

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
другого (магістерського) рівня

на тему **НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДОЗИМЕТРИ ДЛЯ СЕНСОРНИХ
ЦИФРОВИХ МЕРЕЖ**

Виконав: студент 2 курсу, групи ІКК-2.1
спеціальності
121 Інженерія програмного забезпечення

_____ Попазов В. Г. _____

Керівник _____ Горбачов В. Е. _____

Рецензент _____ Русу О. П. _____

ДОВІДКА

кафедри ІТ про виконану магістерську роботу

студента 2 курсу ФКПІ та КН групи ІПЗ

Попазова Вячеслава Георгійовича

на тему Напівпровідникові дозиметри для сенсорних цифрових мереж

Висновок нормоконтролера Косиць, Данила р. Кваліф. робота виконана на належному рівні. Виконано з дотриманням нормативних вимог кафедри ІТ.
Нормоконтролер Косиць Д.І. 15.12.2023 Косиць Д.І.
(науковий ступінь, вчене звання, посада) (підпис, дата) (і.б. прізвище)

Висновок відповідального за перевірку на наявність академічного плагіату Діагностика плагіату за допомогою сервісу iParasite 10.1043693768 виконана. Результат: не виявлено плагіату.
Відповідальна особа Косиць Д.І. 15.12.2023 Косиць Д.І.
(науковий ступінь, вчене звання, посада) (підпис, дата) (і.б. прізвище)

Попередня експертиза (захист)

магістерської роботи

(бакалаврської роботи чи магістерської роботи)

студ. Попазова В. Г. проведена "15" 12 2023 р.
(прізвище і.б.)

Висновки Кваліфікаційна робота виконана в повному обсязі. В роботі досліджується оригінальна методика кваліфікації одноперехідних та поєднаних транзисторів для покращення характеристик датчиків. Магістерська робота відповідає діючим стандартам та рекомендується до захисту.

Члени комісії

(підпис)

(підпис)

(підпис)

д.т.н., проф. Стешковська І.В.

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)

к.т.н., проф. Лисор'єва І.І.

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)

к.т.н. доц. Гордечов В.Є.

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище і.б.)

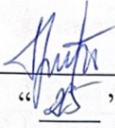
МІЖНАРОДНИЙ ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет кібербезпеки, програмної інженерії та комп'ютерних наук
Кафедра інформаційних технологій
Освітній ступінь магістр
Галузь знань 12 Інформаційні технології
Спеціальність 121 Інженерія програмного забезпечення

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІТ

к.т.н., доц.

 Т. І. Григор'єва

"25" 09 2023 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Попазову Вячеславу Георгійовичу

1. Тема роботи Напівпровідникові дозиметри для сенсорних цифрових мереж
керівник роботи Горбачов Віктор Едуардович, к.т.н., доцент кафедри ІТ
затверджені наказом закладу вищої освіти від 25.09.2023 р. № 1957
зі змінами від 04.12.2023 р. № 3102
2. Строк подання студентом роботи 11.12.2023 р.
3. Вхідні дані до роботи: Наукова літератури з інформацією про конкурентні пристрої
Технічна документація з параметрами пристроїв
Опис алгоритму покрокової стратегії дослідження
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки Розділ 1 Дозиметри в цифрових сенсорних мережах
Розділ 2 Моделювання параметрів дозиметра
Розділ 3 Шляхи покращення характеристик дозиметра з частотним виходом
5. Перелік графічного матеріалу (з зазначенням обов'язкових слайдів)
Слайд 1 – Радіаційні об'єкти які діють на напівпровідникові пристрої цифрової мережі
Слайд 2 – Сучасні системи моніторингу радіації
Слайд 3 – Сучасні конструкції датчиків радіації
Слайд 4 – Чутливий елемент на базі MOSFET
Слайд 5 – Порівняння блок-схем сполучення чутливих елементів з цифровими мережами

