Серед таких технологій варто відзначити сонячну енергетику, що дозволяє

					КПТР.210120.01.03	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

безпосередньо акумулювати енергію сонячного випромінювання, а також перетворення радіочастотної енергії, що дозволяє вловлювати випромінювання з навколишнього середовища та перетворювати його на електричну енергію.

У даному кваліфікаційному проєкті запропоновано архітектуру гібридної енергосистеми, призначеної для забезпечення живлення телекомунікаційного обладнання, встановленого на мобільних автономних платформах. Запропонована система включає РЧ-модуль збору енергії з семиступеневим каскадним множником напруги, стандартну сонячну панель для денного збору енергії, DC-DC підвищувальний перетворювач для стабілізації вихідної напруги, а також систему накопичення енергії у вигляді літій-іонного акумулятора. Основною перевагою такого підходу є можливість безперервного функціонування системи за рахунок комбінованого збору енергії з декількох джерел.

У межах проєкту здійснено розробку електричної схеми системи, виконано моделювання її роботи у середовищі PSpice, а також проведено аналіз електричних характеристик при різних вхідних умовах. Особлива увага приділялася впливу інтенсивності радіочастотного сигналу, освітленості та конфігурації окремих блоків на загальну ефективність системи. За результатами моделювання було визначено оптимальні параметри для кожного з елементів системи, а також запропоновано технічні рішення для підвищення стабільності роботи в умовах змінного енергетичного середовища.

Кінцевою метою проєкту є створення прототипу гібридної енергосистеми, придатної для впровадження у реальні телекомунікаційні додатки. Результати дослідження можуть бути використані для подальшої розробки автономних систем зв'язку, а також знайти застосування в галузях інтернету речей (IoT), розумного моніторингу навколишнього середовища, охорони здоров'я, оборони та логістики.

					КПТР.210120.01.03	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, запропонована система живлення є важливим кроком на шляху до створення більш стійких, автономних та енергоефективних рішень у сфері телекомунікацій. Вона дозволяє підвищити гнучкість та функціональність телекомунікаційної інфраструктури майбутнього, зменшуючи залежність від традиційних джерел живлення і розширюючи можливості її використання у складних експлуатаційних умовах.

					КПТР.210120.01.03	Арк.
						7
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

1.1 Класифікація систем живлення

Системи живлення телекомунікаційного обладнання відіграють ключову роль у забезпеченні надійної та безперервної роботи пристроїв, які передають, приймають або обробляють інформацію. Їх можна класифікувати за кількома основними критеріями, серед яких найважливішими є: тип джерела енергії, режим роботи, мобільність, рівень автономності, а також призначення системи.

Залежно від типу джерела енергії, системи живлення поділяються на мережеві, акумуляторні, гібридні та такі, що використовують альтернативні джерела енергії. Мережеві системи живлення є найпоширенішими у стаціонарних телекомунікаційних об'єктах, таких як базові станції стільникового зв'язку або центри обробки даних. Вони підключаються до електромережі змінного струму з типовими параметрами 220 В/50 Гц (в Україні та Європі) або 110 В/60 Гц (у США). Такі системи зазвичай поєднуються з блоками безперебійного живлення, які забезпечують короткочасну підтримку живлення у разі перебоїв у мережі.

Акумуляторні системи базуються на використанні батарей накопичення енергії. Найчастіше застосовуються свинцево-кислотні, літій-іонні та нікель-металгідридні акумулятори. Вони забезпечують резервне живлення телекомунікаційних пристроїв у разі зникнення основного джерела енергії, а також використовуються у повністю автономних системах, наприклад, у віддалених регіонах, де відсутня інфраструктура електропостачання.

Гібридні системи поєднують можливості кількох джерел живлення. Типовим прикладом є конфігурація, де основне живлення подається з мережі, а у разі аварійного відключення активуються акумулятори або альтернативні джерела. До останніх належать сонячні батареї, вітрові турбіни, а також більш

					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

сучасні джерела, такі як системи збору радіочастотної енергії (RF energy harvesting) або термоелектричні генератори. Такий підхід дозволяє підвищити енергоефективність системи та забезпечити безперебійну роботу навіть у складних умовах.

За режимом роботи системи можуть функціонувати або в постійному, або в резервному режимі. Постійне живлення означає безперервну подачу енергії до навантаження, що необхідно для критичних телекомунікаційних систем, таких як магістральні маршрутизатори, базові станції та сервери. У резервному режимі джерело живлення активується лише у разі збоїв в основному джерелі. Такі рішення часто застосовуються у поєднанні з системами моніторингу та автоматичного перемикавання.

Ще одним важливим критерієм класифікації є мобільність системи живлення. Стаціонарні системи встановлюються у фіксованих локаціях і не призначені для переміщення. Їхня конструкція передбачає використання потужних трансформаторів, інверторів, пристроїв захисту та вентиляційних систем. У той же час, мобільні системи живлення розробляються для використання у портативних або транспортних засобах – зокрема, в мобільних комунікаційних станціях, безпілотних літальних апаратах (БПЛА), мобільних терміналах тощо. Такі системи мають обмежену вагу, компактні розміри, високу енергощільність та ефективність при мінімальних втратах енергії.

Крім вищезазначених ознак, системи живлення також класифікують за рівнем автономності – від повністю залежних від зовнішньої мережі до повністю автономних, які працюють лише за рахунок накопиченої або альтернативної енергії. Також враховують призначення системи: для критичних об'єктів (що потребують надвисокої надійності), резервних систем, тимчасових польових систем, розподілених телекомунікаційних вузлів тощо.

Таким чином, класифікація систем живлення телекомунікаційного обладнання охоплює широкий спектр технічних рішень і підходів, кожен з яких

					КПТР.210120.01.03	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

телекомунікаційних систем. На рисунку 1.2 наведено основні вимоги до джерел живлення телекомунікаційних пристроїв.



Рисунок 1.2 – Основні вимоги до джерел живлення телекомунікаційних пристроїв

1. Стабільність вихідної напруги і струму. Однією з ключових вимог є забезпечення стабільного і безперервного живлення з чітко підтримуваними параметрами напруги та струму. Будь-які коливання або стрибки можуть спричинити некоректну роботу чутливих електронних компонентів, збої у передачі сигналу, а іноді й повне відключення системи. Особливо це актуально для телестанцій, комунікаційних вузлів, базових станцій мобільного зв'язку, де стабільність електроживлення безпосередньо впливає на якість надання послуг.

2. Висока енергетична щільність. У мобільних пристроях, портативній апаратурі, а також безпілотних літальних апаратах (БПЛА) часто обмежені габарити та вага джерел живлення. Тому надзвичайно важливо, щоб вони мали максимальну енергетичну щільність – здатність зберігати та віддавати велику кількість енергії при мінімальних розмірах і вазі. Це дозволяє збільшити час

автономної роботи без необхідності частих підзарядок або заміни акумуляторів, що особливо важливо у польотних і мобільних застосунках.

3. Автономність. Джерело живлення має забезпечувати тривалий час роботи без необхідності підключення до зовнішнього джерела енергії. Автономність – це ключова характеристика для віддалених, автономних телекомунікаційних вузлів, аварійних станцій, а також для обладнання, яке функціонує у складних чи важкодоступних умовах, наприклад, у сільській місцевості або на морських платформах. Важливо, щоб система могла працювати надійно впродовж визначеного періоду, знижуючи потребу в обслуговуванні.

4. Енергоефективність. Максимальне використання отриманої енергії – це один з найважливіших факторів у конструкції сучасних джерел живлення. Мінімальні втрати при перетворенні, передачі та зберіганні енергії дозволяють підвищити загальну ефективність системи, зменшити тепловиділення та продовжити термін служби компонентів. Енергоефективність також сприяє зниженню експлуатаційних витрат і зменшує вплив на навколишнє середовище.

5. Безпека. Джерела живлення повинні відповідати високим стандартам безпеки. Це включає використання нетоксичних та екологічно чистих матеріалів, мінімізацію тепловиділення, а також наявність надійних систем захисту від коротких замикань, перегріву, перевантажень та інших аварійних станів. Забезпечення безпеки особливо важливе для запобігання пожежам, вибухам і пошкодженню обладнання, а також для захисту персоналу, що обслуговує телекомунікаційні системи.

6. Універсальність і сумісність. Джерела живлення повинні бути універсальними та сумісними з різними типами обладнання, а також з різними системами енергозабезпечення. Це забезпечує можливість легкої інтеграції в існуючі мережі, використання з різними видами акумуляторів, сонячними панелями, генераторами, а також з системами РЧ-енергозбирання. Така гнучкість дозволяє масштабувати і адаптувати живлення під специфічні умови та потреби телекомунікаційних проектів.

					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

7. Стійкість до екстремальних умов експлуатації

Телерадіоапаратура часто працює у складних зовнішніх умовах — це може бути широкий діапазон температур (від сильного морозу до спеки), підвищена вологість, пил, механічні вібрації, удари та інші несприятливі фактори. Тому джерела живлення повинні бути розроблені з урахуванням захисту від таких впливів, забезпечуючи стабільну роботу навіть у екстремальних середовищах. Важливою є також захищеність від корозії та інших деградаційних процесів, що продовжує термін служби пристроїв.

8. Можливість дистанційного моніторингу та управління. Сучасні джерела живлення часто оснащуються системами контролю, що дозволяють віддалено відстежувати параметри роботи (напругу, струм, температуру, стан заряду) та оперативно реагувати на зміни або збої. Це підвищує надійність систем, дозволяє оптимізувати технічне обслуговування і зменшує час простою обладнання.

9. Модульність і масштабованість. Важливо, щоб джерело живлення можна було легко модернізувати або масштабувати відповідно до зростання вимог до енергоспоживання телекомунікаційного обладнання. Модульний дизайн дозволяє додавати або замінювати елементи без повної заміни системи, що знижує витрати і підвищує гнучкість експлуатації.

1.3 Огляд сучасних рішень автономного живлення

Сучасні рішення автономного живлення телекомунікаційних пристроїв охоплюють як класичні, так і інноваційні технології.

- Акумуляторні батареї. Літій-іонні акумулятори є найбільш поширеними завдяки високій енергетичній щільності, довгому життєвому циклу та відносній безпеці.

- Сонячні панелі. Використовуються для довготривалого живлення у віддалених районах без доступу до мережі. Перевага – безкоштовна енергія, недолік – залежність від погодних умов.

					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

- Енергоозбір з радіочастот (RF Energy Harvesting). Підходить для пристроїв з низьким енергоспоживанням, зокрема сенсорів IoT. Обмеженням є невелика потужність.

- Гібридні системи живлення. Поєднують різні джерела (наприклад, сонячні панелі + акумулятори + РЧ-ЕН) для підвищення надійності та автономності.

Особливий інтерес викликають новітні системи з використанням суперконденсаторів, паливних елементів і інтелектуальних схем управління живленням, що адаптуються до зовнішніх умов.

На рисунку 1.3 наведено приклад гібридної системи автономного живлення, що поєднує сонячну панель, РЧ-антену з приймачем, контролер заряду, акумулятор, інвертор або DC-DC перетворювач, систему моніторингу стану батареї та навантаження. Система дозволяє ефективно збирати енергію з декількох джерел, зберігати її в акумуляторі та забезпечувати стабільне живлення навантаження навіть при змінних умовах навколишнього середовища. Кожен компонент виконує специфічну функцію, спрямовану на забезпечення безперебійної та надійної роботи автономного джерела живлення.

Гібридна система автономного живлення поєднує сонячну панель, РЧ-антену з приймачем, контролер заряду, акумулятор, інвертор або DC-DC перетворювач та систему моніторингу стану батареї. Сонячна панель є основним джерелом живлення вдень, тоді як РЧ-антена з приймачем забезпечує підзарядку від електромагнітного випромінювання в умовах низької інсоляції або вночі. Контролер заряду оптимізує процес заряджання від обох джерел і захищає акумулятор від перевантажень. Акумулятор накопичує енергію для безперервного живлення навантаження, навіть коли джерела енергії неактивні. Інвертор або DC-DC перетворювач забезпечує узгодження напруги з потребами навантаження, а система моніторингу контролює стан акумулятора, забезпечуючи надійність і безпеку роботи всієї системи.

					КПТР.210120.01.03	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

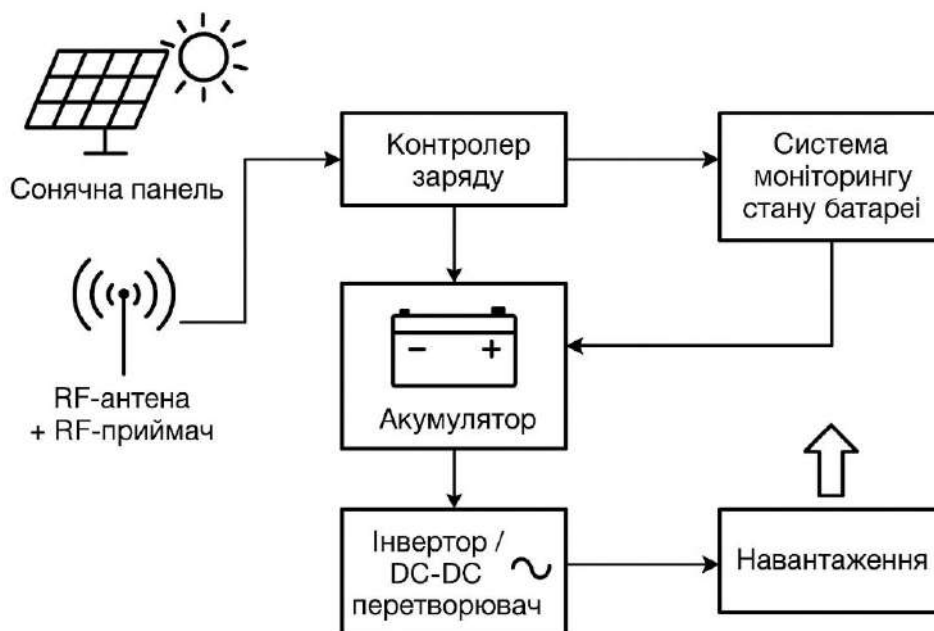


Рисунок 1.3 – Приклад гібридної системи автономного живлення з сонячною панеллю, акумулятором і РЧ-енергозбором

1.4 Проблематика живлення телекомунікаційного обладнання

Телекомунікаційне обладнання є надзвичайно чутливими до параметрів систем живлення, оскільки їх функціонування значною мірою залежить від автономності, малої ваги та ефективного використання енергетичних ресурсів. Забезпечення надійного і тривалого енергопостачання для БПЛА стикається з низкою технічних викликів, вирішення яких потребує глибокого аналізу та інженерного підходу.

Основні проблеми живлення БПЛА включають:

1. Обмежена ємність акумуляторів. Сучасні акумуляторні технології, зокрема літій-іонні батареї, мають фізичне обмеження по щільності енергії. Підвищення ємності акумулятора неминуче веде до збільшення маси, що для БПЛА критично, адже зайва вага значно знижує тривалість польоту, маневреність і висоту. Таким чином, інженери стикаються з необхідністю компромісу між ємністю, вагою та розмірами енергетичного модуля.

2. Залежність від зовнішніх умов. Багато сучасних рішень намагаються доповнити живлення БПЛА відновлюваними джерелами, такими як сонячні панелі або технології радіочастотного енергозбирання. Однак ефективність сонячних панелей значно знижується у несприятливих погодних умовах (хмарність, сутінки, пил), а РЧ-енергозбір має надзвичайно низький рівень енергетичної потужності, що не дозволяє повністю забезпечити живлення критичних систем БПЛА.

3. Високе енергоспоживання польотних систем. Під час виконання завдань БПЛА активно використовує енергомісткі підсистеми: електромотори для гвинтів, системи стабілізації та керування, навігаційні прилади (GPS, гіроскопи), сенсори, відеокамери, комунікаційні модулі (Wi-Fi, LTE, радіоканал). Всі вони вимагають стабільного і якісного живлення, що ще більше ускладнює задачі розробки джерела живлення з обмеженими ресурсами.

4. Відсутність безперервного джерела енергії під час польоту. На відміну від наземних об'єктів, БПЛА не можуть бути постійно підключені до джерела живлення. Це зумовлює потребу в енергонезалежних системах, здатних самостійно забезпечити електроживлення протягом всього польотного циклу, включно з злетом, маневруванням, виконанням завдань і поверненням. У випадках тривалих польотів або місій із змінним енергоспоживанням критичною є гнучкість і адаптивність системи живлення.

