

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

(тема)

Розробка енергоефективного пристрою для організації зв'язку у вбудованих
системах

Виконав: студент 2 курсу, гр. КІТПВм-19-1
Моцний В. О.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 151 Автоматизація
та комп'ютерно-інтегровані технології
освітньої програми Комп'ютерно-інтегровані
технологічні процеси і виробництва
(код і повна назва напрямку)

Тип програми освітньо-професійна
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Олександров Ю. М.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І.Ш.
(прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва
	(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«_____» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Моцному Валерію Олеговичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка енергоефективного пристрою для організації зв'язку у вбудованих системах

затверджена наказом по університету від 02.11. 2020 р. № 1511 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 14.12.2020 р.

3. Вихідні дані до роботи Об'єкт дослідження – мікроконтролерні засоби, що становлять основу бездротових сенсорних мереж; Предмет дослідження –

мікроконтролерні засоби, що становлять основу

бездротових сенсорних мереж; Мета роботи – розробити методику зниження споживання енергії мікронтролерними засобам вбудованих системах.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Вступ;

4.2 Аналіз технології обробки даних в IoT;

4.3 Аналіз методів зниження споживання енергії та вибір типу мікроконтролеру для енергоефективного пристрою;

4.4 Моделювання енергозберігаючого профілю роботи мікроконтролерного Засобу;

4.5 Експериментальні дослідження;

4.6 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 15 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Керівник (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літератури за темою роботи	01.09.2020	Вик.
2	Аналіз технології обробки даних в IoT	10.9.2020	Вик.
3	Аналіз методів зниження споживання енергії та Вибір типу мікроконтролеру для енергоефективного пристрою	17.09.2020	Вик.
4	Вибір інструменту для моделювання	30.09.2020	Вик.
5	Експериментальні дослідження	20.11.2020	Вик.
6	Розрахунок природного та штучного освітлення в приміщенні	23.11.2020	Вик.
7	Оформлення пояснювальної записки	25.11.2020	Вик.
8	Подання роботи до ДЕК	14.12.2020	Вик.

Дата видачі завдання 14.12.2020

Студент

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

Моцний В.О.

(прізвище, ініціали)

Олександров Ю.М.

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 84 с., 3 табл., 35 рис., 2 дод., 25 джерела.

ІОТ, МІКРОКОНТРОЛЕР, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, STM32L051,
СПОЖИВАННЯ СТРУМ, СТРУКТУРНА СХЕМА, RFM69HW.

Об'єкт дослідження – процес підвищення енергоефективності електронних пристроїв у вбудованих системах.

Предмет дослідження – мікроконтролерні засоби, що становлять основу бездротових сенсорних мереж.

Мета атестаційної роботи – вибір методів зниження споживання енергії мікроконтролерними засобам вбудованих системах та збільшення часу автономної роботи.

У магістерській атестаційній роботі проведено аналіз принципів побудови бездротової сенсорної мережі для обміну повідомленнями між пристроями у вбудованих системах. Розроблена структурна схема мікропроцесорного пристрою, що становить основу бездротової мережі. Виконане моделювання енергетичного профілю роботи мікроконтролерного модуля NUCLEO-L031. Для моделювання роботи мікроконтролерного пристрою обрано інтегроване середовище STM32CubeIDE. Задано реальний сценарій роботи для перевірки очікуваного рівня споживання енергії від батареї потужністю 700 мАч. За розробленою структурною схемою та попередніми теоретичними результатами моделювання створено два модуля: тестовий зразок модуля ІоТ; тестовий зразок модуля керування та збору даних.

Розроблено алгоритм роботи модуля ІоТ та програма, в якій реалізовано запропоновану методику синхронізації пристроїв та наступного переходу в енергозберігаючий режим для економії енергії живлення.

Результати магістерської атестаційної роботи опубліковані в журналі “Наука онлайн”.

ABSTRACT

IOT, MICROCONTROLLER, ENERGY EFFICIENCY, STM32L051, CURRENT CONSUMPTION, STRUCTURAL DIAGRAM, RFM69HW.

Explanatory note contains: 84 pp., 3 tables, 35 figures, 2 appendix, 25 sources.

The object of research – process of increasing the energy efficiency of electronic devices in embedded systems.

The subject of research – microcontroller tools that form the basis of wireless sensor networks.

The purpose of the work – choice of methods to reduce energy consumption by microcontrollers in embedded systems and increase the battery life.

In the master's attestation work the analysis of principles of construction of a wireless sensor network for exchange of messages between devices in embedded systems is carried out. The block diagram of the microprocessor device which is a basis of a wireless network is developed.

The modeling of the energy profile of the NUCLEO-L031 microcontroller module is performed. The STM32CubeIDE integrated environment was chosen to simulate the operation of the microcontroller device. A real scenario was set to check the expected level of power consumption from a 700 mAh battery.

According to the developed structural scheme and previous theoretical results of modeling, two modules were created:

- test sample of the IoT module;
- test sample of control and data collection module.

The algorithm of operation of the IoT module and the program in which the offered technique of synchronization of devices and the subsequent transition to an energy saving mode for economy of power supply was realized are developed.

The results of the master's certification work are published in the journal "Science Online".

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	8
Вступ.....	9
1 Аналіз сучасного стану технології обміну даними у вбудованих системах.....	11
1.1 Аналіз вимог до бездротових сенсорних мереж.....	11
1.2 Аналіз факторів, що впливають на розробку моделей сенсорних мереж.....	13
1.3 Аналіз особливостей апаратного забезпечення компонентів сенсорних мереж.....	14
1.4 Порівняння протоколів передачі даних в бездротових мережах.....	17
1.5 Аналіз методів кодування інформації що передається.....	20
1.6 Висновки до 1 розділу.....	31
2 Вибір мікроконтролерних засобів для побудови енергоефективного пристрою	32
2.1 Вибір сімейства мікроконтролерів для побудови енергоефективного пристрою.....	32
2.2 Висновки до 2 розділу.....	40
3 Постановка задачі експеримента з моделювання енергоефективного профілю мікроконтролерного пристрою.....	41
3.1 Вибір інструменту для моделювання.....	41
3.2 Моделювання енергозберігаючого профілю роботи мікроконтролерного засобу.....	42
3.3 Висновки до 3 розділу.....	51
4 Експериментальні дослідження.....	52
4.1 Розробка структури базового модуля бездротової мережі.....	52

	7
4.2 Розробка структурної схеми сенсорного модуля	53
4.3 Вибір радіомодуля для реалізації функції обміну даними.....	56
4.4 Представлення результатів тестових випробувань	63
4.5 Висновки до 4 розділу.....	72
5 Розрахунок природно та штучного освітлення в приміщенні	73
5.1 Розрахунок природного освітлення в приміщенні	73
5.2 Розрахунок штучного освітлення в приміщенні.....	75
5.3 Висновки до 5 розділу.....	76
Висновки.....	77
Перелік джерел посилання	79
Додаток А Код програми	82
Додаток Б Демонстраційний матеріал	93

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ІН – ідентифікаційний номер;

ІЧ – інфрачервоний порт;

ЧМ – частотна модуляція;

АМІ – Alternate Mark Inversion;

АVR – Advanced Virtual RISC;

ССР – corner-cube retroreflector;

СОВ – Chip-on-Board;

ІоТ – internet of things;

ІSM – industrial, scientific and medical;

LP Run – Low Power Run;

LP Sleep – Low Power Sleep;

MAC – medium access control;

NRZ – Non Return to Zero;

ООК – On-Off Keying;

QAM – Quadrature Amplitude Modulation;

RF – radio frequency;

RTC – Real Time Clock;

SPI – Serial Peripheral Interface;

SWV – Serial Wire Viewer;

USB – Universal Serial Bus;

WLAN – wireless local area networks.

ВСТУП

Сучасні успіхи в області бездротового зв'язку і цифрової електроніки зробили можливим створення дешевих, низькоспоживаючих і багатофункціональних вбудованих пристроїв, що мають малі габарити і здатні передавати дані по радіоканалу на короткі відстані. Як правило, кожен такий пристрій має набір датчиків, мікропроцесор і радіочастотний модем, що дозволяє реалізувати різні протоколи мережевої взаємодії між безліччю аналогічних пристроїв – створювати так звані бездротові сенсорні мережі.

У промисловості сенсорні мережі можна використовувати для безперервного моніторингу обладнання та передбачення його відмов або необхідності профілактичного обслуговування з набагато більшою точністю, що дозволить компаніям уникнути дорогих аварій або простоювання виробничих ліній.

Вузли бездротової мережі здатні ретранслювати повідомлення по віртуальному ланцюгу, забезпечуючи значну площу покриття системи при малій потужності передавачів і, отже, істотну економію енергії.

Основними особливостями і перевагами бездротової сенсорної мережі є:

- низька вартість і малі габарити вузла;
- висока енергетична ефективність – термін експлуатації може досягати декількох років;
- великі масштаби мереж (від десятків до тисяч пристроїв) з щільним розміщенням вузлів у просторі;
- високі надійність і відмовостійкість системи досягаються комунікаційною надмірністю – наявністю безліч альтернативних маршрутів доставки даних;
- стійкість до змін топології мережі і характеристик середовища поширення радіохвиль;
- самоналаштування і самовідновлення мережі;
- здатність вузлів спільно обробляти отримані дані і приймати рішення на базі розподілених алгоритмів;

– обмежені комунікаційні, обчислювальні і енергетичні ресурси вузла.

Таким чином, тема роботи «Розробка енергоефективного пристрою для організації зв'язку у вбудованих системах» є актуальною.

Об'єкт дослідження – процес підвищення енергоефективності електронних пристроїв у вбудованих системах.

Предмет дослідження – мікrontролерні засоби, що становлять основу бездротових сенсорних мереж.

Мета атестаційної роботи – вибір методів зниження споживання енергії мікrontролерними засобами вбудованих системах та збільшення часу автономної роботи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– провести аналіз вимог до вибору обладнання та побудови бездротових мереж;

– провести аналіз методів підвищення енергоефективності електронних пристроїв у вбудованих системах;

– розробити структуру енергоефективного мікропроцесорного пристрою для використання в складі вбудованих систем;

– провести експериментальне дослідження використання обраного методу зниження споживання енергії;

– оформити атестаційну роботу магістра згідно ДСТУ 3008:2015 [1], методичними вказівками з «Розробки й оформлення магістерської атестаційної роботи» для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітні програми: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» [2] та згідно з положеннями [3-6].

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЇ ОБМІНУ ДАНИМИ У ВБУДОВАНИХ СИСТЕМАХ

1.1 Аналіз вимог до бездротових сенсорних мереж

Сенсорні мережі заснованих на спільній роботі великого числа дрібних вузлів, які складаються з модулів збору і обробки даних, а також передавача. Такі мережі мають значні переваги перед набором традиційних датчиків. Ось дві ключові особливості традиційних датчиків:

- датчики можуть бути розташовані далеко від спостережуваного явища. Використовуючи такий підхід потрібно багато датчиків, які використовують деякі складні методи, щоб виділити цілі з шуму;

- можна розгорнути кілька датчиків, які виконують тільки збір даних. Ретельно розробити позиції датчиків і топологію. Вони передаватимуть спостереження в центральні вузли, де і буде виконуються збір і обробка даних [7].

Сенсорна мережа складається з великого числа вузлів (мотів), які густо розташовані близько до спостережуваного явища. Положення мотів не потрібно попередньо розраховувати. Це дозволяє випадковим чином розташовувати їх у важкодоступних місцевостях або використовувати для операцій з надання допомоги, які вимагають швидкого реагування. З іншого боку, це означає, що мережеві протоколи і алгоритми роботи мотів повинні мати можливість самоорганізації.

Ще однією унікальною особливістю сенсорних мереж є спільна роботи окремих вузлів. Моти оснащені процесором. Тому замість передачі вихідних даних, вони можуть їх обробляти, виконуючи прості обчислення і передавати далі тільки необхідні і частково оброблені дані.

Описані вище особливості забезпечують широкий спектр застосування сенсорних мереж [8].

Реалізація завдань, що вимагають використання бездротових сенсорних мереж, вимагають спеціальних методів. Чимало протоколів і алгоритмів розроблені для традиційних бездротових тимчасових мереж, тому вони не дуже добре підходять для унікальних особливостей і вимог сенсорних мереж.

Наведемо відмінності сенсорних і однорангових мереж:

- кількість вузлів сенсорної мережі може бути на кілька порядків вище, ніж вузлів однорангової мережі;
- вузли щільно розташовані;
- вузли схильні до збоїв;
- топологія сенсорних мереж може часто змінюватися;
- вузли в основному використовують ширококомвні повідомлення, в той час як більшість тимчасових мереж засновані на зв'язку "точка-точка";
- вузли обмежені в живленні, обчислювальних потужностях, і пам'яті;
- вузли не можуть мати глобальний ідентифікаційний номер (ІН) через велику кількість накладних витрат і великої кількості датчиків.

Так як вузли в мережі розташовані щільно, сусідні вузли можуть виявитися дуже близько один до одного. Отже, модулі зв'язку в сенсорних мережах будуть споживати менше енергії. Крім того, можна використовувати низьку потужність сигналу передачі даних, що корисно для батарейного живлення [9].

Одним з найбільш важливих обмежень для вузлів є мале споживання енергії. Вузлі мережі мають обмежені джерела енергії, тому, якщо традиційні мережі спрямовані на досягнення високої якості сигналу, мережеві протоколи мотів повинні зосередитися головним чином на збереження енергії. Вони повинні володіти механізмами, які дають користувачеві можливість продовження часу життя мота за рахунок зниження пропускну здатності, або збільшення часу затримки передачі даних.

1.2 Аналіз факторів, що впливають на розробку моделей сенсорних мереж

Розробка сенсорних мереж залежить від багатьох факторів, які включають в себе відмовостійкість, масштабованість, витрати виробництва, вид операційного середовища, топологію сенсорної мережі, апаратні обмеження, модель передачі інформації та споживання енергії. Ці фактори розглядаються багатьма дослідниками. Однак ні в одному з цих досліджень повністю не враховані всі фактори, які впливають на розробку мереж. Вони важливі, оскільки служать в якості орієнтира для розробки протоколу або алгоритмів роботи сенсорних мереж. Крім того, ці фактори можуть бути використані для порівняння різних моделей.

1.2.1 Відмовостійкість

Деякі вузли можуть вийти з ладу через відсутність енергії, фізичних ушкоджень або стороннього втручання. Відмова вузла не повинна вплинути на роботу сенсорної мережі. Це питання надійності і відмовостійкості. Відмовостійкість – здатність підтримувати функціональність сенсорної мережі без збоїв при виході з ладу вузла. Надійність $R_k(t)$ або відмовостійкості вузла моделюється за допомогою розподілу Пуассона для визначення вірогідності відсутності несправності вузла в період часу $(0; t)$.

Варто звернути увагу на те, що протоколи і алгоритми можуть бути орієнтовані на рівень відмовостійкості, необхідний для побудови сенсорних мереж. Якщо середовище, в якій вузли розміщені мало схильна до втручань, то протоколи можуть бути менш відмовостійкими. Наприклад, якщо вузли мережі інтегруються в систему управління розумним будинком, щоб стежити за вологістю і рівнем температури, вимоги до відмовостійкості може бути низьким, оскільки такого роду сенсорні мережі не можуть вийти з ладу і «шум» навколишнього середовища не впливає на їх роботу. З іншого боку, якщо вузли використовуються у виробництві для спостереження за станом технологічного процесу, то відмовостійкість повинна бути високою, оскільки спостереження є критично важливими і вузли можуть бути знищені під час виходу з ладу обладнання. В результаті, рівень відмовостійкості

залежить від застосування сенсорних мереж і моделі повинні бути розроблені з урахуванням цього.

1.2.2 Масштабованість

Кількість вузлів, розгорнутих для вивчення конкретного явища, може бути близько сотень або тисяч. В залежності від програми, число може досягати екстремальних значень (мільйонів). Нові моделі повинні бути в змозі працювати з цим числом вузлів. Вони також повинні використовувати високу щільність сенсорних мереж, яка може варіюватися від декількох вузлів до декількох сотень на виробничій ділянці.

1.3 Аналіз особливостей апаратного забезпечення компонентів сенсорних мереж

Вузол сенсорних мереж складаються з чотирьох основних компонентів, як показано на рис. 1.1: блок збору даних, блок обробки, передавач і блок живлення. Наявність додаткових модулів залежить від застосування мереж, наприклад, можуть бути модулі визначення місцезнаходження, силовий генератор і мобілізатор (МАС). Модуль збору даних, як правило, складаються з двох частин: датчики і аналого-цифровий перетворювачів (АЦП).

Аналоговий сигнал, що генерується датчиком на основі спостережуваного явища, перетворюється в цифровий сигнал за допомогою АЦП, а потім подається в блок обробки. Модуль обробки, який використовує інтегровану пам'ять, керує процедурами, які дозволяють спільно з іншими вузлами виконувати поставлені завдання спостереження. Блок передавача (трансивер) з'єднує вузол з мережею. Одним з найбільш важливих компонентів вузла є блок живлення. Блок живлення

може мати можливість підзарядки, наприклад, використовуючи сонячні батареї.

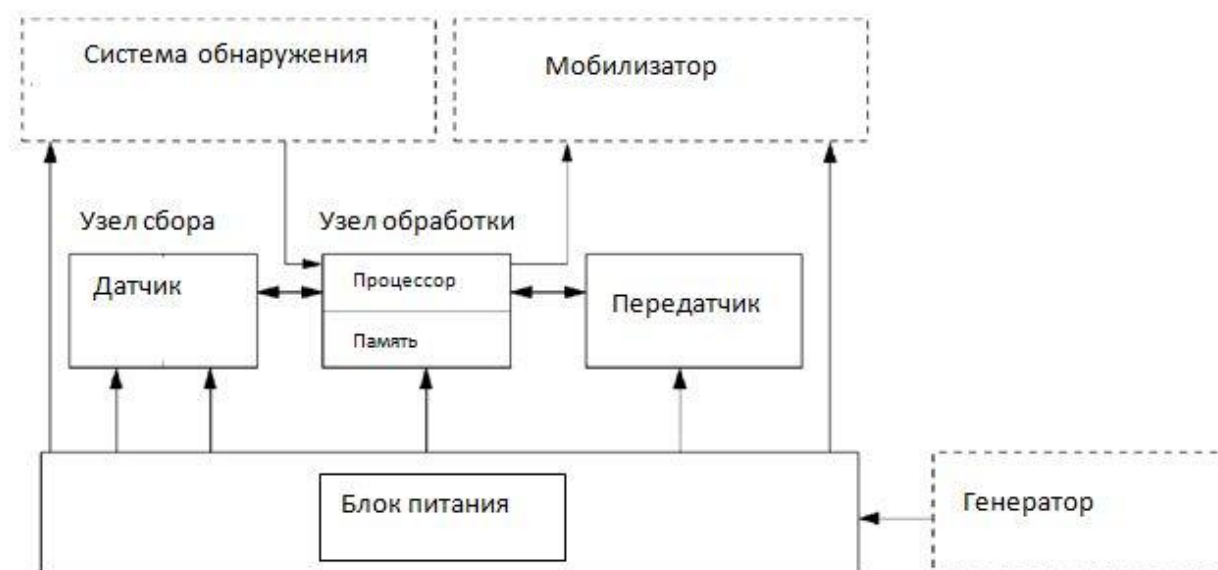


Рисунок 1.1 – Структурна схема вузла сенсорної мережі

Більшості вузлів, що передають дані і збирають дані, необхідно знати своє місце розташування з високою точністю. Тому в загальну схему включений модуль визначення місця розташування. Іноді може знадобитися мобілізатор, який при необхідності переміщує вузол, коли це необхідно для виконання поставлених завдань. Всі ці модулі, можливо, буде потрібно розмістити в корпус розміром 50x20 мм. Розмір вузла може бути менше кубічного сантиметра і досить легким, щоб залишатися в повітрі. Крім розміру, є деякі інші жорсткі обмеження для вузлів. Вони повинні:

- споживати дуже мало енергії;
- працювати з великою кількістю вузлів на малих відстанях;
- мати низьку вартість виробництва;
- бути автономними і працювати без нагляду;
- адаптуватися до навколишнього середовища.

Оскільки вузли можуть бути недоступними, життя сенсорної мережі залежить від живлення окремих вузлів. Живлення обмежений ресурс і через обмеження за розміром.

Продовжити термін служби сенсорних мереж можна використовуючи батареї що заряджаються, наприклад, отримуючи енергію з навколишнього середовища. Сонячні батареї – яскравий приклад використання підзарядки.