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 25.09.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області	25.09.2023-01.10.2023	<i>вик</i>
2	Огляд і аналіз існуючих аналогів	02.10.2023-08.10.2023	<i>вик</i>
3	Дослідження особливостей сполучення різних типів датчиків з цифровою моніторинговою мережею	09.10.2023-15.10.2023	<i>вик</i>
4	Теоретичне та експериментальне дослідження аналогового чутливого елемента дозиметра	16.10.2023-05.11.2023	<i>вик</i>
5	Теоретичне та експериментальне дослідження характеристик дозиметра з частотним виходом.	06.11.2023-12.11.2023	<i>вик</i>
6	Дослідження шляхів покращення характеристик частотного дозиметра	13.11.2023-19.11.2023	<i>вик</i>
7	Висновки та рекомендації	20.11.2023-26.11.2023	<i>вик</i>
8	Перелік джерел посилання	27.11.2023-03.12.2023	<i>вик</i>
9	Додаток А Перелік копій демонстраційного матеріалу	04.12.2023-10.12.2023	<i>вик</i>

Студент *Григор* В. Г. Попазов

(підпис)

Керівник роботи *Горбачов* В. Е. Горбачов

(підпис)

ВІДГУК КЕРІВНИКА

магістерської роботи студента Попазова В. Г.

на тему: Напівпровідникові дозиметри для сенсорних цифрових мереж

Об'єкти з підвищеним радіаційним фоном оснащуються інтелектуальними системами управління в першу чергу. Для внесення корективів в роботу електроніки на таких об'єктах потрібні нові типи детекторів іонізуючого випромінювання, які були б компактними і споживали мало енергії. Датчики з частотним виходом не потребують аналогово-частотних перетворювачів, завадо захищені та легко інтегруються в цифрові мережі.

Тема даної роботи присвячена експериментальному дослідженню можливості використання одноперехідного транзистора в схемі релаксаційного генератора в якості дозиметра з частотним виходом.

Студент Попазов В. Г. добре виконав завдання до ВКР і основну увагу приділив теоретичним дослідженням та комп'ютерному моделюванню впливу радіації на характеристики польових і одноперехідних транзисторів.

Робота проводилася значною мірою самостійно. Графік консультацій не порушувався. Завдання на ВКР виконано повністю. Побудована комп'ютерна модель експериментальних досліджень властивостей дозиметра при різних дозах радіації. Необхідні для цього розрахунки проведені. При оформленні пояснювальної записки використовувались комп'ютерні технології.

Під час виконання магістерської роботи студент Попазова В. Г. засвоїв методи комп'ютерного моделювання, показав уміння користуватись навчальною та технічною літературою, ставити та розв'язувати дослідницькі задачі.

Магістерська робота відповідає вимогам до випускних кваліфікаційних робіт магістрів та заслуговує оцінки «відмінно».

Студент Попазов В. Г. заслуговує присвоєння кваліфікації магістр з інженерії програмного забезпечення за заявленою спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення.

Керівник

к.т.н., доцент кафедри ІТ



В. Е. Горбачов

РЕЦЕНЗІЯ

на магістерську роботу студента Попазова В. Г.

на тему: Напівпровідникові дозиметри для сенсорних цифрових мереж

Магістерська робота виконана на 73 сторінках текстової частини та містить три розділи згідно з завданням на магістерську роботу.

У магістерській роботі студента Попазова В. Г. розглянуті питання експериментальної перевірки можливості використання одноперехідного транзистора в якості дозиметра в цифрових мережах. Актуальність теми полягає в тому, що критеріями використання датчика є можливість сполучення з цифровими мережами, економія ресурсів та завадостійкість.

У роботі досліджується оригінальна методика комбінації одноперехідних та польових транзисторів для покращення характеристик датчика.

Практичне значення отриманих автором роботи результатів полягає в можливості використання таких методик при організації та експлуатації сенсорних мереж на реальних об'єктах з метою економії ресурсів.

В роботі Попазова В. Г. показав достатню теоретичну підготовку.

Пояснювальна записка й графічні матеріали виконані охайно й відповідно до вимог ЄСКД, оформлення демонстраційних слайдів якісне.

Зауваження:

- досліджено в роботі було і аналоговий і частотний сенсори, так чому обрано частотний чутливий елемент не чітко обговорено в тексті;
- доцільно було б оцінити термін роботи досліджуваного приладу за умов радіаційного опромінення.

Але названі недоліки не знижують цінності виконаної роботи.

Магістерська робота студента Попазова В. Г. відповідає вимогам до випускних кваліфікаційних робіт магістрів та заслуговує оцінки «відмінно».

Студент Попазов В. Г. заслуговує присвоєння кваліфікації магістр з інженерії програмного забезпечення за заявленою спеціальністю 121 Інженерія програмного забезпечення.