Окрім згаданих проблем, при створенні систем живлення для БПЛА варто враховувати і низку додаткових чинників, що визначають ефективність, надійність і практичність застосування таких систем у реальних умовах. Нижче наведено додаткові аспекти, які слід враховувати при проектуванні та впровадженні гібридних енергосистем для безпілотників:

Проблема теплового управління. У компактних корпусах БПЛА високий рівень енергоспоживання викликає утворення тепла, що негативно впливає на стабільність роботи електроніки, ефективність акумуляторів і загальну надійність системи. Під час заряджання та розряджання акумуляторів, роботи

сонячних панелей чи РЧ-модулів можуть виникати температурні перепади. Ефективна система охолодження чи теплорозсіювання має мінімізувати ризики перегріву, особливо у високоінтенсивних режимах.

Мініатюризація та інтеграція компонентів. Оскільки розміри і маса БПЛА жорстко обмежені, усі компоненти енергосистеми повинні бути максимально компактними, легкими та ефективно інтегрованими в конструкцію літального апарата. Це вимагає розробки малогабаритних перетворювачів енергії, спеціалізованих акумуляторів і компактних антенно-енергетичних модулів, які не створюють аеродинамічного опору та не порушують баланс апарата.

Сумісність з телекомунікаційними модулями. Оскільки основною задачею БПЛА в межах телекомунікаційних систем є забезпечення зв'язку, живлення повинно бути адаптованим до специфіки роботи високочастотних передавачів, ретрансляторів та модулів обробки сигналу. Нестабільне або недостатнє живлення може призвести до перебоїв у передачі даних, втрати сигналу чи помилок при обробці інформації.

Інтелектуальне управління енергоспоживанням. Сучасні гібридні системи живлення повинні бути доповнені інтелектуальними алгоритмами енергоменеджменту, які в режимі реального часу здійснюють моніторинг рівня заряду, оптимізують розподіл енергії між компонентами та прогнозують тривалість роботи системи. Це особливо важливо для місій з високими вимогами до надійності, де кожна хвилина польоту має стратегічне значення.

Стійкість до електромагнітних завад. Оскільки РЧ-модулі збору енергії та телекомунікаційні пристрої працюють у близькому частотному діапазоні, необхідно забезпечити електромагнітну сумісність усіх елементів системи, уникнувши взаємних перешкод. Ретельне екранування, фільтрація сигналів та правильне розведення ланцюгів є важливою складовою електронного дизайну енергосистеми.

Модульність та масштабованість системи. Із розвитком вимог до функціональності БПЛА необхідним є забезпечення гнучкої структури системи

					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

живлення. Це дозволить змінювати її конфігурацію залежно від типу завдань, умов експлуатації чи типу платформи — від мікродронів до великих безпілотних літальних систем. Наявність уніфікованих модулів (сонячний блок, РЧ-збирач, буферна батарея, DC-DC перетворювач тощо) спрощує адаптацію до різних сценаріїв використання.

Таким чином, розробка гібридних енергосистем для БПЛА не обмежується лише підбором джерел енергії, а потребує комплексного підходу, що враховує фізичні, технічні та експлуатаційні параметри апарата. В умовах зростаючого попиту на автономні телекомунікаційні рішення, інтеграція енергоефективних та адаптивних систем живлення стане ключовим фактором успіху в реалізації інноваційних проєктів у сфері бездротових мереж і дронів.

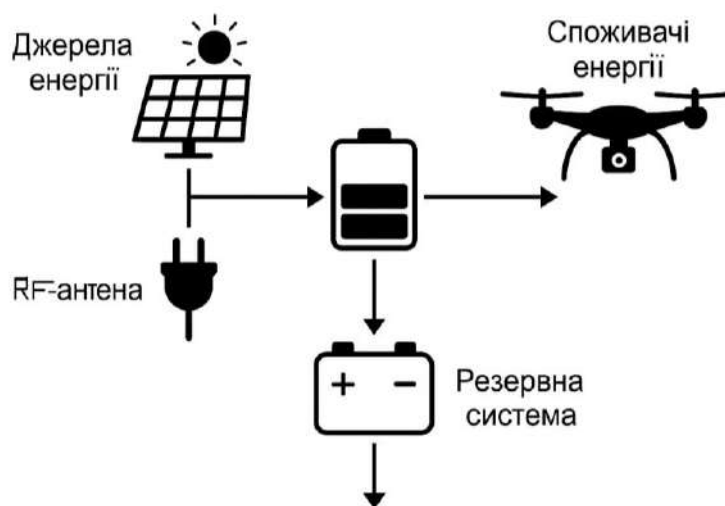


Рисунок 1.4 – Схематичне зображення енергетичних потоків в системі живлення БПЛА

Розв’язання зазначених проблем можливе шляхом створення гібридних систем живлення, які поєднують акумуляторні джерела з альтернативними технологіями, такими як мініатюрні сонячні батареї, РЧ-енергоозбір, термоелектричні генератори або навіть мікродвигуни внутрішнього згоряння для

підзарядки. Додатково необхідно впроваджувати інтелектуальні алгоритми керування енергоспоживанням, пріоритизації навантажень, оптимізації траєкторій польоту та адаптивного енергобалансування. Комплексний підхід до проектування систем живлення дозволяє підвищити ефективність і надійність сучасних БПЛА в умовах реального застосування.

1.5 Висновок до першого розділу

Проведений аналіз систем живлення телекомунікаційного обладнання виявив широкий спектр існуючих рішень, кожне з яких має свої переваги і обмеження. Класифікація систем за типом джерела енергії, режимом роботи та мобільністю дозволяє вибирати найбільш оптимальні конфігурації для різних умов експлуатації.

Вимоги до джерел живлення визначають основні технічні характеристики, яким мають відповідати учасні пристрої, особливо у мобільних та автономних умовах. Огляд сучасних автономних систем живлення показав тенденцію до інтеграції різних джерел енергії в гібридні рішення для підвищення надійності та тривалості роботи.

Особливу увагу було приділено проблематиці живлення безпілотних літальних апаратів, де обмеження маси і потреба у тривалому автономному живленні вимагають нових підходів, таких як гібридні системи енергозбирання.

Таким чином, подальші дослідження будуть спрямовані на розробку та оптимізацію гібридних систем живлення, які враховують особливості роботи телекомунікаційного обладнання, зокрема БПЛА, забезпечуючи їх ефективну і надійну роботу.

					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

польоту, оскільки сонячна енергія є постійно доступною протягом світлового дня і не потребує додаткових джерел живлення. Проте ефективність таких систем залежить від багатьох факторів, включаючи погодні умови, розмір і розташування панелей, а також технологічні характеристики самого фотоелементу.

Об'єднання цих двох технологій – радіочастотного та сонячного збору енергії – у гібридну систему дозволяє максимально використовувати доступні ресурси навколишнього середовища, підвищуючи ефективність і стабільність живлення телекомунікаційного обладнання БПЛА. Такий підхід дозволяє значно знизити залежність від традиційних акумуляторів, які мають обмежену ємність та збільшують вагу апарату, а також забезпечити безперервну роботу систем навіть у умовах недостатнього сонячного випромінювання завдяки додатковому живленню від РЧ джерел.

Таким чином, технології збору енергії з навколишнього середовища виступають ключовими напрямками розвитку автономних систем живлення, особливо для компактних і мобільних платформ, таких як БПЛА. Подальші дослідження в цій галузі спрямовані на підвищення ефективності перетворення та накопичення енергії, зменшення ваги і розмірів систем, а також оптимізацію керування енергоспоживанням для забезпечення максимальної автономності польоту.

2.2 Переваги та недоліки традиційних та сучасних методів енергозбирання

У сучасних дослідженнях активно вивчаються різноманітні методи збору енергії з навколишнього середовища, які дозволяють забезпечити автономну роботу безпілотних літальних апаратів. Зокрема, широке застосування знаходять технології збору енергії з радіочастотних джерел та сонячного випромінювання. Вони дозволяють продовжити час польоту, знизити залежність від традиційних акумуляторних батарей та зменшити загальну вагу апарату.

					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Сонячна енергія є одним із найперспективніших джерел для живлення БПЛА, особливо в умовах тривалого перебування в повітрі при денному освітленні. Використання легких, гнучких та високоефективних сонячних елементів, які можуть бути вбудовані безпосередньо в поверхню крила або корпусу дрона, дозволяє значно підвищити автономність польоту. Завдяки безперервному підживленню від сонця під час польоту, можливе поступове заряджання акумулятора або навіть повна заміна традиційних джерел енергії для малопотужних систем. Проте ефективність таких систем сильно залежить від умов освітлення: похмура погода, низький кут падіння сонячних променів або запилене середовище суттєво знижують вихідну потужність сонячних батарей.

Збір енергії з радіочастотного випромінювання (RF energy harvesting) базується на використанні навколишнього електромагнітного фону, створеного базовими станціями мобільного зв'язку, телевежами, Wi-Fi роутерами та іншими передавачами. Енергія у вигляді радіохвиль приймається спеціальними антенами, після чого випрямляється і накопичується у вигляді постійного струму для живлення низькопотужної електроніки. Перевагою РЧ-енергозбору є незалежність від погодних умов та можливість функціонування у закритих або затінених зонах, де сонячне світло недоступне. Проте основним обмеженням цієї технології є дуже низька щільність енергії у більшості середовищ, що обмежує її застосування лише для підтримки енергозабезпечення малопотужних модулів, таких як телеметричні сенсори, маяки чи системи моніторингу.

Комбіновані гібридні рішення, що поєднують декілька джерел енергії – наприклад, сонячні батареї та РЧ-збирачі – дозволяють підвищити гнучкість та надійність живлення безпілотників. У таких системах енергія з різних джерел може бути акумульована в буферному накопичувачі (наприклад, суперконденсаторі або літій-іонному акумуляторі), а потім оптимально розподіляється за допомогою DC-DC перетворювачів до споживачів. Цей підхід забезпечує адаптивну реакцію на зміну умов навколишнього середовища та

					КПТР.210120.01.03	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

енергоспоживання дрона, дозволяючи максимально ефективно використовувати доступні ресурси.

Крім того, активно досліджуються перспективні напрямки, такі як п'єзоелектричне та термоелектричне енергозбирання, проте вони наразі не демонструють достатнього рівня потужності для повноцінного забезпечення польоту БПЛА, а скоріше виступають як допоміжні або резервні джерела для автономної підтримки малих систем керування чи зв'язку.

Отже, впровадження енергозбиральних технологій у системи живлення безпілотних літальних апаратів відкриває нові можливості для підвищення їх автономності, зменшення вагових характеристик та розширення спектру застосування в умовах обмеженого доступу до традиційних джерел живлення. Проте для практичного застосування необхідно розв'язати низку технічних проблем, пов'язаних з ефективністю перетворення енергії, її накопиченням, а також інтеграцією таких систем у компактні платформи безпілотників.

2.2.1 Збір енергії з радіочастотних джерел

Технологія збору енергії з радіочастотних джерел (RF Energy Harvesting, РЧ-ЕН) полягає у перетворенні електромагнітних хвиль, які безперервно присутні у навколишньому середовищі, на корисну електричну енергію. Джерелами таких радіочастотних хвиль можуть бути телевізійні та радіостанції, базові станції мобільного зв'язку, Wi-Fi роутери, системи Bluetooth, а також різні інші бездротові пристрої, що працюють у частотних діапазонах від кількох мегагерц до гігагерц. Завдяки широкому розповсюдженню цих сигналів, технологія РЧ-ЕН набуває все більшого значення як перспективний спосіб автономного живлення малопотужних електронних пристроїв, у тому числі сенсорних мереж, носимих пристроїв та безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Основними структурними елементами системи РЧ-ЕН є:

					КПТР.210120.01.03	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Приймальна антена, яка збирає електромагнітні хвилі з навколишнього простору та конвертує їх у змінний електричний сигнал. Тип антени та її параметри (розмір, форма, смуга пропускання) безпосередньо впливають на ефективність збору енергії. Наприклад, широко використовуються дипольні, патч-антени або багатoelementні антени для підвищення коефіцієнта підсилення.

Узгоджувальний контур, який служить для максимізації передачі потужності від антени до наступного етапу системи – випрямляча. Узгодження імпедансів необхідне, щоб мінімізувати втрати сигналу та уникнути відбиттів. Часто це коливальний контур LC, підібраний на частоту прийому.

Випрямляч, або пристрій перетворення змінної напруги на постійну, зазвичай реалізується у вигляді мультиступеневої схеми множника напруги (Voltage Multiplier, VM). Застосування множника дозволяє підвищити вихідну постійну напругу до рівня, необхідного для живлення електронних компонентів або заряджання акумуляторів.

Переваги використання технології РЧ-ЕН включають здатність забезпечувати живлення в умовах, де традиційне джерело енергії, наприклад, сонячне світло, недоступне (наприклад, уночі або в приміщеннях), а також компактність і простоту інтеграції таких систем у різні пристрої. Крім того, оскільки електромагнітні хвилі присутні постійно, РЧ-ЕН може забезпечувати безперервне живлення малопотужних електронних систем.

Проте існують і суттєві обмеження. Найголовнішим недоліком РЧ-ЕН є низька щільність енергії у навколишньому середовищі, що обмежує загальну потужність, яку можна зібрати. Часто рівень вхідного сигналу не перевищує декілька міліватів, що ускладнює отримання стабільного джерела живлення для енергомістких пристроїв. Це зумовлює необхідність оптимізації кожного етапу системи, від антени до випрямляча.

Дослідження у галузі показують, що ефективність перетворення РЧ-енергії у постійну напругу значною мірою залежить від кількості ступенів у схемі

					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

- Розробки багатодіапазонних і широкосмугових антен, здатних збирати енергію з різних частотних діапазонів;
- Покращення схем множників напруги із застосуванням діодів Шотткі для зниження втрат у випрямлячах;
- Використання адаптивних систем імпедансного узгодження, що дозволяють підлаштовуватися під змінні умови навколишнього середовища і частоти сигналів;
- Впровадження систем управління енергоспоживанням, що оптимізують використання зібраної енергії у залежності від потреб пристрою.

У результаті, технологія РЧ-ЕН має великий потенціал для застосування у автономних системах живлення, особливо для таких пристроїв, як безпілотні літальні апарати, у яких вага акумулятора та обмеження за габаритами є критично важливими.

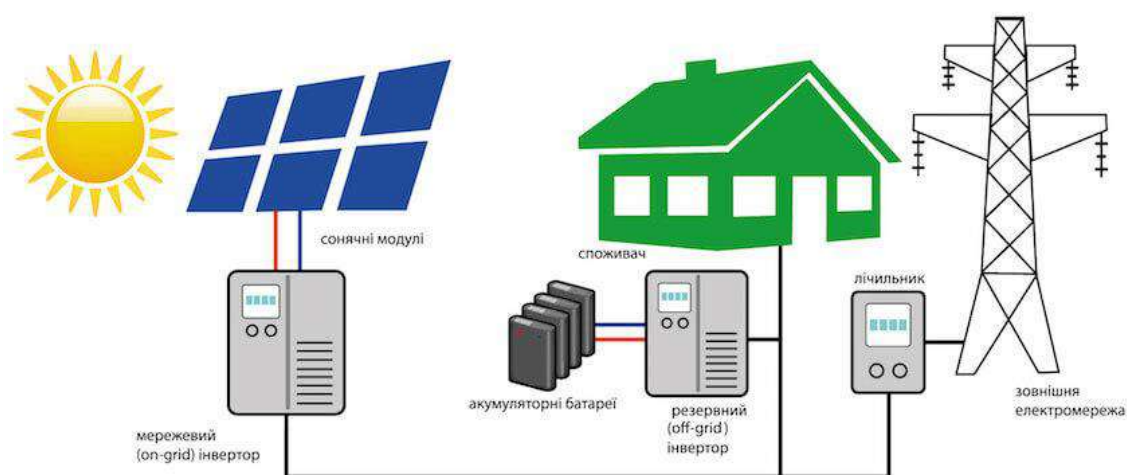
2.2.2 Збір сонячної енергії

Сонячна енергія є одним із найпоширеніших і найбільш перспективних джерел відновлюваної енергії для живлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Використання фотогальванічних (PV) елементів, або сонячних батарей, дає змогу безпосередньо перетворювати сонячне випромінювання на електричну енергію, що є екологічно чистим і відносно доступним джерелом живлення.

