

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ
ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інформаційних технологій та електроніки

Кафедра інформаційних технологій та програмування

Пояснювальна записка
до магістерської дипломної роботи

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: Дослідження доцільності, методів та застосування ЛІС для
мініатюрних всесезонних датчиків

Виконав: студент 2 курсу, групи ЕЛ-24дм
171 «Електроніка»
(шифр і назва спеціальності)

Гирилюк Д.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Зінченко В.Л.
(прізвище та ініціали)

Рецензент Іванов В.Г.
(прізвище та ініціали)

Київ – 2025 року

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА
ДАЛЯ

Факультет інформаційних технологій та електроніки
Кафедра інформаційних технологій та програмування
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Спеціальність 171 «Електроніка»
(шифр і назва спеціальності)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІТП
_____ д.т.н., проф.Захожай О.І.
(підпис)
« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дипломну роботу студенту

Гирилюк Дмитро Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження доцільності, методів та застосування ЛІС для мініатюрних всесезонних датчиків.

керівник роботи к.т.н., Зінченко Володимир Леонідович,

(вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по батькові)

затверджені наказом університету від « 28 » 11 2025 року № 241/17.03

2. Строк подання студентом роботи: 18 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Матеріали науково-дослідної практики, науково-методична література, дані інтернет-мережі, офіційна документація

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

4.1 Вступ.

4.2 Аналітична частина.

4.3 Дослідження необхідної компонентної бази для побудови автономних датчиків.

4.4 Розрахунки моделей застосування.

4.4 Експериментальні дослідження.

4.5 Висновки.

4.6 Перелік використаних джерел.

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

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 05.11.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Одержання завдання на виконання роботи	05.11.2025	виконано
2.	Укладання і погодження з керівником плану і етапів виконання роботи	08.11.2025	виконано
3.	Узагальнення даних літературних джерел	12.11.2025	виконано
4.	Аналіз шляхів виконання завдання. Вибір і погодження з керівником оптимального шляху виконання завдання	18.11.2025	виконано
5.	Аналіз технічних засобів та існуючих систем	22.11.2025	виконано
6.	Реалізація практичної частини завдання	07.12.2025	виконано
7.	Укладання, оформлення та погодження пояснювальної записки з керівником	17.12.2025	виконано
8.	Надання пояснювальної записки на кафедрі	18.12.2025	виконано
9.	Підготовка доповіді та презентації	22.12.2025	виконано

Студент _____ Гирилюк Д.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Зінченко В.Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: сторінок 44, рисунків 18, схем електричних принципів 2, таблиць 8

Мета роботи: Пошук раціонального рішення для забезпечення автономного живлення мініатюрних датчиків в умовах зміни температур

Задача: Дослідити доцільність і можливість побудови мініатюрних та повністю автономних (з максимальним ресурсом) датчиків, які будуть працювати на вулиці в широкому діапазоні температур. Напрацювати рекомендації та методи проектування архітектури таких датчиків для забезпечення їх надійної роботи.

Об'єкт дослідження: Джерела живлення на основі LІС конденсаторів

Предмет дослідження: Методи і засоби безперебійної роботи автономних датчиків в умовах широкої зміни температур

Гіпотеза дослідження: Літій іонні конденсатори можуть бути найкращим чи одним із найкращих доступних варіантів на ринку електронних компонентів для побудови недорогих мініатюрних датчиків, які можуть працювати автономно на вулиці в тому числі при від'ємних температурах багато років і навіть десятиліття без будь-якого втручання.

ABSTRACT

The thesis addresses the problem of powering miniature autonomous sensors operating outdoors across a wide temperature range, including sub-zero conditions. The aim is to assess the feasibility of designing compact, fully autonomous sensor nodes with maximum lifetime and no need for human intervention. The research focuses on power-supply systems based on lithium-ion capacitors (LICs) and analyses their behaviour under varying temperature conditions.

The object of the study is LIC-based power sources, while the subject is methods and design approaches that ensure reliable, uninterrupted operation of autonomous sensors under significant temperature fluctuations. The central hypothesis is that lithium-ion capacitors can be the best, or one of the best, commercially available options for building low-cost outdoor sensor devices capable of operating autonomously for many years and even decades. Based on the obtained results, the thesis formulates practical recommendations and design guidelines for LIC-based architectures of long-lifetime sensor systems.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	9
1.1. Актуальність ринку IoT та аналіз проблеми.....	9
1.2. Аналіз існуючих комерційних рішень.....	11
1.3. Порівняльний аналіз елементів живлення для всепогодних датчиків.....	14
2. ДОСЛІДЖЕННЯ НЕОБХІДНОЇ КОМПОНЕНТНОЇ БАЗИ АВТОНОМНОГО ДАТЧИКА.....	16
2.1. Порівняльний вибір ємностей літій-іонних конденсаторів (LIC).....	16
2.2. Аналіз варіантів сонячних елементів.....	17
2.3. Дослідження архітектур підсистеми живлення.....	19
3. РОЗРАХУНКИ МОДЕЛЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ.....	22
3.1. Розрахунки споживання основних елементів.....	22
3.2. Оцінка ресурсу LIC-конденсатора на основі розрахованого енергоспоживання.....	27
3.3. Додаткові втрати.....	29
3.4. Уточнення та висновки.....	29
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	30
4.1. Опис еталонного датчика та моделей розряду.....	30
4.2. Розробка та опис вимірювального стенду.....	30
4.3. Логіка вимірювання.....	37
4.4. Результати досліджень.....	40
ВИСНОВКИ.....	41
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	42

ВСТУП

Ринок IoT пристроїв демонструє сталий зріст у всіх вертикалях. Як свідчить графік "Global IoT market forecast" від IoT Analytics (Вересень 2024), кількість активних IoT-підключень продовжує стрімко збільшуватися, прогнозуючи досягнення 41.1 мільярда пристроїв до 2030 року. [1]

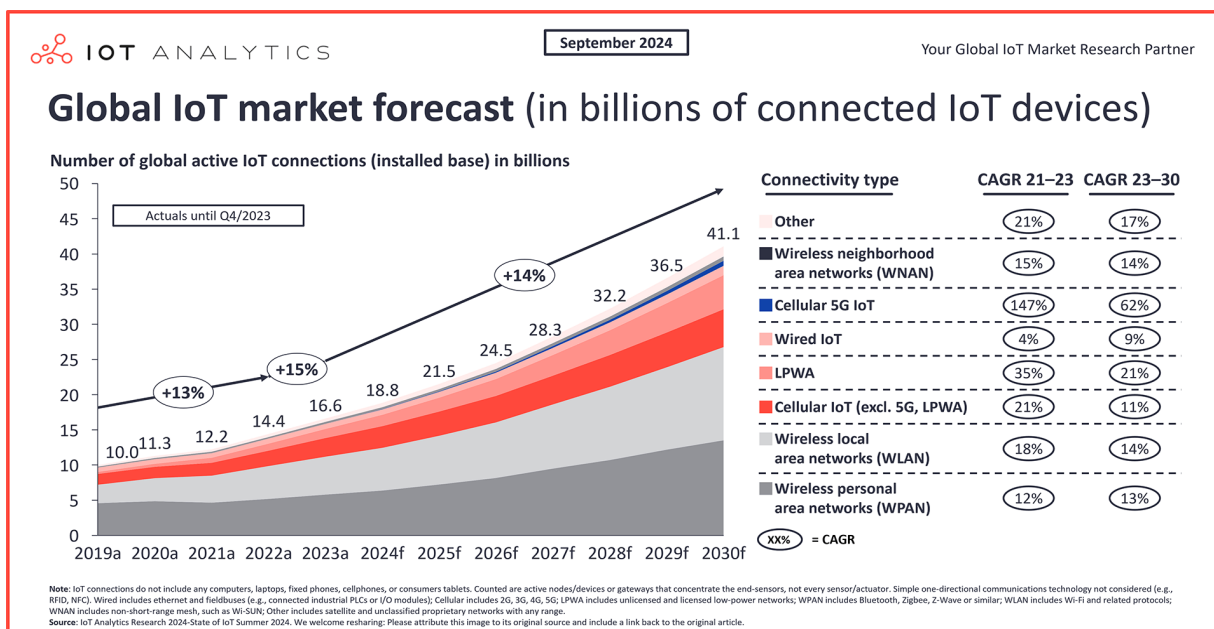


Рис.: Ринок IoT

Це формує попит на нові пристрої, а враховуючи розвиток ІШ в майбутньому, ця потреба може збільшитись, бо з часом людям не потрібно буде слідкувати за датчиками і при здешевшанні самих датчиків ця технологія стає економічно вигідною у всіх сферах. Потенційно, умовний ІШ сервіс за підпискою + набір датчиків можуть робити те, що робила окрема людина, і при цьому виключити "людський фактор".

Але якщо розвиток ІШ помітний, то датчики розвиваються нерівномірно. На ринку є багато рішень для реалізації кінцевого продукту (різні сенсори на кристалі, RF-чіпи), але сам кінцевий продукт іноді виходить з запізненням, навіть коли для цього є всі необхідні технології. Також завдяки появі подібних датчиків відкривається можливість появи "розумних парків", "розумних садів" та виноградників, де, наприклад, стан кожного дерева можна буде контролювати.

Ключовою проблемою в цій галузі є відсутність готових датчиків, які б одночасно:

- працювали б автономно;

- мали малий розмір;
- були б дешеві;
- не потребували обслуговування (заміна батареї, підзарядка користувачем);
- працювали б на вулиці як взимку в помірних широтах, так і влітку.

Мета даної роботи: Пошук раціонального рішення для забезпечення автономного живлення мініатюрних датчиків в умовах зміни температур.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

Дослідити доцільність і можливість побудови мініатюрних та повністю автономних (з максимальним ресурсом) датчиків, які будуть працювати на вулиці в широкому діапазоні температур.

Напрацювати рекомендації та методи проектування архітектури таких датчиків для забезпечення їх надійної роботи.

Об'єкт дослідження: Джерела живлення на основі LІС конденсаторів.

Предмет дослідження: Методи і засоби безперебійної роботи автономних датчиків в умовах широкої зміни температур.