Рецензент

к.т.н., доцент каф. КН



О. П. Русу

Ім'я користувача:
Анна Серединко

Дата перевірки:
15.12.2023 21:54:28 MSK

Дата звіту:
17.12.2023 18:57:40 MSK

ID перевірки:
1016010077

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

ID користувача:
100001433

Назва документа: 2023_ПОПАЗОВ_Горбачов_Напівпровідникові_дозиметри_для_сенсорних

Кількість сторінок: 71 Кількість слів: 15147 Кількість символів: 117178 Розмір файлу: 6.64 MB ID файлу: 1015695768

10.6% Схожість

Найбільша схожість: 2.69% з Інтернет-джерелом (<https://business.vodafone.ua/produkty/iot>)



0% Цитат

Вилучення цитат вимкнено

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнено

0% Вилучень

Немає вилучених джерел

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи 98

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської роботи: 69 с., 21 рис., 1 табл., 2 додатка, 29 джерел.

Об'єкт дослідження – конструкція дозиметра з частотним виходом.

Мета роботи – дослідити при яких умовах дозиметр, який зібраний на базі промислових недорогих транзисторів, може бути використано для роботи в сучасних цифрових сенсорних мережах.

Метод дослідження – комп'ютерне моделювання параметрів дозиметра опроміненого різними дозами радіації.

Вперше теоретично та експериментально дослідженні технічні рішення покращення характеристик існуючих датчиків при невеликих витратах. В першому розділі сформульовано вимоги до датчиків радіації цифрових мереж. В другому розділі проведено теоретичні та експериментальних дослідження дозиметрів на базі польового та одноперехідного транзистора з частотним виходом. В третьому розділі досліджені методи покращення характеристик дозиметра з частотним виходом. Досліджена схема дозиметра має стандартну недорогу елементну базу, високу чутливість та споживаєть мало енергії, що значно економить ресурси при організації та експлуатації цифрових сенсорних мереж.

ЦИФРОВА МЕРЕЖА СЕНСОРНА, ДОЗИМЕТР, АНАЛОГОВИЙ
ДАТЧИК, ЧАСТОТНИЙ ДАТЧИК

ABSTRACT

Explanatory note to the master's thesis: 69 p., 21 figures, 1 tables, 2 appendix, 29 sources.

The object of research is the construction of a dosimeter with a frequency output.

The purpose of the work is to investigate under what conditions a dosimeter assembled on the basis of industrial inexpensive transistors can be used to work in modern digital sensor networks.

The research method is computer modeling of the parameters of a dosimeter irradiated with different doses of radiation.

For the first time, theoretically and experimentally investigate technical solutions for improving the characteristics of existing sensors at low costs. In the first section, the requirements for radiation sensors of digital networks are formulated. In the second chapter, theoretical and experimental studies of dosimeters based on a field-effect and single-junction transistor with a frequency output are carried out. In the third section, methods of improving the characteristics of a dosimeter with a frequency output are investigated. The investigated scheme of the dosimeter has a standard inexpensive element base, high sensitivity and consumes little energy, which significantly saves resources in the organization and operation of digital sensor networks.

3 DIGITAL SENSOR MEASURE, DOSIMETER, ANALOG SENSOR, FREQUENCY SENSOR

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАК

- АТ команда - це аббревіатура від англійського слова увага (ATtention)
- GPS (Global Positioning System) - глобальна система позиціонування
- I2C - (Inter-Integrated Circuit) - синхронний протокол передачі даних
- IoT (Internet of Things) – Інтернет Речей
- LPWAN (Low Power Wide Area Network) – енергоефективна мережа великого радіусу дії
- NB-IoT (Narrow Band Internet of Things) - стандарт стільникового зв'язку для пристроїв телеметрії з низькими обсягами обміну даними
- OTAA (Over-the-Air Activation) - режим активації пристроя по радіоканалу
- RFID (Radio Frequency IDentification) - технологія радіочастотної ідентифікації
- SPI (Serial Peripheral Interface) – послідовний переферійний інтерфейс
- SMA - тип високочастотного з'єднувача
- WSN (Wireless Sensor Network) - безпроводна сенсорна мережа
- WEP - протокол для мережевого шифрування та безпеки
- WPA - протокол для мережевого шифрування та безпеки
- WPA2 - протоколи для мережевого шифрування та безпеки
- UART - (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) – універсальний асинхронний прийомопередавач
- АЧП - аналогово-частотний перетворювач
- БС - базова станція
- МОН ПТ - метал-оксидно-напівпровідниковий польовий транзистор
- ОПТ - одноперехідний транзистор
- ПТ - польовий транзистор
- ТЛД - термомінесцентний детектор
- ФЛД - фото люмінесцентний детектор
- ЧЦП - частотно-цифровий перетворювач