Сучасні технології розробки PV-елементів спрямовані на досягнення максимальної енергоефективності при мінімальній вазі та габаритах. Особливо важливо для БПЛА, де кожен грам ваги та зміна аеродинамічної форми може суттєво вплинути на дальність польоту, маневреність і витрату енергії. Тому все частіше застосовуються легкі, гнучкі та тонкі сонячні панелі, які можна інтегрувати прямо у поверхню крила або корпусу БПЛА без істотного збільшення опору повітря. Такі панелі виготовляють на основі тонкоплівкових технологій, включаючи аморфний кремній, кадмій-телурид (CdTe) та органічні

перетворювача напруги, компенсуючи зміни інсоляції, температури та навантаження.

Крім того, для підвищення надійності та автономності роботи БПЛА інтегрують системи управління енергією (Energy Management Systems, EMS), які відповідають за розподіл, зберігання і оптимальне використання зібраної сонячної енергії. EMS здійснює балансування між споживанням електроенергії для роботи двигунів, авіоніки та комунікаційних систем, а також зарядкою акумуляторів, що забезпечує безперервність функціонування у змінних умовах польоту.



у

Рисунок 2.2 – Фотоелектрична система збору сонячної енергії

Сучасні дослідження також звертають увагу на:

- Використання багатошарових (мультиджанкційних) сонячних елементів, які дозволяють захоплювати ширший спектр сонячного випромінювання, значно підвищуючи ККД у порівнянні з традиційними кремнієвими панелями.
- Розробку інтегрованих сонячних систем із вбудованими акумуляторами для безпосереднього накопичення енергії, що зменшує втрати при передачі та підвищує надійність.

- Застосування автоматизованих систем орієнтації БПЛА для максимальної експозиції сонячних панелей до сонця, що додатково збільшує кількість отриманої енергії.

Враховуючи всі вищезазначені аспекти, сонячна енергетика залишається ключовим напрямом розвитку автономних живильних систем для безпілотних літальних апаратів, особливо у довготривалих місіях з високими вимогами до автономності і екологічності.

2.3 Перспективи використання гібридних систем енергозбирання

Гібридні системи енергозбирання, які поєднують сонячну енергію та енергію з радіочастотних джерел (РЧ-ЕН), становлять перспективний напрям розвитку автономного енергозабезпечення для безпілотних літальних апаратів (БПЛА). В умовах підвищених вимог до тривалості польоту та зменшення залежності від акумуляторних батарей, поєднання різних джерел енергії дає змогу компенсувати недоліки кожного окремого методу та забезпечити безперервну роботу системи в різних середовищах. Наприклад, у денний час сонячні панелі ефективно виробляють енергію за рахунок прямого або розсіяного випромінювання, тоді як уночі або в умовах затінення живлення може надходити з радіочастотних хвиль, які присутні в міських умовах або поблизу телекомунікаційного обладнання.

На рисунку 2.3 наведено структурну схему гібридної системи енергозбирання, яка об'єднує два незалежні джерела живлення: сонячну енергію та енергію радіочастотного випромінювання (RF). У верхній частині схеми зображено фотоелектричну (PV) панель, яка перетворює сонячне світло на електричну енергію. Вихід PV-модуля з'єднаний із контролером заряду та системою відстеження точки максимальної потужності (MPPT), що оптимізує вироблення енергії в змінних умовах освітлення.

						КПТР.210120.01.03	Арк.
							29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

доступної потужності. Крім того, в системах використовуються алгоритми відстеження точки максимальної потужності (MPPT), що дозволяє підтримувати оптимальні умови перетворення сонячної енергії в електричну навіть при змінному освітленні.

Однією з ключових переваг гібридного підходу є можливість роботи БПЛА у складних умовах, де традиційні джерела живлення були б недостатньо ефективними. Дослідження показують, що застосування гібридного енергозбирання дозволяє збільшити тривалість автономної роботи на 30–50% порівняно з використанням лише одного джерела. Наприклад, у роботі [4] описано структуру гібридної системи, в якій сонячна панель генерує енергію вдень, а радіочастотна схема з семиступеневим множитком напруги забезпечує резервне живлення вночі або в закритому приміщенні. В результаті забезпечується більш надійне живлення критичних систем БПЛА, що особливо важливо при виконанні довготривалих місій або у важкодоступних районах.

Загалом гібридні системи енергозбирання відкривають нові можливості для проектування енергонезалежних мобільних пристроїв, зокрема БПЛА, телеметричних станцій, автономних сенсорних мереж та інших пристроїв Інтернету речей (IoT). Використання комбінації РЧ та сонячної енергії дозволяє адаптувати систему до змін зовнішніх умов, забезпечити баланс між вагою, ефективністю та компактністю, а також зменшити навантаження на акумуляторні системи, продовжуючи їхній термін служби. Подальші дослідження в цій галузі спрямовані на оптимізацію енергетичних ланцюгів, впровадження інтелектуального керування енергією, зменшення габаритів компонентів і покращення інтеграції таких рішень у конструкцію БПЛА без шкоди для їхньої аеродинаміки.

Паралельно до PV-секції працює РЧ-модуль, який складається з приймальної антени, узгоджувального контуру та випрямляча, реалізованого за схемою множника напруги. Ця підсистема призначена для збору енергії з навколишнього електромагнітного фону, наприклад, від телекомунікаційних

передавачів або інших джерел радіосигналів. Обидва джерела живлення з'єднуються на рівні спільної шини постійного струму, що подає енергію до навантаження – бортових систем БПЛА або буферного акумулятора.

Гібридна конфігурація дозволяє забезпечити більш стабільне та безперервне живлення в умовах змінного зовнішнього середовища. Такий підхід підвищує енергоефективність та автономність безпілотного літального апарата.

Технічно гібридна система енергозбирання складається з декількох ключових блоків: фотогальванічних (PV) елементів, антен для приймання РЧ-сигналів, узгоджувальних контурів, випрямлячів із множниками напруги, а також елементів накопичення енергії (акумуляторів або суперконденсаторів). Для підвищення ефективності застосовуються контролери керування енергією, здатні автоматично перемикаєти або комбінувати джерела залежно від рівня доступної потужності. Крім того, в системах використовуються алгоритми відстеження точки максимальної потужності (MPPT), що дозволяє підтримувати оптимальні умови перетворення сонячної енергії в електричну навіть при змінному освітленні.

Однією з ключових переваг гібридного підходу є можливість роботи БПЛА у складних умовах, де традиційні джерела живлення були б недостатньо ефективними. Дослідження показують, що застосування гібридного енергозбирання дозволяє збільшити тривалість автономної роботи на 30–50% порівняно з використанням лише одного джерела. Наприклад, у роботі [4] описано структуру гібридної системи, в якій сонячна панель генерує енергію вдень, а радіочастотна схема з семиступеневим множником напруги забезпечує резервне живлення вночі або в закритому приміщенні. В результаті забезпечується більш надійне живлення критичних систем БПЛА, що особливо важливо при виконанні довготривалих місій або у важкодоступних районах.

Загалом гібридні системи енергозбирання відкривають нові можливості для проектування енергонезалежних мобільних пристроїв, зокрема БПЛА, телеметричних станцій, автономних сенсорних мереж та інших пристроїв

					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Інтернету речей (IoT). Використання комбінації РЧ та сонячної енергії дозволяє адаптувати систему до змін зовнішніх умов, забезпечити баланс між вагою, ефективністю та компактністю, а також зменшити навантаження на акумуляторні системи, продовжуючи їхній термін служби. Подальші дослідження в цій галузі спрямовані на оптимізацію енергетичних ланцюгів, впровадження інтелектуального керування енергією, зменшення габаритів компонентів і покращення інтеграції таких рішень у конструкцію БПЛА без шкоди для їхньої аеродинаміки.

2.4 Обґрунтування вибору гібридного підходу для системи живлення

Рішення про використання гібридної системи енергозбирання для живлення телекомунікаційного обладнання безпілотного літального апарата (БПЛА) зумовлене потребою в підвищенні надійності енергопостачання при автономній роботі в різноманітних умовах довкілля. Зокрема, телекомунікаційні системи, встановлені на БПЛА, повинні функціонувати безперервно під час польоту незалежно від змін у погоді, інтенсивності сонячного освітлення, наявності джерел радіочастотної енергії або інших зовнішніх факторів. Традиційне використання лише одного джерела, наприклад акумулятора або сонячної панелі, не завжди здатне гарантувати стабільність живлення протягом усього періоду роботи, особливо під час виконання довготривалих місій у віддалених або недоступних районах.

Поєднання технологій радіочастотного енергозбирання (РЧ-Energy Harvesting, РЧ-ЕН) та перетворення сонячної енергії створює синергетичний ефект, завдяки якому досягається стабільне енергозабезпечення незалежно від зміни параметрів середовища. У денний час за умов достатнього рівня інсоляції основним джерелом енергії виступає фотогальванічний елемент, тоді як у нічний час або за поганої погоди — переважно використовується радіочастотне випромінювання, що може бути наявним у міських або промислових районах, де

						КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			33

працюють різноманітні бездротові мережі. Це дозволяє зменшити навантаження на буферні елементи зберігання енергії (акумулятори або суперконденсатори), подовжити термін їх служби та забезпечити більш рівномірний режим заряджання.

Ще одним важливим аспектом застосування гібридної архітектури є можливість оптимізації масогабаритних характеристик системи живлення. Оскільки повністю акумуляторне рішення вимагає значного запасу енергії, що прямо пропорційно впливає на масу апарата, гібридна система дозволяє зменшити ємність акумуляторів, зберігаючи при цьому тривалість автономної роботи. Зменшення ваги, у свою чергу, покращує аеродинаміку БПЛА, дозволяє збільшити дальність польоту, підвищити корисне навантаження (наприклад, більше сенсорів або модулів зв'язку), а також зменшити споживання енергії на підтримку стабільного польоту.

Крім технічних переваг, гібридна система також забезпечує гнучкість під час проектування: за потреби можна адаптувати конфігурацію (наприклад, змінити площу сонячної панелі або чутливість РЧ-антен) відповідно до специфіки завдання чи місцевості. Такий підхід сприяє створенню універсальних БПЛА, придатних до використання як у цивільному (моніторинг, зв'язок, екологічні дослідження), так і у військовому секторі (розвідка, передача даних, зв'язок в екстремальних умовах).

Отже, використання гібридної системи живлення на основі РЧ- та сонячного енергозбирання є не лише технічно виправданим, а й стратегічно доцільним кроком у напрямку створення ефективних, надійних та універсальних енергетичних рішень для сучасних безпілотних телекомунікаційних платформ.

2.5 Висновок до другого розділу

У розділі проведено детальний огляд і аналіз сучасних підходів до енергозбирання, зокрема методів збору енергії з радіочастотних джерел (РЧ-ЕН)

					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

та сонячної енергії. Розглянуто переваги і недоліки кожного з цих традиційних і новітніх методів, що дозволяє чітко усвідомити їх потенціал та обмеження в контексті автономного живлення електронних пристроїв. Зокрема, було встановлено, що РЧ-енергозбір характеризується відносною незалежністю від погодних умов і розподілу джерел, однак обмежений потужністю отримуваної енергії. Сонячні ж технології забезпечують значно вищу щільність енергії, але їх ефективність суттєво залежить від освітленості та кліматичних умов.

Особливу увагу приділено перспективам використання гібридних систем енергозбирання, які комбінують переваги різних джерел енергії, забезпечуючи більш стабільне і надійне живлення в умовах змінної зовнішньої середовища. Враховуючи специфіку застосування, зокрема в безпілотних літальних апаратах (БПЛА), було обґрунтовано вибір гібридного підходу, що дозволяє оптимізувати енергетичний баланс системи та підвищити автономність і ефективність роботи обладнання.

Таким чином, проведений аналіз підтвердив доцільність подальшого розвитку та впровадження гібридних енергозбірних систем для живлення БПЛА, що відкриває нові можливості для підвищення надійності і функціональності сучасних автономних платформ.

					КПТР.210120.01.03	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ

3.1 Збір енергії з радіочастотного випромінювання

Системи енергозбирання на основі радіочастотного (RF) випромінювання набувають все більшого значення в контексті забезпечення автономної роботи малопотужних електронних пристроїв, особливо у випадках, коли застосування традиційних джерел живлення є ускладненим або недоцільним. Зокрема, до таких пристроїв належать бездротові сенсорні вузли, RFID-мітки, вбудовані мікроконтролери, а також безпілотні літальні апарати (БПЛА), які все частіше використовуються у складних або важкодоступних умовах експлуатації.

Загальна структурна схема такої системи представлена на рисунку 3.1, де відображено основні функціональні блоки: антену, схему узгодження імпедансів та випрямляч.

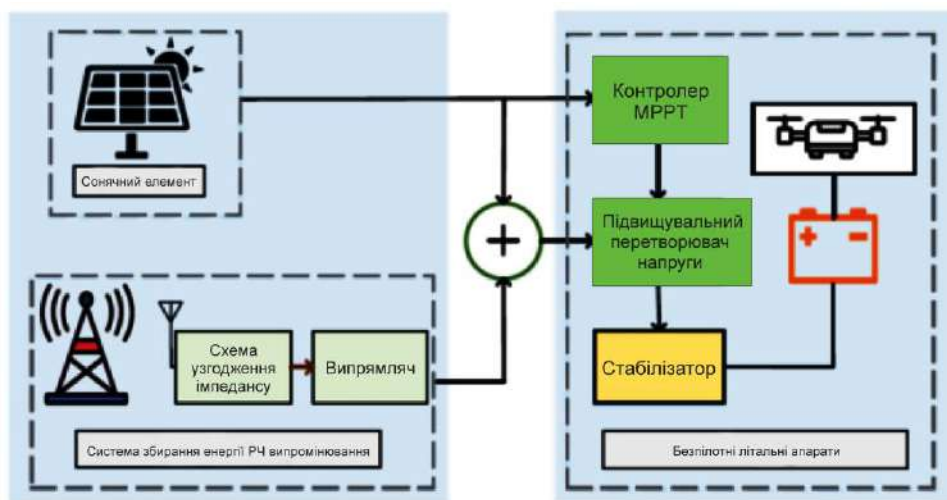


Рисунок 3.1 – Блок-схема гібридної RF–сонячної системи для БПЛА

З технічної точки зору, типова система збору енергії з радіочастотного середовища включає в себе декілька ключових функціональних елементів, що

Уолтона), які дозволяють підвищити рівень вихідної напруги за рахунок каскадного випрямлення з накопиченням заряду в багатоступеневій конфігурації.

Таким чином, ефективна реалізація системи РЧ-енергозбирання вимагає ретельної взаємодії всіх її складових – від оптимального вибору антени, через точне узгодження імпедансів, до ефективного випрямлення та зберігання отриманої енергії. Подальші дослідження у цьому напрямі зосереджені на покращенні коефіцієнта перетворення, зниженні втрат та мініатюризації компонентів з можливістю інтеграції в компактні мобільні пристрої.

Для ефективного підвищення рівня напруги, що надходить до навантаження після випрямлення сигналу з антени, у структурі системи енергозбирання реалізовано каскадне рішення у вигляді сімступеневого множника напруги. Принципова схема цієї частини системи зображена на рисунку 3.2. Множник напруги побудовано на основі класичної топології Кокрофта–Волтона, яка традиційно застосовується у високочастотних перетворювачах, де важлива можливість досягати високих значень постійної напруги без використання активних елементів або складних конструктивних рішень.

Схема включає 14 напівпровідникових діодів та 14 конденсаторів, які організовані у послідовно з'єднані каскади. Кожен каскад складається з двох діодів та двох конденсаторів і виконує функцію проміжного етапу накопичення та подальшої передачі електричного заряду. Принцип дії ґрунтується на циклічному процесі заряджання та розряджання конденсаторів, що здійснюється синхронно зі зміною полярності вхідного змінного сигналу. Під час позитивного напівперіоду сигналу перший каскад формує базовий рівень напруги, який у подальшому використовується наступним каскадом для його підвищення. Цей процес повторюється на кожному наступному ступені, внаслідок чого формується нарощувана послідовність напруг, яка на виході забезпечує значно вищий рівень постійної напруги порівняно з вхідним сигналом.