Модуль передачі даних вузла може бути пасивним або активним оптичним пристроєм, як в смарт-вузлі або радіочастотним (RF) передавачем. Для радіочастотної передачі потрібен модуль модуляції, який використовує певну смугу пропускання, модуль фільтрація, демодуляція, що робить їх більш складними і дорогими. Крім того, можливі втрати при передачі даних між двома вузлами через те, що антени розташовано близько до землі. Проте, радіозв'язок є кращою в більшості існуючих проектів сенсорних мереж, так як частоти передачі даних низькі (як правило, менше 1 Гц), а частота циклів передачі висока через малі відстані. Ці характеристики дозволяють використовувати низькі радіочастоти. Однак, проектування енергоефективних і низькочастотних радіопередавачів як і раніше є технічно складним завданням, а існуючі технології, які використовуються при виробництві Bluetooth пристрої, не є достатньо ефективним для сенсорних мереж, оскільки споживають багато енергії.

Хоча в даний час процесори постійно зменшують свої габарити і збільшують потужність, обробка та зберігання даних вузлом як і раніше є його слабким місцем. Наприклад, модуль обробки смарт-вузла складається з процесора 4 МГц Atmel AVR8535, мікроконтролера з 8 Кбайт для інструкцій, флеш-пам'яті, 512 байт RAM і 512 байт EEPROM [10]. У цьому модулі, який має 3500 байт під ОС і 4500 байт вільної пам'яті під код, використовується операційна система TinyOS. Модуль обробки іншого прототипу вузла IAMPS має процесор SA-1110 з частотою 59-206 МГц. На вузлах IAMPS використовується багатопотокова операційна система L-OS. Більшість завдань збору даних вимагають знань позиції вузла.

1.4 Порівняння протоколів передачі даних в бездротових мережах

1.4.1 Протокол ZigBee

Протокол ZigBee був спеціально розроблений для мінімізації споживання електроенергії мотами. Тому на мотах проводиться тільки первинна обробка, орієнтована на зменшення обсягу інформації, що передається.

Для вироблення стандарту, в тому числі стека протоколів для бездротових сенсорних мереж, ZigBee використовував розроблений раніше стандарт IEEE 802.15.4, який описує фізичний рівень і рівень доступу до середовища для бездротових мереж передачі даних на невеликі відстані (до 75 м) з низьким енергоспоживанням, але з високим ступенем надійності. На мережевому рівні в ZigBee визначені механізми маршрутизації і формування логічної топології мережі (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Конфігурація стеків протоколів 802.15.4 і ZigBee

На початку роботи відбувається ідентифікація всіх вузлів, а потім вже формується схема маршрутизації. Всі вузли в стандарті ZigBee за рівнем складності розбиваються на три класи. Перший і вищий з них - координатор - управляє

роботою мережі, зберігає дані про її топології та служить шлюзом для передачі даних, що збираються всією бездротовою сенсорною мережею, для подальшої обробки. У сенсорних мережах, як правило, використовується один координатор. До наступного класу належать вузли маршрутизатори, вони приймають і передають дані, а також можуть визначати напрямок передачі. І нарешті, найпростіший мот може лише передавати дані найближчому маршрутизатору. Таким чином, виходить, що стандарт ZigBee підтримує мережу з кластерною архітектурою. Кластер утворює маршрутизатор і найпростіші вузли, у яких він запитує сенсорні дані. Маршрутизатори кластерів ретранслюють дані один одному, і в кінцевому рахунку дані передаються координаторові. Координатор зазвичай має зв'язок з IP-мережею, куди і прямують дані для остаточної обробки. На сучасному етапі розвитку в протоколі ZigBee окремо вузли-маршрутизатори та найпростіші вузли в більшості випадків об'єднані в один, який виконує одночасно обидві функції.

Крім стандартів 802.15.4/ZigBee для створення БСМ можуть використовуватися специфікації інших стандартів бездротового зв'язку заснованих на IEEE 802.15.4 -2005, зокрема WirelessHART і ISA100. Однак в даний час в області технологій бездротових сенсорних мереж ZigBee є стандартом, в найбільшій мірою підкріпленим представленими на ринку повністю сумісними апаратними та програмними засобами. Крім того протоколи ZigBee дозволяють мережевим пристроям перебувати в сплячому режимі більшу частину часу, що істотно збільшує ресурс роботи вузлів при харчуванні від батарейних джерел. У БСМ на основі ZigBee підтримується режим "профілів пристроїв" або профілів для різних датчиків, які сумісні на рівні стека протоколу і можуть об'єднуватися в мережу, передавати, приймати і ретранслювати інформацію. У той же час "розуміти" цю інформацію буде тільки той пристрій, для якого вона призначена.

В даний час, є досить велика кількість різних ZigBee-продуктів, починаючи від мікросхем приймачів стандарту IEEE 802.15.4 і закінчуючи готовими OEM-модулями з вбудованим програмним забезпеченням мережевого стека ZigBee. Всі пристрої стандарту ZigBee в залежності від рівня складності поділяються на три

класи, вищий з яких - координатор - керує процесом формування мережі, зберігає дані про її топології та служить шлюзом для передачі даних, що збирають від усіх сенсорів БСМ для їх подальшої обробки. У мережі, як правило, використовується тільки один PAN-координатор. Середній за складністю пристрій – маршрутизатор здатний ретранслювати повідомлення, підтримувати всі топології мережі, а також виконувати функції координатора кластеру. І, нарешті, найпростіший пристрій – звичайний вузол здатний лише передавати дані найближчому маршрутизатору.

1.4.2 Інші способи організації зв'язку у бездротових мережах

У сенсорній мережі multi-hop, вузли спілкуються за допомогою бездротового зв'язку. Зв'язок може здійснюватися за допомогою радіо, інфрачервоний порт або оптичних носіїв. Для того щоб глобально використовувати ці способи середовище передачі має бути доступним у всьому світі. Один з варіантів радіозв'язку є використання промислових, наукових і медичних смуг (ISM), які доступні без ліцензій в більшості країн.

Деякі види частот, які можуть бути використані, описані в міжнародній таблиці частот, що міститься в статті S5 про регламент радіозв'язку. Деякі з цих частот, вже використовуються в бездротовій телефонії та бездротових локальних мережах (WLAN). Для сенсорних мереж малого розміру і низької вартості, підсилювач сигналу не потрібен.

Апаратні обмеження і знаходження компромісу між ефективністю антени і споживанням енергії накладають певні обмеження на вибір частоти передачі в діапазоні надвисоких частот.

В архітектурі WINS також використовується радіозв'язок. Інший можливий спосіб зв'язку в сенсорних мережах є ІЧ-порт. ІЧ-зв'язок доступний без ліцензії і захищений від перешкод електричних приладів. ІЧ-передавачі дешевші і простіші у виробництві. Основним недоліком такого зв'язку, це вимога прямої видимості між відправником і отримувачем. Це робить ІЧ-зв'язок небажаним для використання в сенсорних мережах через середовища передачі.

Альтернативний спосіб передачі використовують смарт-вузли, які є модулями автоматичного моніторингу та обробки даних. Вони використовують для передачі оптичне середовище. Є дві схеми передачі, пасивна з використанням *corner-cube retroreflector* (CCR) і активна з використанням лазерного діода і керованих дзеркал. У першому випадку не потрібне інтегроване джерело світла, для передачі сигналу використовується конфігурація з трьох дзеркал (CCR). Активний метод використовує лазерний діод і систему активного лазерного зв'язку, для відправки світлових променів передбачуваному приймачеві. Незвичайні вимоги до застосування сенсорних мереж роблять вибір середовища передачі складним. Наприклад, морські додатки вимагають використання передачі у водному середовищі. Тут потрібно використовувати довгохвильові випромінювання, які можуть проникати крізь поверхні води. У важкодоступній місцевості або на поле бою можуть виникнути помилки і більші перешкоди. Крім того може виявитися що, антени вузлів не володіють потрібною висотою і потужністю випромінювання для зв'язку з іншими пристроями. Отже, вибір середовища передачі повинні супроводжуватися надійними схемами модуляції і кодування, що залежати від характеристик передавального каналу.

1.5 Аналіз методів кодування інформації що передається

При передачі даних по бездротових каналах зв'язку застосовуються два основних типи кодування переданої інформації – на основі синусоїдального несучого сигналу і на основі послідовності прямокутних імпульсів [11], [12]. Перший спосіб часто називається також модуляцією або аналоговою модуляцією, підкреслюючи той факт, що кодування здійснюється за рахунок зміни параметрів аналогового сигналу. Другий спосіб зазвичай називають цифровим кодуванням. Ці способи відрізняються шириною спектру результуючого сигналу і складністю апаратури, необхідної для їх реалізації.

1.5.1 Аналогова модуляція

Основне завдання будь-якої системи зв'язку – передача інформації від джерела повідомлення до приймача найбільш економічним чином. Тому потрібно вибрати такий тип модуляції, який зводить до мінімуму дію перешкод і спотворень, досягаючи тим самим максимальної інформаційної швидкості і мінімального коефіцієнта помилок.

Аналогова модуляція застосовується для передачі даних по каналах з вузькою смугою частот. Так як апаратура передачі і прийому даних працює з даними в дискретному вигляді (тобто одиницям і нулям даних відповідають дискретні електричні сигнали), то при їх передачі через аналоговий канал потрібно перетворення дискретних даних в аналогові (модуляція). При прийомі таких аналогових даних необхідно зворотне перетворення – демодуляція. Модуляція/демодуляція – процеси перетворення цифрової інформації в аналогові сигнали і навпаки. При модуляції інформація може надаватися синусоїдальним сигналом тієї частоти, яку добре передає канал передачі даних.

До способів модуляції відносяться:

- амплітудна модуляція;
- частотна модуляція;
- фазова модуляція.

При амплітудній модуляції (рис. 1.3, б) змінюється тільки амплітуда синусоїди несучої частоти, при передачі логічної одиниці видається синусоїда однієї амплітуди, а при передачі логічного нуля іншої амплітуди [13]. Цей спосіб в чистому вигляді має низьку помилкостійкість і застосовується рідко. Перевага амплітудної модуляції – простота реалізації.

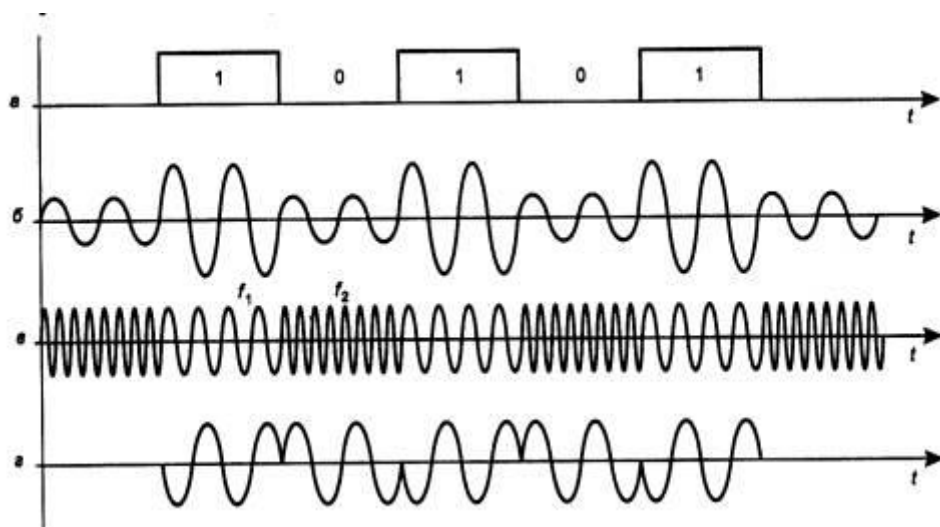


Рисунок 1.3 – Типи модуляції

При частотній модуляції (рис. 1.3, в) змінюється тільки частота несучої для логічної одиниці і логічного нуля вибираються синусоїди двох різних частот. Цей спосіб досить просто реалізувати, і часто застосовується при низькошвидкісній передачі даних. Частотній модуляції притаманний недолік – висока чутливість до зміни частоти сигналу при передачі.

При фазовій модуляції (рис. 1.3, г) логічної одиниці і логічного нуля відповідають сигнали однакової амплітуди і частоти, але відрізняються по фазі (наприклад, 0 і 180 градусів). Незважаючи на гадану простоту методу фазової модуляції йому притаманні деякі недоліки, пов'язані з труднощами технічної реалізації.

З комбінованих методів широко використовуються методи квадратурної амплітудної модуляції (QAM), які з'єднують амплітудну модуляцію з 4 рівнями амплітуди і фазову модуляцію з 8 значеннями зсуву фази [14]. Із 32 можливих комбінацій амплітуди і зсуву фази для передачі даних в різних модифікаціях методу використовуються лише деякі, в той час, як всі інші комбінації є забороненими, що дозволяє поліпшити розпізнавання помилкових сигналів.

Відомо, що частотна і фазова модуляції забезпечують кращу стійкість і більш високі енергетичні характеристики, ніж амплітудна модуляція, однак для цього їм потрібні великі необхідні смуги частот. Амплітудна модуляція підходить більше так як вона проста в реалізації та дешевше.

1.5.2 Цифрове кодування

При виборі способу кодування потрібно одночасно прагнути до досягнення кількох цілей [15]:

- мінімізувати ширину спектра сигналу, отриманого в результаті кодування;
- забезпечувати синхронізацію між передавачем і приймачем;
- забезпечувати стійкість до шумів;
- виявляти і по можливості виправляти бітові помилки;
- мінімізувати потужність передавача.

Більш вузький спектр сигналу дозволяє на одній і тій же лінії домагатися більш високої швидкості передачі даних. Спектр сигналу в загальному випадку залежить як від способу кодування, так і від тактової частоти передавача.

Синхронізація передавача і приймача потрібна для того, щоб приймач точно знав, в який момент часу необхідно зчитувати нову порцію інформації з лінії зв'язку. При передачі дискретної інформації час завжди розбивається на такти однаковою тривалості, і приймач намагається вважати новий сигнал в середині кожного такту, тобто синхронізувати свої дії з передавачем.

Проблема синхронізації в мережах вирішується складніше, ніж при обміні даними між близько розташованими пристроями. На невеликих відстанях добре працює схема, заснована на окремо тактуючій лінії зв'язку, так що інформація знімається з лінії даних тільки в момент приходу тактового імпульсу (рис. 1.4).

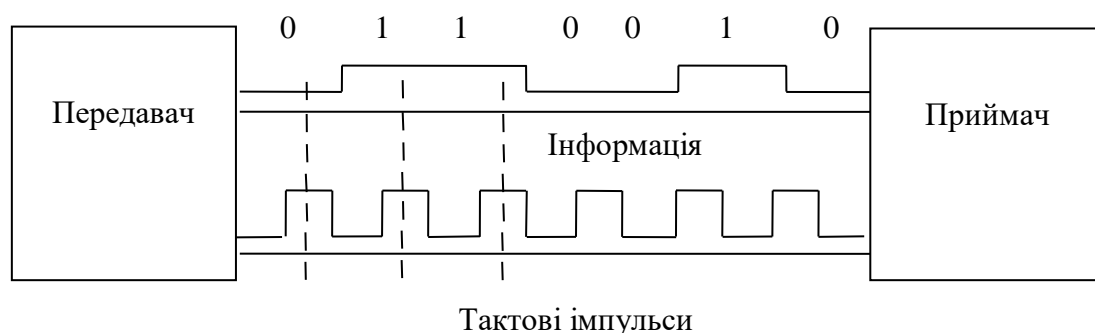


Рисунок 1.4 – Синхронізація приймача і передавача

На великих відстанях нерівномірність швидкості поширення сигналу може

привести до того, що тактовий імпульс прийде настільки пізніше або раніше відповідного сигналу даних, що біт даних буде пропущений або зчитаний повторно.

Для вирішення проблеми синхронізації застосовуються так звані коди, що самосинхронізуються, сигнали яких несуть для приймача вказівки про те, в який момент часу потрібно здійснювати розпізнавання чергового біта. Будь-який різкий перепад сигналу – фронт, може служити вказівкою на необхідність синхронізації приймача з передавачем.

При використанні синусоїда в якості несучого сигналу, результуючий код має властивість самосинхронізації, так як зміна амплітуди несучої частоти дає можливість приймачу визначити момент чергового такту.

Розпізнавання і корекція перекручених даних складно здійснити засобами фізичного рівня, тому найчастіше цю роботу беруть на себе протоколи, що лежать вище: канальний, мережевий, транспортний і прикладний [11]. З іншого боку, розпізнавання помилок на фізичному рівні економить час, так як приймач не чекає повного приміщення кадру в буфер, а відбраковує його відразу при розпізнаванні помилкових бітів всередині кадру.

На рис. 1.5, а показаний метод потенційного кодування, званий також кодуванням без повернення до нуля (NRZ). Остання назва відображає ту обставину, що при передачі послідовності одиниць сигнал не повертається до нуля протягом такту.

Переваги методу:

- простота реалізації;
- метод має гарну розпізнаваність помилок (завдяки наявності двох різко відмінних потенціалів);
- основна гармоніка f_0 має досить низьку частоту ($N / 2$ Гц), що призводить до вузького спектру.

Недоліки методу:

- метод не має властивість самосинхронізації. Навіть при наявності високочастотного тактового генератора приймач може помилитися з вибором

Однією з модифікацій методу NRZ є метод біполярного кодування з альтернативною інверсією (AMI). У цьому методі (рис. 1.5, б) використовуються три рівні потенціалу – негативний, нульовий і позитивний. Для кодування логічного нуля використовується нульовий потенціал, а логічна одиниця кодується або позитивним потенціалом, або негативним, при цьому потенціал кожної нової одиниці протилежний потенціалу попередньої [12].

Код AMI частково ліквідує проблеми постійної складової і відсутності самосинхронізації, властиві коду NRZ. Це відбувається при передачі довгих послідовностей одиниць. У цих випадках сигнал на лінії являє собою послідовність різнополярних імпульсів з тим же спектром, що і у коду NRZ, що передає нулі і одиниці, що чергуються, тобто без постійної складової і з основною гармонікою $N/2$ Гц (де N – бітова швидкість передачі даних). Довгі ж послідовності нулів також небезпечні для коду AMI, як і для коду NRZ – сигнал вироджується в постійний потенціал нульовий амплітуди. Тому код AMI вимагає подальшого поліпшення, хоча завдання спрощується, залишилося впоратися тільки з послідовностями нулів.

В цілому, для різних комбінацій біт на лінії використання коду AMI приводить до більш вузького спектру сигналу, ніж для коду NRZ, а значить, і до більш високої пропускної здатності лінії. Наприклад, при передачі одиниць, що чергуються, і нулів основна гармоніка f_0 має частоту $N/4$ Гц.

Код AMI надає також деякі можливості по розпізнаванню помилкових сигналів. Так, порушення суворого чергування полярності сигналів говорить про помилковий імпульсі або зникнення з лінії коректного імпульсу. Сигнал з некоректною полярністю називається забороненим сигналом (SV).

У коді AMI використовуються не два, а три рівня сигналу на лінії. Додатковий рівень вимагає збільшення потужності передавача приблизно на 3 дБ для забезпечення тієї ж достовірності прийому біт на лінії, що є загальним недоліком кодів з декількома станами сигналу в порівнянні з кодами, які розрізняють тільки два стани.

Крім потенційних кодів в мережах використовуються й імпульсні коди, в яких дані представлені повним імпульсом або ж його частиною – фронтом [13].

Найбільш простим випадком такого підходу є біполярний імпульсний код, в якому одиниця представляється імпульсом однієї полярності, а нуль – інший (рис. 1.5, в). Кожен імпульс триває половину такту. Такий код має відмінні властивостями, що самосинхронізуються, але постійна складова може бути присутня, наприклад, під час передачі довгої послідовності одиниць і нулів. Крім того, спектр у нього ширше, ніж у потенційних кодів. Так, при передачі всіх нулів або одиниць частота основної гармоніки коду буде дорівнює N Гц, що в два рази вище основної гармоніки коду NRZ і в чотири рази вище основної гармоніки коду АМІ при передачі одиниць, що чергуються, і нулів. Через занадто широкого спектру, біполярний імпульсний код використовується рідко.

У локальних мережах до недавнього часу найпоширенішим методом кодування був так званий манчестерський код (рис. 1.5, г).

У манчестерському коді для кодування одиниць і нулів використовується перепад потенціалу, тобто фронт імпульсу. При манчестерському кодуванні кожен такт ділиться на дві частини [14]. Інформація кодується перепадами потенціалу, що відбуваються в середині кожного такту. Одиниця кодується перепадом від низького рівня сигналу до високого, а нуль – зворотним перепадом. На початку кожного такту може відбуватися службовий перепад сигналу, якщо потрібно представити кілька одиниць або нулів підряд. Так як сигнал змінюється, принаймні, один раз за такт передачі одного біта даних, то манчестерський код володіє хорошими властивостями, що самосинхронізуються. Смуга пропускання манчестерського коду більш вузька, ніж у біполярного імпульсного. У нього також немає постійної складової, а основна гармоніка в гіршому випадку (при передачі послідовності одиниць або нулів) має частоту N Гц, а в кращому (при передачі одиниць, що чергуються, і нулів) вона дорівнює $N/2$ Гц, як і у кодів АМІ або NRZ. В середньому ширина смуги манчестерського коду в півтора рази вужча, ніж у біполярного імпульсного коду, а основна гармоніка коливається поблизу значення $3N/4$. Манчестерський код має ще одну перевагу перед біполярним імпульсним кодом. В останньому для передачі даних використовуються три рівні сигналу, а в манчестерському – два.