Гіпотеза дослідження: Літій іонні конденсатори можуть бути найкращим чи одним із найкращих доступних варіантів на ринку електронних компонентів для побудови недорогих мініатюрних датчиків, які можуть працювати автономно на вулиці, в тому числі при від'ємних температурах, багато років і навіть десятиліття без будь-якого втручання.

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Актуальність ринку IoT та аналіз проблеми

Як було зазначено у вступі, глобальний ринок IoT стрімко зростає, а кількість підключених пристроїв щороку збільшується на десятки відсотків. Це стосується не лише споживчої електроніки, а насамперед промислових, інфраструктурних та сільськогосподарських застосувань, де сенсорні вузли працюють у важкодоступних місцях і мають функціонувати роками без втручання людини. Додаткові дослідження ринку, наприклад від Precedence Research [2], підтверджують цей тренд як для загального ринку IoT-сенсорів, так і для вузькоспеціалізованих сегментів, як-от ринок сенсорів для агросектору.

Сучасні технології відкривають шлях до створення нових екосистем, таких як «розумні парки» та «розумні сади», де моніторинг стану окремих дерев чи рослин стає можливим завдяки мережі мініатюрних датчиків та хабів. Подібні підходи вже застосовуються у точному землеробстві, виноградарстві, моніторингу лісів та міських зелених зон: датчики фіксують вологість ґрунту, температуру, освітленість, стан деревини, наявність шкідників тощо, а потім передають ці дані до центральних систем аналітики. У поєднанні з методами штучного інтелекту це дозволяє оптимізувати полив, підживлення та догляд, своєчасно виявляти проблеми й зменшувати витрати на ручний моніторинг.

Водночас вимоги до таких сенсорних вузлів є досить жорсткими: вони повинні мати малий розмір, бути недорогими, працювати автономно від локального джерела живлення та не потребувати регулярного сервісу (заміни батареї або ручної підзарядки). У багатьох сценаріях — наприклад, на великих полях, у лісових масивах чи парках площею кілька квадратних кілометрів — обслуговування навіть кількох сотень або тисяч сенсорів стає економічно невиправданим. Тому саме питання живлення є критичним обмеженням для масового впровадження «розумних» екосистем.

Проте ключовою перепорою для масового впровадження таких систем є саме живлення. Більшість існуючих рішень громіздкі або працюють лише за плюсових

температур, оскільки в їх основі лежать звичайні літій-іонні чи літій-залізофосфатні (LiFePO_4) акумулятори. Такі акумулятори, наприклад LiFePO_4 , не заряджаються при температурі нижче 0°C , оскільки за низьких температур різко зростає ризик деградації елементів, зокрема через явище літійового «покриття» (Li-plating) на аноді. Це робить неможливим їх використання у всепогодних вуличних датчиках, які мають заряджатися від сонця взимку, коли температура повітря часто є нижчою за нуль, а інсоляція – мінімальною.

Для повноти картини варто згадати й існуючі альтернативи, такі як літій-титанатні (LTO) акумулятори. Вони дійсно здатні працювати та заряджатися за від'ємних температур, що частково знімає обмеження, притаманні звичайним Li-ion та LiFePO_4 . Проте їхнім суттєвим недоліком є нижча питома енергія та висока вартість. Іншими словами, щоб отримати ту ж кількість накопиченої енергії, потрібні більші за розміром та масою елементи, які до того ж коштують дорожче. Також є проблема з доступністю цих елементів в малому форм-факторі.

Суперконденсатори також мають недоліки, що зумовлені як вартістю на одиницю збереження енергії (якщо мати на увазі енергію, що ми можемо легко отримати з них), так і тим, що габаритні характеристики можуть не задовольняти вимоги до мініатюризації пристрою. При цьому ціна потрібних іоністорів буде теж доволі високою.

Як наслідок, розробникам доводиться або завищувати габарити та вартість пристрою (використовуючи великі акумулятори з запасом ємності, що компенсує неможливість зимового заряду), або обмежувати реальний діапазон робочих температур, позиціонуючи пристрій як придатний лише для «м'якого» клімату. Обидва підходи суперечать концепції масового розгортання мініатюрних всесезонних датчиків, здатних працювати роками без втручання. Це й формує науково-практичну проблему, яку вирішує дана робота: пошук альтернативних рішень для автономного живлення, які б зберігали працездатність і можливість заряджання в широкому діапазоні температур, включно з зимовими умовами.

1.2. Аналіз існуючих комерційних рішень

Аналіз ринку виявив вкрай обмежену кількість комерційних пристроїв, що відповідають поставленим вимогам: мініатюрність, всесезонна робота, можливість заряджатися від навколишнього середовища (передусім сонячної енергії) та тривала автономність без обслуговування. Більшість доступних рішень або орієнтовані на інші сценарії застосування (наприклад, внутрішні приміщення), або мають надмірно високу вартість, що не дозволяє використовувати їх у масовому сегменті IoT-сенсорів.



Рис.1.1. Thermokon SR65 li

Thermokon SR65 li. Єдине знайдене комерційне рішення на суперконденсаторах. Цей пристрій позиціонується як бездротовий датчик температури для систем автоматизації будівель і використовує комбінацію суперконденсатора та енергохарвестингу (як правило, сонячної панелі). Головним недоліком є надзвичайно висока вартість, що сягає близько 200 доларів [3]. Така ціна є прийнятною для окремих BMS-рішень у великих комерційних об'єктах, але

практично несумісна з концепцією масового розгортання сотень або тисяч датчиків у сільському господарстві чи «розумних парках». Крім того, пристрій орієнтований здебільшого на відносно «комфортні» кліматичні умови і не оптимізований під жорсткі польові сценарії з великими температурними перепадами.



Рис.1.2. MDS-001 Temperature Sensor

MDS-001 Temperature Sensor. Цей датчик використовує LiFePO_4 -акумулятор, який, попри кращі температурні характеристики порівняно з класичними Li-ion , все одно не заряджається при температурах нижче $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, і коштує близько 250 доларів [4]. Таким чином, він частково розв’язує проблему надійності та ресурсу батареї, але не усуває ключового обмеження — неможливості безпечного заряду при від’ємних температурах. Для цілорічних вуличних сенсорів, що мають поповнювати енергію від сонячної панелі навіть за мінімальної інсоляції взимку, це є критичним фактором. Висока вартість також переводить цей продукт у нішевий сегмент, де кількість вузлів порівняно невелика, а бюджет на один пристрій може бути суттєво вищим.

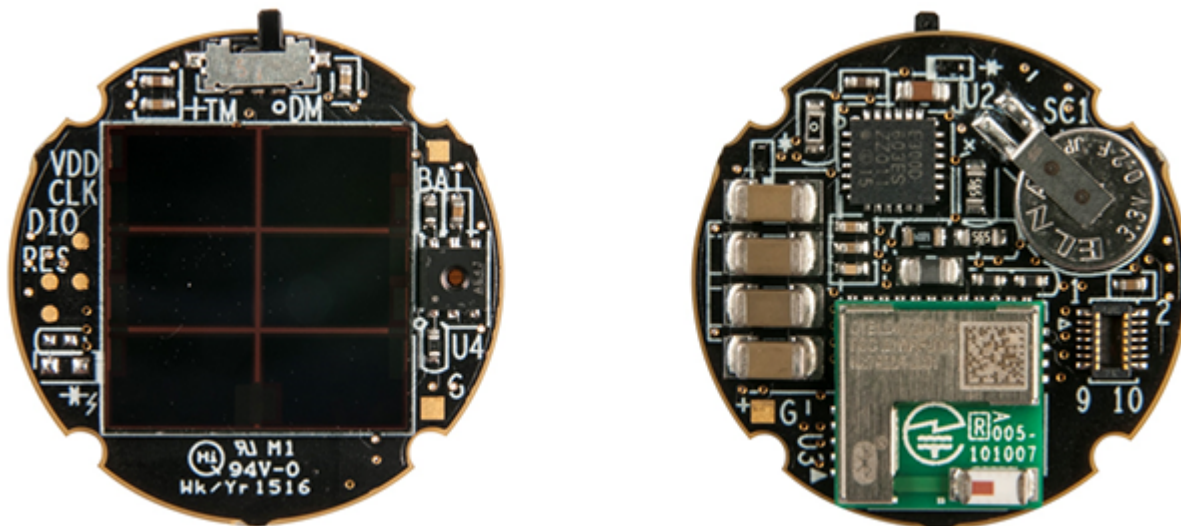


Рис.1.3. Farnell CYALKIT-E02

Рішення від Farnell - CYALKIT-E02 (на базі суперконденсатора 0,2 F). Це не закінчений продукт, а скоріше компонент або референсний модуль для розробників. Хоча він і є мініатюрним, мала ємність суперконденсатора (0,2 F) істотно обмежує запас енергії, а отже, і реальний час автономної роботи без підзаряду [5]. Такий підхід більш актуальний для демонстраційних або лабораторних застосувань, де важлива компактність, але не ставиться вимога до багаторічної роботи без обслуговування. Додатково використання BLE (Bluetooth Low Energy), що має дуже невеликий радіус передачі, обмежує застосування подібних рішень великими відстанями: створення розподіленої мережі датчиків на площах у кілька гектарів або більше потребує або густого розміщення хабів, або іншої радіотехнології.

Більшість «далекобійних» датчиків логічно використовують частоти 433/900 MHz (наприклад, LoRa), що висуває додаткові вимоги до енергоспоживання у пікових режимах передачі. У таких системах передавач може споживати десятки мА протягом відносно тривалого часу передачі (особливо при великих дальностях), що створює високі пікові навантаження на джерело живлення. Для побудови справді мініатюрних всесезонних сенсорів потрібне джерело з поєднанням таких властивостей: можливість роботи та заряджання за низьких температур, достатня щільність енергії, здатність витримувати пікові струми радіомодуля й водночас прийнятна вартість для масових застосувань.

Підсумовуючи, проаналізовані комерційні рішення або є надто дорогими (Thermokon SR65 li, MDS-001), або мають обмежений запас енергії та радіус дії (рішення Farnell на 0,2 F і BLE). На момент проведення дослідження не було виявлено серійних пристроїв, які б поєднували мініатюрність, всесезонну роботу, можливість заряджатися взимку та низьку собівартість, необхідну для масового розгортання мережі датчиків. Це додатково обґрунтовує актуальність дослідження застосування LIC як альтернативної технології живлення для таких сенсорних вузлів.