					КПТР.210120.01.03	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

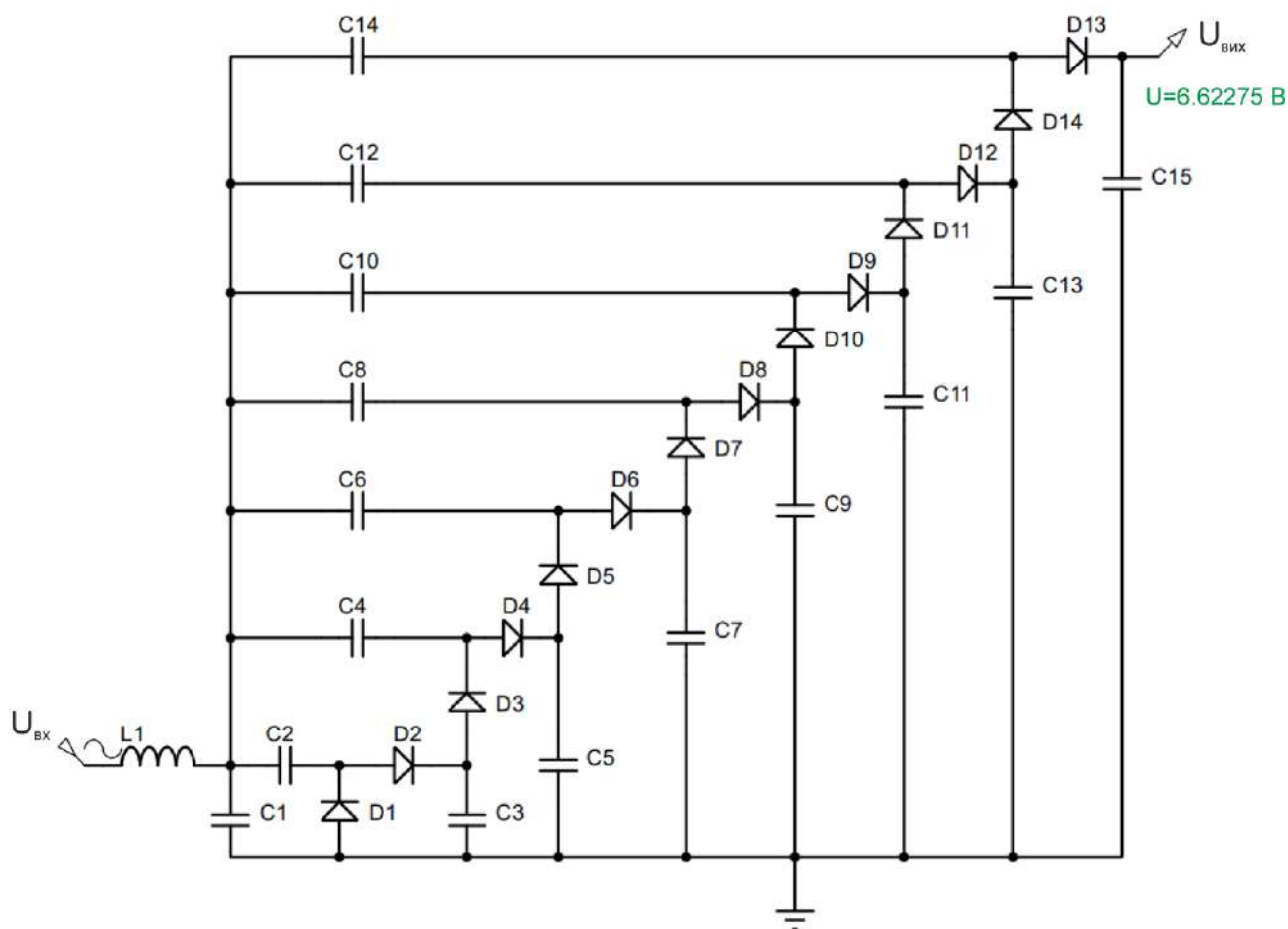


Рисунок 3.2 – Принципова електрична схема модуля збору енергії радіочастотного діапазону

Завдяки використанню спеціалізованих діодів Шоттки (зокрема, таких як HSMS-2852), що характеризуються низьким порогом відкриття (менше 0.3 В), система зберігає високу ефективність навіть за умов надзвичайно низького рівня потужності РЧ-сигналу. Крім того, за рахунок оптимального підбору номіналів конденсаторів вдалося забезпечити стабільність вихідної напруги навіть при зміні частотних параметрів сигналу, що надходить на вхід. Конструкція множника повністю пасивна та характеризується високим ступенем компактності, що дозволяє інтегрувати її у малогабаритні пристрої з обмеженим простором для елементної бази.

У результаті реалізації зазначеного підходу до формування постійної напруги стало можливим ефективно акумулювати навіть незначні рівні радіочастотної енергії з навколишнього середовища та перетворювати їх у корисне електроживлення, придатне для подальшого використання в малопотужній автономній електроніці. Така структура може успішно застосовуватися як окремо, так і в поєднанні з іншими джерелами енергії, наприклад сонячними елементами, для формування гібридних систем живлення, зокрема для безпілотних літальних апаратів або енергоавтономних сенсорних вузлів у складі систем Інтернету речей.

3.2 Збір сонячної енергії

Сонячні панелі (фотоелектричні модулі) є одним з найпоширеніших та надійних джерел автономного живлення для малопотужних пристроїв, включаючи безпілотні літальні апарати (БПЛА), сенсорні вузли, станції збору даних тощо. Основний принцип роботи сонячної панелі ґрунтується на фотовольтаїчному ефекті (PV-ефекті), який відбувається в напівпровідникових матеріалах при поглинанні фотонів світла. Під впливом сонячного випромінювання утворюються електронно-діркові пари, які, розділяючись внутрішнім електричним полем р-п переходу, створюють електричну напругу на виході панелі.

У процесі розробки автономних систем живлення для безпілотних літальних апаратів особливу увагу приділяють аналізу впливу зовнішніх факторів на роботу джерел енергії, зокрема – сонячних панелей. Конверсія сонячного випромінювання в електроенергію є складним процесом, ефективність якого визначається сукупністю різних умов. Одним із головних параметрів, що визначає вихідну потужність, є інтенсивність сонячного світла. В умовах яскравого сонячного освітлення панелі здатні генерувати максимальну

					КПТР.210120.01.03	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

напругу та струм, що наближуються до паспортних значень. При зменшенні інсоляції, наприклад у похмурі дні, рівень генерації суттєво падає.

Крім рівня освітлення, велике значення має температура довкілля. Підвищення температури впливає на властивості напівпровідникових матеріалів фотомодулів, що зумовлює поступове зменшення їх ККД. Ще одним фактором є геометричне розташування панелі відносно джерела світла: відхилення від оптимального кута зменшує кількість енергії, яка поглинається поверхнею. Також необхідно враховувати чистоту панелей – осідання пилу, поява забруднень або часткове затінення можуть спричинити значні втрати потужності.

З метою дослідження реакції сонячної панелі на зміну зовнішніх умов було проведено численні моделювання у середовищі Proteus. Симуляції охоплювали типові погодні сценарії, що дозволило оцінити характер зміни напруги на виході модуля. Наприклад, у сонячну погоду напруга досягала значень у діапазоні 15–19 В, що дозволяє забезпечити живлення більшості електронних систем безпосередньо або з мінімальною трансформацією. В умовах обмеженої освітленості – таких як хмарне небо – напруга знижувалася до меж 8–12 В, що вже вимагало підвищення до необхідного рівня. У темний час доби генерація була обмеженою: вихідна напруга перебувала у межах 2–6 В, чого недостатньо для прямого живлення, проте її можна використовувати для повільного заряджання акумулятора або суперконденсатора.

У проєкті визначено, що для більшості підсистем, таких як мікроконтролери, датчики, бездротові передавачі та блоки обробки даних, достатньою та оптимальною є стабілізована напруга 5 В. Це значення було обране як основне, зважаючи на універсальність і широке поширення відповідної елементної бази. Окрім того, завдяки обмеженому рівню живлення з'явилася можливість використовувати легші сонячні елементи, зменшити обсяг буферних компонентів, спростити тепловий режим і знизити загальну вагу системи, що позитивно впливає на аеродинамічні характеристики БПЛА.

					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Щоб забезпечити стабільне живлення при змінному рівні напруги, було реалізовано схему імпульсного підвищувального перетворювача. Його основною функцією є приведення коливної напруги сонячної панелі до фіксованого значення 5 В. Такий тип перетворювача працює з високим коефіцієнтом корисної дії – до 90–95 %, завдяки імпульсному режиму. Крім того, пристрій захищає навантаження від можливих перенапруг і сприяє ефективному збереженню енергії. Під час моделювання було випробувано кілька варіантів схем, що використовували ШІМ-контролери типу XL6009 та МТ3608. Особливу увагу приділено вибору параметрів ключових елементів: індуктивностей, конденсаторів та діодів Шотткі, що дозволило досягти мінімального рівня пульсацій і високої стабільності вихідної напруги.

Результати досліджень підтвердили доцільність використання сонячних панелей як основного або допоміжного джерела енергії в автономних системах живлення. Їх можна ефективно інтегрувати в енергетичну архітектуру дрона, особливо в поєднанні з іншими видами енергозбору, такими як перетворення енергії з радіочастотного випромінювання. Такий комбінований підхід дозволяє підвищити енергетичну незалежність, розширити умови експлуатації апарату та забезпечити стабільну роботу впродовж тривалого часу, навіть у разі зміни зовнішніх умов.

3.3 Підвищувальний перетворювач і стабілізатор

DC-DC підвищувальний перетворювач (boost-converter) є ключовим компонентом системи енергоживлення, оскільки забезпечує перетворення низької вхідної напруги від сонячної панелі або РЧ-модуля в стабільну напругу, придатну для живлення апаратури БПЛА. Його основна функція – підвищити вхідну напругу до заданого рівня, незважаючи на коливання вхідних параметрів, що виникають через змінну освітленість або нестабільність РЧ-сигналу.

					КПТР.210120.01.03	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Така конфігурація дозволяє ефективно підвищувати рівень вхідної напруги з одночасним забезпеченням стабільного вихідного сигналу, що критично важливо для живлення електронних компонентів БПЛА.

Основні компоненти схеми:

- Індуктор L1 – елемент накопичення енергії. Під час проходження струму індуктор накопичує енергію у вигляді магнітного поля. Після розриву ланцюга він віддає накопичену енергію в ланцюг навантаження.

- MOSFET Q1 – електронний ключ, керований сигналом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ, PWM). Його відкриття та закриття формують цикли накопичення та передачі енергії.

- Діод D1 – дозволяє струму проходити в одному напрямку після розриву кола, запобігаючи зворотному струму.

- Конденсатори C1, C2 – згладжують пульсації вихідної напруги, забезпечуючи стабільне живлення навантаження.

- Резистори R1 та R2 – використовуються як елементи навантаження, а також як частина стабілізуючої схеми вихідної напруги.

- Стабілізатор напруги – забезпечує постійну вихідну напругу, необхідну для надійної роботи підключених пристроїв (напр., контролера БПЛА або телекомунікаційного модуля).

Принцип роботи

Робота підвищувального перетворювача базується на двофазному циклі:

Стан 1 – MOSFET Q1 увімкнено:

- Транзистор проводить струм, і джерело напруги живить індуктор L1.
- Індуктор накопичує енергію у вигляді магнітного поля.
- Струм через індуктор зростає лінійно.
- В цей момент діод D1 заблокований, і струм не проходить до навантаження.

Стан 2 – MOSFET Q1 вимкнено:

					КПТР.210120.01.03	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Потік струму через індуктор переривається, і через явище самоіндукції виникає підвищена напруга на індукторі.
- Ця напруга відкриває діод D1, і енергія передається до навантаження через конденсатор C2.
- Таким чином, вихідна напруга складається з напруги джерела живлення та додаткової напруги індуктора.

$$\frac{(U_{ex} - U_{VT})t_{вкл}}{L_1} = \frac{(U_{вих1} - U_{ex} + U_D)t_{вих1}}{L_1} \quad (3.1)$$

Якщо $t_{вих1} = 1 - t_{вкл}$, вихідна напруга через резистор R1:

$$U_{вих1} = \frac{(U_{ex} - U_{VT})t_{вкл}}{1 - t_{вкл}} - U_D \quad (3.2)$$

де U_D – це падіння напруги на діоді D1;

U_{VT} – падіння напруги на транзисторі MOSFET Q1;

$U_{вих1}$ – це вихідна напруга через резистор R1.

Щоб стабілізувати вихідну напругу після перетворення, застосовується схема з резистором R2 та стабілізатором напруги:

$$U_{вих2} = U_{cm} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (3.2)$$

де U_{cm} – опорна напруга стабілізатора

Алгоритм MPPT. Для максимально ефективного використання енергії з сонячної панелі застосовується алгоритм MPPT (Maximum Power Point Tracking – відстеження точки максимальної потужності). Його завдання — автоматично

					КПТР.210120.01.03	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

регулювати робочий цикл (duty cycle) транзистора таким чином, щоб забезпечити роботу сонячної панелі в її оптимальній точці потужності. Це особливо важливо при змінних умовах освітленості.

Основні методи реалізації MPPT:

- Perturb & Observe (P&O)
- Incremental Conductance (IncCond)
- Fuzzy Logic або Neural Network підходи — у складніших системах

У моделі в **Proteus** передбачено керування транзистором за допомогою модуля PWM, який дозволяє змінювати робочий цикл відповідно до параметрів вихідної напруги.

Переваги використання DC-DC перетворювача:

- Забезпечення стабільної напруги живлення при змінній вхідній напрузі;
- Можливість живлення від низьковольтних джерел (наприклад, при сутінках або слабкому РЧ-сигналі);
- Підвищення коефіцієнта корисного використання енергії.

3.4 Проектування гібридної системи збору енергії

Запропонована система збору енергії реалізує концепцію гібридного енергоживлення, що поєднує два відновлювані джерела – сонячну енергію та радіочастотну. Такий підхід дозволяє суттєво підвищити енергетичну автономність безпілотного літального апарата, особливо в умовах тривалого перебування у повітрі або віддаленого місця використання, де неможливо здійснити швидку заміну акумулятора.

3.4.1 Архітектура гібридної системи

					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

На рисунку 3.1 зображено структурну схему запропонованої гібридної системи. У ній об'єднано дві окремі гілки перетворення енергії, кожна з яких включає специфічні компоненти для збору та стабілізації напруги:

Сонячна гілка:

- Фотовольтаїчні панелі (гнучкі, легкі, інтегровані в корпус БПЛА).
- DC-DC підвищувальний перетворювач.
- Система MPPT (Maximum Power Point Tracking) – алгоритм, який постійно аналізує умови освітлення та змінює робочий цикл перетворювача для досягнення максимальної потужності.

РЧ-гілка:

- Приймальна антена (залежно від частоти – широкопasmовоа або спрямована).
- Схема узгодження імпедансів для мінімізації відбиттів сигналу.
- Випрямляч з семиступеневим множником напруги (Voltage Multiplier, VM), який дозволяє отримати постійну напругу з радіочастотного сигналу.
- Фільтри для зменшення пульсацій та шуму на виході.

3.5 Вибір електронних компонентів та структурна схема

Сонячна частина системи функціонує за рахунок перетворення сонячного світла у електроенергію за допомогою фотоелементів. Задля зменшення ваги системи та кращої інтеграції з корпусом БПЛА було обрано гнучкі тонкоплівкові панелі, які не впливають суттєво на аеродинаміку дрона. Наприклад, у дослідженні [25] зазначено, що поєднання перовскітних елементів з CIGS-технологією дозволяє досягати ефективності до 23%, що є надзвичайно перспективним для малих автономних систем.

РЧ-частина побудована на базі семиступеневого множника напруги, що складається з діодів та конденсаторів, які послідовно накопичують та випрямляють змінну напругу. Завдяки високочастотній природі РЧ-сигналу

					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

(часто в діапазоні кількох сотень МГц) можливо використовувати мікросмушкові антени, що не займають багато місця та легко інтегруються в конструкцію БПЛА.

Принцип комбінованого живлення. Обидві гілки системи – сонячна та РЧ – подають напругу до спільного DC-шинного вузла, де вона стабілізується. Стабілізація здійснюється за допомогою швидкодіючих регуляторів напруги, які усувають пульсації та гарантують сталість живлення навіть при флуктуаціях джерел. У системі реалізовано пріоритетне живлення від сонячного джерела, яке забезпечує більшу потужність, а РЧ-енергія використовується як допоміжне джерело або резерв на випадок зниження інсоляції.