На рис. 1.5, д показаний потенційний код з чотирма рівнями сигналу для кодування даних. Це код 2B1Q, назва якого відображає його суть – кожні два біти (2B) передаються за один такт сигналом, що має чотири стани (1Q). При цьому способі кодування потрібні додаткові заходи по боротьбі з довгими послідовностями однакових пар біт, так як при цьому сигнал перетворюється в постійну складову. При випадковому чергуванні біт спектр сигналу в два рази вузькіший, ніж у коду NRZ, так як при тій же бітowej швидкості тривалість такту збільшується в два рази. Таким чином, за допомогою коду 2B1Q можна по одній і тій же лінії передавати дані в два рази швидше, ніж за допомогою коду AMI або NRZI. Однак для його реалізації потужність передавача повинна бути вище, щоб чотири рівні чітко розрізнялися приймачем на тлі перешкод.

Також використовуються методи відновлення спотворених і втрачених кадрів [15]. Вони засновані на повторну передачу кадру даних в тому випадку, якщо кадр втрачається і не доходить до адресата або приймач виявив в ньому спотворення інформації. Щоб переконатися в необхідності повторної передачі даних, відправник нумерує кадри, що відправляються і для кожного кадру очікує від приймача так званої позитивної квитанції – службового кадру, який подаватиметься про те, що вихідний кадр був отриманий і дані в ньому виявилися коректними. Час цього очікування обмежений – при відправці кожного кадру передавач запускає таймер, і, якщо після його закінчення позитивна квитанція не отримана, кадр вважається загубленим. Приймач у разі отримання кадру з перекрученими даними може відправити негативну квитанцію – явна вказівка на те, що даний кадр потрібно передати повторно.

Існують два підходи до організації процесу обміну квитанціями: з простоями і з організацією «вікна».

Метод з простоями вимагає, щоб джерело, що послав кадр, очікував отримання квитанції (позитивної або негативної) від приймача і тільки після цього послав наступний кадр (або повторював спотворений). Якщо ж квитанція не спадає протягом тайм-ауту, то кадр (або квитанція) вважається загубленим і його передача повторюється. На рис. 1.6, а видно, що в цьому випадку продуктивність

обміну даними істотно знижується, хоча передавач і міг би послати наступний кадр відразу ж після відправки попереднього, він зобов'язаний чекати приходу квитанції. Зниження продуктивності цього методу корекції особливо помітно на низькошвидкісних каналах зв'язку, тобто в територіальних мережах.

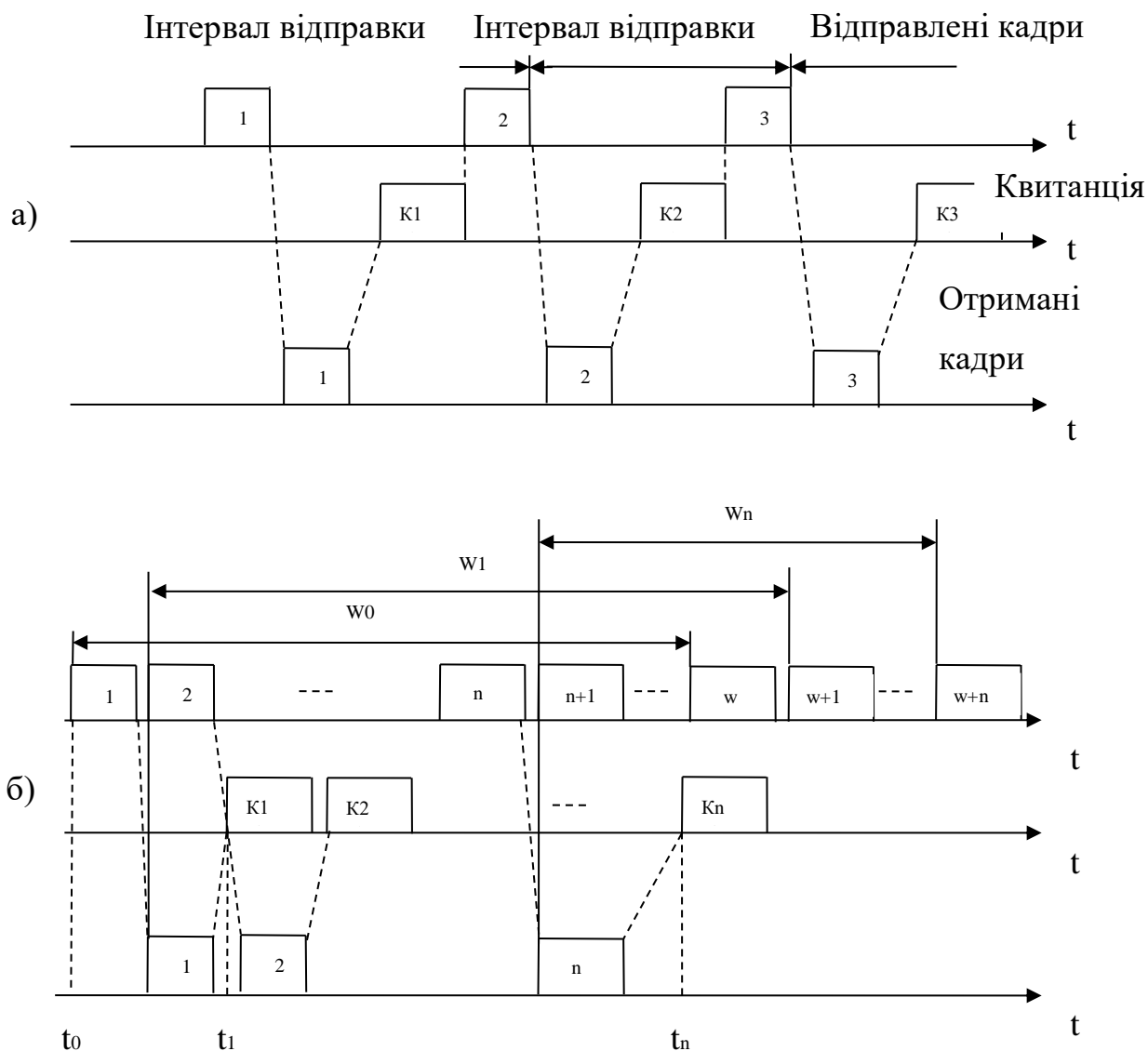


Рисунок 1.6 – Методи відновлення спотворених і втрачених кадрів

Другий метод називається методом «ковзного вікна». У цьому методі для підвищення коефіцієнта використання лінії джерелу дозволяється передати деяку кількість кадрів в безперервному режимі, тобто в максимально можливому для джерела темпі, без отримання на ці кадри позитивних відповідних квитанцій.

Кількість кадрів, які дозволяється передавати таким чином, називається розміром вікна. Рисунок 1.6, б ілюструє даний метод для вікна розміром в W кадрів.

Метод «ковзного вікна» складніший в реалізації, ніж метод з простоями, так як передавач повинен зберігати в буфері всі кадри, на які поки не отримані позитивні квитанції. Крім того, потрібно відстежувати кілька параметрів алгоритму: розмір вікна W , номер кадру, на який отримана квитанція, номер кадру, який ще можна передати до отримання нової квитанції.

Приймач може не посилати квитанції на кожен прийнятий коректний кадр. Якщо кілька кадрів прийшли майже одночасно, то приймач може послати квитанцію тільки на останній кадр. При цьому мається на увазі, що всі попередні кадри також дійшли успішно.

Деякі методи використовують негативні квитанції. Негативні квитанції бувають двох типів: групові та виборчі. Групова квитанція містить номер кадру, починаючи з якого потрібно повторити передачу всіх кадрів, відправлених передавачем в мережу. Виборча негативна квитанція вимагає повторної передачі тільки одного кадру.

Метод з простоями є окремим випадком методу «ковзного вікна», коли розмір вікна дорівнює одиниці.

Метод «ковзного вікна» має два параметри, які можуть помітно впливати на ефективність передачі даних між передавачем і приймачем, розмір вікна і величина тайм-ауту очікування квитанції. В надійних мережах, коли кадри спотворюються і губляться рідко, для підвищення швидкості обміну даними розмір вікна потрібно збільшувати, так як при цьому передавач буде посилати кадри з меншими паузами. У ненадійних мережах розмір вікна слід зменшувати, так як при частих втратах й викривлення кадрів різко зростає обсяг вдруге через мережу кадрів, а значить, пропускна здатність мережі буде витрачатися багато в чому вхолосту – корисна пропускна здатність мережі буде падати.

Вибір тайм-ауту залежить не від надійності мережі, а від затримок передачі кадрів мережею. У багатьох реалізаціях методу ковзного вікна величина вікна і тайм-аут вибираються адаптивно, в залежності від поточного стану мережі.

Надлишкові коди засновані на розбитті вихідної послідовності біт на порції, які часто називають символами [16]. Потім кожен вихідний символ замінюється на новий, який має більшу кількість біт, ніж вихідний. Наприклад, логічний код 4В / 5В замінює вихідні символи довжиною в 4 біта на символи довжиною в 5 біт. Так як результуючі символи містять надлишкові біти, то загальна кількість бітових комбінацій в них більше, ніж у вихідних. Так, в коді 4В / 5В результуючі символи можуть містити 32 бітових комбінації, в той час як вихідні символи – тільки 16. Тому в результуючому коді можна відібрати 16 таких комбінацій, які не містять великої кількості нулів, а інші вважати забороненими кодами. Крім усунення постійної складової і додання коду властивості самосинхронізації, надлишкові коди дозволяють приймачу розпізнавати спотворені біти. Якщо приймач приймає заборонений код, значить, на лінії відбулося спотворення сигналу.

Код 4В / 5В потім передається по лінії за допомогою фізичного кодування по одному з методів потенційного кодування, чутливому тільки до довгих послідовностей нулів. Символи коду 4В / 5В довжиною 5 біт гарантують, що при будь-якому їх поєднанні на лінії не можуть зустрітися більше трьох нулів підряд.

Буква В в назві коду означає, що елементарний сигнал має 2 стану – від англійського binary – двоїчний. Є також коди і з трьома станами сигналу, наприклад, в коді 8В / 6Т. Надмірність коду 8В / 6Т вище, ніж коду 4В / 5В, так як на 256 вихідних кодів припадає $36 = 729$ результуючих символів.

1.6 Висновки до 1 розділу

Проведено аналіз принципів побудови бездротової сенсорної мережі для обміну повідомленнями між пристроями у вбудованих системах. Розроблена структурна схема мікропроцесорного пристрою, що становить основу бездротової мережі.

РОЗДІЛ 2

ВИБІР МІКРОКОНТРОЛЕРНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ПОБУДОВИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ПРИСТРОЮ

2.1 Вибір сімейства мікроконтролерів для побудови енергоефективного пристрою

В більшості пристроїв використовуються досить прості профілі конфігурування, що не передбачають оптимального використання ресурсів пристрою з точки зору споживання енергії джерела живлення. Для пристроїв з автономним живленням відключення кожного зайвого мікроампера може суттєво подовжити час автономної роботи.

Виконаний аналіз показав, що існують наступні поширені методи зниження споживання енергії:

- використання енергозберігаючої серії пристроїв;
- відключення периферії мікроконтролера, що не використовується;
- перевід пристрою до режиму сну зі зниженням споживання енергії.

Для обирання енергозберігаючої серії пристроїв потрібно визначити сімейство мікроконтролерів з можливістю реалізації економії енергії. Наразі широко використовуються два типи пристроїв:

- контролери Arduino;
- контролери STM32.

У табл. 2.1 наведено порівняння двох сімейств контролерів. Дані взяті з різних джерел, наприклад з [13].

Таблиця 2.1 – Порівняння двох поширених сімейств контролерів Arduino та STM32

Параметр	Arduino Nano	STM32
Частота контролера, МГц	16	72
Пам'ять програм, кБайт	32	64
Напруга живлення, В	5	3,3
Середній споживаний струм в режимі сну, мА	35	20
Наявність послідовного інтерфейсу	Так, 1 шт.	Так, 3 шт.
Наявність RTC	Ні	Так
Наявність SPI	Так	Так

На рис. 2.1 показано порівняння енергоспоживання для різних плат Arduino.

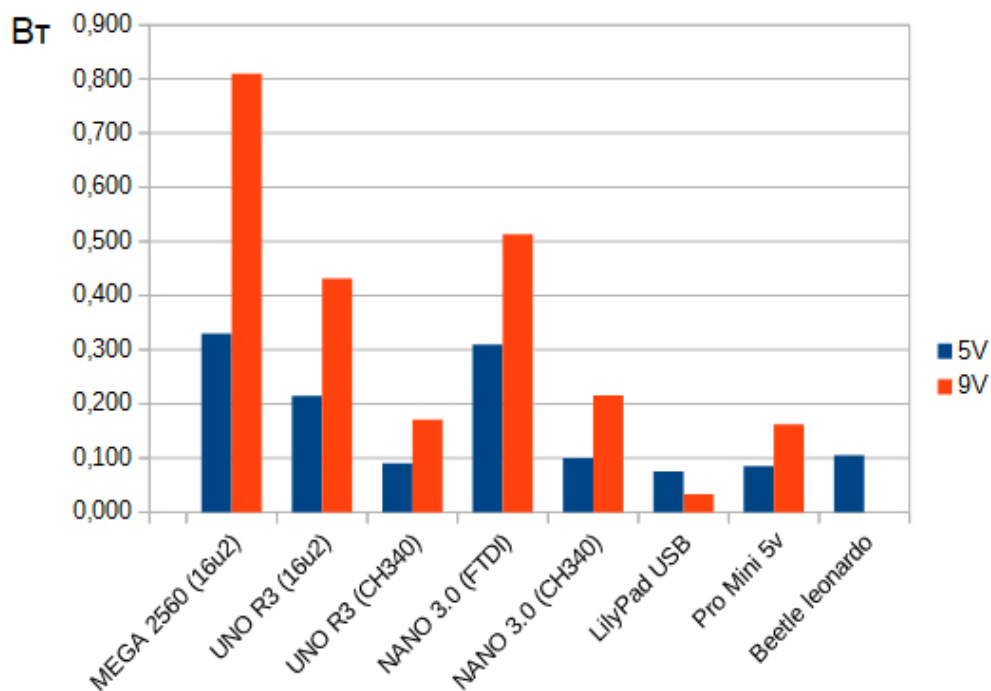


Рисунок 2.1 – Порівняння енергоспоживання для різних плат Arduino

Для порівняння використовувались популярні плати, що побудовані з використанням різних мікросхем та периферійних пристроїв. Як правило, на платі присутні додаткові компоненти, що призводять до споживання енергії. Рівень використання енергії також залежить від частоти роботи ядра контролера. Це справедливо для пристроїв будь-якого виробника. Наприклад, на рис. 2.2 можна побачити, як зростає споживання струму ядром контролера Atmega [10].

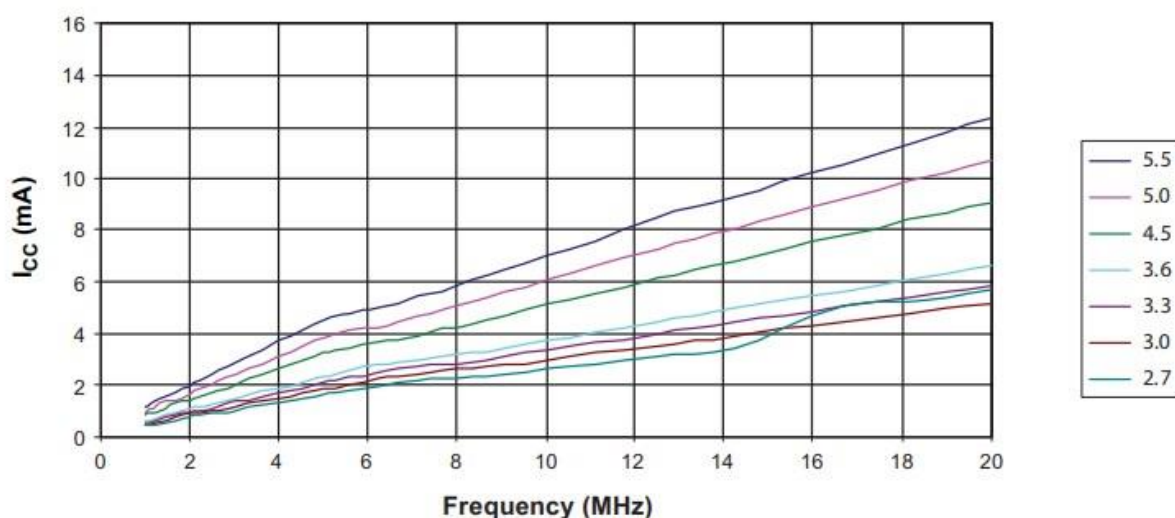


Рисунок 2.2 – Залежність споживання струму від частоти роботи ядра контролера

У мікроконтролерів Atmega є кілька режимів енергозбереження, в кожному з яких залишаються в активному режимі тільки деякі з апаратних блоків (таймери, інтерфейси, АЦП, і т.д.) [10]. Також у пристроїв є блок BOD, що відповідає за постійний моніторинг напруги і перезавантаження в разі його падіння нижче налаштованого порога. У всіх режимах сну залишається активний АЦП. Можна виділити п'ять режимів енергозбереження МК (AVR).

IDLE – «легкий» сон, відключається тільки жмут CPU і Flash, пробуджується миттєво від будь-яких переривань.

POWERDOWN – найбільш глибокий сон, відключається все крім WDT і зовнішніх переривань, прокидається від апаратних (звичайних + PCINT) або WDT, пробудження за 1000 тактів (62 мкс).

STANDBY – глибокий сон, ідентичний POWERDOWN, але додатково дається режим, при якому System clock активний. Пробудження відбувається за 6 тактів (0,4 мкс).

POWERSAVE – глибокий сон, в якому працює Timer 2 та є можливість прокинутися від його переривань. Також можна використовувати даний таймер для відліку часу.

EXTSTANDBY– глибокий сон, в якому System clock активний. пробудження відбувається за 6 тактів (0,4 мкс).

Самий часто використовуваний на практиці режим Power down (найглибший сон). У ньому відключається все, крім watchdog і апаратних переривань. В даному режимі мікроконтролер споживає мінімальний струм, а прокинутися можна тільки по перериванню Watchdog таймера або по апаратному перериванню.

Таким чином, аналіз показав, що контролери марки Atmega хоч і мають великий набір різних конфігурацій та профілів живлення але не дають нам повний набір апаратних можливостей, як це робить STM. Виходячи з табл. 2.1 ми бачимо, що контролери серії STM32L мають можливість реалізації внутрішнього годинника, що сумісно з профілем енергозбереження дають можливість реалізації методу синхронізації з матер-пристроєм для побудови мережі автономних IoT-пристроїв. Дані пристрої мають високу продуктивність, що властиво всім мікроконтролерів на ядрі ARM Cortex-M3. Для нас важливим є їх низьке енергоспоживання в активному і сплячому режимах.

Розглянемо профілі енергозбереження контролерів STM32L [10].

Режим Run – звичайний режим. Усе увімкнено, вся периферія доступна, частота до 32 МГц.

Режим Low Power Run (LP Run) – спеціальний режим з робочою частотою в межах 131 кГц і максимальним споживанням, вважаючи всю периферію, 200 мкА. В режимі LP Run стабілізатор живлення процесора переходить в спеціальний економічний режим, що економить до півсотні мікроампер в порівнянні з роботою на тій же частоті в режимі Run.

Режим Sleep – припинення роботи ядра, але зі збереженням всіх тактових частот. Периферія процесора може продовжувати працювати, якщо ядро їй не потрібно, але може бути і автоматично відключена.

Режим Low Power Sleep (LP Sleep) – поєднання Sleep з переходом стабілізатора в економічний режим. Тактова частота не вище 131 кГц, загальне споживання не вище 200 мкА.

Режим Stop – повна зупинка всіх тактових частот, крім «годинного» генератора 32768 Гц, зовнішнього або внутрішнього. У випадку з STM32L в цьому режимі продовжують працювати тільки годинник реального часу, все інше повністю зупиняється; в більш нових процесорах деяка периферія може тактуватися від низької частоти. Майже всі піни процесора зберігають свій стан. Вміст ОЗУ зберігається, зовнішні переривання продовжують працювати.

Режим Standby – повне вимкнення ядра процесора, ОЗУ і всієї периферії, крім годиннику реального часу. ОЗУ не зберігається (тобто з точки зору програмного забезпечення, перехід в Standby практично аналогічний відключенню живлення), продовжує працювати RTC. Зовнішні переривання не працюють, крім трьох спеціальних ніжок WKUPx, перемикання яких з 0 в 1 пробуджує процесор.