1.3. Порівняльний аналіз елементів живлення для всепогодних датчиків

Як показав аналіз ринку, кількість комерційних пристроїв, що відповідають вимогам мініатюрності, всесезонної роботи та можливості зимового заряду, є вкрай обмеженою. Для живлення автономних вуличних датчиків, що вимагають підзарядки взимку, основними «конкурентами» є три технології: літій-іонні конденсатори (LIC), суперконденсатори (Supercapacitor) та літій-титанатні (LTO) акумулятори.

Суперконденсатори мають обмежену робочу напругу (до 2,7 В), а їхня напруга суттєво падає в процесі розряду, що ускладнює живлення радіомодулів та мікроконтролерів без додаткових перетворювачів. Важливо й те, що значна частина запасеної енергії суперконденсатора перебуває в діапазоні низьких напруг (нижче порогу роботи електроніки, наприклад 1,8 В), звідки «дістати» її без Boost-перетворювача практично неможливо.

LTO-акумулятори демонструють кращі масогабаритні показники, але практично недоступні на ринку в малих форм-факторах, придатних для мініатюрних сенсорів, і потребують повноцінної схеми контролю заряду. Крім того, робочий діапазон напруги одного елемента LTO (приблизно 1,5–2,5 В) не дозволяє жити 3,3-вольтовий мікроконтролер напряму — обов'язково потрібен підвищувальний перетворювач. На відміну від цього, LIC з діапазоном приблизно 3,8–2,5 В можуть жити 3,3 В електроніку через LDO-стабілізатор або Buck-конвертер більшу частину циклу розряду, а схема заряджання може бути

спрощеною, або навіть жити пристрій напругу, якщо не заряджати LIC вище 3.4...3.5 В, що може бути виправдано.

Порівняльна таблиця ключових параметрів

	LIC	Supercapacitor	LTO
Заряд при -20°C	так	так	так
Потребує схеми контролю заряду/разряду	так	ні	так
Масогабаритні показники до енергоємності	середні	гірші	кращі
Цикли заряд/разряд	100000	500000	20000
Робоча напруга	2.5 до 3.8	0 до 2.7	1.5 до 2.5
Характер падіння напруги	майже лінійне	майже лінійне	майже лінійне з "хвостами"
Ціна за одиницю зберігаємої енергії	середня	вища	нижча
Наявність на ринку в маленьких форм-факторах	є в наявності	є в наявності	з доступних майже нічого немає

Таблиця 1.1.

Як видно з таблиці, LIC (літій-іонні конденсатори) є компромісним та раціональним рішенням: вони здатні заряджатися при -20 °C [6], мають достатньо високу робочу напругу (до 3,8 В), значно більший ресурс циклів, ніж LTO, та доступні у малих форм-факторах. При цьому LIC здатні віддавати короточасні пікові струми, необхідні для роботи далекобійних радіомодулів, з прийнятним падінням напруги, що робить їх придатними для живлення всепогодних мініатюрних датчиків.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ НЕОБХІДНОЇ КОМПОНЕНТНОЇ БАЗИ АВТОНОМНОГО ДАТЧИКА

2.1. Порівняльний вибір ємностей літій-іонних конденсаторів (LIC)

В рамках дослідження розглядаються LIC-конденсатори з наступними ємностями:

10 F (екв. $\approx 3,75$ мА·год у робочому діапазоні напруг 3,8–2,5 В)

20 F (екв. $\approx 7,5$ мА·год у тому ж діапазоні).

Ці значення «еквівалентної ємності» наведені для зручного порівняння з літій-іонними акумуляторами й відповідають кількості енергії, яку можна використати в типовому діапазоні напруг, придатному для живлення 3,3-вольтової електроніки (через LDO або понижувальний перетворювач). Такі ємності є орієнтовно достатніми для малопотужних IoT-вузлів із дуже низьким середнім споживанням (мікроампери в черговому режимі) та короткими піковими імпульсами струму під час радіопередачі.

Також розглядаються варіанти на 40 F та 100 F для застосувань, що споживають значно більше енергії (частіші сеанси зв'язку, додаткові сенсори, підвищена потужність передавача тощо). Однак з ростом ємності збільшуються габарити й вартість компонента, тому для мініатюрних масових датчиків базовими вважаються саме номінали 10–20 F, а більші ємності використовуються як «верхня межа» для окремих сценаріїв.

Ціновий аналіз ринку (на прикладі LCSC) показує, що ціни на базові ємності 10–20 F є дуже низькими при гуртових замовленнях (приблизно 0,35–0,45 USD від 1000 од.), що відповідає критерію дешевизни кінцевого пристрою. На ринку присутні компоненти від різних виробників, таких як Asian Brands (Ymin), KNSCHA та CDA, що зменшує ризики дефіциту окремого постачальника та робить LIC привабливими для серійних рішень [7].

2.2. Аналіз варіантів сонячних елементів

Для забезпечення автономності датчика потрібне джерело підзарядки ЛІС. Найбільш раціональним є використання мініатюрних сонячних елементів, інтегрованих у корпус сенсора. Основні технології, що розглядаються:



Рис.2.1. Елементи з кристалічного кремнію, готові вироби

Кристалічний кремній (моно- та полікристал)

Найбільш поширений та доступний варіант. Монокристалічні елементи мають вищий ККД, проте зазвичай дорожчі та менш зручні для механічної «нарізки». Для наших задач краще підходить полікристал у вигляді окремих пластин, які можна кастомізувати під необхідний розмір та форму корпусу датчика (наприклад, вузькі смуги або невеликі прямокутники, розміщені по периметру).

2.3. Дослідження архітектур підсистеми живлення

Ключовим викликом при використанні літій-іонних конденсаторів (LIC) є забезпечення суворих рамок робочої напруги. На відміну від класичних суперконденсаторів, LIC вимагають захисту не лише від перенапруги (зазвичай вище 3.8 В), але й від глибокого розряду (нижче 2.2–2.5 В), який призводить до незворотної деградації елемента.

Для реалізації схеми керування було розглянуто такі підходи:

1. Спеціалізовані мікросхеми Energy Harvesting: (Наприклад, серія BQ255xx від TI). Це найефективніше рішення, що містить MPPT (відстеження точки максимальної потужності) та повний контроль заряду/розряду, але є найдорожчим варіантом.
2. Дискретна аналогова схема: Використання компараторів або супервізорів напруги (наприклад, серії BD/ROHM або аналогів) для керування ключами. Дешевший варіант, але потребує ретельного підбору компонентів для мінімізації струму спокою.
3. Керування засобами мікроконтролера (МК): МК вимірює напругу через АЦП і керує MOSFET-транзисторами. Це найгнучкіший варіант, проте він несе ризики при «холодному старті» (коли енергії недостатньо для запуску самого МК).
4. Пасивне обмеження (Shunt/LDO): Найпростіший метод, де верхній поріг напруги обмежується стабілітроном або LDO, а захист від розряду покладається на вбудований в МК механізм Brown-out Reset.

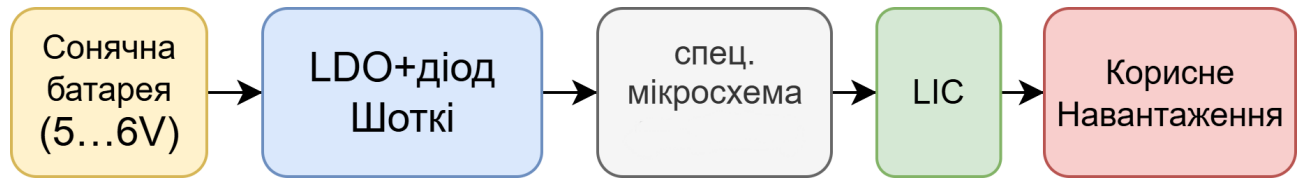
На основі цього сформовано 8 базових варіантів архітектури, що комбінують тип джерела (низьковольтна або високовольтна сонячна панель) та метод контролю:

Група А: Спеціалізовані контролери (Maximum Reliability)

Варіант 1:

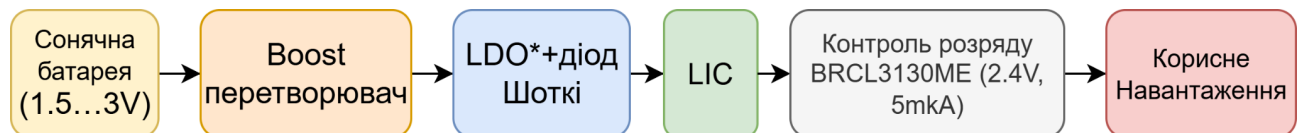


Варіант 2:

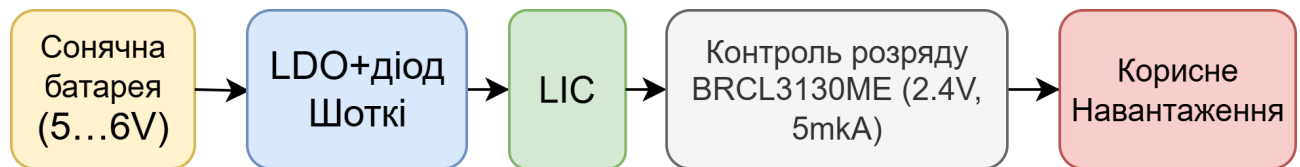


Група Б: Апаратний захист (Balance of Cost/Safety)

Варіант 3:

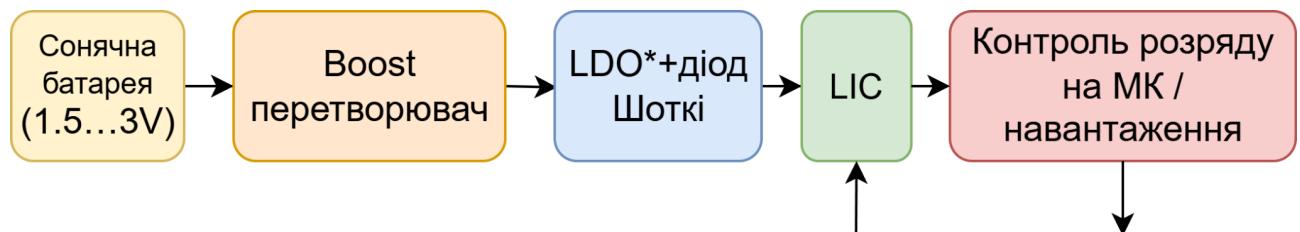


Варіант 4:

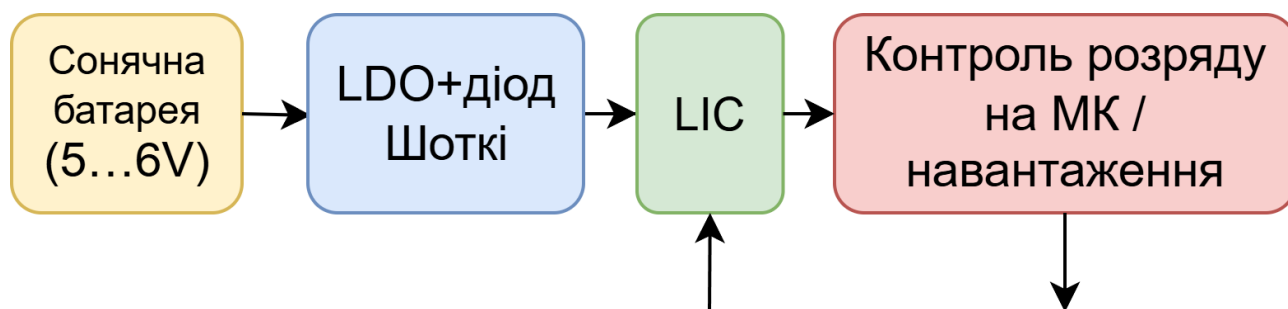


Група В: Програмно-апаратний контроль (Low Cost / Risk)

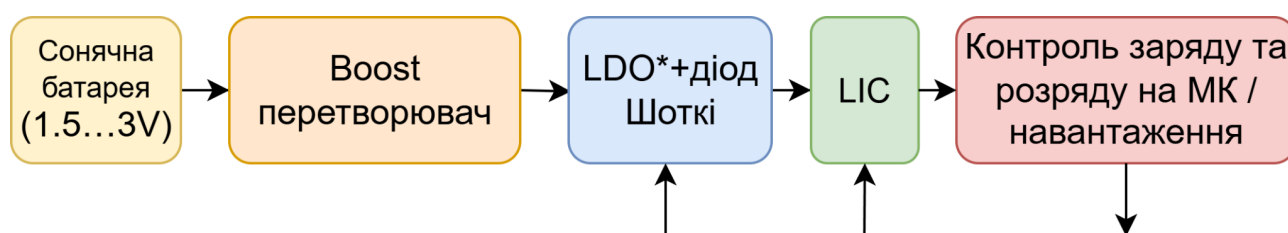
Варіант 5:



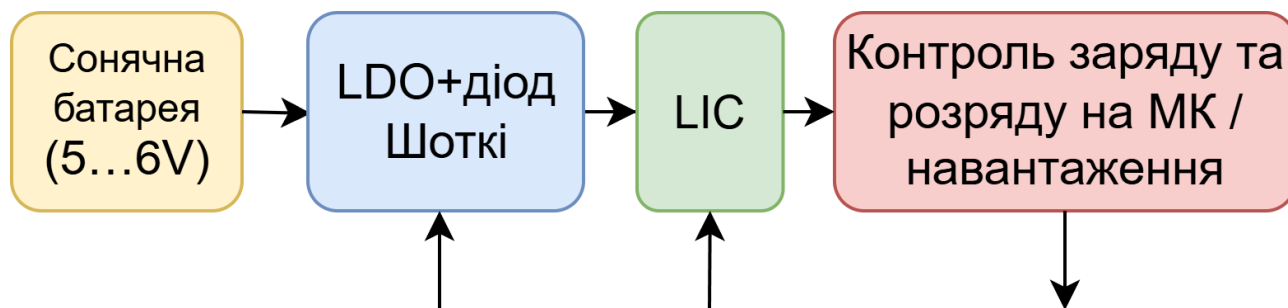
Варіант 6:



Варіант 7:



Варіант 8:



Примітка: У Варіантах 6-8 контроль заряду покладено на МК. Це вимагає схемотехнічного рішення для забезпечення початкового заряду при повністю розрядженому накопичувачі (bypass circuit), коли МК ще знеструмлений. Але для уникнення цього ми можемо використовувати літій іонні конденсатори з пасом по ємності а старт МК починати з низької потужності обчислень, що суттєво зменшить енергозатрати. При цьому, якщо LIC повністю розряджений, ні про яку передачу даних по радіоканалу не може бути й мови, ми просто чекаємо, поки елемент живлення не зарядиться.

Також в цих варіантах ми не заряджаємо LIC максимальною напругою 3.8 В, а використовуємо підтримуючу напругу 3.4...3.5 В. LDO та понижуючі перетворювачі на такі напруги є на ринку і вони відносно дешеві. Це суттєво спрощує та здешевшає пристрій, Але трішки знижує ефективну ємність LIC. При цьому зменшення ємності не велика, бо крайні “хвости” залежності напруги та залишкової ємності в LIC покривають лише невелику частину. Таким чином, враховуючи інші дослідження, ми втратимо 10%...17% ємності, не зарядивши LIC до 3.8 В, а лише до 3.5 В. [8], [9]

3. РОЗРАХУНКИ МОДЕЛЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ

3.1. Розрахунки споживання основних елементів

Для еталонного датчика, описаного у попередніх розділах (мініатюрна сонячна панель + LIC + сенсор + мікроконтролер + LoRa-модуль), приймемо типові параметри радіоканалу для діапазону EU868:

- Робоча частота: $f = 868 \text{ MHz}$
- Ширина смуги: $BW = 125 \text{ KHz}$ (класичний режим LoRaWAN uplink)
- Spreading Factor (SF): розглядаються три варіанти — **SF7, SF9, SF12**
- Coding Rate: $CR = 4/5$ (параметр $CR = 1$ у формулах)
- Довжина преамбули: 8 символів
- Режим заголовка: явний (explicit header)
- Контрольна сума: CRC увімкнено
- Корисне навантаження одного пакета: 12 байт (ID датчика, кілька вимірних параметрів, службові поля)

Підхід до розрахунку базується на методиках, наведених у роботі «Evaluation of Energy Consumption of LPWAN Technologies»[10].

Тривалість одного символу для LoRa визначається як:

$$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{BW}$$

Час преамбули:

$$T_{preamble} = (N_{preamble} + 4.25)T_{sym},$$

$$N_{preamble} = 8$$

Кількість символів корисного навантаження:

$$N_{payload} = 8 + \left(\left\lceil \frac{8 \cdot PL - 4 \cdot CF + 28 + 16 \cdot CRC - 20 \cdot H}{4 \cdot (SF - 2 \cdot DE)} \right\rceil \right) \cdot (CR + 4), 0$$

де:

PL — розмір корисного навантаження (12 байт),

$CRC = 1$ (увімкнено),

$H = 0$ (явний заголовок),

$DE = 0$ для $SF < 11$ і $BW = 125 kHz$, $DE = 1$ для $SF \geq 11$.

Загальний час «у ефірі» (Time-on-Air, ToA) одного пакета:

$$T_{packet} = (N_{preamble} + N_{payload})T_{sym}$$

Для прийнятих параметрів та $BW = 125$ кГц отримуємо (чисельно):

SF	ToA пакета, мс
7	41.2
8	82.4
9	144.4
10	288.8
11	577.5
12	1155.1

Таблиця 3.1 — Час передачі одного пакета LoRa при $BW = 125$ кГц, $PL = 12$ байт

Далі зробимо розрахунки з урахуванням МК та еталонного датчика, який буде мати деякі середні параметри споживання та робочої напруги.

Розіб'ємо споживання енергії еталонного датчика на три основні складові:

1. Режим сну (sleep):

- Струм сну всього вузла (МК + сенсор + LoRa-модуль у standby):

$$I_{sleep} \approx 2\mu A *$$

- Напруга живлення від LIC:

$$V \approx 3.3V$$

* За умови використання ключів керування на MOSFET. Але навіть якщо споживання сну буде $5\mu A$, то споживання за 1 добу (для спрощення рахуємо тільки його) буде: $5\mu A \cdot 24 = 120 \mu A$, тобто, це не є критичне споживання, але його треба буде враховувати для окремого пристрою, який буде розроблятися.

2. Пробудження та вимірювання (МК + сенсор):

- Струм активного режиму МК + сенсора:

$$I_{proc} \approx 5mA$$

- Тривалість вимірювання та підготовки даних:

$$T_{proc} \approx 20ms$$

3. Передача LoRa (TX):

- Струм передавача при потужності близько +14 dBm:

$$I_{TX} \approx 44mA$$

- Час передачі $T_{TX} = T_{packet}$ згідно з попередніми даними.

Енергія кожної частини циклу «сон → пробудження → вимір → передача → сон»:

$$E_{proc} = V \cdot I_{proc} \cdot t_{proc}$$

$$E_{TX} = V \cdot I_{TX} \cdot t_{TX}$$

$$E_{sleep} = V \cdot I_{sleep} \cdot (T_{int} - t_{proc} - T_{TX})$$

Де T_{int} — період між передачами (інтервал опитування/надсилання даних).