MOSFET-ключі, що працюють на високій частоті, забезпечують ефективне комутування енергії в DC-DC перетворювачах та зменшення втрат у системі. Відповідні керувальні алгоритми адаптивно змінюють параметри імпульсів у залежності від поточних умов (інтенсивність світла, сила РЧ-сигналу тощо).

Для тестування ефективності гібридної системи використано реальні параметри дрона, оснащеного акумулятором TB55, що має:

- Ємність: 7660 мА·год
- Номінальна напруга: 22,8 В
- літій-полімерна батарея

Використання гібридної системи дозволяє:

- Зменшити навантаження на основну батарею, що подовжує її ресурс.
- Підтримувати навігаційні та зв'язкові системи в енергозалежному режимі навіть при зниженні основної напруги.
- Підвищити загальний час автономного польоту до 10–20% у сприятливих умовах (ясна погода + наявність РЧ-сигналів).

3.6 Висновок до третього розділу

У третьому розділі було здійснено моделювання основних підсистем гібридної системи живлення для безпілотного літального апарата, яка поєднує

					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

радіочастотне та сонячне енергозбирання. Результати моделювання підтвердили працездатність та доцільність обраного підходу до автономного живлення.

Модель збору РЧ-енергії реалізовано на основі антени, схеми узгодження та семиступеневого множника напруги, що дозволяє ефективно перетворювати слабкий змінний сигнал у постійну напругу. Використання пасивних компонентів (діодів та конденсаторів) забезпечує простоту реалізації та компактність схеми.

Сонячна підсистема побудована з урахуванням особливостей роботи фотоелементів за різних умов освітлення. Було обґрунтовано вибір напруги 5 В як базової для живлення системи, що дозволило оптимізувати вагу та енергоефективність.

Особливу увагу приділено стабілізації вихідної напруги, необхідної для подальшого живлення електроніки та акумуляторів БПЛА. Усі елементи системи об'єднано в єдину архітектуру гібридного живлення, яка забезпечує паралельну роботу РЧ та сонячного каналів.

					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ

У цьому розділі представлено результати моделювання основних елементів системи енергозбирання та її практичної реалізації. Розглянуто окремі складові системи, а також їхню інтеграцію в єдину гібридну структуру. Проведено порівняння ефективності різних варіантів реалізації та сформульовано рекомендації щодо подальшого вдосконалення.

4.1 Моделювання використання сонячної енергії

На першому етапі дослідження було змодельовано систему збору енергії з використанням сонячної панелі як джерела живлення. Метою цього етапу було визначення можливості використання фотоелектричного модуля для заряджання акумуляторної батареї безпілотного літального апарата (БПЛА) та забезпечення необхідних електричних параметрів на виході.

У моделюванні використовувалася стандартна сонячна панель із номінальною вихідною напругою 5 В у умовах оптимального освітлення. Однак ця напруга є недостатньою для прямого заряджання акумулятора БПЛА DJI Matrice M200-V2, що потребує вищої напруги. Для вирішення цього завдання в схемі було реалізовано DC-DC підвищувальний перетворювач (boost converter), який забезпечує підняття напруги до необхідного рівня.

Результати симуляції підтвердили ефективність обраного підходу. Згідно з даними моделювання у середовищі Proteus, протягом перших 40 секунд напруга на виході системи поступово зростає з початкових 5 В до 15,32 В. Водночас, вихідний струм зростає до 0,6963 А, що є достатнім для заряджання акумуляторної батареї за умови стабілізованого живлення (рис. 4.1).

Проте, в процесі моделювання було виявлено, що вихідна напруга перетворювача схильна до коливань у динамічних режимах роботи. З метою

					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

забезпечення стабільної напруги на виході та захисту акумуляторного елемента від перенапруги, до схеми було додано стабілізатор напруги, що дозволяє зменшити пульсації та підвищити надійність живлення.

Таким чином, результати моделювання засвідчили, що використання сонячної енергії в поєднанні з підвищувальним перетворювачем та стабілізатором є ефективним методом попереднього підзаряджання акумуляторної батареї БПЛА в умовах зовнішнього освітлення. Однак залежність від рівня інсоляції обмежує стабільність надходження енергії, що зумовлює необхідність використання додаткових джерел енергії, зокрема радіочастотного збору енергії, для побудови гібридної системи.

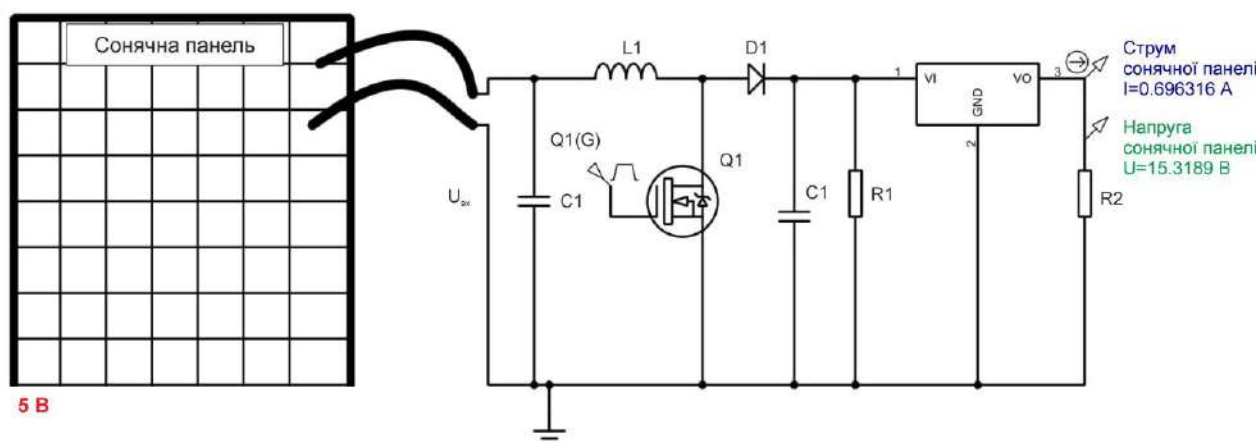


Рисунок 4.1 – Вихідна напруга та струм сонячної системи після підвищувального перетворювача

Зважаючи на те, що отримана вихідна напруга після роботи підвищувального перетворювача становить 15,32 В, вона є недостатньою для ефективного заряджання акумулятора безпілотного літального апарата DJI Matrice M200-V2, який вимагає мінімальної напруги заряджання 22,8 В. Це свідчить про обмежені можливості використання лише сонячної енергії в умовах стандартного освітлення без залучення більш потужних фотоелементів або складних схем послідовного з'єднання сонячних панелей.

Крім того, в умовах змінної інсоляції (наприклад, у похмуру погоду або при польоті в затінених ділянках) продуктивність фотоелектричних елементів значно знижується, що негативно впливає на стабільність живлення системи. У поєднанні з вимогами до потужності та надійності автономного джерела енергії для БПЛА це обумовлює неможливість використання виключно сонячної енергії як єдиного джерела живлення.

Таким чином, виникає необхідність застосування гібридного підходу, при якому до системи сонячного енергоживлення додається додаткове джерело збору енергії, зокрема радіочастотне (RF) енергозбирання. Комбінування двох незалежних джерел дозволяє:

- забезпечити більш стабільне та потужне енергоживлення в різних умовах експлуатації;
- підвищити сумарну вихідну напругу та струм;
- підвищити ефективність заряджання акумулятора БПЛА;
- зменшити залежність від погодних та просторових факторів.

4.2 Моделювання процесу збору енергії з радіочастотного випромінювання

На другому етапі дослідження було проведено імітаційне моделювання роботи системи збору енергії з радіочастотного (RF) випромінювання. Даний процес передбачає перетворення низькорівневих електромагнітних коливань, присутніх у навколишньому середовищі, у корисну постійну електричну енергію. Основним елементом конструкції модуля енергозбору виступає багатокаскадний випрямляч-множник напруги, реалізований на базі діодних елементів та накопичувальних конденсаторів.

Система виконана за схемою Кокрофта-Волтона, яка забезпечує послідовне додавання потенціалів, що утворюються у кожному каскаді. Така конфігурація дозволяє суттєво підвищити вихідну напругу навіть при наявності дуже низької амплітуди вхідного сигналу. У процесі моделювання було

					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

досліджено вплив кількості каскадів на рівень напруги на виході системи. За результатами симуляцій отримані наступні значення постійної напруги:

- при одному каскаді – 0,85 В;
- при трьох каскадах – 1,62 В;
- при п'яти каскадах – 2,40 В;
- при семи каскадах – 4,22 В (максимальне значення без навантаження).

Як видно з рисунка 4.2, вихідна напруга системи збору РЧ-енергії зростає із збільшенням кількості каскадів у схемі діодного випрямляча-множника. Така залежність пояснюється послідовним накопиченням електричного потенціалу на кожному каскаді, що забезпечує поступове підвищення рівня постійної напруги на виході системи.

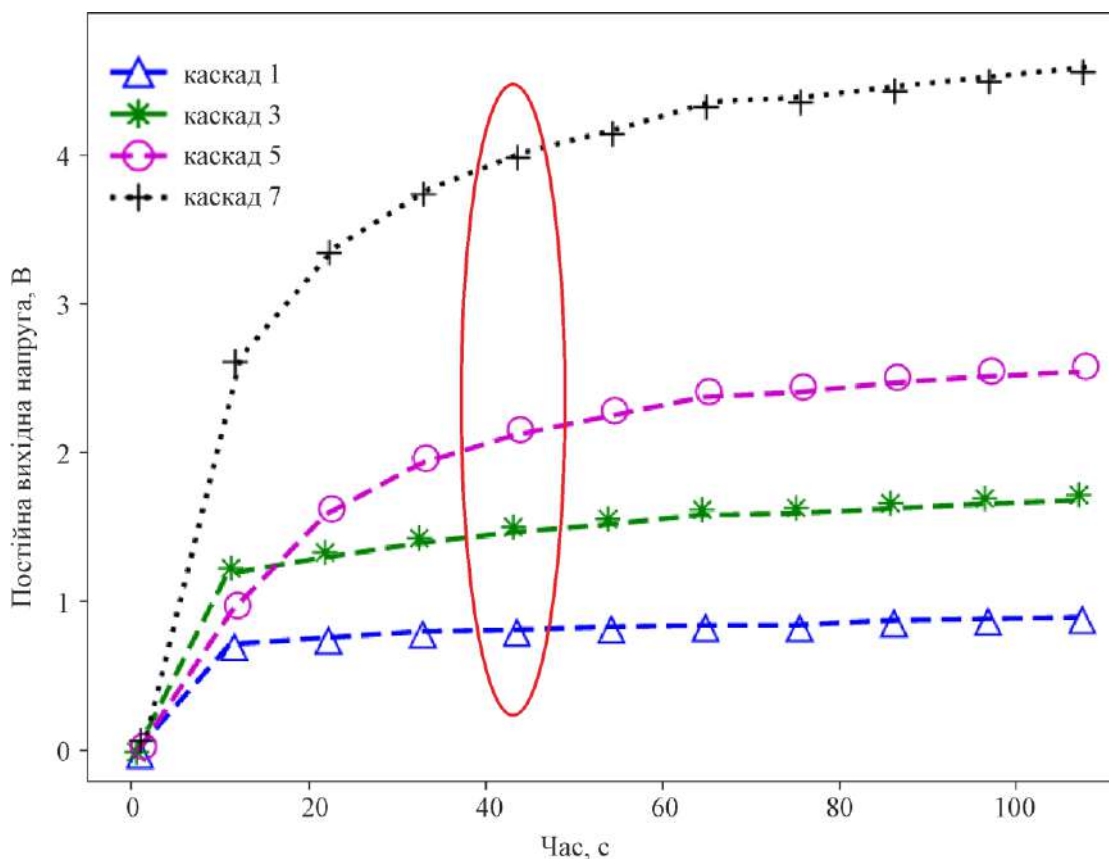


Рисунок 4.2 – Графік залежності вихідної постійної напруги РЧ-енергозбирача від кількості каскадів у схемі випрямляча-множника

Водночас, з урахуванням реальних експлуатаційних умов, таких як наявність паразитних опорів, падіння напруги на діодах і внутрішній опір джерела, ефективне значення напруги знижується. При моделюванні повного семикаскадного варіанта з навантаженням та тривалістю роботи 40 секунд, стабілізоване значення напруги на виході склало 3,68 В. Це демонструє наявність втрат, пов'язаних із внутрішніми обмеженнями елементів схеми, а також динамікою накопичення заряду в системі.

З метою підвищення корисної напруги до рівня, придатного для живлення електронних пристроїв або заряджання акумуляторів, на вихід випрямляча було підключено DC-DC підвищувальний перетворювач (boost converter). У результаті перетворення вихідна напруга зросла до 9,77 В, що суттєво перевищує рівень напруги після множника. Одночасно було зафіксовано струм навантаження 0,48 А, що свідчить про здатність системи забезпечувати відносно потужне навантаження при ефективному перетворенні.

Незважаючи на досягнуті результати, слід зазначити, що отримані параметри є недостатніми для прямого заряджання акумуляторної батареї безпілотного літального апарата DJI Matrice M200-V2, яка потребує вищого рівня напруги та більшої потужності. Проте, враховуючи гібридний характер системи живлення, до якої входить також сонячна підсистема, РЧ-модуль може успішно виконувати функцію додаткового джерела енергії. Його застосування доцільне у наступних випадках:

- компенсація нестачі потужності при недостатньому сонячному освітленні, зокрема в умовах хмарності, тіней або у вечірній/нічний час;
- підживлення окремих функціональних вузлів безпілотника з метою зменшення навантаження на основне джерело живлення;
- забезпечення резервного або аварійного енергопостачання критичних систем або сенсорних блоків.

Таким чином, результати моделювання підтверджують, що технологія збору енергії з радіочастотного випромінювання є перспективним додатком до

					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

гібридних систем енергозабезпечення для автономних електронних пристроїв і безпілотних літальних апаратів, які функціонують у середовищах зі складними умовами доступу до основних джерел енергії.

Основні характеристики, що були використані при моделюванні сонячної підсистеми енергозбирання, наведено у таблиці 4.1. У ній вказані ключові параметри фотоелемента, які впливають на ефективність перетворення сонячної енергії у електричну.

Таблиця 4.1 – Основні параметри моделі сонячного енергозбирання

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці вимірювання
Вихідна напруга сонячної панелі	$U_{\text{вх}}$	5,00	В
Вихідна напруга перетворювача	$U_{\text{вих}}$	15,32	В
Вихідний струм	$I_{\text{вих}}$	0,6963	А
Час стабілізації вихідної напруги	$t_{\text{стаб}}$	40	с
Тип перетворювача	–	Підвищувальний	–
Наявність стабілізатора	–	Так	–

4.3 Результати моделювання гібридної системи

Запропонована гібридна система енергозбирання об'єднує два джерела енергії – сонячну панель та РЧ-енергозбір – із метою забезпечення стабільного та ефективного живлення для акумуляторної системи безпілотного літального апарата. Обидва джерела з'єднуються через інтегрований підвищувальний DC-DC перетворювач, який виконує функцію узгодження рівнів напруги, а також через стабілізатор напруги, що забезпечує постійні параметри вихідного живлення, незалежно від змін у потужності вхідних джерел.

Такий підхід дає змогу:

- Підвищити надійність системи живлення за рахунок резервування джерел (у разі зменшення інтенсивності сонячного світла система може частково житись від РЧ-енергії);

- Оптимізувати ефективність перетворення енергії завдяки спільній точці регулювання;

- Забезпечити стабільні вихідні параметри, необхідні для заряджання акумулятора БПЛА, з урахуванням характеристик ємності, робочої напруги та струму заряджання.

Згідно з результатами комп'ютерного моделювання (рис. 4.3 та 4.4), вихідна напруга системи вже через 1 секунду після запуску стабілізується на рівні 23,15 В, а вихідний струм – на рівні 1,05 А. Ці параметри повністю відповідають технічним вимогам до акумуляторної батареї, що застосовується в обраному типі БПЛА, зокрема щодо напруги живлення, граничного струму заряджання та профілю безпеки заряду.

Крім того, аналіз динамічних процесів у перехідному режимі функціонування системи вказав на низку важливих характеристик, що підтверджують високу якість і надійність запропонованої гібридної архітектури. В процесі моделювання було виявлено, що при зміні режимів роботи системи, зокрема під час переходу від початкового стану до стаціонарного режиму, відсутні різкі коливання як напруги, так і струму на виході. Це свідчить про стабільність функціонування підвищувального DC-DC перетворювача, що, своєю чергою, зменшує ризик пошкодження елементів живлення та електронних компонентів системи, підвищуючи довговічність та надійність загальної конструкції.