Для більшості випадків використання виграш даних режимів полягає в менших витратах часу на виконання завдання після виходу МК в активний режим роботи (режим «Run»). Якщо розглядати енергоспоживання в процесі обробки даних або роботи мікроконтролера, то воно, виражене в мА/DMIPS (benchmark Rev 2.0), у Cortex-M3 значно краще, ніж в інших архітектурах, зокрема, 16-бітних. Продуктивність в DMIPS/МГц задається ядром і інтерфейсом пам'яті, енергоспоживання в мА/DMIPS в процесі роботи може бути збільшено за допомогою регулювання напруги живлення. Саме цей метод був застосований в STM32L, а саме – динамічна адаптація напруги живлення в залежності від необхідної частоти тактування мікроконтролера.

При роботі МК на максимальній частоті (для повного використання всіх його можливостей – продуктивності, периферії) зазвичай необхідно, щоб верхня межа напруги живлення становила від 3 В до 3,3 В. У випадку якщо контролеру

необхідно переключитися в режим низьких частот тактування, така напруга є надлишковим і несе з собою зайві витрати по енергоспоживанню. З цією метою в лінійці STM32L реалізовано динамічна зміна напруги ядра мікроконтролера [10].

STM32L надає можливість динамічного зміни напруги живлення ядра в трьох діапазонах: 1,8 В (Range 1), 1,5 В (Range 2) і 1,2 В (Range 3). Така особливість дозволяє домогтися загального зниження енергоспоживання більш ніж на 25 %. Таким чином, конфігурація напруги живлення ядра в сукупності з режимами ультранизького енергоспоживання дозволяє підходити до регулювання споживання більш гнучко. Особливості можливостей тактування і загального енергоспоживання в залежності від напруги живлення ядра відображені на рис. 2.3.

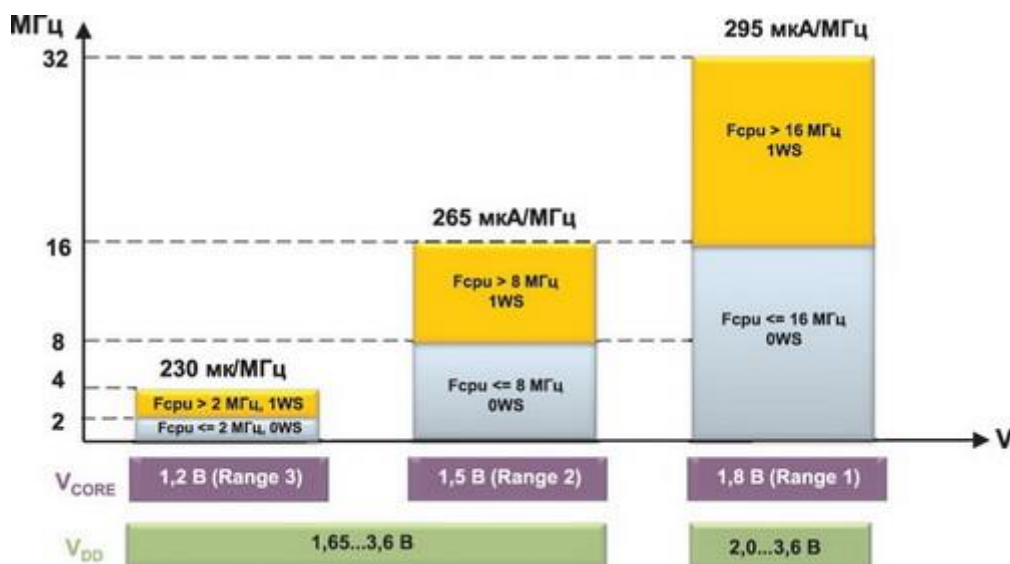


Рисунок 2.3 – Залежність продуктивності STM32L від напруги живлення ядра

На рис. 2.3 показані залежності частот тактування від напруги живлення ядра і загальної напруги живлення мікроконтролера. У першому діапазоні (Range 1) досягається максимальна продуктивність без будь-яких обмежень. У другому діапазоні (Range 2) максимальна частота тактування обмежена 16 МГц. У третьому діапазоні (Range 3) максимальна частота контролера обмежена 4 МГц. На рисунку наводяться цифри енергоспоживання мікроконтролера з усією включеною периферією і виконанням програмного забезпечення з FLASH і SRAM.

Існують кілька можливостей зменшення загального енергоспоживання, які в сукупності дозволяють значно знизити енергоспоживання мікроконтролера – зниження напруги харчування, відключення тактування невикористовуваних периферійних модулів, зниження частоти тактування ядра мікроконтролера і його шин. Ще більшого зниження енергоспоживання можна досягти шляхом відключення частотно-незалежних джерел (джерела тактування, незалежній пам'яті і регулятора напруги).

Узагальнену схему енергоспоживання лінійки STM32L представлено на рис. 2.4.

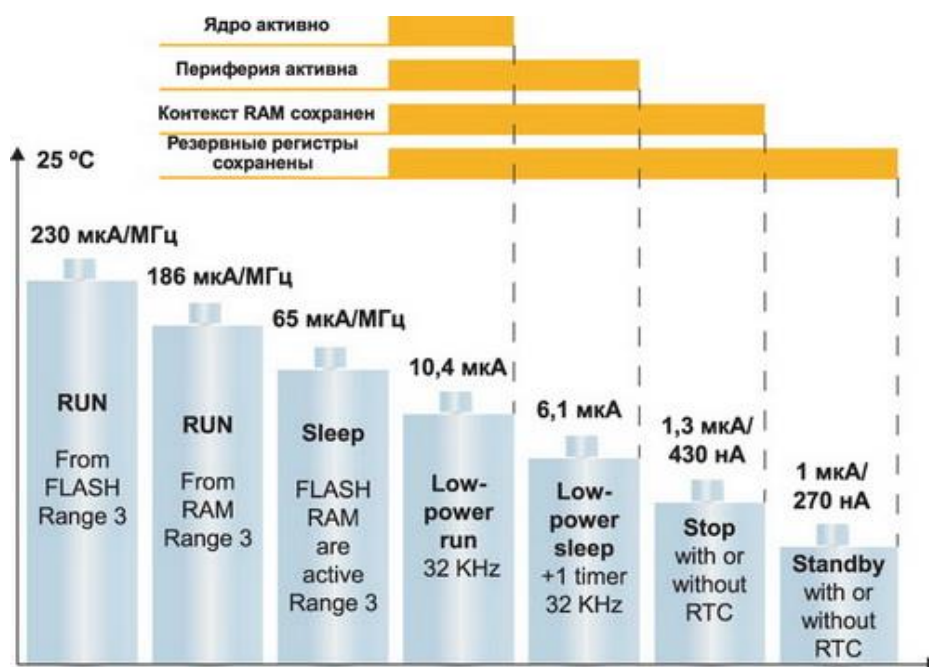


Рисунок 2.4 – Узагальнена схема енергоспоживання лінійки STM32L

Аналіз даного рисунку дає можливість встановити шляхи витрати енергії. Так, першим, що можна бачити – споживання в активному режимі при виконанні програми з flash-пам'яттю становить близько 230 мкА/МГц. Друге – якщо flash-пам'ять відключена, то програма виконується тільки з SRAM-пам'яті, і споживання в цьому випадку становить 186 мкА/МГц.

Далі йдуть режими зниженого споживання з різними характеристиками при роботі від вбудованого низькочастотного джерела тактування. Споживання в стоп-

режимі з активними і неактивними годинами реального часу (RTC) становить 1,3 мкА і 430 нА, відповідно, при цьому важливий момент це те, що вміст SRAM-пам'яті зберігається. Більш детальна картина енергоспоживання розглянута в табл. 2.1. Всього ж в лінійці STM32L є сім режимів зниженого енергоспоживання, більш детальна інформація представлена в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Режими зниженого енергоспоживання

Режими зниженого енерго- споживання	Енергоспоживання	Функціональні модулі						
		ЦПУ	FLASH/ EEPROM	RAM	DMA та периферія	Такту- вання	LCD	RTC
Sleep	100 мкА/МГц (Range 1)	неактив.	вкл	вкл	активна	Будь- яке	доступно	
	82 мкА/МГц (Range 2)							
	65 мкА/МГц (Range 3)							
Low power run	10,4 мкА (FLASH викл, 32 кГц частота)	активен	вкл або викл	вкл	активна	MSI		
	5,1 мкА (таймер викл)	неактив.	викл	вкл	активна	MSI		
6,1 мкА (таймер викл.)								
Stop (RTC активен)	1,3 мкА (1,8 В)	неактив.	викл	вкл	неактив.	LSE, LSI	доступно	
	1,6 мкА (3 В)							
Stop	500 нА	неактив.	викл	вкл	неактив.	LSE, LSI	викл	викл
Standby (RTC активен)	1 мкА (1,8 В)	викл	викл	викл	викл	LSE, LSI	викл	вкл
	1,3 мкА (3 В)				викл			
Standby	270 нА	викл	викл	викл	викл	LSE, LSI	викл	викл

У порівнянні з основними режимами зниженого енергоспоживання лінійки STM32F, в лінійці STM32L додалися два нових режиму: «Low Power Run» і «Low Power Sleep». Вони забезпечують робочий і сплячий режими для додатків з надзвичайно низьким споживанням у випадках, коли деякі периферійні модулі не можуть бути відключені (наприклад, модуль передачі даних або таймери), а також при тривалій роботі ЦПУ на низьких частотах. Для подальшого зменшення енергоспоживання можна використовувати наступні рекомендації:

- регулятор напруги можна перевести в режим економії енергії для зниження струму споживання;
- незалежну пам'ять можна вимкнути, а виконання програми проводити з RAM;
- внутрішній RC-осцилятор можна використовувати для формування основного тактового сигналу.

2.2 Висновки до 2 розділу

Розглянуті особливості мікроконтролерів лінійки STM32L, що дозволяють домогтися ультранизького енергоспоживання. Сім режимів енергозбереження спільно з гнучкою системою тактування і живлення ядра дозволяють досягти споживання всього в 10,5 мкА при активному ядрі і менш 270 нА в режимі глибокого сну, коли відключене живлення практично всіх модулів мікроконтролера, але зберігається можливість виходу з режиму по настанню зовнішніх подій. Лінійка STM32L об'єднує в собі накопичений досвід компанії STMicroelectronics в розробці платформ з ультранизьким енергоспоживанням, щільністю коду і продуктивністю ядра ARM Cortex-M3.

РОЗДІЛ 3

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ЕКСПЕРИМЕНТА З МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕЕФЕКТИВНОГО ПРОФІЛЮ МІКРОКОНТРОЛЕРНОГО ПРИСТРОЮ

3.1 Вибір інструменту для моделювання

Для моделювання роботи мікроконтролерного пристрою обрано інтегроване середовище STM32CubeIDE. Даний інструмент є сучасної розробкою фірми STM та поєднує дві популярних програми: CubeMX та Atollic TrueStudio.

STM32CubeIDE – перше інтегроване середовище розробки від ST, яка дає можливість попередньо конфігурувати проект, налаштувати периферію і тактування мікроконтролера, згенерувати код ініціалізації і провести компіляцію коду. Також STM32CubeIDE володіє просунутим набором інструментів для налагодження та моделювання роботи мікроконтролерного засобу. Як зазначено раніш, дана платформа, створена на базі Atollic TrueStudio для STM32 і STM32CubeMX, об'єднує їх сильні сторони, поєднуючи в собі потужний функціонал першої та зручні та практичні утиліти другої. Додаткові можливості для налагодження містять:

- перегляд реєстрів периферії, ядра і пам'яті;
- системний аналіз і відстеження в реальному часі (SWV);
- інструменти, що дозволяють проводити аналіз роботи мікроконтролера.

Інтегрований STM32CubeMX дозволяє:

- здійснити вибір мікроконтролера STM32;
- налаштувати тактування, периферію або додаткове програмне забезпечення;
- створити проект і згенерувати код ініціалізації.

STM32CubeIDE розроблена на базі ECLIPSE™ / CDT і включає в себе підтримку доповнень ECLIPSE, компілятор GNU C/C++ і GDB-відладчик.

Додаткові можливості для налагодження містять:

- перегляд регістрів периферії, ядра і пам'яті;
- системний аналіз і відстеження в реальному часі (SWV);
- інструменти, що дозволяють проводити аналіз помилок процесора.

В програмі реалізована підтримка ST-LINK і J-Link, є імпорт проекту з Atollic® TrueSTUDIO® і AC6 System Workbench STM32. Також реалізована кросплатформеність: Windows, Linux і macOS [18].

3.2 Моделювання енергозберігаючого профілю роботи мікроконтролерного засобу.

За допомогою інтегрованого середовища STM32CubeIDE виконаємо моделювання енергозберігаючого профілю роботи IoT модуля в основі якого буде закладений мікроконтролер STM32L031. На рис. 3.1 показано зовнішній вигляд демонстраційної плати NUCLEO-L031, яка має в своєму складі вищевказаний контролер.

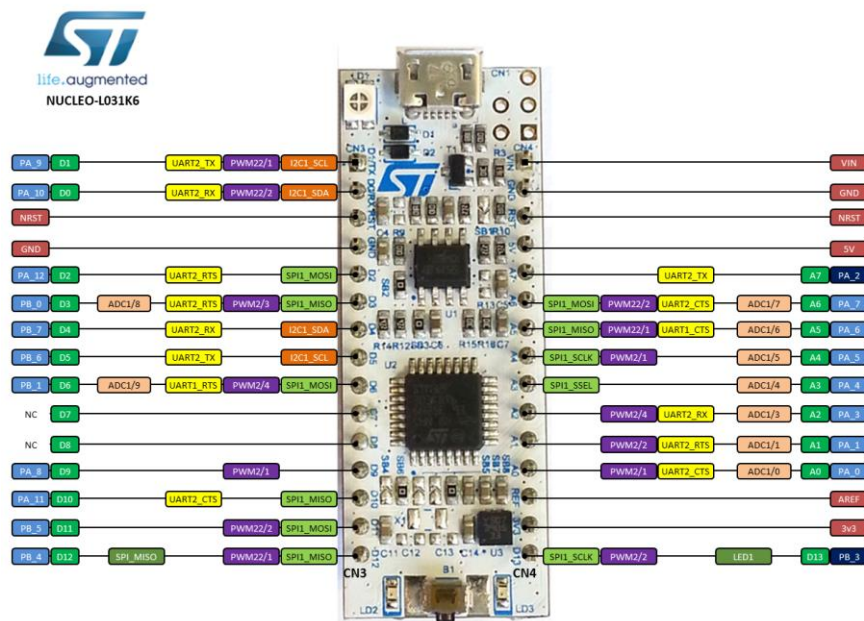


Рисунок 3.1 – Демонстраційна плата NUCLEO-L031

Наступний етап – це конфігурація системи тактування. Дана процедура в сімействі контролерів STM32 дуже розвинута, тому в інтегрованому середовищі передбачено спеціальний розділ моделювання роботи внутрішнього генератора. На рис. 3.4 показано приклад моделювання роботи системи тактування.

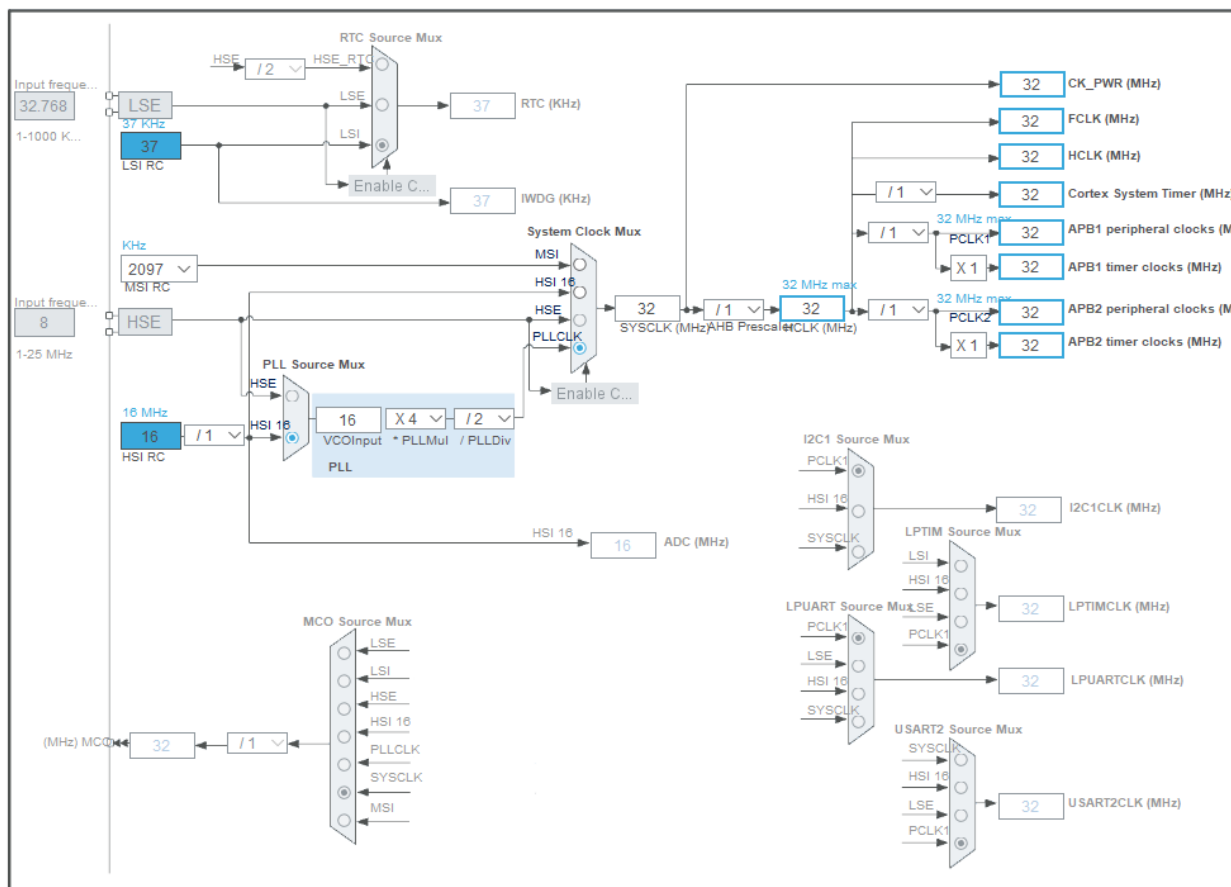


Рисунок 3.4 – Моделювання роботи системи тактування

За допомогою даного інструменту можна задавати різні режими роботи таймерів та дільників тактових імпульсів та відразу бачити зміни в роботі всіх периферійних блоків на які впливають ці показники. В даному випадку систему конфігуровано на роботу з тактовою частотою 32 МГц.

За допомогою вкладки «Tools» можна виконати моделювання енергетичного профілю роботи обраного мікроконтролера. На рис. 3.5 показана приклад відображення профілю за замовченням.

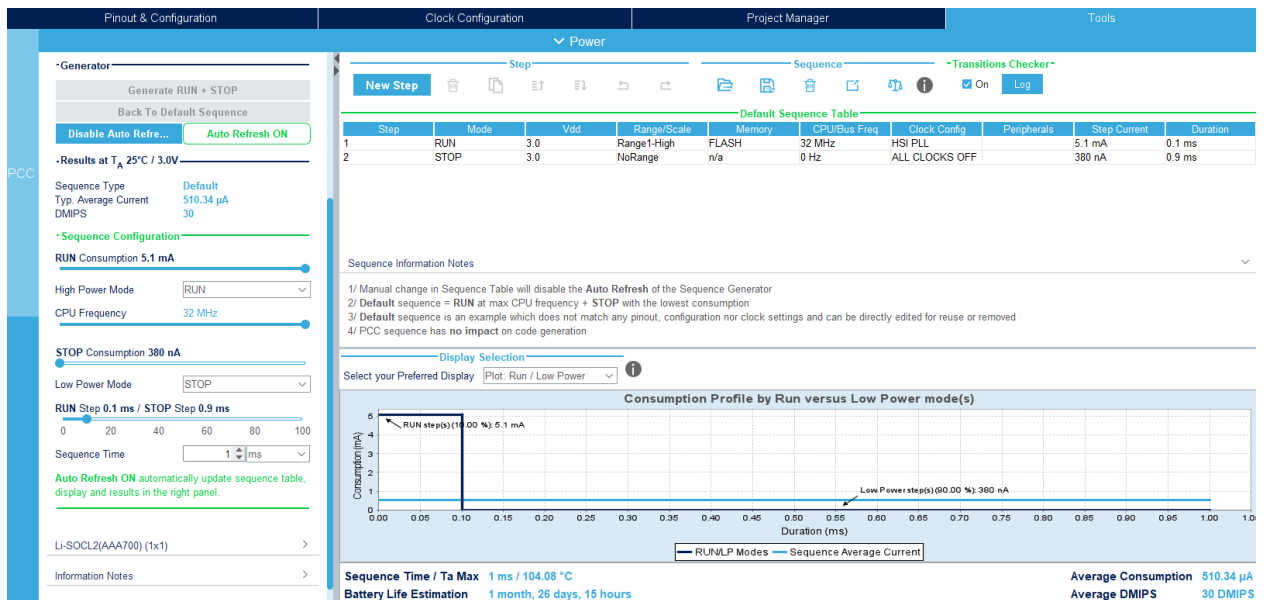


Рисунок 3.5 – Вкладка моделювання енергетичного профілю

Виконаємо моделювання енергетичного профілю для наступного сценарію використання мікроконтролерного модулю;

- робота пристрою полягає в відправленні на базовий пристрій повідомлення про стан датчику розбиття скла;
- повідомлення надсилаються з періодичністю в 1 секунду;
- час на відправлення повідомлення 100 мс;
- весь час, що залишився (900 мс) мікроконтролерний засіб повинен знаходитись в режимі сну.