Повна енергія на один цикл:

$$E_{cycle} = E_{proc} + E_{TX} + E_{sleep}$$

Середня потужність:

$$P_{avg} = \frac{E_{cycle}}{T_{int}}$$

Середній струм споживання:

$$I_{avg} = \frac{P_{avg}}{V}$$

Далі розглянемо два практично значущих інтервали передавання:

варіант А: передача кожні 1 хвилина ($T_{int} \approx 60s$);

варіант В: передача кожні 10 хвилин ($T_{int} \approx 600s$);

варіант С: передача кожну годину ($T_{int} \approx 3600s$);

Далі отримуємо числові результати для SF7, SF9, SF12. Для вибраних параметрів маємо такі результати (округлено):

SF	ToA, мс	E_{TX} , мДж	E_{cycle} , мДж	P_{avg} , мкВт	I_{avg} , мкА	Споживання за добу, мА·год
7	41.2	5.99	6.72	111.9	33.9	0.81
9	144.4	21.0	21.72	362.1	109.7	2.63
12	1155.1	167.7	168.42	2807.0	850.6	20.41

Таблиця 3.2 — Енергоспоживання одного еталонного датчика при різних SF ($BW = 125$ кГц), передача кожну хвилину

SF	ToA, мс	E_{TX} , мДж	E_{cycle} , мДж	P_{avg} , мкВт	I_{avg} , мкА	Споживання за добу, мА·год
7	41.2	5.99	10.27	17.1	5.19	0.125
9	144.4	21.0	25.25	42.1	12.8	0.31
12	1155.1	167.7	172.0	286.7	86.9	2.08

Таблиця 3.3 — Енергоспоживання одного еталонного датчика при різних SF ($BW = 125$ кГц), передача кожні 10 хвилин

SF	ToA, мс	E_{TX} , мДж	E_{cycle} , мДж	P_{avg} , мкВт	I_{avg} , мкА	Споживання за добу, мА·год
7	41.2	5.99	30.07	8.35	2.53	0.061
9	144.4	21.0	45.05	12.5	3.79	0.091
12	1155.1	167.7	191.8	53.3	16.1	0.39

Таблиця 3.4 — Енергоспоживання одного еталонного датчика при різних SF ($BW = 125$ кГц), передача кожну годину

З таблиць видно:

- Для **дуже коротких інтервалів** (1 хв) та великих SF (наприклад, SF12) основний внесок у споживання дають саме тривалі передачі LoRa. Добове споживання струму в цьому випадку різко зростає, і ресурс LIC істотно зменшується.
- Для **помірних інтервалів** (10 хв) картина вже більш збалансована: передача все ще дає помітний внесок у споживання при SF9–SF12, але сумарне добове споживання залишається на рівні, сумісному з багатодобовою роботою навіть для LIC невеликої ємності.
- Для **тривалих інтервалів** (1 година і більше) домінує струм сну, а внесок одного пакета у добове споживання вже не такий великий — незалежно від

SF, за умови, що використовується енергоефективний режим сну мікроконтролера та радіомодуля.

У реальній системі ці значення будуть уточнені експериментальними вимірюваннями струмів для конкретних компонентів (обрана мікросхема мікроконтролера, конкретний LoRa-модуль, реальний сенсор), однак отримані оцінки дають коректний порядок величин для подальшого проектування архітектури живлення.

3.2. Оцінка ресурсу LIC-конденсатора на основі розрахованого енергоспоживання

У попередніх матеріалах були розглянуті літій-іонні конденсатори ємністю 10 F та 20 F, для яких наведено еквівалентну ємність у мА·год (для заданого робочого діапазону напруг) — приблизно 3.75 мА·год для 10 F та 7.5 мА·год для 20 F.

Оцінимо, на скільки діб вистачить одного LIC на 10 F без підзарядки при різних режимах роботи.

Передача кожну 1 хвилину ($T_{int} = 60$ с)

За розрахунками середнього струму маємо такі **добові споживання**:

- SF7: ≈ 0.81 мА·год на добу
- SF9: ≈ 2.63 мА·год на добу
- SF12: ≈ 20.41 мА·год на добу

Тоді приблизна кількість діб автономної роботи для LIC 10 F:

- SF7:

$$N_{\text{діб}} \approx 3.75/0.81 \approx 4.6 \text{ доби (тобто близько 4–5 діб)}.$$

- SF9:

$$N_{\text{діб}} \approx 3.75/2.63 \approx 1.4 \text{ доби (приблизно 1.5 доби)}.$$

- SF12:

$$N_{\text{діб}} \approx 3.75/20.41 \approx 0.18 \text{ доби, тобто менше 5 годин без підзарядки}.$$

Цей режим (передача щохвилини при високому SF) є найважчим з точки зору енергоспоживання й показує «верхню межу» навантаження на LIC.

Передача кожні 10 хвилин ($T_{int} = 600$ с)

Добові споживання (з попередньої таблиці):

- **SF7: ≈ 0.125 мА·год**

$$N_{\text{діб}} \approx 3.75/0.125 \approx 30 \text{ діб.}$$

- **SF9: ≈ 0.31 мА·год**

$$N_{\text{діб}} \approx 3.75/0.31 \approx 12 \text{ діб.}$$

- **SF12: ≈ 2.08 мА·год**

$$N_{\text{діб}} \approx 1.8 \text{ доби.}$$

Тобто при інтервалі 10 хвилин навіть невеликий LIC на 10 F забезпечує **від ~2 до ~30 діб** автономної роботи без підзарядки (залежно від SF).

Передача кожену годину ($T_{int} = 3600$ с)

Для годинного інтервалу добові споживання такі:

- **SF7: ≈ 0.061 мА·год**

$$N_{\text{діб}} \approx 61.5 \text{ доби (понад } \mathbf{60 \text{ діб}} \text{ автономної роботи).}$$

- **SF9: ≈ 0.091 мА·год**

$$N_{\text{діб}} \approx 3.75/0.091 \approx 41.2 \text{ доби (близько } \mathbf{41 \text{ доби}} \text{).}$$

- **SF12: ≈ 0.39 мА·год**

$$N_{\text{діб}} \approx 3.75/0.39 \approx 9.6 \text{ доби (приблизно } \mathbf{10 \text{ діб}} \text{).}$$

У цьому випадку домінує саме струм сну, а внесок окремої передачі в добовий енергобаланс є не таким значним.

Отримані оцінки добре узгоджуються з гіпотезою, що LIC з відносно невеликою еквівалентною ємністю (порядку кількох мА·год) можуть забезпечувати

від кількох діб до кількох десятків діб автономної роботи навіть без сонячної підзарядки, за умови рідкісних (10 хв – 1 година) передач та використання енергоефективних режимів LoRa.

3.3. Додаткові втрати

Як зазначалось, розрахована ємність для $10\text{ F} \rightarrow \approx 3.75\text{ мА}\cdot\text{год}$ не є паспортною, а враховує

Для більшої ємності (20 F , $\sim 7.5\text{ мА}\cdot\text{год}$) ці значення фактично **подвоюються**. Це створює запас на похмурі періоди взимку, коли сонячна панель дає дуже малу енергію, та дає можливість або збільшувати частоту передавання даних, або зберігати ту саму частоту при більшому запасі автономності.

Навіть із цим:

- частина енергії з’їдається на LDO / DC–DC (ККД < 100 %),
- частина напруги “знизу” недоступна через:
 - мінімальну робочу напругу МК (наприклад, 2.0–2.2 В),
 - дроп-аут стабілізатора.

Можна чесно сказати, що наші розрахунки ресурсу LIC — це оптимістична верхня оцінка, а в реальному пристрої потрібно закладати ще $\sim 20\text{--}30\%$ запас (тобто реальний час роботи буде трохи менший, але порядок величин приблизно той самий).

3.4. Уточнення та висновки

Треба зазначити, що цикл роботи правильно розміщеного датчику навіть у похмуру погоду буде становити не більше 0.5 доби в стані, коли немає підзаряду від сонячного елемента. Тому навіть якщо ми закладемо для надійності 50% запасу, то всі варіанти розрахунків, які будуть більше 1 доби роботи нам підійдуть, але бажано більший запас. Також є ймовірність засипання сонячного модуля снігом чи забруднення, але це складно передбачити (коли сніг розтане чи пил змие дощ), тут або закладати роботу в 10+ діб, та/або робити спеціальні рекомендації по

розміщенню пристрою таким чином, щоб вони мали мінімальний шанс залишитися без постачання енергії сонця.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1. Опис еталонного датчика та моделей розряду

Для напрацювання рекомендацій необхідно визначити параметри "еталонного датчика". Він має включати: мінімальну сонячну батарею, сам датчик (сенсор), мікроконтролер та радіомодуль (наприклад, LORA).

Ключовим є моделювання споживання енергії. Споживання не є лінійним, а складається з:

1. Струм сну: Дуже малий струм (мікроампери) в проміжках між вимірами.
2. Струм пробудження/виміру: Струм, який споживає МК та сенсор під час пробудження та зчитування даних.
3. Піковий струм передачі: Найбільш енергозатратний режим роботи радіомодуля (напр. LORA).

Для теоретичних розрахунків необхідно сформувати таблицю моделей розряду, яка враховуватиме комбінації параметрів:

- 1 варіант струму датчика + МК після пробудження.
- варіанти споживання при передачі (різні налаштування потужності LORA).
- варіанти часу передачі (залежить від обсягу даних та Spreading Factor).
- варіанти різних затримок між пробудженнями (наприклад, передача раз на 10 хв, раз на годину, раз на добу).

4.2. Розробка та опис вимірювального стенду

Теоретичні розрахунки необхідно підтвердити експериментально. Для цього розробляється спеціалізований тестовий стенд.

Схема стенду: Заряджений LIC-конденсатор підключається до керованого навантаження. Керуючий стенд (на базі МК з дисплеєм) керує цим навантаженням та вимірює напругу на LIC.