Також було зафіксовано високий коефіцієнт перетворення енергії на початкових етапах запуску системи. Це є надзвичайно важливим фактором для безпілотних літальних апаратів, які можуть запускатися в умовах обмеженої енергії або перебувати тривалий час у стані очікування. Ефективне використання

наявної енергії в перші секунди дозволяє системі оперативно переходити у робочий стан без потреби у зовнішньому живленні.

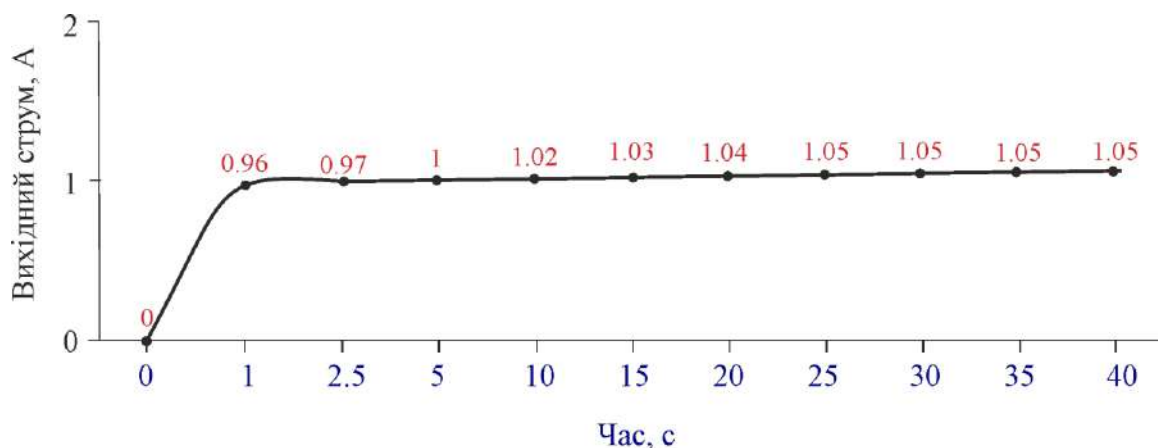


Рисунок 4.3 – Часова характеристика вихідного струму гібридної системи

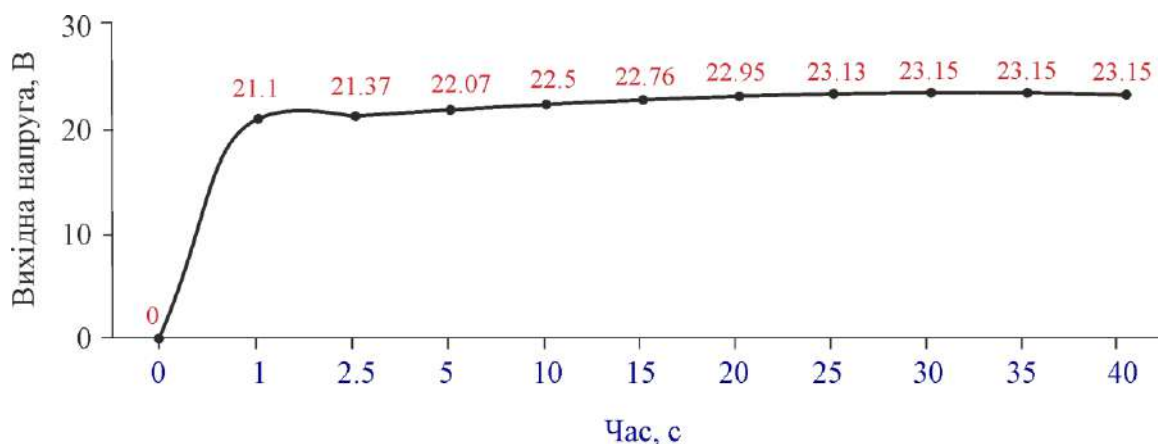


Рисунок 4.4 – Часова характеристика вихідної напруги гібридної системи

Особливої уваги заслуговує ефективна взаємодія між джерелами енергії — сонячною панеллю та РЧ-енергозбирачем. Аналіз показав відсутність конфліктів між джерелами при паралельному підключенні до перетворювального модуля. Система не демонструє ознак перевантаження, зворотного струму або небажаних перехресних впливів між каналами живлення. Це свідчить про грамотно

реалізовану архітектуру поєднання джерел із врахуванням електричних характеристик кожного з них, а також про правильне узгодження імпедансів та використання захисних схем.

Таким чином, результати моделювання підтверджують, що запропонована гібридна система енергоживлення здатна забезпечити автономну, стабільну та енергоефективну роботу безпілотних літальних апаратів у різних умовах експлуатації. Її використання особливо доцільне в складних середовищах, де доступ до традиційних джерел енергії обмежений або переривчастий, зокрема в пошуково-рятувальних операціях, моніторингу навколишнього середовища чи розвідці.

4.4 Порівняльний аналіз ефективності

Для оцінки ефективності функціонування розробленої гібридної системи енергозбирання було проведено чисельне моделювання її роботи в двох різних конфігураціях. Перший варіант передбачав безпосереднє використання енергії, отриманої з РЧ-сигналів через багатокаскадний випрямляч, без додаткової обробки. У другому варіанті до виходу множника напруги було підключено DC-DC підвищувальний перетворювач (boost converter), який забезпечує додаткове збільшення рівня постійної напруги до значень, необхідних для живлення реального навантаження.

У процесі моделювання аналізувалися такі параметри, як вихідна напруга, струм, потужність, стабільність напруги в часі, а також втрати на елементах схеми. Зокрема, увагу було зосереджено на впливі використання підвищувального перетворювача на загальний рівень вихідної потужності системи та її здатність до підтримання живлення в умовах низької енергонасиченості зовнішнього середовища.

Порівняльні результати, отримані у двох конфігураціях, подано у таблицях 4.2 та 4.3, де наведено числові значення ключових характеристик: напруги на

					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

даних з таблиці 4.2 підтверджує недостатність потужності в конфігурації без підвищення напруги для повноцінного живлення або заряджання акумулятора, і вказує на необхідність інтеграції DC-DC перетворювача для підвищення вихідних електричних параметрів системи.

Таблиця 4.3 – Вихідні параметри з підвищенням напруги

Система	Напруга (В)	Струм (А)
Сонячна	15,3	0,69
RF	9,77	0,48
Гібридна	23,15	1,05

Після впровадження підвищувального DC-DC перетворювача результати моделювання виявилися суттєво кращими у порівнянні з попередньою конфігурацією без перетворення напруги. Такий підхід дозволив компенсувати втрати, зумовлені низькою напругою на виході джерел енергії, і досягти значно вищих значень, придатних для практичного застосування в системах автономного живлення.

Зокрема, після застосування підвищувального перетворювача сонячне джерело забезпечило напругу на рівні 15,3 В. Це значення наближається до мінімального порогового рівня, необхідного для ефективного заряджання акумуляторної батареї безпілотного літального апарата, що дозволяє розглядати сонячну підсистему як потенційно самодостатнє джерело живлення за сприятливих умов освітлення.

Що стосується РЧ-енергозбирання, то у конфігурації з DC-DC перетворювачем також було зафіксовано покращення вихідних характеристик. Напруга досягла рівня 9,77 В при вихідному струмі 0,48 А. Такі показники свідчать про суттєве підвищення ефективності роботи РЧ-джерела, що робить його придатним для використання як допоміжне джерело живлення або для

заряджання менш потужних елементів системи живлення у нічний час або при обмеженому доступі до сонячної енергії.

Найвищі значення вихідних електричних параметрів було зафіксовано у гібридній конфігурації, яка поєднує обидва типи енергозбирання. Завдяки поєднаному ефекту та підвищувальному перетворенню, система досягла напруги 23,15 В при струмі 1,05 А. Такий рівень вихідних характеристик повністю відповідає вимогам до стандартного зарядного профілю акумуляторної системи безпілота DJI Matrice M200-V2. Це дозволяє розглядати запропоновану гібридну систему як перспективне рішення для створення автономної енергетичної підсистеми в умовах обмеженого доступу до традиційних джерел живлення.

Зіставлення даних у таблицях 4.2 та 4.3 демонструє суттєве зростання ефективності після застосування підвищувального перетворювача:

- Збільшення напруги в 2–3 рази для окремих джерел і майже в три рази для гібридної системи.
- Зростання струму у кілька порядків, особливо для сонячного і РЧ-компонентів.
- Гібридна система у комбінації з DC-DC перетворювачем забезпечує найкращий баланс напруги та струму, що дозволяє забезпечити стабільну роботу системи живлення безпілотного літального апарата навіть у змінних умовах навколишнього середовища.

Таким чином, інтеграція підвищувального перетворювача є ключовим етапом у розробці ефективної гібридної системи енергозбирання. Вона дозволяє реалізувати енергонезалежну архітектуру живлення для БПЛА, забезпечуючи стабільне заряджання, гнучкість у виборі джерел та підвищену надійність роботи у польових умовах.

Для ефективної реалізації гібридної системи енергоживлення доцільно врахувати кілька практичних аспектів, які підвищують надійність та ефективність її функціонування на борту БПЛА.

					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Одним із ключових напрямів є оптимізація розміщення джерел енергії на корпусі безпілотної літачки. Сонячні панелі повинні встановлюватися під оптимальним кутом до сонця, враховуючи середнє положення сонця протягом типового польоту, а РЧ-антени – орієнтуватися в напрямку найбільш ймовірних джерел радіочастотного випромінювання. Таке розташування дозволить забезпечити максимальний рівень енергозбору в реальних умовах експлуатації.

Для зменшення втрат потужності у системі енергоперетворення слід використовувати високоефективні DC-DC перетворювачі з сучасною схемотехнікою, зокрема із синхронними випрямлячами та вбудованими стабілізаторами напруги. Це дозволить стабілізувати вихідні параметри навіть при коливаннях вхідної напруги або змінах навантаження.

З метою забезпечення безпечного та ефективного заряду акумуляторів доцільно впровадити системи керування акумулятором (BMS), які контролюють рівень заряду, напругу на осередках, температуру та інші параметри. Такий підхід гарантує довговічність елементів живлення та запобігає небезпечним режимам експлуатації.

У сонячну підсистему рекомендується інтегрувати контролер відстеження точки максимальної потужності (MPPT). Це дозволить системі автоматично адаптуватися до змін освітлення й забезпечити оптимальне перетворення сонячної енергії навіть за хмарної погоди або при зміні кута падіння світла.

РЧ-ланцюг також потребує вдосконалення. Для зменшення ваги та габаритів системи слід провести мініатюризацію каскадного множника напруги, використовуючи SMD-компоненти з низьким внутрішнім опором. Крім того, доцільним є впровадження мікрополоскових технологій, які дозволяють реалізовувати компактні й малозумні схеми перетворення.

Окрему увагу слід приділити тепловому режиму роботи системи. Для запобігання перегріванню елементів перетворювача рекомендується передбачити ефективне тепловідведення – застосування радіаторів,

					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

термопрокладок або навіть пасивних систем охолодження. Це особливо актуально під час тривалих польотів у теплу пору року.

Нарешті, для забезпечення гнучкого керування енергопотоками та оперативного моніторингу стану системи бажано реалізувати програмну підтримку. Це може включати в себе вимірювання струмів і напруг у реальному часі, розрахунок ефективності окремих джерел живлення, а також автоматичне перемикання між ними залежно від умов роботи.

Реалізація наведених рекомендацій дозволить створити стабільну, адаптивну та енергоефективну систему живлення для сучасних безпілотних літальних апаратів, що працюють в автономному режимі.

4.5 Висновок до четвертого розділу

У даному розділі було проведено моделювання окремих підсистем збору енергії – сонячної та радіочастотної (RF), а також їх об'єднання в гібридну систему, призначену для живлення безпілотного літального апарата

Моделювання сонячної системи показало, що при вхідній напрузі 5 В сонячної панелі та застосуванні підвищувального перетворювача вихідна напруга може досягати 15,3189 В, а струм – 0,6963 А. Однак ці параметри все ще не відповідають вимогам живлення акумулятора БПЛА, що підтверджує необхідність додаткових джерел живлення.

Аналіз РЧ-системи засвідчив, що вихідна напруга залежить від кількості каскадів у схемі множника напруги. При використанні 7 стадій і часі стабілізації 40 секунд було досягнуто напруги 3,68 В та струму 0,48 А, що є кращими показниками порівняно з аналогами, але також не є достатніми для автономної роботи дрона.

Запропонована гібридна система, яка поєднує в собі сонячну та РЧ-енергію, продемонструвала значне покращення характеристик. Після стабілізації напруга досягла 23,15 В, а струм – 1,05 А, що є прийнятними параметрами для

					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

заряджання акумулятора M200-V2. Порівняльний аналіз підтвердив, що поєднання джерел енергії дозволяє суттєво підвищити ефективність системи в порівнянні з окремим використанням сонячного або РЧ-джерела.

Підсумовуючи, результати моделювання демонструють доцільність використання гібридної системи енергозбирання для БПЛА. Отримані вихідні параметри напруги та струму відповідають вимогам систем автономного живлення, що підтверджує перспективність обраного підходу та створює передумови для подальшої розробки фізичної реалізації цієї системи.

					КІТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

ВИСНОВКИ

У даному кваліфікаційному проєкті проведено комплексне дослідження проблеми забезпечення енергонезалежної роботи телекомунікаційного обладнання, що функціонує в умовах автономного розміщення, зокрема на базі безпілотних літальних апаратів. У зв'язку з обмеженим ресурсом традиційних джерел живлення, таких як акумулятори, зростає потреба у впровадженні інноваційних систем, здатних акумулювати енергію з навколишнього середовища та забезпечувати стабільне живлення впродовж тривалого часу.

В результаті аналітичного огляду існуючих систем живлення було з'ясовано, що класичні підходи, засновані на використанні лише акумуляторів або сонячних панелей, не забезпечують достатньої автономності для сучасних телекомунікаційних застосувань, особливо у віддалених або екстремальних умовах експлуатації. Як перспективний напрям обрано реалізацію гібридної системи енергозбирання, яка об'єднує можливості сонячного та радіочастотного збору енергії.

На основі теоретичного аналізу та моделювання розроблено структуру гібридної системи, що включає РЧ-модуль з семиступеневим множителем напруги, сонячну панель, підвищувальний перетворювач, стабілізатор та накопичувач енергії. Проведені моделювання показали, що поєднання двох джерел – РЧ та сонячного — забезпечує суттєво вищі вихідні параметри напруги та струму, що дозволяє ефективно заряджати акумулятор. Зокрема, сумарна вихідна напруга після стабілізації становить понад 23 В при струмі понад 1 А, що відповідає вимогам живлення телекомунікаційних пристроїв на борту безпілотних літальних апаратів.

Порівняльний аналіз ефективності окремих джерел живлення та їх поєднання підтвердив переваги гібридного підходу. Отримані результати свідчать про реальну доцільність використання таких систем у практиці, а також

					КПТР.210120.01.03	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відкривають нові можливості для вдосконалення автономних телекомунікаційних платформ.

Результати роботи мають практичну цінність і можуть бути використані як основа для створення дослідного зразка системи живлення, подальшої оптимізації її компонентів, а також впровадження в реальні проєкти з автономного розгортання телекомунікаційних мереж. У перспективі, подальше удосконалення гібридної архітектури, впровадження адаптивного енергоменеджменту та використання новітніх матеріалів дозволить ще більше підвищити ефективність таких систем і розширити сфери їх застосування.