Для початку моделювання порубано обрати джерело автономного живлення. За допомогою вбудованого інтерфейсу налаштування програми обираємо літієву батарею напругою 3,6 В типу Li-SOCL2 розміру AAA700.

Дана батарея має потужність 700 мАч та максимальний саморозряд 0,08 %. Такий тип живлення досить часто використовується у вбудованих системах. На рис. 3.7 наведено інформаційний звіт, що надається програмою при обиранні джерела живлення.

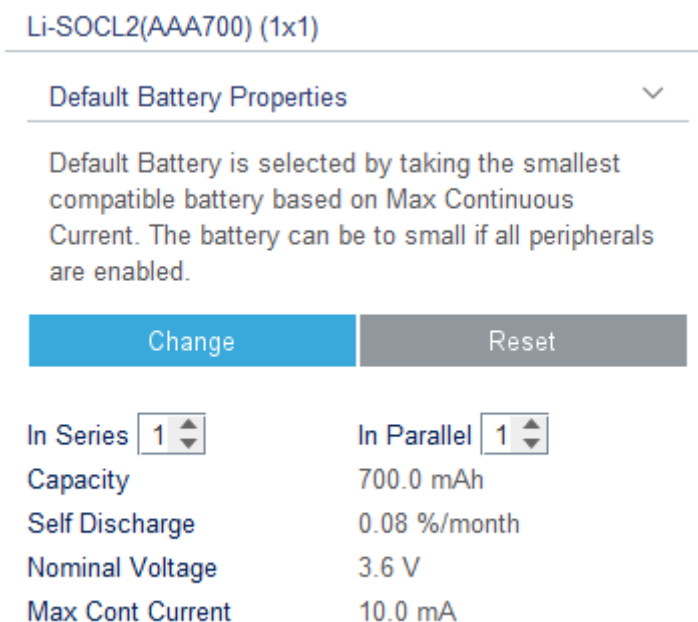


Рисунок 3.7 – Інформаційний звіт, що надається програмою при обиранні джерела живлення

На наступному кроці необхідно задати час активної роботи мікроконтролеру. Для цього в програмі STM32CubeMX передбачено діалогове вікно, що показано на рис. 3.8.

Як можна бачити за наведеним прикладом, ми задаємо час роботи 100 мс. При цьому в активному режимі ядро буде споживати 5,1 мА. Це значення програма обчислює сама на основі обраної підключеної периферії. В нашому випадку у нас не використовується додаткове підключення та ми робимо моделювання в умовах роботи з мінімальними конфігураційними властивостями, що є традиційно для пристроїв IoT.

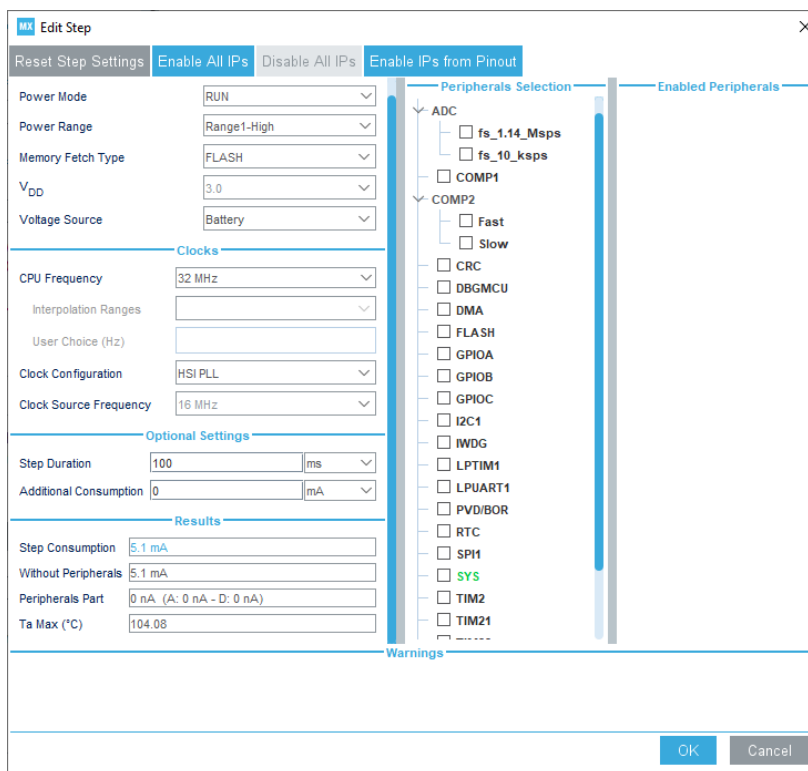


Рисунок 3.8 – Задання часу активної роботи мікроконтролеру

На рис. 3.9 показано вікно завдання параметрів сну мікроконтролеру.

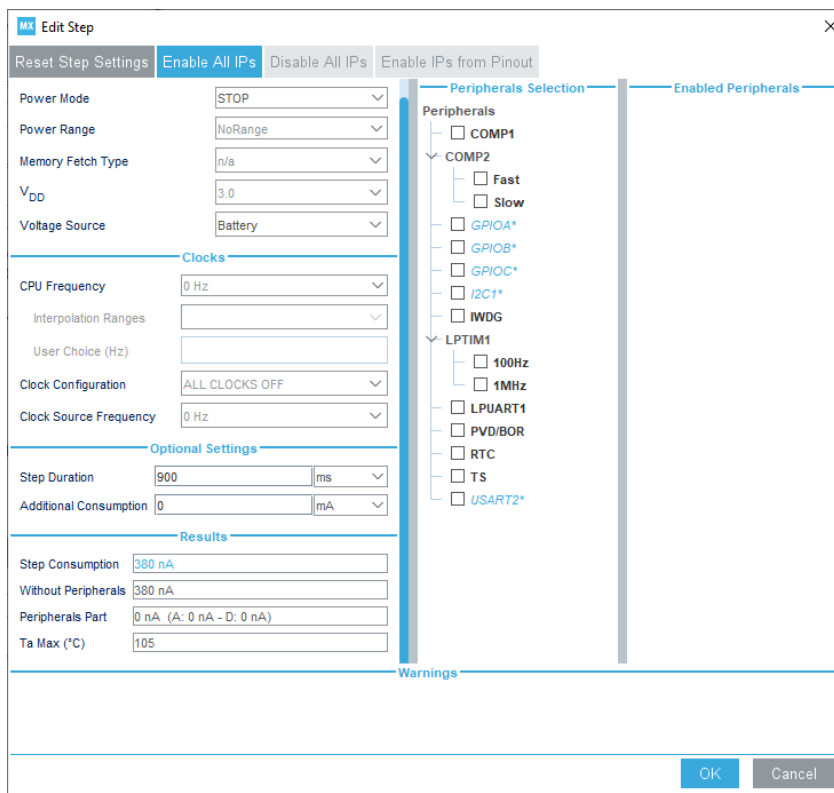


Рисунок 3.9 – Завдання параметрів сну мікроконтролеру

Як можна бачити з наведеного рисунку, контролер буде знаходитись в режимі сну більшість часу – 900 мс. Споживання енергії в даний період буде на рівні 380 нА.

Після запуску процесу моделювання ми отримали графік розподілу споживання енергії в часі. На рис. 3.10 наведено приклад сформованого графіку.

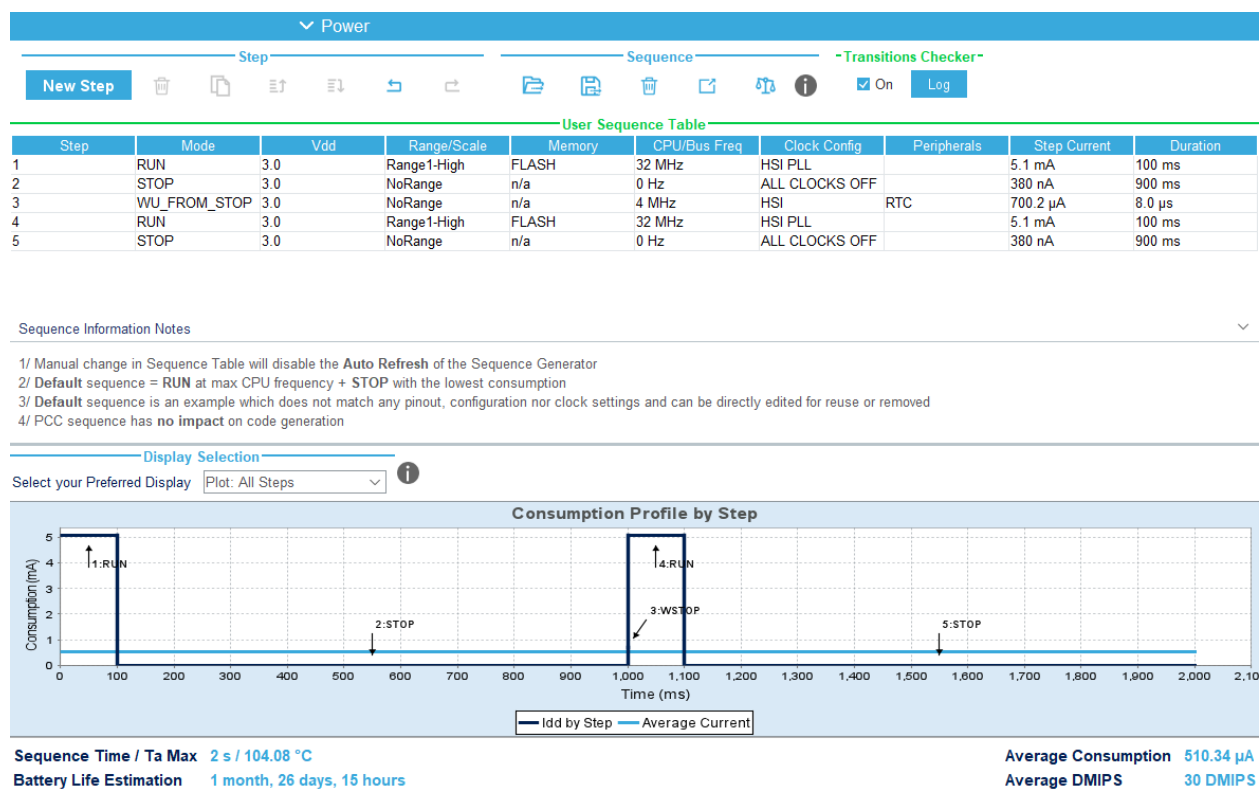


Рисунок 3.10 – Графік розподілу споживання енергії в часі

Також в результаті моделювання ми отримали прогноз щодо часу роботи пристрою від одного джерела живлення напругою 3,6 В потужністю 700 мАч.

Як можна бачити з рис. 3.10 такий час склав один місяць та 26 діб. При цьому середнє споживання енергії склало 510 мкА.

На рис. 3.11 наведено більш інформативне вікно з даними про частоту роботи ядра контролеру, температуру, при якій проводилось моделювання, та додатковими параметрами, що властиві перехідним процесам при пробудженні пристрою.

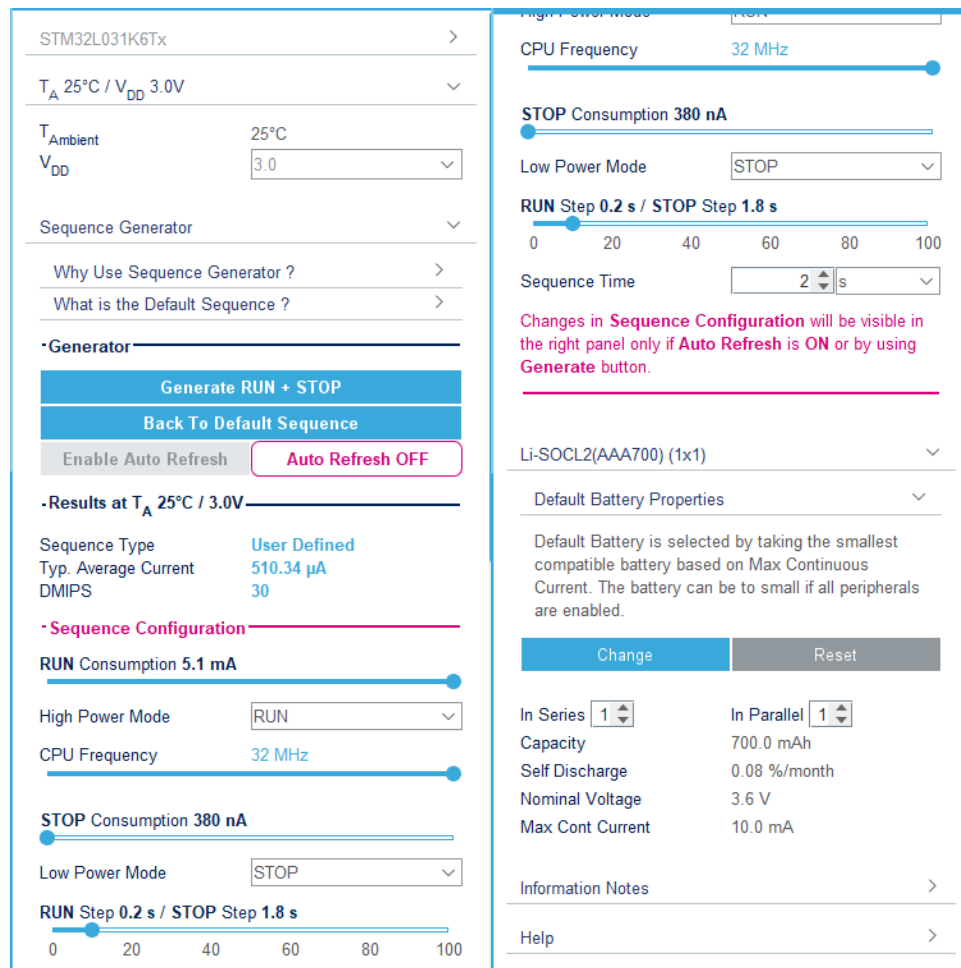


Рисунок 3.11 – Звіт з додатковим даними про умови моделювання

Повний покроковий звіт процесу моделювання наведено нижче:

Results for the current sequence (selected MCU: STM32L031K6Tx)

Check transition between step 1 (RUN, Range1-High) and step 2 (STOP, NoRange)

Possible next step(s): RUN [Range1-High, Range2-Medium, Range3-Low]

Possible next step(s): LOWPOWER_RUN [NoRange]

Possible next step(s): SLEEP [Range1-High, Range2-Medium, Range3-Low]

Possible next step(s): LOWPOWER_SLEEP [NoRange]

Possible next step(s): STOP [NoRange]

===== Transition allowed!

Check transition between step 2 (STOP, NoRange) and step 3 (WU_FROM_STOP, NoRange)

Possible next step(s): WU_FROM_STOP [NoRange]

3.3 Висновки до 3 розділу

В даному розділі магістерської атестаційної роботи виконано моделювання енергетичного профілю роботи мікроконтролерного модуля NUCLEO-L031. Для моделювання роботи мікроконтролерного пристрою обрано інтегроване середовище STM32CubeIDE. Задано реальний сценарій роботи для перевірки очікуваного рівня споживання енергії від батареї потужністю 700 мАч.

Моделювання показало, що запропонований сценарій та використання обраних методів зберігання енергії дало змогу працювати пристрою від батареї один місяць та 26 діб. При цьому середнє споживання енергії склало 510 мкА.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Розробка структури базового модуля бездротової мережі

Як зазначено під час аналізу літератури по темі магістерської атестаційної роботи до складу сенсорної мережі входять два типи пристроїв:

- базовий модуль;
- бездротові сенсорні модулі.

Структурна схема базового модуля приведена на рис. 4.1.

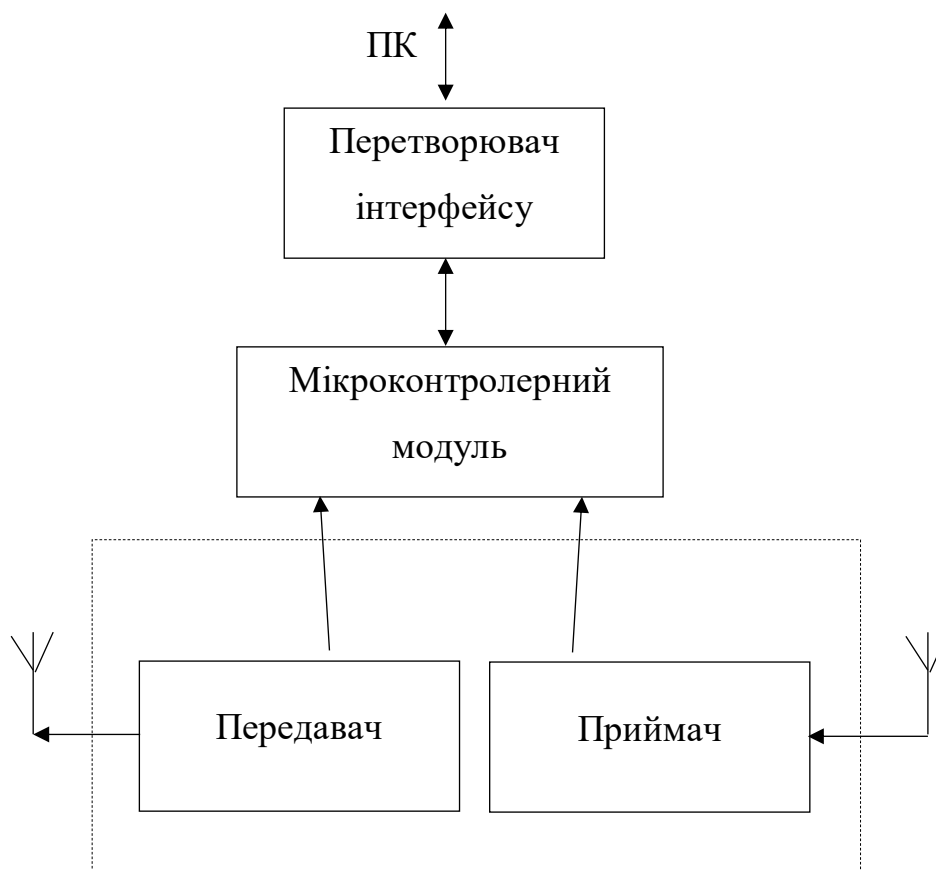


Рисунок 4.1 – Структурна схема базового модуля

До складу модуля входять:

- перетворювач інтерфейсу;

- мікроконтролерний модуль;
- передавач;
- приймач.

Основне призначення даного модуля передача запитів на сенсорні модулі для отримання від них даних про стан того чи іншого датчика.

Базовий модуль підключається до персонального комп'ютера через перетворювач інтерфейсів. Як інтерфейс може виступати послідовний порт RS-232 або USB.

Запит надходить в мікроконтролер, де формується пакет для відправки через бездротову мережу. Кожен пакет отримує унікальний ідентифікатор.

Передавач відправляє пакет в мережу і пристрій перемикається в режим прийому, прослуховуючи інформацію від сенсорів мережі.

Прийняті дані надходять через передавач в мікроконтролер. Тут вони проходять перевірку на можливі помилки. Після ідентифікації прийнятих даних і їх обробки, отримана інформація надсилається також через перетворювач інтерфейсів на персональний комп'ютер.

4.2 Розробка структурної схеми сенсорного модуля

Структурна схема сенсорного модуля наведена на рис. 4.2.

До складу модуля входять:

- датчик;
- блок узгодження;
- аналогово-цифровий перетворювач;
- мікроконтролерний модуль;
- внутрішня пам'ять;
- індикатор стану;
- акумулятор;
- передавач;
- приймач.