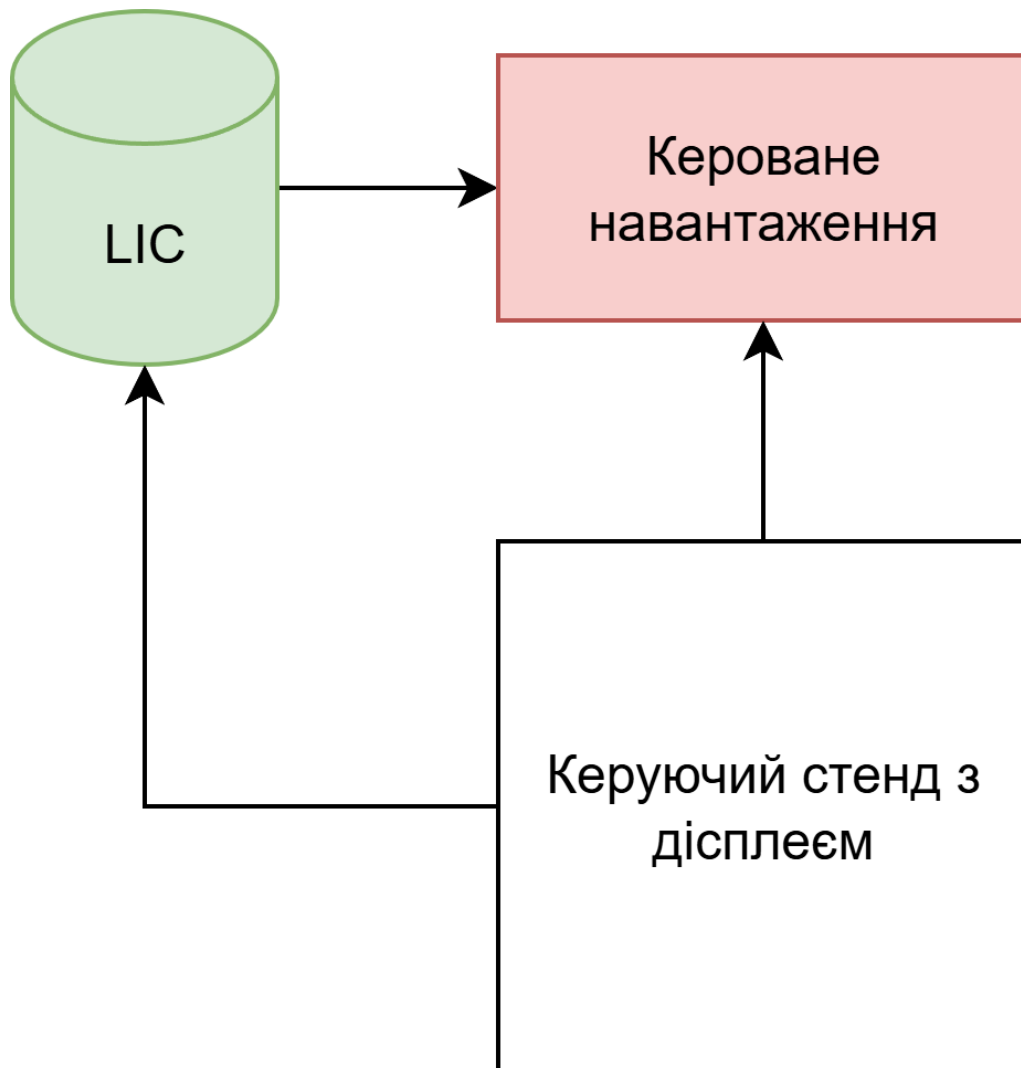


Рис 4.1 Схематичне зображення вимірювального стенду

Навантаження: Для імітації роботи датчика використовуються 2 резистори, що підключаються через MOSFET'и: один імітує струм пробудження/виміру, інший (меншого опору) – піковий струм передачі.

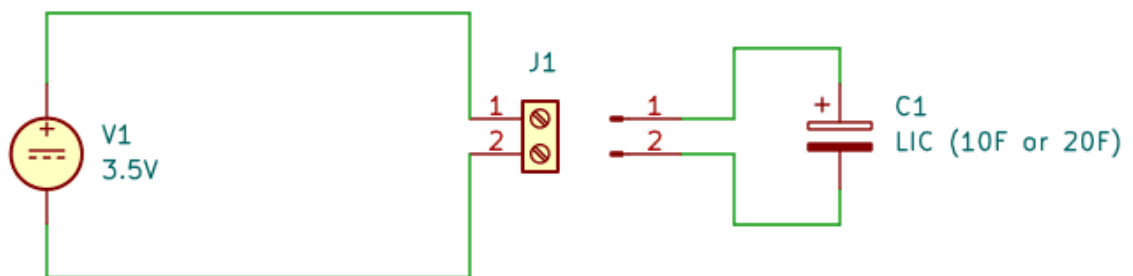
Процес: Стенд розряджає конденсатор імпульсами "зі сходинкою" (імітація пробудження + передачі), але з прискоренням (інтервали 1-2 секунди замість хвилин/годин).

Вимірювання: Стенд рахує кількість імпульсів (циклів "сон-передача"), які конденсатор зміг забезпечити, доки напруга не впаде до мінімально допустимої (напр., 2.6В).

Заряд: Для експерименту конденсатор заряджається від лабораторного БЖ з обмеженням струму (10 мА) та напруги (3.5-3.55В). Це імітує "гірші" умови заряду, ніж повільний від сонця, але LIC до цього не чутливі.

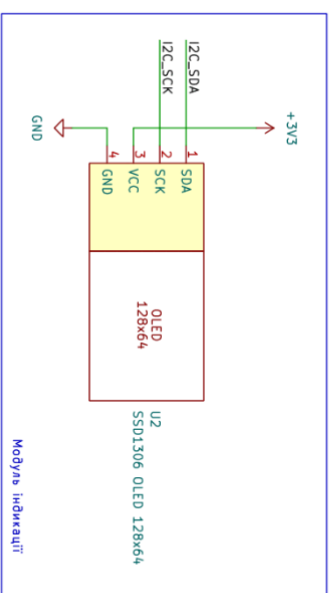
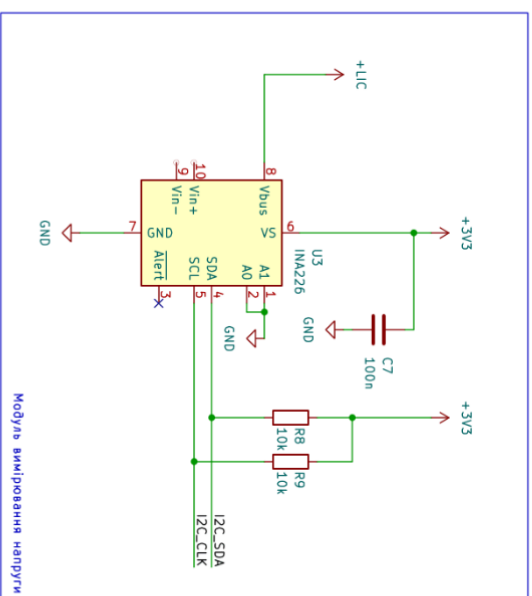
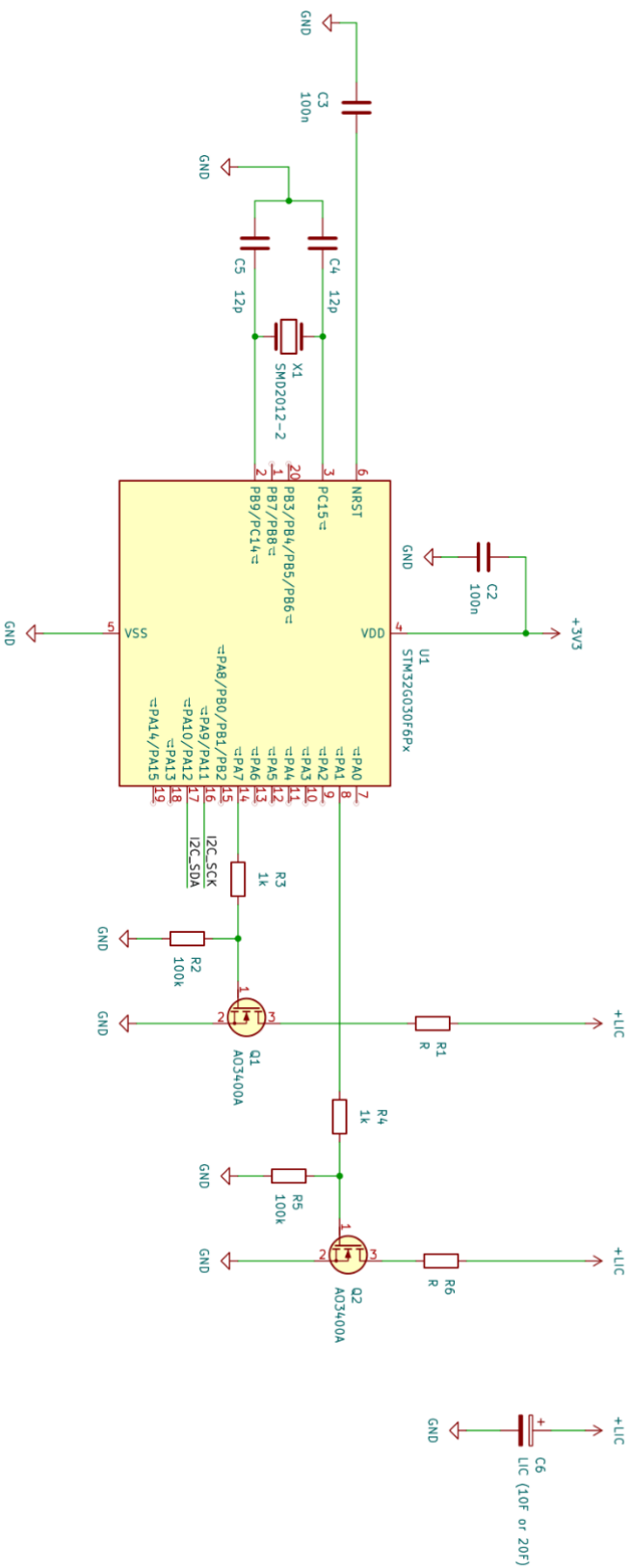
Цей експеримент дозволить практично перевірити 9 основних профілів споживання (комбінації струмів) та екстраполювати ці дані на 27 теоретичних моделей (враховуючи різний час сну).

Схема заряду LIC :



На схемі заряду резистор джерело V1 є лабораторним блоком живлення, де виставлена напруга 3.5В, а також обмежений струм в межах, згаданих нами значень. Також контролюємо напругу на LIC вольтметром.

Схема вимірювального стенду для розряду LIC :



Charge
File: untitled.kicad_sch

Вимірювальний стенд побудований на мікроконтролері STM32G030F6P6, який формує часові інтервали для керування розрядом через транзисторні ключі Q1, Q2 та на резисторах R1, R2. В свою чергу останні (R1, R2) виконують роль навантаження на LIC. Їх опір розраховується за Законом Ома :

$$R_{\text{навантаж.}} = \frac{U_{LIC}}{I_{LIC}}$$

В свою чергу опором переходу Стік-Витік ми можемо знехтувати, тому що він становить десятки міліом.