					КІТР.210120.01.03	Арк.
						66
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Левченко В. О., Лобур М. В. Електроживлення телекомунікаційних систем. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2014. – 292 с.
2. Колесник С. М. Джерела живлення електронної апаратури. – Харків: УПА, 2011. – 248 с.
3. Данилюк А. А. Електроживлення радіоелектронних пристроїв. – Київ: КНЕУ, 2015. – 275 с.
4. Шахов Ф. Ф. Акумуляторні батареї в енергоживленні. – Одеса: ТЕС, 2012. – 178 с.
5. Стрижак А. С., Богомолів В. А. Сонячна енергетика: Основи та практичне використання. – Київ: Либідь, 2016. – 223 с.
6. Вдовиченко І. Б. Гібридні системи живлення електроніки. – Харків: НТУ "ХП", 2020. – 198 с.
7. Савченко А. П. Основи електропостачання телекомунікаційних об'єктів. – Київ: ДУТ, 2017. – 204 с.
8. Книш Ю. М. Фізичні основи напівпровідникової електроніки. – Київ: КНУ, 2013. – 296 с.
9. Овчаренко В. О. Альтернативні джерела живлення телекомунікацій. // Радіоелектроніка та інформатика. – 2019. – №2. – С. 53–59.
10. Довганюк І. В. Енергозбереження в телекомунікаціях: сучасні рішення. – Вінниця: ВНТУ, 2021. – 148 с.
11. Журба І. І. Використання сонячних панелей у телекомунікаційних системах. // Вісник ХНУРЕ. – 2020. – №4. – С. 65–70.
12. Ковальчук П. М. Високочастотні перетворювачі для систем живлення. – Київ: КПІ, 2019. – 132 с.
13. Ярошенко О. С. Підвищувальні перетворювачі в системах автономного живлення. // Сучасні проблеми радіотехніки. – 2021. – №1. – С. 40–48.
14. Мірошниченко, І. П. Основи теорії електричних перетворювачів. – Київ: Наукова думка, 2010. – 320 с.
15. Кравченко М. Л. Системи живлення БПЛА та телекомунікаційних вузлів. // Радіоелектронні технології. – 2022. – №3. – С. 33–39.

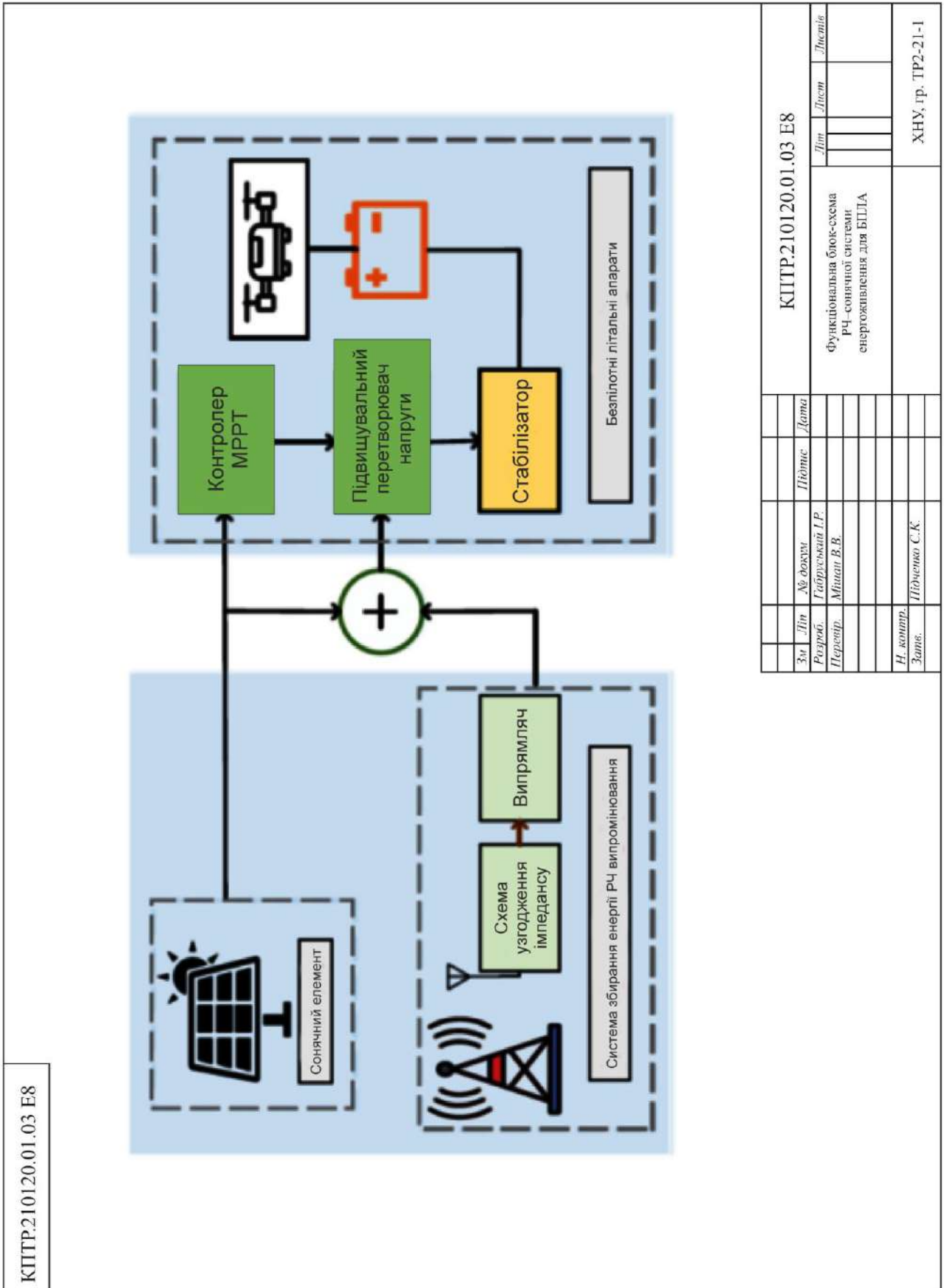
					КПТР.210120.01.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

16. Петренко Л. М. DC-DC перетворювачі для сонячних систем живлення. – Дніпро: ДНУ, 2020. – 174 с.
17. Горобець А. П. Енергоефективність автономних телекомунікаційних систем. – Київ: Техніка, 2022. – 180 с.
18. Сидоренко В. А. Стабілізатори напруги для телекомунікаційного обладнання. – Харків: УПА, 2019. – 150 с.
19. Марчук І. О. Розробка РЧ-множників напруги для енергозбирання. // Телекомунікаційні технології. – 2023. – №2. – С. 45–52.
20. Шевченко Ю. В. Перспективи впровадження гібридного живлення в Україні. // Вісник ХНУРЕ. – 2023. – №1. – С. 59–65.
21. Kim, H., Park, J. Hybrid Energy Harvesting Systems for IoT Applications. // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 13248–13261.
22. Mishra, D., De, D. Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks: A Review. // IEEE Sensors Journal. – 2018. – Vol. 18(10). – P. 4090–4102.
23. Visser, H. J., Vullers, R. J. M. RF Energy Harvesting and Transport for Wireless Sensor Network Applications: Principles and Requirements. // Proceedings of the IEEE. – 2013. – Vol. 101(6). – P. 1410–1423.
24. Shrestha, A. et al. Design of a High-Efficiency Multi-Stage Voltage Multiplier for RF Energy Harvesting. // IEEE Transactions on Circuits and Systems. – 2019. – Vol. 66. – P. 542–551.
25. Beker, L. et al. Energy Harvesting for Autonomous Systems: A Review of RF and Solar Techniques. // Advanced Materials Technologies. – 2021. – Vol. 6. – 2100345.
26. Chen, Y. et al. A Fully Integrated Solar Energy Harvester with MPPT for Low-Power Applications. // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2019. – Vol. 34(10). – P. 9404–9414.
27. Talla, V. et al. Powering the Next Billion Devices with RF Energy Harvesting. // Communications of the ACM. – 2017. – Vol. 60(3). – P. 83–90.
28. Bandyopadhyay, S., Chandrakasan, A. P. Platform Architecture for Solar, Thermal, and RF Energy Harvesting. // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2011. – Vol. 26(12). – P. 602–611.

ДОДАТКИ

Додаток Б

Функціональна блок-схема РЧ-сонячної системи енергоживлення для БПЛА



Додаток Г

Графіки динаміки та ефективності гібридної системи енергозбирання

КПТР.210120.01.03 E8

КПТР.210120.01.03 E8			
Зм.	Лист	Підпис	Дата
Розроб.	Габруський І.Р.		
Перевір.	Млиши В.В.		
Н. котир.	Подченко С.К.		
Затв.			

КПТР.210120.01.03 E8			
Лист	Лист	Листів	Листів

Графіки динаміки та ефективності гібридної системи енергозбирання

ХНУ, гр. ТР2-21-1



ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЄКТ

СИСТЕМА ЖИВЛЕННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ



Виконав:
студент 4 курсу,
група TP2-21-1
Ілля ГАБРУСЬКИЙ

Науковий керівник:
к.т.н., доцент
Віктор МІШАН

Система живлення телекомунікаційного обладнання

МЕТА ПРОЄКТУ:

Розробка гібридної системи збору енергії для підвищення автономності та енергоефективності телекомунікаційного обладнання шляхом комбінованого використання сонячної та радіочастотної енергії

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ:

Телекомунікаційне обладнання з обмеженим часом автономної роботи через енергоспоживання

ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ:

Гібридна система енергозбору та живлення, що включає сонячні панелі, RF-енергозбірники, семиступеневий множник напруги та DC-DC перетворювачі для стабілізації живлення

Система живлення телекомунікаційного обладнання

Актуальність

- Обмежений час автономної роботи телекомунікаційного обладнання через високе енергоспоживання
- Потреба у використанні відновлюваних джерел енергії

Основний зміст

- Гібридна система збору енергії:
 - Сонячні панелі
 - Радіочастотні (RF) енергозбірники
- Спільне живлення для стабільної роботи
- Семиступеневий множник напруги для RF-модуля

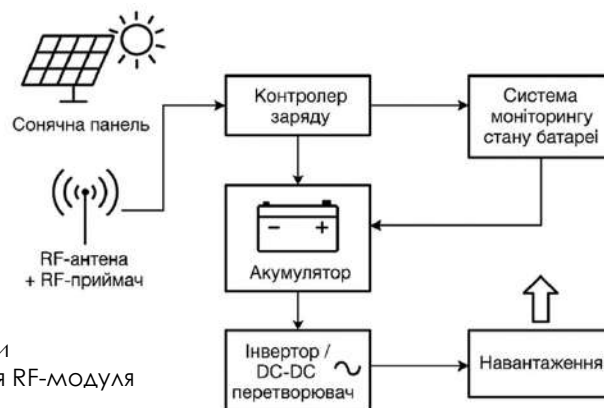


Рис. 1 – Приклад гібридної системи автономного живлення

Гібридна система енергозбору — ефективний спосіб збільшення автономності та енергоефективності телекомунікаційного обладнання

Збір енергії з навколишнього середовища для бездротової передачі енергії

Радіочастотне енергозбирання

- Збір енергії з навколишніх РЧ-сигналів
- **Компоненти системи:**
 - антена приймача
 - кола імпедансного узгодження
 - множник
- **Проблема:** Низька вихідна напруга постійного струму
- **Рішення:**
 - багатоступеневі множники напруги
 - широкопasmові та багатодіапазонні випрямлячі

Сонячна енергія:

- Найбільш доступне та чисте джерело
- **Проблеми:**
 - Залежність від погодних умов
 - Низька ефективність
- **Рішення:**
 - Техніки MPPT
 - Системи управління енергією
 - Підвищувальні перетворювачі
 - Оптимальний вибір матеріалів

Гібридна система

Гібридна система РЧ + Сонце:

Однчасне використання енергії від сонячного світла та RF-сигналів

Вихідна енергія використовується для заряджання акумулятора

Використані підходи:

- 7-ступеневий множник напруги на шотки-діодах
- Дводіапазонні випрямлячі з узгодженням імпедансу
- Гнучкі легкі випрямлячі з керуванням мікроконтролером

Переваги:

Безперервне живлення навіть уночі або за поганої погоди

Висока ефективність збору енергії завдяки комбінованим підходам

МОТИВАЦІЯ:

Потреба в автономному та безперебійному живленні

Збирання енергії радіочастотного діапазону

Основні компоненти системи:

- Антена приймача
- Схема імпедансного узгодження
- Випрямляч

Принцип роботи:

- Антена приймає РЧ сигнал
- Схема узгодження знижує втрати потужності між антеною і випрямлячем
- Випрямляч перетворює змінну напругу у постійну
- Множник напруги підвищує вихідну DC-напругу

7-ступенева схема множника напруги

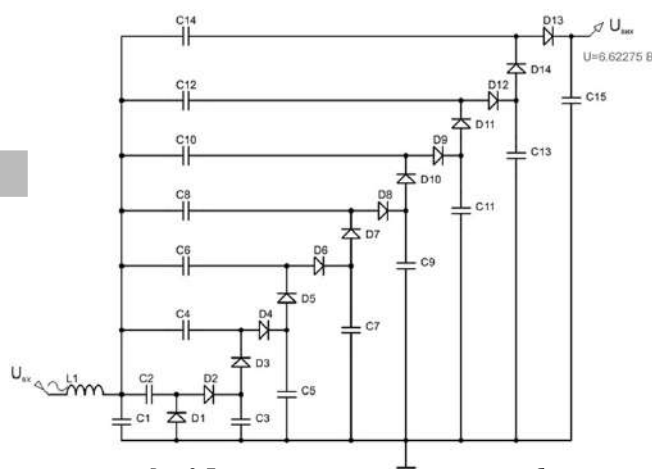


Рис. 2. Принципова електрична схема модуля збору енергії радіочастотного діапазону

Збір сонячної енергії

Вихідна напруга залежно від умов

- Сонячний день: 15–19 В
- Похмурий день: 8–12 В
- Ніч: 2–6 В

Фактори впливу:

- Тип панелі
- Інтенсивність сонячного світла
- Місце розміщення

Адаптація:

- Легка вага та енергоефективність системи
- Вибір $U_{\text{вих}}$: 5 В
- Використання підвищувальних DC-DC перетворювачів для стабілізації напруги

Принцип роботи:

- Сонячні панелі перетворюють світло на електрику через фотovoltaїчний ефект.
- Використовуються напівпровідникові матеріали.

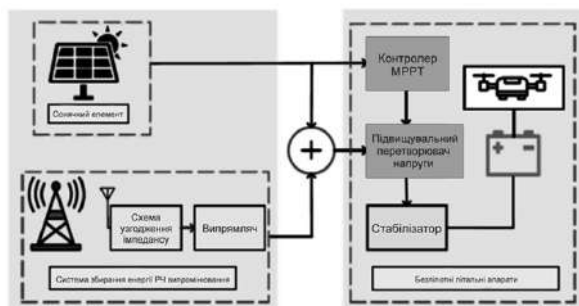


Рис. 3. Блок-схема гібридної РЧ-сонячної системи

Мета:

- Підвищення ефективності енергоживлення навіть у нічний час
- Мінімізація ваги та кількості компонентів

Підвищувальний перетворювач і стабілізатор напруг

Як працює:

📦 **Індуктор** зберігає енергію у вигляді магнітного поля

⚡ **MOSFET Q1** – ключ, який вмикається/вимикається для керування енергією

🌀 **MPPT-контролер** регулює роботу MOSFET для досягнення максимальної потужності

Призначення:

- ✓ Збільшує вихідну напругу порівняно з вхідною
- ✓ Забезпечує стабільне живлення ТК системи

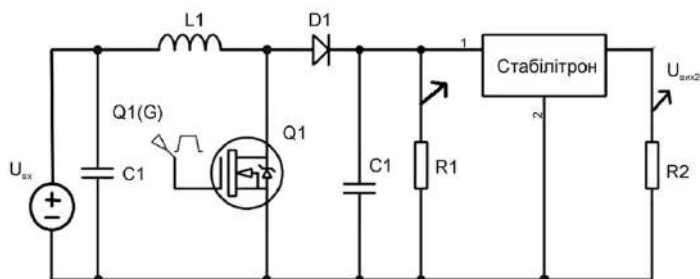


Рис. 4. Підвищувальний перетворювач DC-DC і стабілізатор напруг

Підвищувальний перетворювач: як це працює?

Два основні стани у циклі:

Стан 1:

- MOSFET **Q1** увімкнений
- Струм тече від джерела через індуктор **L1** та транзистор **Q1**
- Енергія накопичується в індукторі

Стан 2:

- MOSFET **Q1** вимкнений
- Енергія з індуктора **L1** передається через діод **D1**, конденсатор **C2** і навантаження **R1**
- Вихідна напруга підвищується

Стабілізація вихідної напруги

Навіщо потрібна стабілізація?

Після роботи підвищувального перетворювача вихідна напруга $U_{вих1}$ може бути нестабільною через зміни навантаження або вхідної напруги.