ВСТУП

Основою для організації та експлуатації цифрових сенсорних мереж є вимоги до ефективності датчиків фізичних величин. Одніми з основних вимог є мале споживання енергії, висока чутливість та невисока ціна датчика.

Актуальність. Стрімкий розвиток мереж «Інтернету речей» в атомній промисловості, в радіаційній медицині, в галузі високих енергій, при дослідженні космосу потребує постійного внесення корекцій в роботу електронних систем в місцях з підвищеним радіаційним фоном. Тому дослідження по створенню ефективних датчиків іонізуючого випромінювання з низьким енергоспоживанням є актуальним на сьогоднішній день.

Мета дослідження. Метою роботи є теоретичні та експериментальні дослідження залежності параметрів одноперехідного транзистора в схемі релаксаційного генератора та перевірка можливості використання його в якості датчика іонізуючого випромінювання з частотним виходом в сенсорних цифрових мережах.

Завдання дослідження. Для досягнення мети треба здійснити огляд технічних вимог, які пред'являються до датчиків при їх використанні в мережах Інтернету речей, а також конструкцій існуючих сучасних датчиків іонізуючого випромінювання; дослідити механізми залежності електричних параметрів польових та одноперехідних транзисторів від радіаційних дефектів в теоретичному аспекті; експериментально дослідити залежність електричних параметрів польових та одноперехідних транзисторів від потоку радіаційного випромінювання; теоретично та експериментально дослідити залежність вихідної частоти релаксаційного генератора від потоку радіаційного випромінювання; окреслити можливості покращення характеристик датчика; зробити висновки про відповідність параметрів датчика сучасним датчикам, які використовуються в промисловості; розглянути конкретні способи поєднання датчика з цифровими системами мереж «Інтернету речей».

Предметом дослідження є електричні параметри польових та одноперехідних транзисторів, які зазнали опромінення певними фіксованими дозами радіації, а також вихідна частота релаксаційного генератора зібраного на базі цих транзисторів.

Новизна. Вперше теоретично та експериментально дослідженні технічні рішення покращення характеристик датчиків конструкція яких представляє собою комбінацію існуючих в серійному виробництві чутливих до дії радіації елементів при невеликих матеріальних витратах.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що використані в роботі методи експериментальних досліджень параметрів датчиків та засоби покращення їх характеристик дозволяють в подальшому приймати правильні рішення під час роботи з цифровими сенсорними мережами, знаходити можливості використовувати серійно вироблені промисловістю прилади замість дорогих спеціальних систем, що значно економить витрати на організацію і експлуатацію мереж Інтернету речей.

Результати можуть бути застосовані при організації нових та експлуатації існуючих цифрових сенсорних мереж в місцях з підвищеним фоном радіації.

Прогнози щодо розвитку досліджень. Використання результатів роботи дозволить застосовувати досліджений в роботі метод впровадження нових недорогих технічних рішень для розвитку передових технологій Інтернету речей.

Особистий внесок автора полягає в тому що висновки в роботі побудовані на результатах власних теоретичних і експериментальних досліджень лабораторних зразків транзисторів, виконані на лабораторній вимірювальній установці.

Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та рекомендацій і переліку джерел посилання. В першому розділі сформульовано вимоги до датчиків радіації мереж «Інтернету речей». В другому розділі проведено теоретичні та експериментальних дослідження датчика іонізуючого випромінювання на базі одноперехідного транзистора з частотним виходом. В третьому розділі досліджені методи покращення характеристик датчика радіації на базі одноперехідного транзистора з частотним виходом та розглянуто принципи поєднання датчика з цифровими системами мереж «Інтернету речей».

Апробація результатів роботи. Основні положення та результати магістерської роботи пройшли апробацію на X Міжнародній науково-практичній конференції «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє» (м. Одеса, 16 – 19 листопада 2020 року). Тезиси доповіді автора опубліковані в збірнику праць конференції [29].