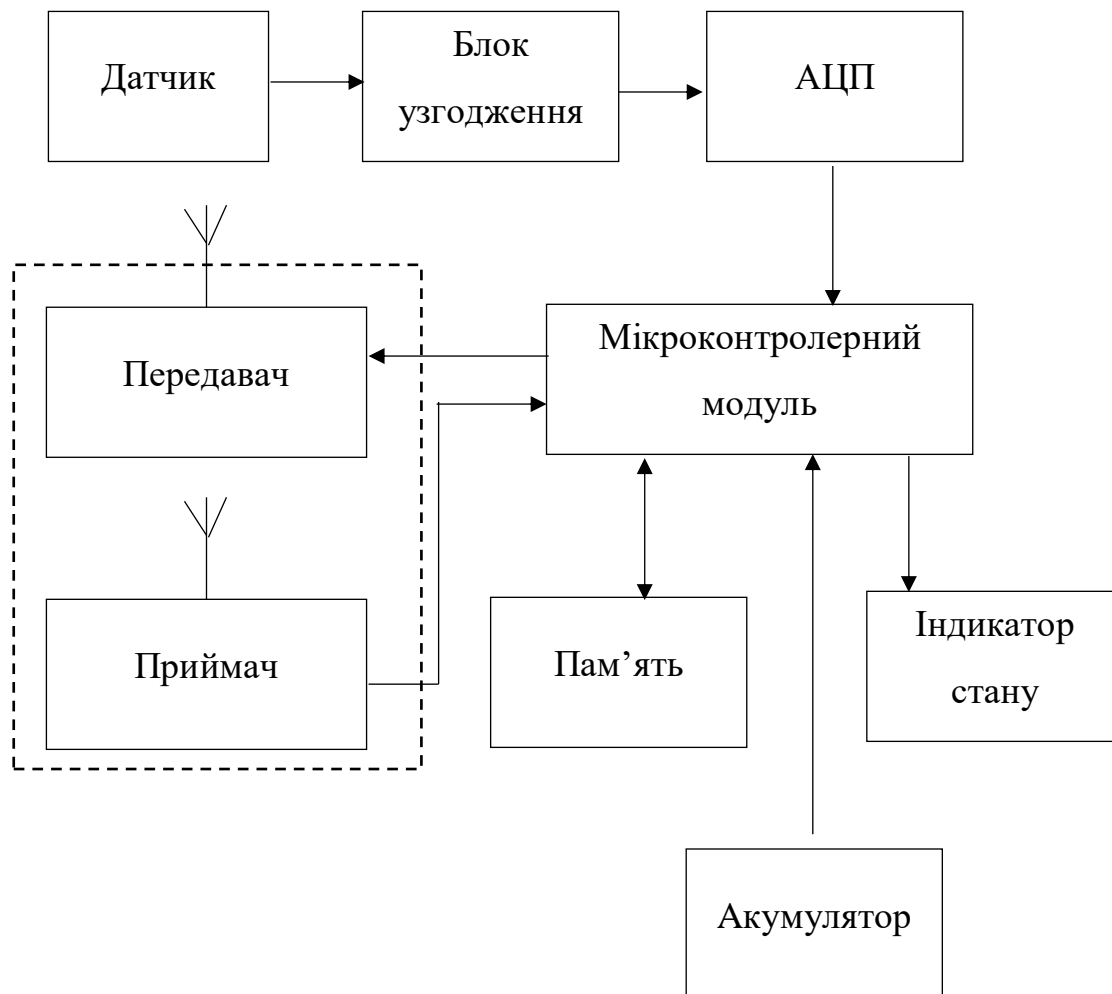


Рисунок 4.2 – Структурна схема сенсорного модуля

Датчик підключається до мікроконтролера через блок узгодження. Як датчик, може виступати цифровий або аналоговий датчик температури, датчик струму, датчик освітленості, вологості, тиску і т.д. Спосіб підключення інтегрального цифрового датчика і аналогового відрізняється. В останньому випадку, наприклад, потрібна схема перетворення опору в напругу і схема посилення цієї напруги до рівня вимірювання АЦП.

З виходу АЦП дані надходять на вхід мікроконтролера через послідовний інтерфейс.

Мікроконтролерний модуль обробляє команди, прийняті з передавача, і визначає їх приналежність даному датчику. Після розбору команди виконується зчитування даних з пам'яті і формування пакету для відправки на базовий модуль.

Передача виконується програмним занесенням даних, які будуть передані в буфер кадру Tx / Rx разом з параметрами, такими як адреса призначення і число повторень, програмуванням одного з таймерів протоколу для вказівки часу, в яке потрібно надіслати кадр. Цей час буде визначено програмним забезпеченням більш високого рівня, такі як хронометраж і межі інтервалу. Як тільки пакет підготовлений, і таймер протоколу встановлено, включається підпрограма управління передачею.

Коли настає запланований час, передавач управляє послідовністю операцій радіо-блоку і модему для виконання необхідної передачі. Передавач може виконати всі алгоритми, необхідні IEEE802.15.4, такі як CSMA / CA і GTS без втручання процесора, включаючи повторення і випадкові повернення.

Коли починається передача, з параметрів, запрограмованих програмним забезпеченням, створюється заголовок кадру і надсилається з даними кадру в передавач. В цей час радіо-блок готовий до передачі. На шляху потоку даних до модему він потрапляє в генератор контрольної суми, який обчислює контрольну суму і прикріплює її в кінці кадру.

При прийомі радіо-блок налаштований на отримання даних на певному каналі. Після отримання даних від модему кадр прямує в буфер кадру Tx / Rx, де і заголовок, і дані кадру можуть бути прочитані програмним забезпеченням протоколу. При отриманні заголовка кадру може бути згенеровано переривання. Отриманий кадр від приймача передається в генератор контрольної суми. В кінці прийому результат контрольної суми порівнюється з контрольною сумою в кінці кадру для контролю правильності отримання кадру.

Модуль живиться від вбудованого акумулятора, який був обраний на етапі моделювання в попередньому розділі, тому в програмі і необхідно передбачити режим економії електроенергії. Для цього в пристрої застосований супервізор. Його основне завдання - контроль за напругою на акумуляторній батареї. У разі

його зниження до критичної величини супервизор видає сигнал на мікроконтролер і той, в свою чергу, приймає рішення про передачу сигналу в мережу (попередження про перехід з режиму сну) і перемикання в режим зниженого споживання електроенергії.

4.3 Вибір радіомодуля для реалізації функції обміну даними

У лінійку поставок NOPE-RFM входять безкорпусні мікросхеми приймачів і передавачів, трансиверів, COB (Chip-on-Board) радіомодулі на основі цих IC (інтегральних схем), дискретні радіочастотні компоненти.

Радіомодулі широко застосовуються в таких складних системах, як швидкодіючі прилади дистанційного збору та зберігання даних, управління температурою і вологістю, вимірювання тиску і управління ним, в багатофункціональних спортивних годинах, різноманітної побутової та промислової автоматики і т.д [19].

В основному компанія Nore RF розробляє і виробляє радіомодулі, що діють в діапазонах 315 МГц, 433 МГц, 868 МГц і 915 МГц. Дані пристрої використовують ЧМ (частотну модуляцію) і відповідають рекомендаціям FCC і ETSI. Пристрої мають невисоку ціну і малі розміри (не більше 3 см²). Радіомодулі зберігають працездатність в діапазоні температур від -40 °С до +85 °С. Радіомодулі RFM виробляються за технологією COB, у вигляді друкованої плати з встановленими компонентами і роз'ємом для підключення до зовнішніх ланцюгів [20].

У табл. 4.1 представлена номенклатура і основні характеристики пристроїв RFM-серії.

Таблиця 4.1 – Основні характеристики радіомодулів RFM-серії

Тип	Описание	Диапазон, МГц	Скорость, кбит/с	Чувствительность, дБм	Мощность излучения, мВт	Напряжение питания, В	Интерфейс
RFM01	ЧМ-приемник	433 868 915	115,2 (256)	-109		2,2–5,4	SPI
RFM02	ЧМ-передатчик	433 868 915	115,2 (256)		7	2,2–5,4	SPI
RAM01	OOK-приемник	433 868	40	-110		2,2–3,8	SPI
RFM12	ЧМ-трансивер	433 868	115,2 (256)	-102	8	2,2–5,4	SPI
RFM12B	ЧМ-трансивер	315 433 868 915	115,2 (256)	-102	7	2,2–3,8	SPI
RFM12BP	ЧМ-трансивер	433 868 915	115,2 (256)	-118	500	2,2–3,8 (8–12)	SPI

Малопотужні радіомодулі (RFM01, RFM02, RAM01, RFM12, RFM12B) мають компактні габарити і випускаються в трьох модифікаціях, які представлені на рис. 4.3.



18,0×14,2×8,6 мм — D-формат;

15,9×16,1×4,2 мм — S1-формат;

15,9×16,1×2,2 мм — S2-формат

Рисунок 4.3 – Модифікації плат прийомо-передавачів

RFM01 — недорогий модуль ЧМ-приймача для роботи в діапазонах 433 МГц, 868 МГц, 915 МГц. Його основою є кристал багатofункціональної мікросхеми приймача RF01, що містить PLL-синтезатор з малим часом захоплення і кроком 2,5 кГц, блок нульової проміжної частоти і внутрішній демодулятор. З додаткових

опцій є таймер пробудження, детектор розрядженої батареї, автоматична настройка антени, аналоговий і цифровий вимірювачі рівня сигналу, вхід сигналів тактирування і скидання від зовнішнього мікроконтролера.

Простий в програмуванні SPI-інтерфейс радіомодулів використовується мікроконтролером для прийому даних і управління внутрішніми налаштуваннями. Немає необхідності в додатковій ручній калібровці ланцюгів, що істотно скорочує час роботи над кінцевим проектом [21].

Радіомодуль RFM01 розрахований для роботи в парі з радіомодулем RFM02 ЧМ-передавача. В діапазоні 433 МГц для цієї пари вдається досягти стійкого зв'язку при прямій видимості на відстані 300 м.

Основні параметри радіомодуля RFM01:

- чутливість: -109 дБм;
- швидкість прийому даних:
 - до $115,2$ кбайт/с з внутрішнім демодулятором,
 - до 256 кбайт/с із зовнішнім RC-фільтром;
- програмована смуга пропускання: $67-400$ кГц;
- FIFO-буфер: 16 біт;
- діапазон напруги живлення: $2,2-5,4$ В;
- струм споживання в робочому режимі: не більше 11 мА.

Для спільної роботи з модулем приймача RFM01 виробляється модуль передавача RFM02. Модуль працює в тих же частотних діапазонах. Багатофункціональний кристал передавача RF02 містить PLL-синтезатор з кроком $2,5$ кГц. SPI-інтерфейс аналогічний тому, що використовується в чіпі приймача. Додаткові опції модуля передавача RFM02 такі ж, як у RFM01 [21].

Основні параметри радіомодуля RFM02:

- програмована вихідна потужність: до 7 дБм;
- програмована девіація частоти: $30-210$ кГц, крок 30 кГц;
- швидкість передачі даних: до $115,2$ кбайт/с;
- діапазон напруги живлення: $2,2-5,4$ В;
- струм споживання в робочому режимі: 23 мА.

Подальшим розвитком лінійки бездротових пристроїв став компактний радіомодуль багатоканального ООК-приймача для діапазонів 433 МГц і 868 МГц. Розташована в основі модулів мікросхема приймача RAM01 містить PLL-синтезатор частоти з малим часом встановлення для підтримки режиму стрибаючої частоти з високою роздільною здатністю. На рис. 4.4 представлена типова схема вмикання RAM01.

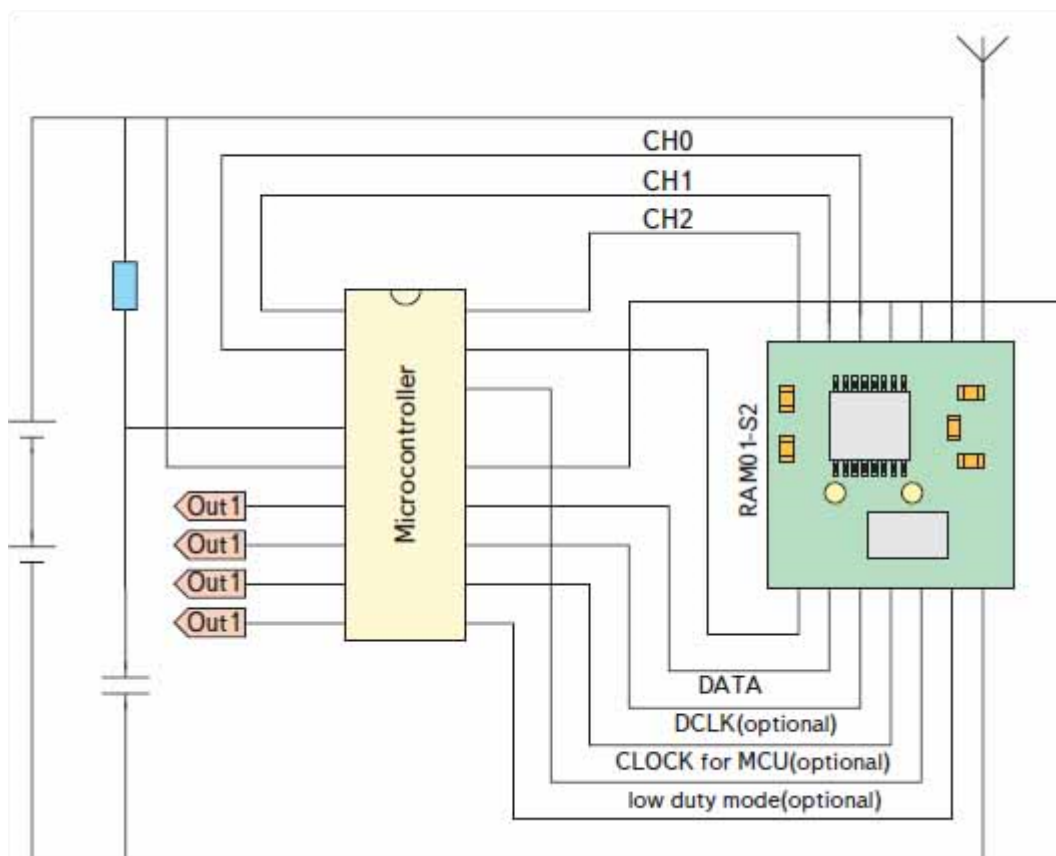


Рисунок 4.4 – типова схема вмикання RAM01

Дана опція полегшує утворення багатьох каналів прийому в зазначених діапазонах частот, а багатополосний смуговий фільтр підвищує надійність утримання радіозв'язку. Програмований смуговий каналний фільтр підтримує різні варіанти бітрейта і девіації частоти.

Радіомодуль RAM01 побудований за схемою обробки сигналу з низькою проміжною частотою. До необхідного мінімуму зведено використання додаткових зовнішніх компонентів.

Схемотехніка даних пристроїв дозволяє замінити традиційні суперрегенеративні та супергетеродинні приймачі, при цьому можна вибрати потрібну робочу частоту логічними сигналами або звичайними перемичками.

Крім того, є можливість виробляти фільтрацію даних і відновлення частоти, а також розпізнавати шаблони прийнятих даних і читати дані у всіх регістрах.

У радіомодулі є послідовний SPI-сумісний інтерфейс, таймер пробудження, детектор напруги батареї живлення, вхід сигналів тактування і скидання для мікроконтролера, що характерно для всіх згаданих радіомодулів [22].

Основні параметри радіомодуля RAM01:

- чутливість: -110 дБм;
- програмована смуга пропускання: $85-340$ кГц;
- вхідний опір приймача: 50 Ом;
- програмований бітрейт: до 40 кбіт/с;
- FIFO-буфер: 64 біт;
- напруга живлення: $2,2-3,8$ В;
- струм споживання в робочому режимі: $9,6$ мА.

На додаток до простих модулів приймача і передавача (RFM01 і RFM02) випускається RFM12 – універсальний радіомодуль трансивера для роботи в діапазонах 433 МГц і 868 МГц. Він побудований на основі мікросхеми трансивера RF12, що має PLL-синтезатор, блок нульової проміжної частоти, а також послідовний SPI-інтерфейс для зв'язку із зовнішнім мікроконтролером.

Трансивер – більш складний і універсальний пристрій, але в ньому так само, як і у інших радіомодулів серії, є таймер пробудження, детектор розрядженої батареї, автоматична настройка антени, аналоговий і цифровий вимірники рівня сигналу, вхід сигналів тактування і скидання від зовнішнього мікроконтролера, диференційний вхід для антени, внутрішній демодулятор.

Радіомодуль RFM12 розрахований для роботи в парі з таким же модулем ЧМ-трансивера. В діапазоні 433 МГц вдається досягти стійкого зв'язку при прямій видимості на відстані до 150 м.

Основні параметри радіомодуля RFM12:

- чутливість: -102 дБм;
- вихідна потужність: 8 дБм;
- хвильовий опір входу/виходу: 50 Ом;
- швидкість прийому даних;
- до 115,2 кбайт/с з внутрішнім демодулятором;
- до 256 кбайт/с із зовнішнім RC-фільтром;
- програмована девіація частоти: 15-240 кГц;
- програмована смуга пропускання: 67-400 кГц;
- діапазон RSSI: 46 дБ;
- приймальний FIFO-буфер на 16 біт;
- два FIFO-буфера по 8 біт на передачу;
- діапазон напруги живлення: 2,2-5,4 В;
- струм споживання в режимі передачі: ≤ 21 мА;
- струм споживання в режимі прийому: ≤ 10 мА.

RFM12B є економічним рішенням модуля трансивера. Він має знижену напругу живлення і дещо меншу вихідну потужність передавального тракту. Додані ще два частотні діапазони – 315 МГц і 915 МГц. Інші параметри повністю повторюють значення, характерні для радіомодуля лінії RFM12.

Відмінні параметри радіомодуля RFM12B:

- діапазони: 315 МГц, 433 МГц, 868 МГц, 915 МГц;
- вихідна потужність: 7 дБм;
- діапазон напруги живлення: 2,2-3,8 В.

Розвитком лінійки трансиверів є модуль RFM12BP з підвищеною вихідною потужністю в 500 мВт і з високою чутливістю приймального тракту 118 дБм.

Так само, як і в попередніх випадках, в ньому використовується чіп RF12, з тими ж технічними параметрами.

Модуль RFM12BP розрахований для роботи в парі з модулем ЧМ-трансивера RFM12. В діапазоні 433 МГц, при такій конфігурації, вдається досягти стійкого зв'язку на відстані до 3000 м при прямій видимості.

Всі основні параметри радіопередачі є доступними для програмування і більшість з них можуть встановлюватися динамічно.

RFM69HW пропонує унікальну перевагу програмованих вузькосмугових і широкосмугових режимів зв'язку без необхідності застосування зовнішніх компонентів. RFM69HW спеціально оптимізований для того, щоб мати дуже низьке енергоспоживання і високу вихідну потужність. Технологія TrueRF™ дозволяє застосовувати застосовувати недорогі зовнішні компоненти (за винятком ПАХ-фільтрів), що задовольняють нормативам ETSI і FCC.

Особливості пристрою:

- 20 дБм (100 мВт) - вихідна потужність;
- висока чутливість: до -120 дБм на швидкості в 1,2 Кбіт / с;
- висока селективність: 16-відвідний канальний фільтр;
- низький струм: 16 мА в режимі приймача, 100 нА для збереження значення в регістрах;
- програмована вихідна потужність: -18 дБм до +20 дБм (крок 1дБ);
- постійна продуктивність в межах напруги живлення мікросхеми;
- швидкість до 300 Кбіт / с при частотній модуляції (FSK);
- вбудований генератор частоти з роздільною здатністю в 61 Гц;
- FSK, GFSK, MSK, GMSK і OOK модуляція;
- вбудований пристрій для відновлення синхронізації;
- розпізнавання вхідного синхросигналу;
- 115 дБ + динамічний діапазон індикатора рівня потужності сигналу (RSSI);
- дуже швидке підстроювання частоти;
- обробка пакетів з використанням CRC-16, AES-128, 66-байтного буфера черги;
- вбудований датчик температури.

4.4 Представлення результатів тестових випробувань

4.4.1 Опис алгоритму роботи пристрою IoT

За розробленою структурної схемою та попередніми теоретичними результатами моделювання створено два модуля:

- тестовий зразок модуля IoT;
- тестовий зразок модуля керування та збору даних.

На рис. 4.6 показано алгоритм роботи модуля IoT.