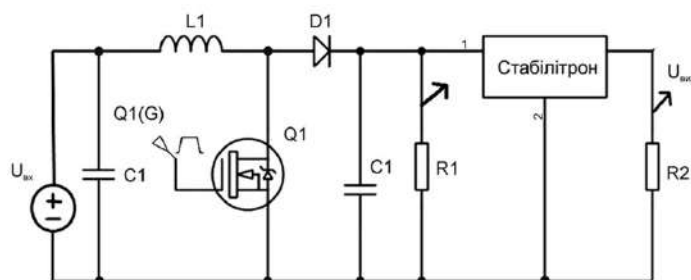


Рис. 4. Підвищувальний перетворювач DC-DC і стабілізатор напруг

Підвищувальний перетворювач: як це працює?

$$\frac{(U_{вх} - U_{VT})t_{вкл}}{L_1} = \frac{(U_{вих1} - U_{вх} + U_D)t_{відкл}}{L_1} \quad 1$$

Якщо $t_{відкл} = 1 - t_{вкл}$, вихідна напруга через резистор **R1**:

$$U_{вих1} = \frac{(U_{вх} - U_{VT})t_{вкл}}{1 - t_{вкл}} - U_D \quad 2$$

- ◆ Резистор **R2** - використовується як дільник напруги для контролю рівня вихідної напруги
- ◆ Стабілізатор напруги - підтримує стабільне значення $U_{вих2}$, незалежно від змін на вході

$$U_{вих2} = U_{ст} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad 3$$

- U_D - падіння напруги на діоді
- U_{Q1} - падіння напруги на транзисторі MOSFET
- $U_{вих1}$ - вих. напруга через навантаження **R1**

Для стабільної роботи:

- Після навантаження **R1** встановлюють стабілізатор
- Вимірюють $U_{вих2}$ через резистор **R2** для контролю

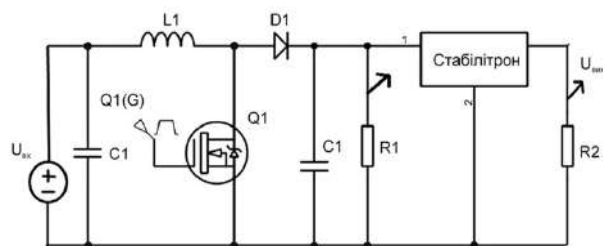


Рис. 4. Підвищувальний перетворювач DC-DC і стабілізатор напруг

Проектування гібридної системи збору енергії

Гібридна радіочастотно-сонячна система живлення



Мета

- збільшити час автономного польоту дрону, поєднуючи два джерела енергії.

Для цього обрана ефективна гнучка сонячна панель і 7-ступеневий множник напруги

Сонячна енергія збирається панелями, які створюють постійний струм

Проектування гібридної РЧ-сонячної система живлення

- Задано **вхідну напругу 5 В** від сонячної панелі.
- Через **підвищувальний перетворювач** напруга зросла до **15,3 В**, струм – до **0,7 А**.

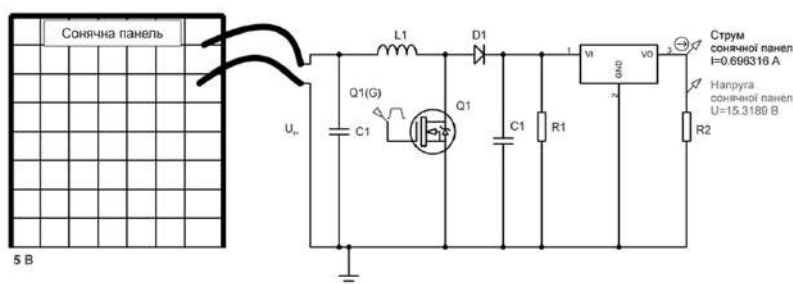


Рис. 5. Сонячна панель, підключена до підвищувального DC-DC перетворювача

⚠ Але:

- Після підвищення маємо **лише 15,3 В**, а для нормальної роботи **потрібно 22,8 В**.
- **Напруга нестабільна**, що **небажано для живлення електроніки**.

⚠ Рішення:

- Використали **стабілізатор**, щоб:
 - згладити напругу,
 - захистити електроніку дрона.

Результати симуляції РЧ-випрямляча

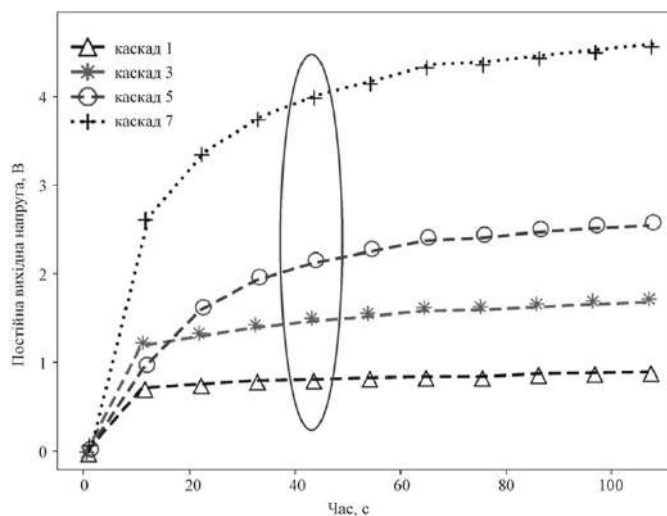


Рис. 6. Постійна напруга на виході в залежності від часу зростання у схемі множника напруги через каскади

- Вплив**
- 1 каскад → 0,85 В
 - 3 каскад → 1,62 В
 - 5 каскад → 2,4 В
 - 7 каскад → 4,22 В

Компроміс: напруга vs час

- Чим більше стадій — тим вища напруга, але довший час стабілізації
- Обрано: 7 каскадів, 40 секунд стабілізації
- Результат: 3,68 В стабільної напруги

Цього достатньо для підтримки роботи автономних пристроїв!

Запропонована гібридна система збору енергії



ефективна та перспективна для автономних енергосистем

Напруга та струм заряджання стабілізуються вже через 1 секунду

Це → прийнятний час, адже йдеться не про пряме живлення, а про заряд акумулятора.

⚡ Стабільні параметри після 1 секунди:

- ◆ Напруга: 23,15 В
- ◆ Струм: 1,05 А

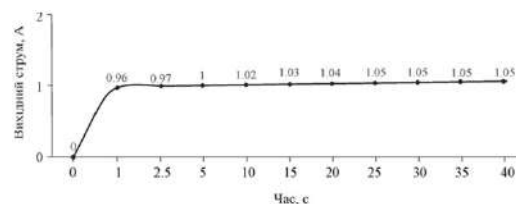


Рис. 7. Часова характеристика вихідного струму гібридної системи

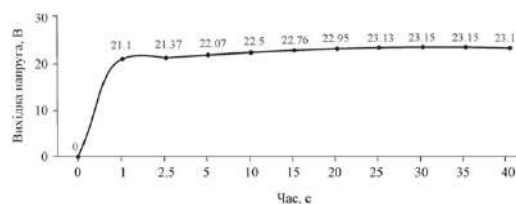


Рис. 8. Часова характеристика вихідної напруги гібридної системи

Порівняльний аналіз ефективності

Таблиця 1 – Вихідні параметри без підвищення напруги

Система	Напруга (В)	Струм (А)
Сонячна	5,00	$5,0 \times 10^{-12}$
РЧ	3,68	$3,68 \times 10^{-8}$
Гібридна	7,17	0,32

Таблиця 1 – Вихідні параметри з підвищення напруги

Система	Напруга (В)	Струм (А)
Сонячна	15,3	0,69
РЧ	9,77	0,48
Гібридна	23,15	1,05

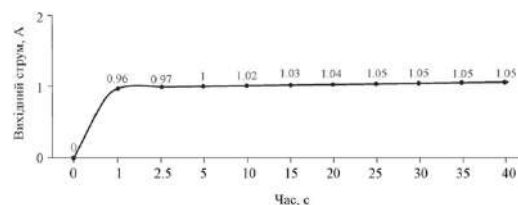


Рис. 7. Часова характеристика вихідного струму гібридної системи

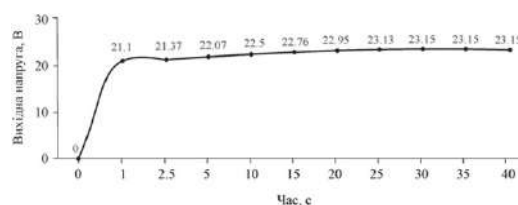
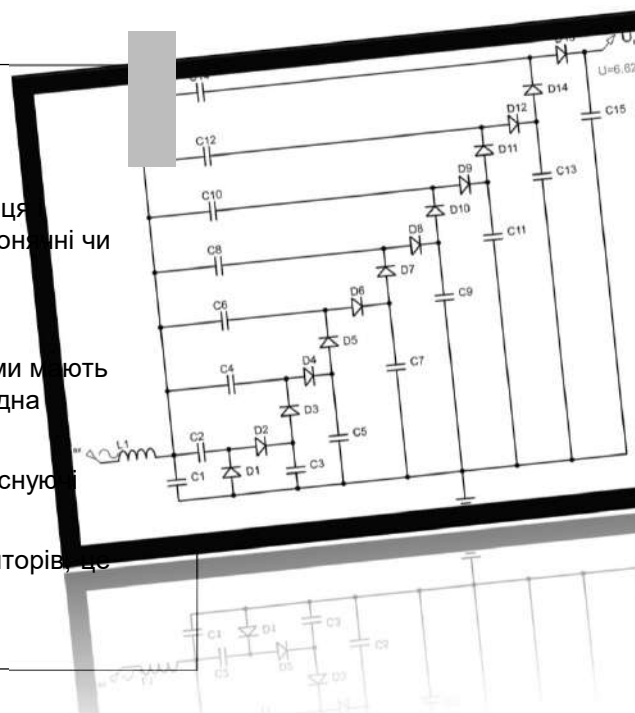


Рис. 8. Часова характеристика вихідної напруги гібридної системи

ВИСНОВКИ

- Гібридна система збирає енергію з сонця, радіохвиль і працює краще за окремі сонячні чи радіочастотні системи.
- Вона стабільно дає більше енергії
- Окремі сонячні чи радіочастотні системи мають періоди низької ефективності, які гібридна система долає.
- Система працює ефективно і вирішує існуючі проблеми.
- Поки що не враховано ємність акумуляторів, це потрібно дослідити далі.



ВІДГУК

на кваліфікаційний проект

студента групи ТР2-21-1 Габруського Іллі

«Система живлення телекомунікаційного обладнання»

Кваліфікаційний проект присвячений актуальній науково-технічній проблемі – створенню гібридної системи живлення телекомунікаційного обладнання з використанням відновлюваних джерел енергії. У роботі детально розглянуто існуючі рішення в цій галузі, проаналізовано сучасні технології енергозбирання, а також запропоновано власну архітектуру системи, яка поєднує сонячну панель, семиступеневий множник напруги для збору радіочастотної енергії та DC-DC перетворювач для стабілізації вихідної напруги.

У процесі виконання кваліфікаційного проекту студент продемонстрував високий рівень володіння теоретичним матеріалом, здатність до аналітичного мислення, вміння самостійно обґрунтовувати технічні рішення, а також навички роботи з сучасними програмними засобами моделювання. Важливою перевагою є застосування комплексного підходу до створення системи живлення, який враховує ефективність енергозбирання, стабільність вихідних параметрів, адаптацію до змін умов навколишнього середовища, а також практичну реалізованість запропонованих рішень.

Особливу увагу приділено можливості інтеграції розробленої системи в безпілотні літальні апарати, що дозволяє розширити сферу застосування даної розробки у телекомунікаційному секторі, зокрема в умовах віддалених регіонів, аварійного зв'язку або розгортання мереж у надзвичайних ситуаціях.

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 в області сучасних телекомунікацій, а здобувач Габруський Ілля заслуговує оцінки «відмінно».

Керівник:
к. техн. наук, професор



Віктор МИШАН

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНИЙ ПРОЕКТ

Дипломник: Габруський Ілля Романович

Тема роботи: Система живлення телекомунікаційного обладнання

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційного проекту

Кількість листів креслень 4 Кількість сторінок записки 69

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Кваліфікаційний проєкт присвячений розробці та аналізу гібридної системи живлення телекомунікаційного обладнання на базі відновлюваних джерел енергії. У межах роботи проведено аналіз існуючих систем живлення, розглянуто сучасні підходи до енергозбирання, обґрунтовано доцільність використання сонячних панелей та радіочастотного множника напруги в поєднанні з DC-DC перетворювачем. Запропоновано та змодельовано комбіновану систему, яка забезпечує стабільну напругу живлення для телекомунікаційного обладнання, зокрема для безпілотних літальних апаратів. Прийняті технічні рішення дозволили покращити ефективність енергозбирання та автономність роботи системи.

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: Кваліфікаційний проєкт виконано з використанням сучасних наукових підходів та інженерних методів. У першому розділі наведено аналіз існуючих систем живлення телекомунікаційного обладнання, з урахуванням тенденцій переходу до автономних та енергоефективних рішень. У другому розділі проаналізовано сучасні технології енергозбирання, включаючи RF-енергію та фотоелектричні джерела, з урахуванням новітніх розробок у сфері множників напруги. У третьому розділі обґрунтовано структуру гібридної системи та виконано її теоретичне проектування. Останній розділ присвячено моделюванню в середовищі електронного САПР, аналізу результатів роботи та оцінці ефективності запропонованої схеми. Робота заснована на використанні передових технічних рішень та новітніх джерел наукової інформації.

4. Позитивні сторони роботи: Робота присвячена актуальній темі створення енергоефективної гібридної системи живлення телекомунікаційного обладнання, зокрема для застосування в автономних платформах, таких як БПЛА. Відзначається комплексний підхід до аналізу, проєктування та моделювання системи, використання сучасних технологій енергозбирання, а також наявність практично цінних технічних рішень.

5. Негативні сторони роботи: Робота в цілому виконана на достатньо високому рівні, однак має деякі недоліки. Зокрема, потребує уточнення деяких технічних параметрів компонентів системи, не всі результати моделювання мають повне аналітичне обґрунтування, а в пояснювальній записці трапляються незначні стилістичні та форматувальні недоліки.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: немає

7. Відгук про роботу в цілому: В цілому кваліфікаційний проєкт 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 (5.00/А), а її автору Габруському Іллі, присвоєння кваліфікації бакалавра «Телекомунікації та радіотехніка»

10. Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, місце роботи) Корсезька І.О.,
доцент кафедри АРТ та Р, ХНУ

« 09 » червня 2025р.


підпис

Завідувачу кафедри телекомунікацій,
медійних та інтелектуальних технологій
д.т.н., професору ПІДЧЕНКУ Сергію
здобувача вищої освіти
ГАБРУСЬКИЙ Ілля
ФІТ, гр. ТР2-21-1

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 «Система живлення телекомунікаційного обладнання» в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

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

29 травня 2025 р.
дата


підпис

Anti-Plagiarism (UA) v-15.281 Educational

The maximum coincidence with one document 1.0%

Dictionaries check: en_US, ru_RU, ua_UA. Errors in the documents: 8%

ID: 243183 Title: Система живлення телекомунікаційного обладнання Added in a DB: 2025-06-03 Authors: Габруський Ілля Романович Heads: Мішан Віктор Володимирович Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	88694	1311	2367 (3%)	41 (3%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

Протокол аналізу звіту подібності експертом

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

Автор: Ілля ГАБРУСЬКИЙ

Співавтор:

Назва: Система живлення телекомунікаційного обладнання

Експерт: *Пивовар О.С.*

Підрозділ: Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

Коефіцієнт подібності 1:3.2%

Коефіцієнт подібності 2:0.9%

Мікропробіли: 0

Заміна букв: 11

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-06-04 14:14:27.0

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 процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування: *Виявлені запозичення не є плагіатом так як відносяться до термінологічних та загальнооб'єктивних словесних фраз*

Дата

04.06.2025р.

експерт

Пивовар О.С.

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

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

Назва кваліфікаційного проекту: Система живлення телекомунікаційного обладнання

Автор: Габруський Ілля Романович

Освітня програма Телекомунікації, медійні технології та інтелектуальні мережі

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Керівник кваліфікаційного проекту: к.т.н., доцент Мішан Віктор Володимирович

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.	відповідає
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 3,2% та 0,9%, а також мають посилання на приведений список літературних джерел.

«05» червня 2025 р.

Завідувач кафедри ТМІТ

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційного проекту

Сергій ПІДЧЕНКО

Віктор СТЕЦЮК

Віктор МІШАН