1 ДОЗИМЕТРИ В ЦИФРОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

1.1 Концептуальні засади побудови цифрових мереж

Цифрові мережі «Інтернету речей» складаються з безлічі різноманітних датчиків, які збирають інформацію про параметри об'єкту (речі). Ця інформація найчастіше бездротовим способом передається в вузли сенсорної мережі, і далі – в хмарне сховище Інтернету. Сервер, який контролює цілу групу об'єктів, через певні інтервали часу вибирає інформацію про стан параметрів даного об'єкта і, в залежності від заданих наперед умов, приймає рішення про подачу сигналу на виконавчий пристрій, який коригує той параметр даного об'єкта, який вийшов за межі заданого інтервалу. Такий об'єкт з датчиками і виконавчими пристроями, який контролюється процесором і називають «Розумною річчю».

«Розумними» можуть бути житлові будинки, цехи заводів, цілі міста, безпілотні автомобілі, і навіть безпілотні суховантажі і танкери. «Розумні речі», які підключені до Інтернету та об'єднанні у різні групи, отримали узагальнену назву «Інтернету речей» (рис. 1.1).

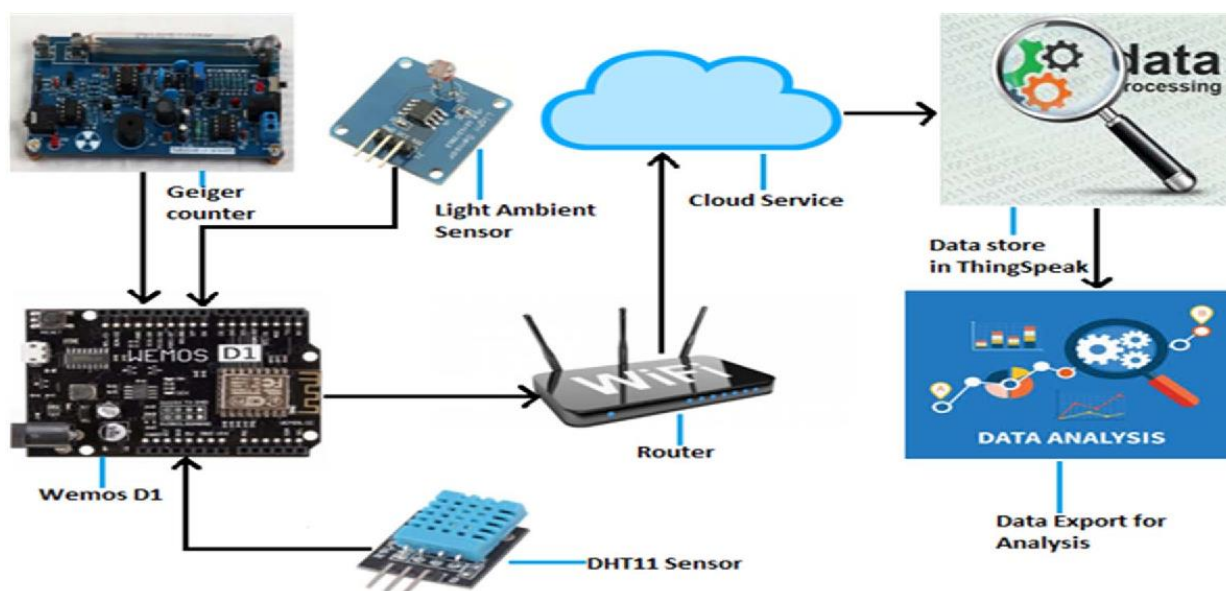


Рисунок 1.1 – Структура цифрової мережі

Згідно до прогнозу виробника мережевого обладнання – компанії Cisco Systems, до 2030 року таких пристроїв буде підключено до мережі більш ніж 500 мільярдів [1]. Це приблизно 80 пристроїв на одного мешканця планети. Кожен з

таких пристроїв має сенсор для збору та передачі даних при взаємодії з зовнішнім середовищем.