Потужність резистора навантаження розраховуємо за формулою:

$$P_{R \text{ навантаж.}} = I^2 \cdot R$$

І обираємо резистор з запасом по номіналу.

Модуль виміру напруги потрібен для контролю напруги літій-іонного конденсатора і фіксації точки розряду. Він побудований на прецизійній мікросхемі-датчику INA226.

Модуль індикації містить OLED дісплей і відображає кількість ітерацій розряду в реальному часі згідно з заданим алгоритмом. Після досягнення критичних значень напруги розряду цей цикл зупиняється та на екрані залишається остаточне значення.

Блок-схема програми вимірювання

Програма для мікроконтролера написана, спираючись на наведену нижче блок-схему. Параметри для вимірювання та розряду LIC задаються програмно через перепрошивку мікроконтролера. Також, підєднавши програматор до стенду ми можемо при потребі знімати дані в реальному часі і навіть візуалізувати їх за допомогою програми STM32CubeMonitor [11]

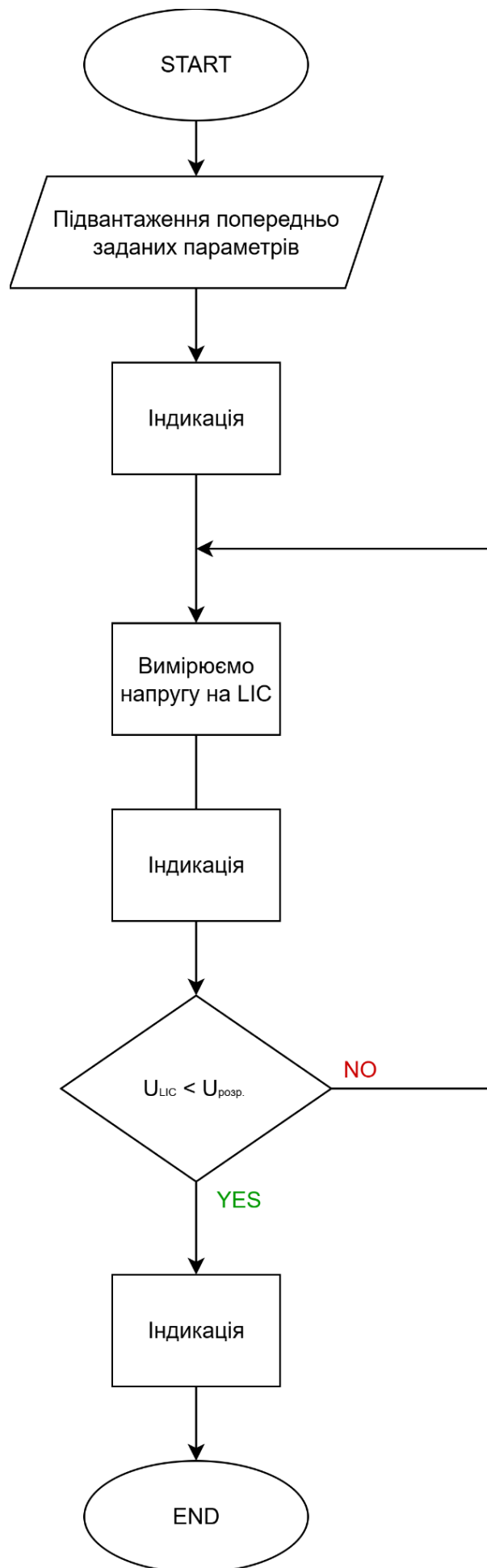


Рис 4.2 Блок-схема алгоритму вимірювання

Кінцевий вигляд вимірювального стенду

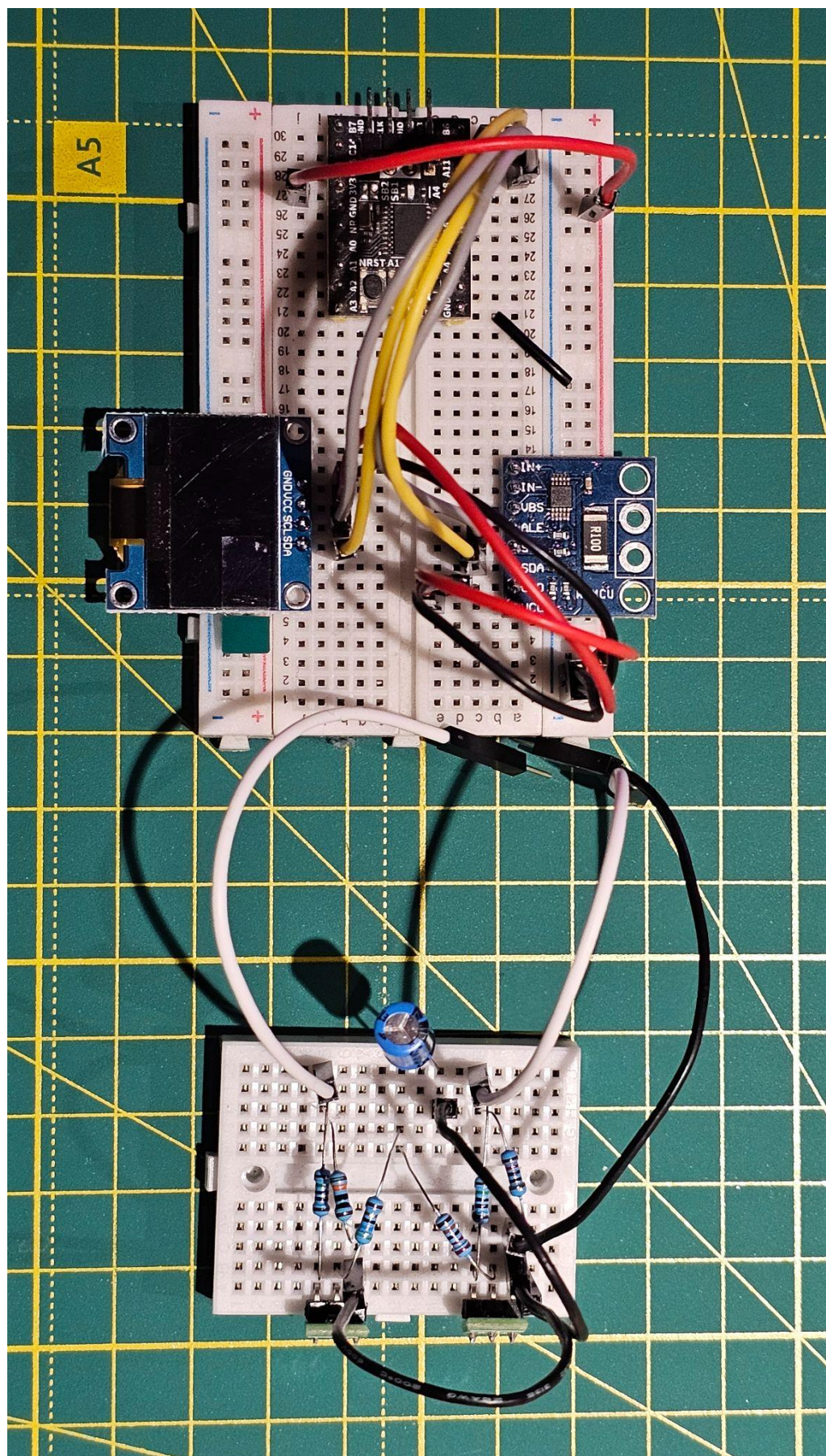


Рис 4.3 Вимірювальний стенд

4.3. Логіка вимірювання

Загальна ілюстрація вимірювання проілюстрована нижче на рис.4.4

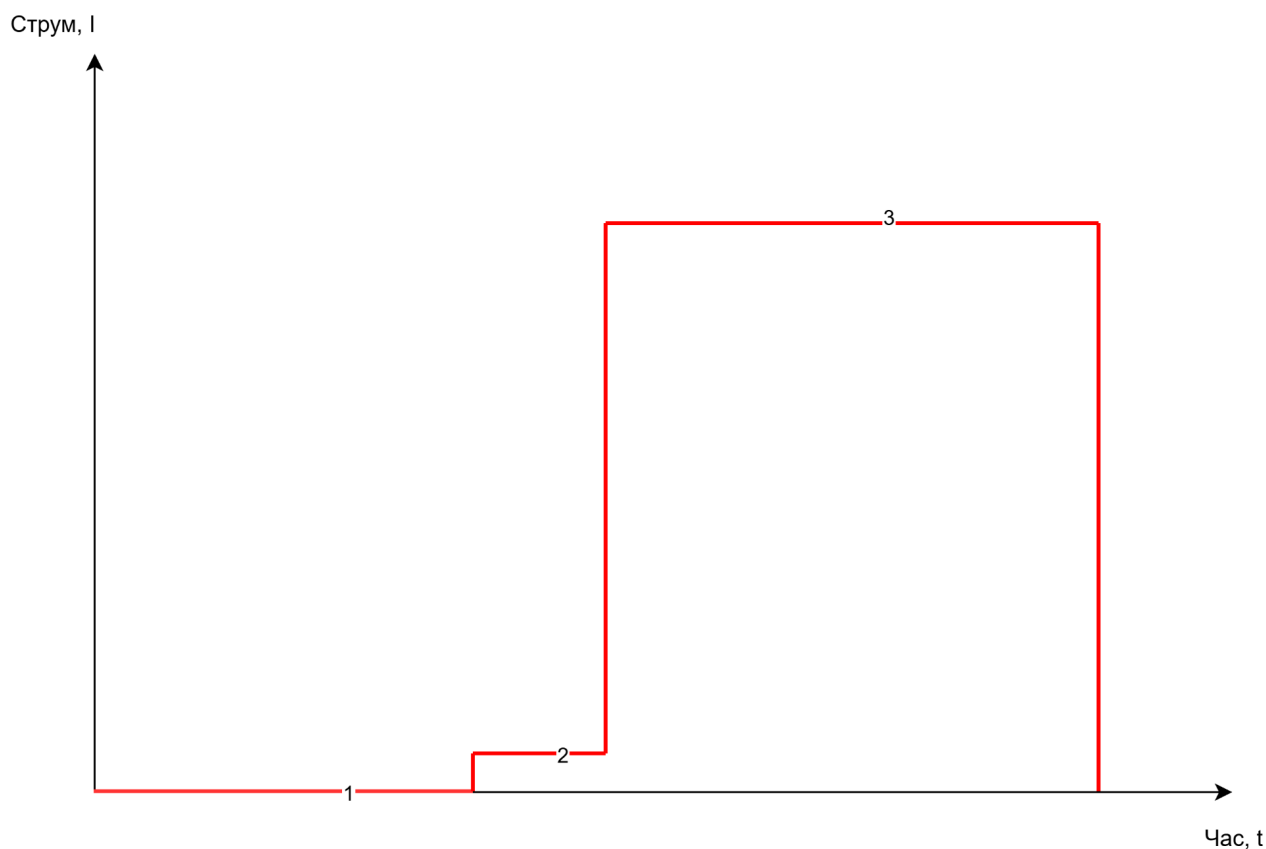


Рис 4.4 Процес розряду LIC

Де зображено:

1 - струм спокою (сну). В своїх вимірах ми будемо їм нехтувати, через те, що ми пришвидшуємо виміри і робимо інтервали сну мінімальними. Так як струм витоку літій-іонних конденсаторів дуже малий [12], нам не потрібно доводити, що цей струм може впливати на швидкий розряд. При потребі ми можемо порахувати вплив струму сну окремо.