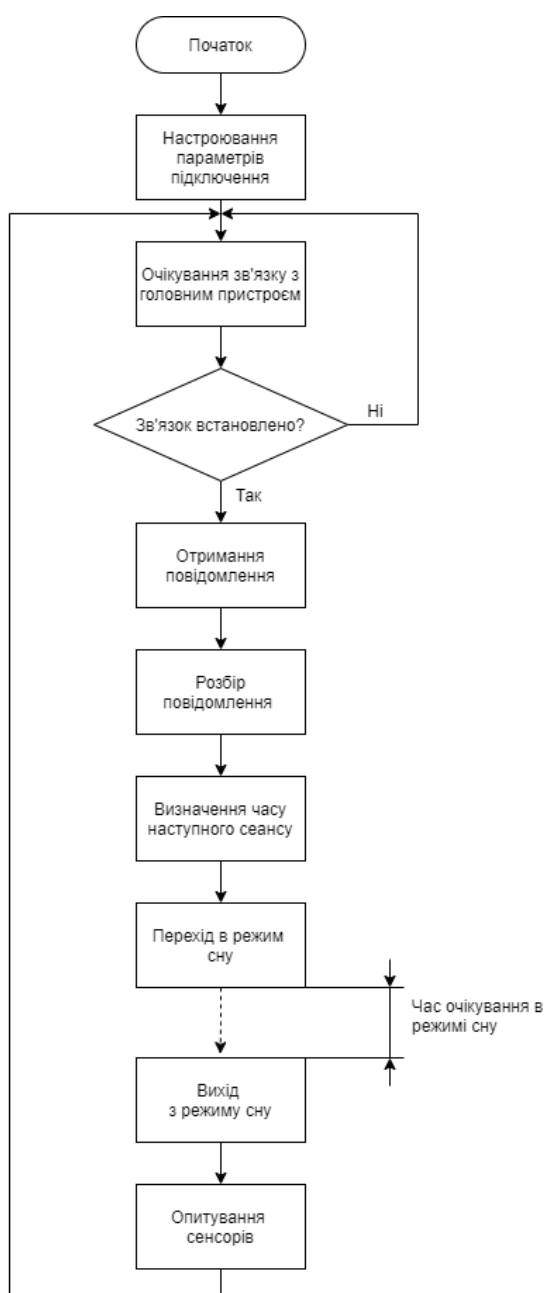


Рисунок 4.5 – Алгоритм роботи модуля IoT

Його робота починається з налаштування параметрів підключення:

- номер мережі в якій здійснюється робота (в нашому випадку для прикладу обираємо номер мережі 100);
- адреса IoT-модуля (в нашому випадку адреса модуля ID = 3);
- розмір буферу повідомлень (log_buffer = 150);
- частота роботи модему = 433 МГц.

Після налаштування параметрів зв'язку модуль IoT залишається в режимі очікування запиту від головного пристрою. Повинна пройти авторизація перш ніж почнеться планова робота пристрою.

Після одержання повідомлення від головного пристрою, в буфер записується час наступного сеансу. Після цього пристрій IoT засипає та переходить в режим зниженого енергоспоживання.

Після закінчення режиму сну пристрій IoT прокидається та виконує свою основну роботу – збирає дані з сенсорів. Після збирання даних, модуль переходить в режим очікування запиту від головного пристрою.

Після чергового сеансу зв'язку з головним пристроєм цикл роботи повторюється.

4.4.2 Проведення експерименту

Зовнішній вигляд зібраного пристрою показано на рис. 4.7.

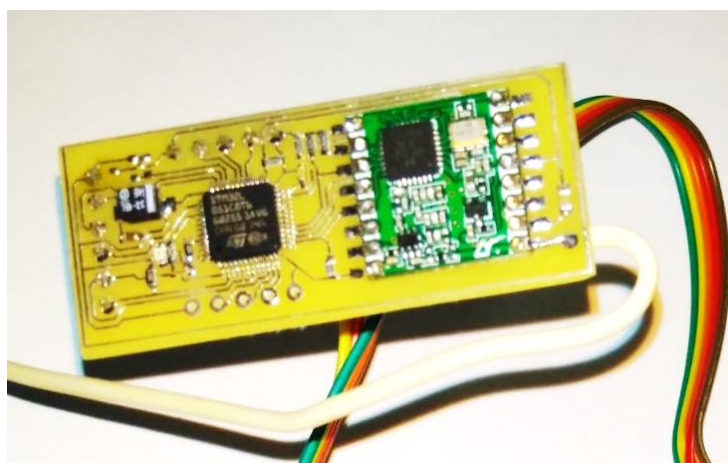
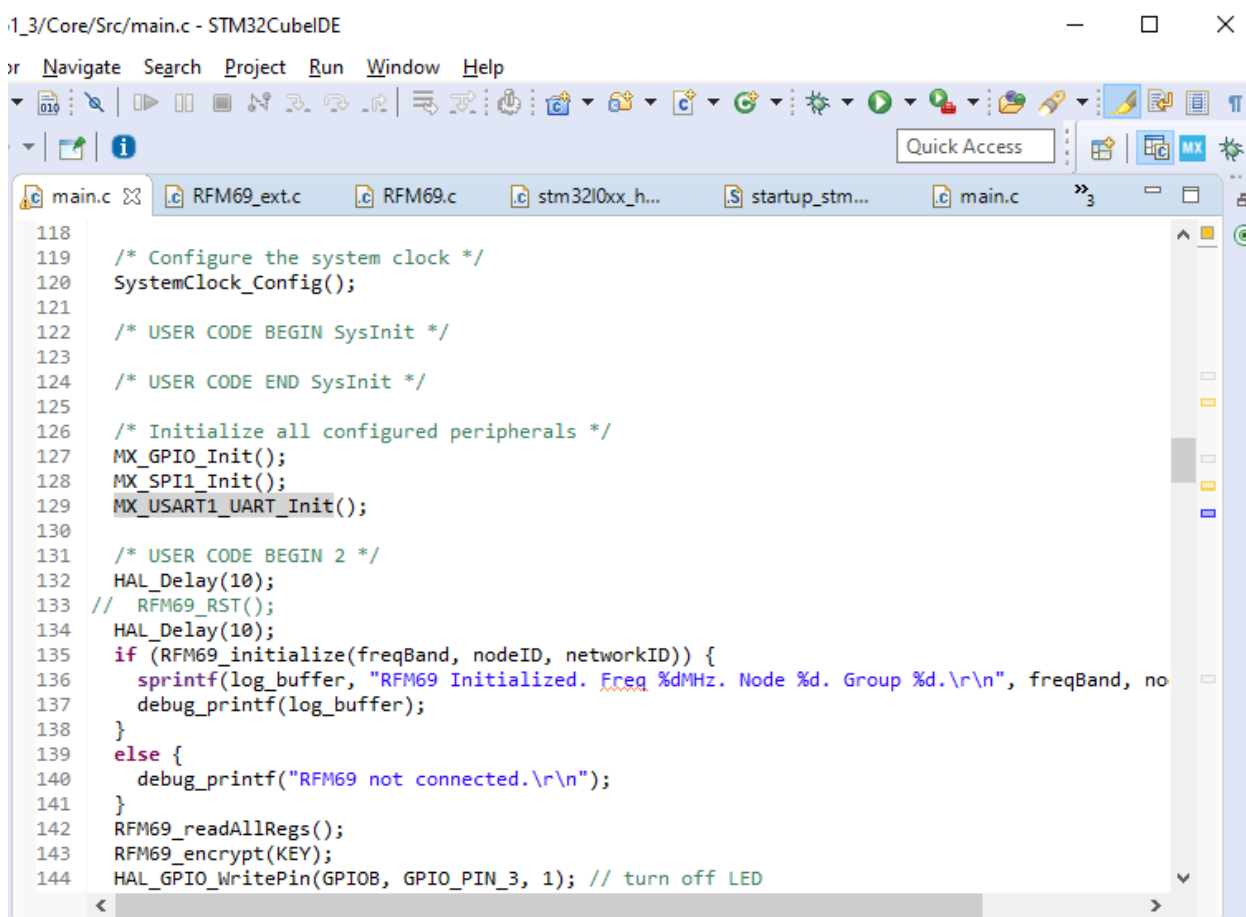


Рисунок 4.6 – Зовнішній вигляд зібраного пристрою для організації зв'язку у вбудованих системах

На рис. 4.6 можна бачити плату зі встановленим модемом HOPER RFM69HW та мікроконтролером STM32L051.

Для перевірки роботи запропонованої методики написана програма на мові С та завантажена в мікроконтролер. Приклад фрагменту коду програми показано на рис. 4.7.



```

118
119  /* Configure the system clock */
120  SystemClock_Config();
121
122  /* USER CODE BEGIN SysInit */
123
124  /* USER CODE END SysInit */
125
126  /* Initialize all configured peripherals */
127  MX_GPIO_Init();
128  MX_SPI1_Init();
129  MX_USART1_UART_Init();
130
131  /* USER CODE BEGIN 2 */
132  HAL_Delay(10);
133  // RFM69_RST();
134  HAL_Delay(10);
135  if (RFM69_initialize(freqBand, nodeID, networkID)) {
136      sprintf(log_buffer, "RFM69 Initialized. Freq %dMHz. Node %d. Group %d.\r\n", freqBand, no
137      debug_printf(log_buffer);
138  }
139  else {
140      debug_printf("RFM69 not connected.\r\n");
141  }
142  RFM69_readAllRegs();
143  RFM69_encrypt(KEY);
144  HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, GPIO_PIN_3, 1); // turn off LED

```

Рисунок 4.7 – Приклад фрагменту коду програми

З наведеного рисунку можна бачити початкову ініціалізацію та виклик функції читання стану регістрів модему.

Після першого включення на екран монітору виводиться повний дамп пам'яті регістрів модему для оцінки правильності налаштування.

Приклад отриманої інформації показано на рис. 4.8 та рис. 4.9. Для зв'язку з модемом використано інструмент для роботи з послідовним портом Termite.

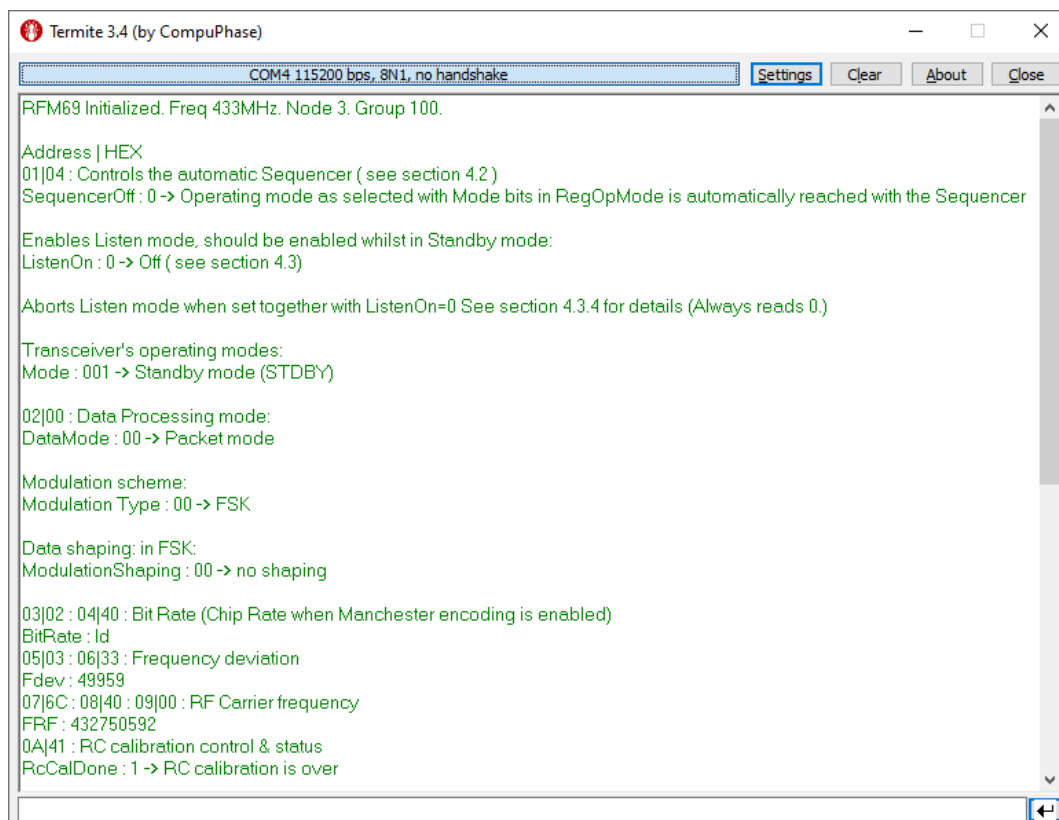


Рисунок 4.8 – Результат читання стану регістрів модему

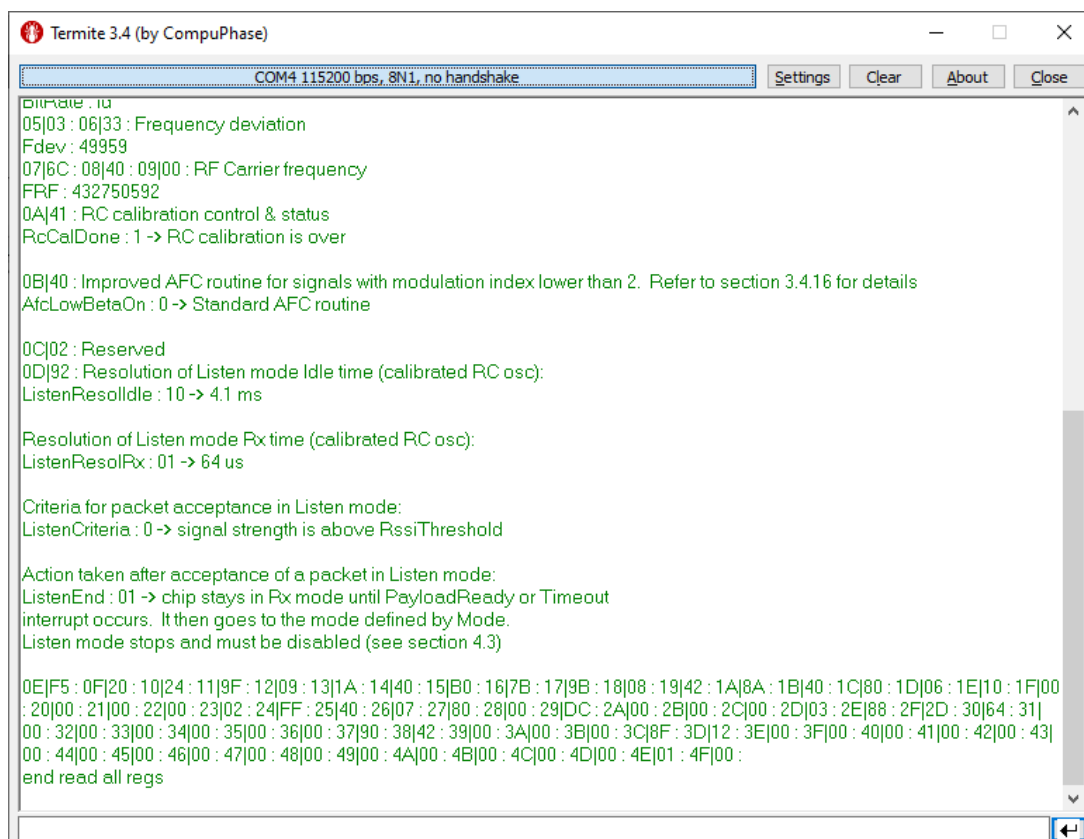
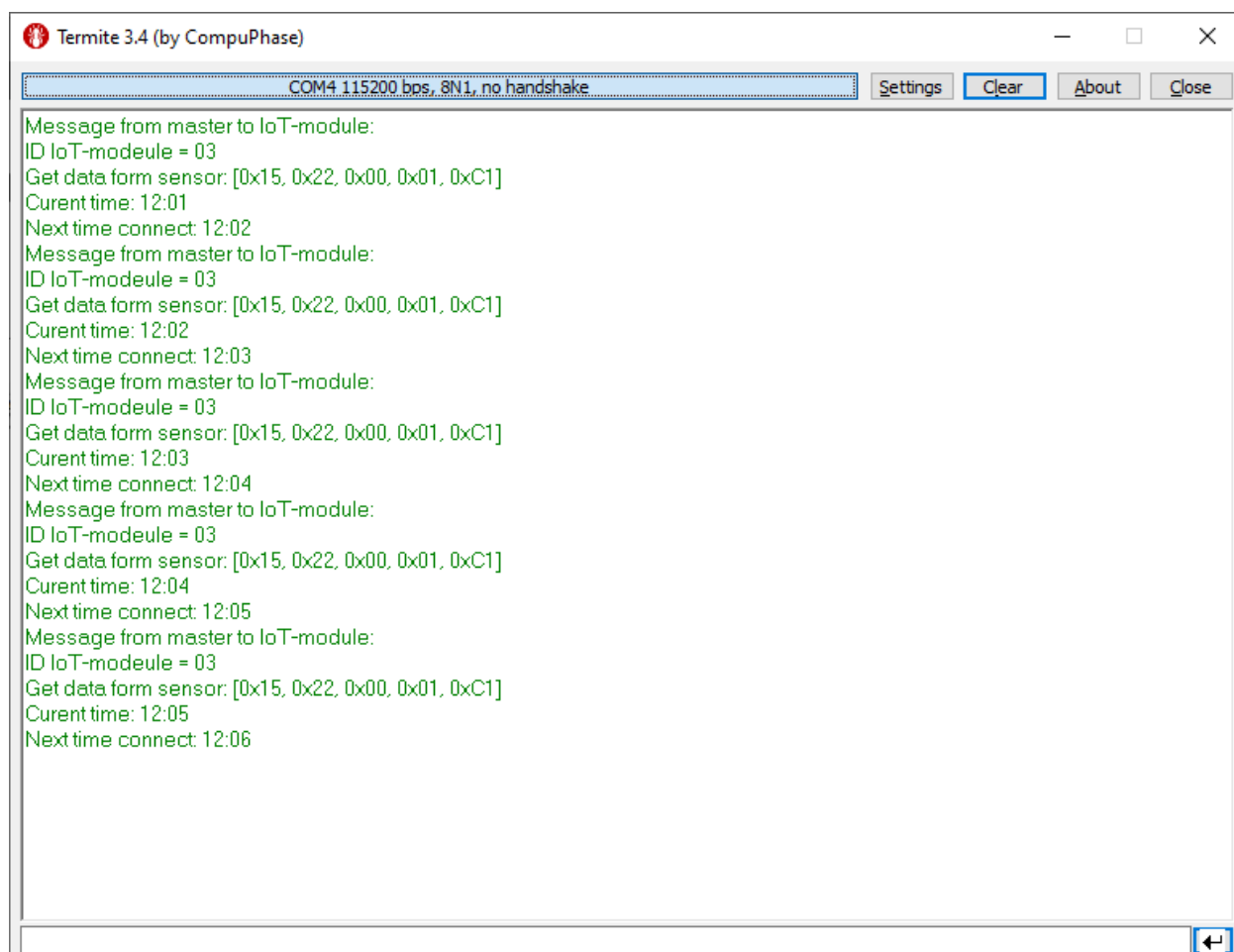


Рисунок 4.9 – Результат читання стану регістрів модему (повний дамп)

З наведеної інформації можна дізнатися про правильність налаштування кодування, частоти роботи пристрою та поточних таймінгів(термінів) для прийому даних.

На рис. 4.10 показано результат обміну даними між головним пристроєм та модулем IoT.