2 - струм периферії. Мається на увазі струм усередненого сенсора та струм споживання мікроконтролера, або іншої периферії.

3 - струм передавача. Це найбільший струм, що буде віддавати LIC і він може бути суттєвим, в порівнянні з ємністю джерела живлення, тому важливо впевнитись, що літій іонний конденсатор пропрацює згідно розрахунків з розділу 3.

В розрахунках споживання основних елементів ми отримали такі приблизні варіанти струму споживання та часові інтервали:

- Струм активного режиму МК + сенсора: 5 mA
- Тривалість вимірювання та підготовки даних: 20 ms
- Струм передавача при потужності близько +14 dBm: 44 mA
- Час передачі для SF7: 41 ms
- Час передачі для SF9: 145 ms
- Час передачі для SF12: 1155 ms

Також з сенс окремо розглянути роботу LIC при максимальних навантаженнях передачі, таких як +20 dBm, які ми не враховували, але вони можуть бути, це і згідно дослідження [13] споживання буде складати орієнтовно **110 mA**.

З цього для підтвердження розрахунків та життєздатності використання LIC в подібних пристроях нам достатньо зробити виміри декількох моделей і, бажано, найбільш навантажених. Тому ми змодельємо 4 варіанти :

1. SF9 і +14dBm
2. SF12 і +14dBm
3. SF9 і +20dBm
4. SF12 і +20dBm

Для кожного розрахуємо **спрощені** моделі для внесення змін в програму за формулою

$$E_{cycle} = V \cdot (T_{sleep} \cdot I_{sleep} + T_{cycle} \cdot I_{perif} + T_{TX} \cdot I_{TX})$$

Як вже було зазначено, ми нехтуємо струмом та часом режиму сну, тому наша формула скорочується до

$$E_{cycle} = V \cdot (T_{cycle} \cdot I_{perif} + T_{TX} \cdot I_{TX})$$

Резистори навантаження в нашій схемі будуть:

$$R_{perif} = 660 \text{ Ohm}$$

$$R_{TX} \text{ (для +14dBm)} = 75 \text{ Ohm}$$

$$R_{TX} \text{ (для +20dBm)} = 30 \text{ Ohm}$$

Після опрацювання розрахунків ми можемо отримати такі дані:

Режим роботи	E_{cycle} , мДж
1 - SF9 i +14dBm	21,38
2 - SF12 i +14dBm	168,04
3 - SF9 i +20dBm	52,97
4 - SF12 i +20dBm	419,60

Розраховуємо кількість циклів для обраних літій-іонних конденсаторів за формулами нижче.

Енергія LIC при заданій напрузі :

$$E_{LIC}(V) = \frac{1}{2} C \cdot (V_{max}^2 - V_{min}^2)$$

$$E_{LIC} 10F \sim 27.45 \text{ Дж}$$

$$E_{LIC} 20F \sim 54.9 \text{ Дж}$$

Для дешевих LIC з мінімальною ємністю 10F та 20F отримуємо таку кількість циклів до повного розряду :

Режим роботи	Кількість повних циклів для LIC 10F	Кількість повних циклів для LIC 20F
1 - SF9 i +14dBm	1283	2566
2 - SF12 i +14dBm	163	326
3 - SF9 i +20dBm	518	1036
4 - SF12 i +20dBm	65	130

Звичайно, треба зважати, що розрахунки зроблені за допомогою сталого навантаження, а не динамічного, яким буде мікросхема чи модуль LORA, тому вираховуємо коефіцієнт, який можна буде використати для корекції :

$$V_{max} = 3.5V$$

$$V_{min} = 2.6V$$

$$V_{пот.} = 3.3V$$

$$k = \frac{2V_{пот.} \cdot \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)}{V_{max}^2 - V_{min}^2}, \quad \text{таким чином } k \sim 1.16$$

Цей коефіцієнт ми можемо використати для корекції наших вимірних значень. Тобто, значення кількості циклів з лабораторного стенду потрібно буде поділити на k .

4.4. Результати досліджень

Після вимірів ми отримали таку табличку, в ній результати вищі за розрахункові, так як в розрахунках ми брали сталу напругу, але вони доводять коректність розрахунків. Тому для отримання потрібних значень нам ще треба данні з таблиці з розрахунками поділити на коефіцієнт $k \sim 1.16$

Режим роботи	Кількість повних циклів для LIC 10F	Кількість повних циклів для LIC 20F
1 - SF9 i +14dBm	1335	2684
2 - SF12 i +14dBm	173	340
3 - SF9 i +20dBm	520	1108
4 - SF12 i +20dBm	66	134

ВИСНОВКИ

Після зіставлення розрахунків та експериментальних даних (навіть незважаючи на багато де приблизний характер даних та припущення) ми

впевнилися в життєздатності використання літій-іонних конденсаторів в мініатюрних датчиках з автономним живленням. Ці елементи зможуть зробити ці датчики не тільки дуже довговічними і не потребуючими зміни джерела живлення, а й забезпечать стабільну роботу навіть в умовах мінусових температур, що є проблемою для більшості недорогих сучасних джерел живлення. При цьому навіть зараз LIC мають дуже привабливу вартість, що також допоможе у масштабуванні та впровадженні подібних рішень.

Також на основі виконаної роботи можна сформулювати практичні рекомендації для проектування мініатюрних всесезонних сенсорів на LIC:

- підбирати режими LoRa (SF та потужність) з урахуванням Time-on-Air, оскільки саме передача є основним “енергетичним ударом” у коротких інтервалах;
- закладати запас по енергії на втрати в перетворювачах живлення (LDO/DC–DC), а також на недоступну частину енергії нижче порогу стабільної роботи електроніки;
- обмежувати максимальну напругу заряду LIC у практичних архітектурах (наприклад, 3.4–3.5 В) як компроміс між ресурсом/надійністю та простотою схеми контролю;
- враховувати реальні польові сценарії з поганою інсоляцією (похмурі дні, сніг/бруд на сонячному елементі) та проектувати енергобаланс так, щоб датчик витримував тривалі періоди з мінімальною підзарядкою.

Напрямами подальшого розвитку дослідження може бути:

1. стендові випробування в термокамері для оцінки впливу температури на ESR, корисну енергоємність і саморозряд LIC;
2. перехід від резистивної моделі навантаження до “динамічної” — використання реального LoRa-модуля для точнішого профілю струму;
3. уточнення моделей під конкретні схеми керування зарядом/розрядом (energy harvesting контролери, компараторні схеми або MCU-контроль) і оцінка їхнього струму спокою;

4. перевірка довготривалої деградації в польових умовах та формування рекомендацій щодо оптимального монтажу датчика для зменшення ризику втрати підзаряду взимку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. IoT Analytics - State of IoT 2025: Number of connected IoT devices growing 14% to 21.1 billion globally - <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>

2. Precedence Research - Agriculture Sensor Market Size and Forecast 2025 to 2034 - <https://www.precedenceresearch.com/agriculture-sensor-market>
3. SR65 868 MHz Wireless Outdoor Temperature Sensor - <https://www.thermokon.de/direct/alterra-base/mimes/get/0479605078a97feac>
4. Wireless Temperature Sensor MONNIT - https://www.sensorstecnic.net/media/productes/pdf/MDS_001_Temperature_Sensor_Data_Sheet.pdf
5. Solar-Powered BLE Sensor Beacon Reference Design Kit - <https://www.farnell.com/datasheets/2629520.pdf>
6. NASA-JSC - Performance and Safety of Lithium-ion Supercapacitor - <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20130000014/downloads/20130000014.pdf>
7. LCSC - <https://www.lcsc.com/category/1143.html>
8. European Electric Vehicle Congress Brussels, Belgium, 3rd – 5th December 2014 - Lithium-ion Capacitor - Electrical and Thermal Characterization of Advanced Rechargeable Energy Storage Component - https://www.researchgate.net/publication/266679610_Lithium-ion_Capacitor_-_Electrical_and_thermal_characterization_of_Advanced_Rechargeable_Energy_Storage_Component
9. Journal of The Electrochemical Society, 2021 168 - A Fast and Scalable Pre-Lithiation Approach for Practical Large-Capacity Lithium-Ion Capacitors - https://www.researchgate.net/publication/356153017_A_Fast_and_Scalable_Pre-Lithiation_Approach_for_Practical_Large-Capacity_Lithium-Ion_Capacitors
10. ResearchGate - Evaluation of Energy Consumption of LPWAN Technologies https://www.researchgate.net/publication/350641637_Evaluation_of_Energy_Consumption_of_LPWAN_Technologies
11. Monitoring tool to test STM32 applications at run-time <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemonitor.html>
12. Journal of Electroanalytical Chemistry - Leakage current and self-discharge in lithium-ion capacitor - https://drive.google.com/file/d/1X0rbxqeK_yz4EH7ZCJvz6De0ozSdmCFC/view

13. Taoufik Bouguera, Jean-François Diouris, Jean-Jacques Chaillout, Randa Jaouadi, Guillaume Andrieux - Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN - <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/7/2104>