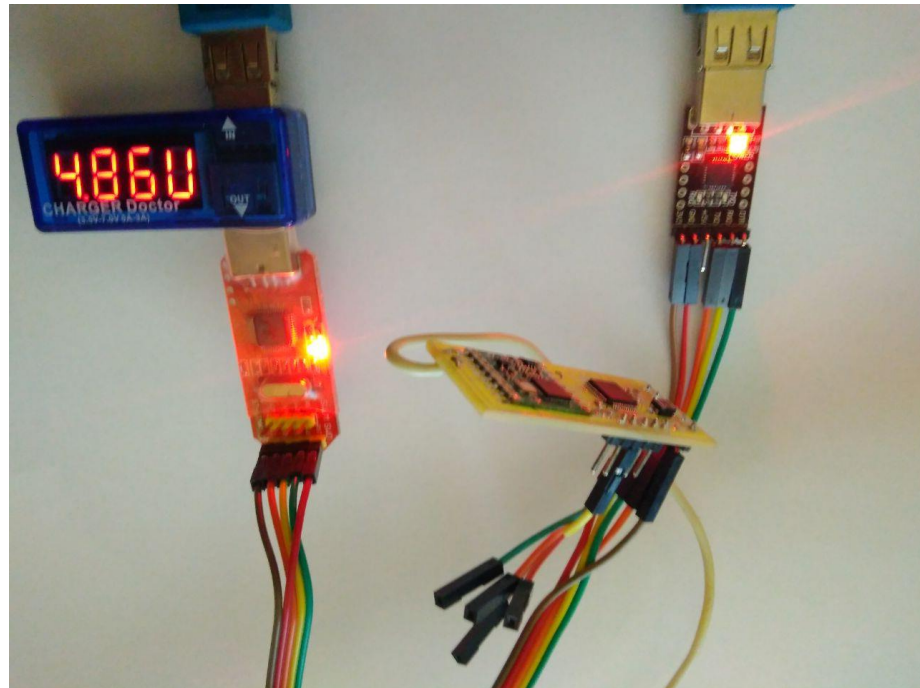
```
Termit 3.4 (by CompuPhase)
COM4 115200 bps, 8N1, no handshake
Settings Clear About Close
Message from master to IoT-module:
ID IoT-module = 03
Get data form sensor: [0x15, 0x22, 0x00, 0x01, 0xC1]
Current time: 12:01
Next time connect: 12:02
Message from master to IoT-module:
ID IoT-module = 03
Get data form sensor: [0x15, 0x22, 0x00, 0x01, 0xC1]
Current time: 12:02
Next time connect: 12:03
Message from master to IoT-module:
ID IoT-module = 03
Get data form sensor: [0x15, 0x22, 0x00, 0x01, 0xC1]
Current time: 12:03
Next time connect: 12:04
Message from master to IoT-module:
ID IoT-module = 03
Get data form sensor: [0x15, 0x22, 0x00, 0x01, 0xC1]
Current time: 12:04
Next time connect: 12:05
Message from master to IoT-module:
ID IoT-module = 03
Get data form sensor: [0x15, 0x22, 0x00, 0x01, 0xC1]
Current time: 12:05
Next time connect: 12:06
```

Рисунок 4.10 – Результат обміну даними між головним пристроєм та модулем IoT

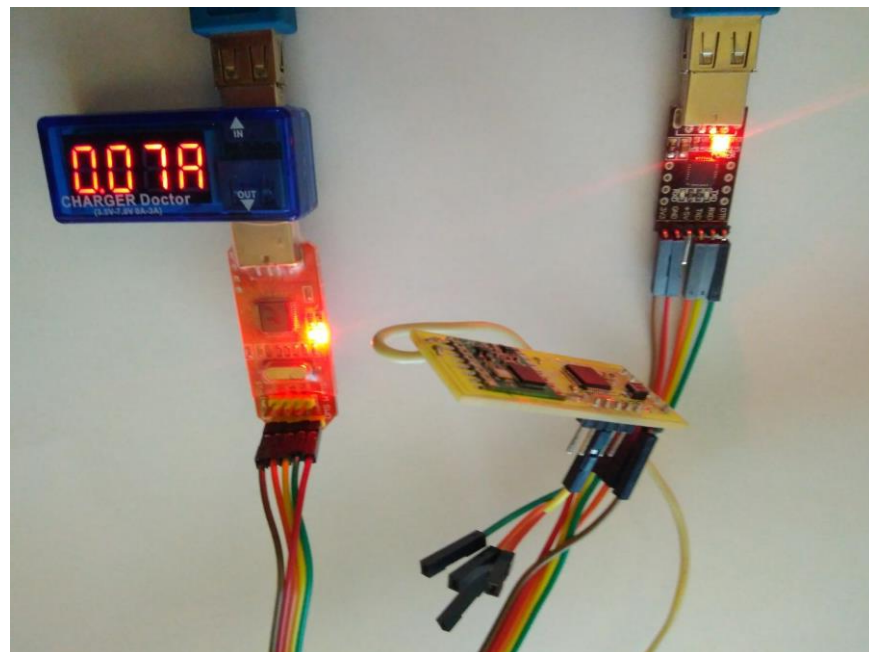
З даного рисунку можна бачити адресу IoT-пристрою, дані, що отримані з сенсору, поточний час сеансу, та час наступного з'єднання. Таким чином в програмі реалізовано запропоновану методику синхронізації пристроїв та наступного переходу в енергозберігаючий режим для економії енергії живлення.

Для перевірки споживаного струму в двох режимах роботи (основному та сну) зібрано дослідний макет з використанням вимірювального пристрою, який показує струм споживання USB-навантаженням.

На рис. 4.11 показано випадок, коли пристрій працює в звичайному режимі.



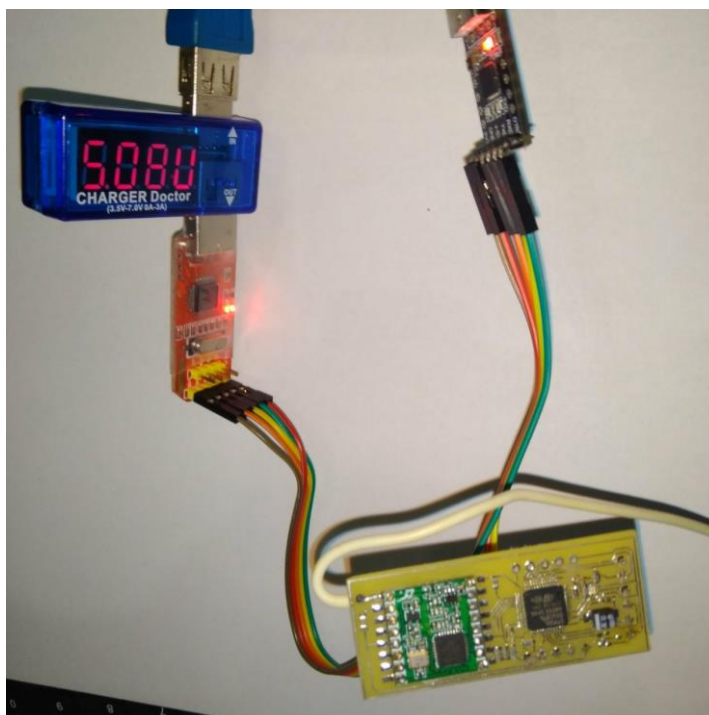
а) напруга живлення



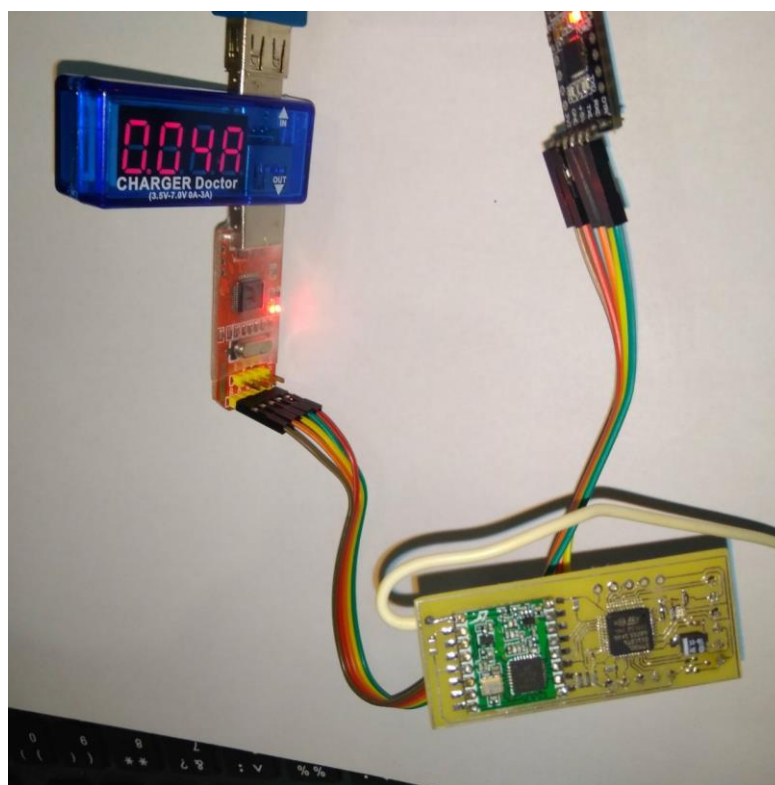
б) споживаний струм

Рисунок 4.11 – Споживання струму в звичайному режимі

На рис. 4.12 показано випадок, коли пристрій знаходиться в режимі сну.



а) напруга живлення



б) споживаний струм

Рисунок 4.12 – Споживання струму в режимі сну

Перед початком експерименту проведено замір споживаного струму без підключеного модуля IoT, а тільки з модулем для відлагодження програми. На рис. 4.13 показано результат вимірювання.



Рисунок 4.13 – Результат вимірювання струму без модуля IoT.

Як можна бачити з наведеного рисунку, пристрій показав значення 0,04 А без модуля IoT. З рис. 4.11 можна бачити, що струм в основному режимі становить 0,07 А. Якщо відняти від отриманого значення струм «холостого» вимірювання, то можна отримати робочий струм на рівні 30 мА, що є прогнозованим для такого режиму роботи.

При переході в режим сну прибор показав струм 0,04 А, такий самий, як в режимі «холостого» вимірювання. Враховуючи похибку приладу для вимірювання та його характеристики можна зробити висновок, що ми досягли очікуваного значення мінімального струму споживання на рівні < 1 мкА.

Таким чином проведені експериментальні дослідження підтвердили правильність теоретичного моделювання та працездатність запропонованій методики зниження споживаного струму пристроями для організації зв'язку в вбудованих системах.

4.5 Висновки до 4 розділу

Розроблено алгоритм роботи модуля IoT та програма, в якій реалізовано запропоновану методику синхронізації пристроїв та наступного переходу в енергозберігаючий режим для економії енергії живлення.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили правильність теоретичного моделювання та працездатність запропонованій методики зниження споживаного струму пристроями для організації зв'язку в вбудованих системах. Струм в основному режимі є на рівні 30 мА, що є прогнозованим для такого режиму роботи. При переході в режим сну ми досягли очікуваного значення мінімального струму споживання на рівні < 1 мкА.

РОЗДІЛ 5

РОЗРАХУНОК ПРИРОДНОГО ТА ШТУЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ В ПРИМІЩЕННІ

5.1 Розрахунок природного освітлення приміщенні

Роботи в приміщенні відносяться до робіт категорії 1а – легка фізична робота, яка виконується сидячи [25].

У робочій зоні приміщення згідно ДСН 3.3.6.042-99 повинні бути встановлені оптимальні поєднання параметрів мікроклімату. Для категорії робіт 1а в приміщенні повинні дотримуватися наступні норми мікроклімату:

- температура повітря не повинна перевищувати 23-25 °С в літній період і 22-24 °С в зимовий період;
- відносна вологість повинна бути в рамках 40-60 %;
- швидкість руху повітря не повинна перевищувати 0,1 м/с.

Для розрахунку природного освітлення необхідно визначити площу віконних прорізів, яка забезпечить нормоване значення коефіцієнту природного освітлення (КПО). Потім необхідно порівняти розраховану площу з реальною. Умови праці вважаються нормальними, якщо за формулою (5.1):

$$S_{OK} \leq S_{реал}, \quad (5.1)$$

де S_{OK} – площа вікон, розрахована по формулі;

$S_{реал} = 2 \text{ м}^2$ – реальне значення площі вікон у приміщенні.

Площу віконних прорізів розраховуємо за формулою (5.2):

$$(5.2)$$

$$S_o = \frac{e_{\text{норм}} \cdot \eta_0 \cdot \gamma \cdot K_3 \cdot S_n}{100 \cdot \tau_0 \cdot r_1},$$

де S_o – площа віконних прорізів, яка забезпечить нормування значення в приміщенні;

$S_n = 25,2 \text{ м}^2$ – площа приміщення;

$e_{\text{норм}}^{IV} = 1,4$ – нормоване значення для 4-го поясу світлового клімату СНД;

$\eta_0 = 14$ – світлова характеристика вікна;

$\gamma = 0,8$ – коефіцієнт, що враховує затіненість вікон будівлями навпроти;

$K_3 = 1,4$ – коефіцієнт запасу (залежить від концентрації пилу в приміщенні та від періодичності очищення скла);

$\tau_0 = 0,88$ – загальний коефіцієнт світло пропускання, що визначається залежно від коефіцієнта пропускання скла, втрат світла в палітурках вікна, шару його забруднення, наявності сонцезахисних конструкцій;

$r_1 = 1,2$ – коефіцієнт, що враховує підвищення за рахунок відбиття.

Виходячи з цього:

$$S_o = \frac{1,4 \cdot 14 \cdot 0,8 \cdot 1,4 \cdot 25,2}{100 \cdot 0,88 \cdot 1,2} = 5,24 \text{ м}^2.$$

Порівняємо розраховану площу віконних прорізів з реальною. Відповідно, значення реальної площі вікон не відповідає нормованим значенням. Рішенням для забезпечення нормованих показників освітлення робочого приміщення є забезпечення додатковими приладами штучного освітлення.

5.2 Розрахунок штучного освітлення в приміщенні

Крім природного освітлення в приміщенні, необхідно використовувати й штучне освітлення.

Нормативні значення штучного освітлення $E=200-500$ лк, природного – КЕО $\geq 1,2$ %. Штучне освітлення виконано, як загальне, з допомогою світильників з люмінесцентними лампами.

Шум у приміщенні відповідає нормативним значенням – 50 дБА згідно з ДСН 3.3.6-037-99.

Перевірочний розрахунок штучного освітлення проводиться методом коефіцієнта використання світлового потоку.

Мета перевірного розрахунку – визначення фактичної освітленості в приміщенні.

Основна розрахункова формула (5.3) методу коефіцієнта використання світлового потоку:

$$F_{cv} = \frac{E_{\phi} + k_z + S + z}{n \cdot N \cdot \eta \cdot \gamma}, \quad (5.3)$$

де E_{ϕ} – фактична освітленість, лк;

$S = 25,2$ м² – площа освітлюваного приміщення, м²;

$z = 1,1$ – коефіцієнт нерівномірності освітлення;

$k_z = 1,4$ – коефіцієнт запасу, що враховує запилення світильників і знос джерел запасу світла в процесі експлуатації. Для приміщення, освітлюваного люмінесцентними лампами та при умові чищення світильників не рідше двох разів на рік;

$N = 2$ – число світильників в ряду, шт.;

$\eta = 0,67$ – коефіцієнт використання світлового потоку ламп;

$\gamma = 0,8$ – коефіцієнт затінення;

$n = 3$ – число рядів світильників;

$n_L = 2$ – число ламп у світильнику, шт.;

$F_L = 1850$ Лм – світловий потік лампи, Лм.

З формули (5.3) потрібно визначити E_ϕ і після розрахунку порівняти з E_n :

$$F_{cv} = F_L \cdot n_L = 1850 \cdot 2 = 3700 \text{ Лм.}$$

Визначимо фактичну освітленість:

$$E_\phi = \frac{F_{cv} \cdot n \cdot N \cdot \eta \cdot \gamma}{k_3 \cdot S \cdot z} = \frac{3700 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 0,67 \cdot 0,8}{1,5 \cdot 25,2 \cdot 1,1} = 286,17 \text{ лк.}$$

Як видно з розрахунку, штучне освітлення в приміщенні – в межах нормованих значень (200–500 лк) означає $E_\phi \geq E_n$.

5.3 Висновки до 5 розділу

Проведено розрахунок природного та штучного освітлення в приміщенні, в результаті, рішенням для забезпечення нормованих показників освітлення робочого приміщення є забезпечення додатковими приладами штучного освітлення.

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз принципів побудови бездротової сенсорної мережі для обміну повідомленнями між пристроями у вбудованих системах. Розроблена структурна схема мікропроцесорного пристрою, що становить основу бездротової мережі.

Аналіз показав, що для розробки енергозберігаючих пристроїв, що працюють від батарейного живлення треба використовувати контролери серії STM32L [11]. Дані пристрої мають високу продуктивність, що властиво всім мікроконтролерам на ядрі ARM Cortex-M3. Для нас важливим є їх низьке енергоспоживання в активному і сплячому режимах.

Виконане моделювання енергетичного профілю роботи мікроконтролерного модуля NUCLEO-L031. Для моделювання роботи мікроконтролерного пристрою обрано інтегроване середовище STM32CubeIDE. Задано реальний сценарій роботи для перевірки очікуваного рівня споживання енергії від батареї потужністю 700 мАч.

Моделювання показало, що запропонований сценарій та використання обраних методів зберігання енергії дало змогу працювати пристрою від батареї один місяць та 26 діб. При цьому середнє споживання енергії склало 510 мкА.

За розробленою структурною схемою та попередніми теоретичними результатами моделювання створено два модуля:

- тестовий зразок модуля IoT;
- тестовий зразок модуля керування та збору даних.

Розроблено алгоритм роботи модуля IoT та програма, в якій реалізовано запроповану методику синхронізації пристроїв та наступного переходу в енергозберігаючий режим для економії енергії живлення.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили правильність теоретичного моделювання та працездатність запропонованій методики зниження споживаного струму пристроями для організації зв'язку в вбудованих системах.

Струм в основному режимі є на рівні 30 мА, що є прогнозованим для такого режиму роботи. При переході в режим сну ми досягли очікуваного значення мінімального струму споживання на рівні < 1 мкА.

Проведено розрахунок природного та штучного освітлення в приміщенні, в результаті, рішенням для забезпечення нормованих показників освітлення робочого приміщення є забезпечення додатковими приладами штучного освітлення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008–2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Документація. – Введ. 2015-06-22. - К.: Держстандарт України, 2015. - 31 с.
2. Методичні вказівки з «Розробки й оформлення магістерської атестаційної роботи» для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітні програми: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І.Ш. Невлюдов, В.В. Косенко, В.В. Євсєєв. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 55 с.
3. Основи наукових досліджень: [навч. посіб.] / І. Ш. Невлюдов, Ю. М. Олександров, А. О. Андрусевич, О. О. Чала. – Кривий Ріг : КК НАУ, 2017. – 344 с.
4. Положення про протидію академічному плагіату в ХНУРЕ [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://nure.ua/polozhennya-pro-protidiyu-akademichnomu-plagiatu-v-hnure-290-vid-28#images>.
5. Положення про роботу екзаменаційних комісій ХНУРЕ [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/2018/Admission_Board/polozh_pk.pdf.
6. Положення про авторське право в ХНУРЕ [Електронний ресурс] / Режим доступу: [www/ URL: https://nure.ua/polozhennya-pro-avtorske-pravo-v-hnure#images](https://nure.ua/polozhennya-pro-avtorske-pravo-v-hnure#images).
7. Аналіз методів зниження споживання енергії та моделювання енергетичного профілю мікроконтролерних пристроїв [Електронний ресурс] / Моцний В.О. // Режим доступу: <https://www.compel.ru/lib/125813-17> / Наука Онлайн No12 грудень 2020.
8. Сергиевский М. Беспроводные сенсорные сети [Текст] / Максим Сергиевский // КомпьютерПресс. – М., 2009. - №8. - С. 12-17.

9. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипенко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. – Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. – 366 с.

10. Автономное питание? – выбираем STM32L. [Електронний ресурс]. – Електрон. текстові дані. – Режим доступу : <https://www.compel.ru/lib/53956#rlcje>.

11. Энергосбережение и сон Arduino [Електронний ресурс]. – Електрон. текстові дані. – Режим доступу : <https://alexgyver.ru/lessons/power-sleep/>.

12. Промышленный Интернет Вещей [Електронний ресурс]. – Електрон. текстові дані. – Режим доступу : https://www.proxis.ua/ru/services/industrial-internet-of-things/?gclid=CjwKCAiA8Jf-BRB-EiwAWDtEGu8XgkHze7-D6t5-MTttETMMA2ClfC7XsH5wRg00FeYOa-FWVDjzxoCeyoQAvD_BwE.

13. Integrated Development Environment for STM32 [Електронний ресурс]. – Електрон. текстові дані. – Режим доступу : <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>.

14. STM32 Nucleo-32 development board with STM32L031K6 MCU, supports Arduino nano connectivity STM32 [Електронний ресурс]. – Електрон. текстові дані. – Режим доступу : <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-l031k6.html>.

15. Кодування та модуляція в каналах передачі та прийому інформації [Електронний ресурс]. – Електрон. текстові дані. – Режим доступу: https://itcj.sethost.net/pdf/svp_3_1_7.pdf.

16. Канальный уровень. Функции та приклади протоколів [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.znanius.com/3594.html>.

17. Конспект лекцій з дисципліни «Інформаційно-комунікаційні системи», частина І, для студентів усіх форм навчання спеціальності 125 «Кібербезпека» за освітньою програмою «Безпека інформаційних комунікаційних систем» [Електронний ресурс] / Упоряд. Г.З. Халімов. – Електронне видання. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – с. 109-126.

18. STM32CubeIDE – новый универсальный инструмент разработки от ST [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.compel.ru/lib/125813>.

19. Конспект лекцій з дисципліни "Теорія автоматичного управління" для напряму підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [Електронний ресурс] / ХНУРЕ : розроб. О. В. Токарєва. - Харків, 2015. — 32 с.

20. Радиомодули HOPE-RF [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://wireless-e.ru/radiomoduli/hope-rf/>.

21. Невлюдов І. Ш. Людино-машинний інтерфейс в технічних засобах автоматизації: Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, О. І. Филипенко, Б. О. Шостак. – Харків : «ХТМТ», 2019. – 244 с.

22. RFM01-868-S2 [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.compel.ru/infosheet/HOPERF/RFM01-868-S2>.

23. Радиомодули Hope RF [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://wireless-e.ru/wp-content/uploads/2009_2_32.pdf.

24. "Simulation of the Sensor Network of Base Stations in a Local Positioning System in Intelligent Industries," 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. [Електронний ресурс] / I. Nevludov, O. Sychova, A. Andrusevich, S. Novoselov, D. Mospan and V. Mospan // Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9240842/authors#authors> / Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240842.

25. Категория работ Главный государственный санитарный врач Украины Постановление от 01.12.1999 № 42 [Електронний ресурс] / Режим доступу: http://search.ligazakon.ua/1_doc2.nsf/link1/TM009433.html.