З точки зору завтрашнього дня сучасне місто не зможе існувати без різного роду датчиків, камер, сенсорів, які збирають дані про рівень забруднення води, вологості, атмосферного тиску, якості повітря, кількості машин на дорогах, стану ґрунту, температурі зовнішнього середовища, вологості, вільних місць на парковках, скупчення людей та інше. Вся ця сукупність пристроїв та необхідного супутнього обладнання, що забезпечує збір даних, їх передачу, обробку та наступний аналіз, і є технологія «Інтернету речей».

Архітектура IoT мережі достатньо проста і включає до себе наступні елементи:

- сенсор з передавачем;
- базову станцію (БС);
- мережевий сервер/система управління;
- сервер додатків.

Нижче на рис. 1.2 наведена типова архітектура мережі IoT [2].

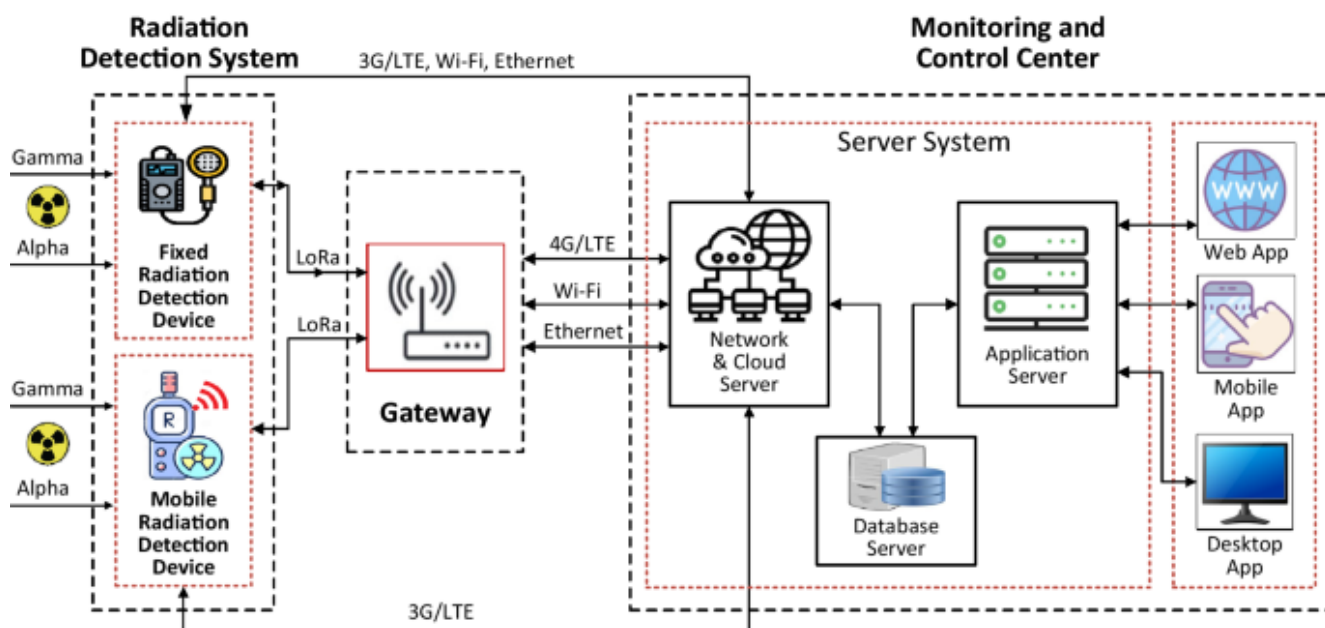


Рисунок 1.2 – Узагальнена архітектура IoT мережі

Сенсори та передавачі. Сенсор збирає інформацію з оточуючого середовища та з певною періодичністю передає її до БС. Радіомодулі або транспондери виконують функції прийому сигналу від сенсора і передають його далі в мережу. Відмінною рисою технології IoT є використання безпроводних сенсорів разом з передавачами з дуже низьким енергоспоживанням, термін роботи яких

вимірюється роками. Саме низьке енергоспоживання датчиків зробило можливим впровадженням технології IoT.

На сьогодні є досить велике число виробників, що пропонують широкий спектр сенсорів, які можуть вимірювати тиск, температуру, вологість сипучість, напруженість магнітного поля, струм, напруженість і тому подібне. Так, наприклад, компанія Livelium робить спеціалізовані сенсори для наступних вимірів [4]: стан середовища, сільське господарство, контроль водних ресурсів, безпека

Базова станція виконує завдання отримання радіосигналу і передачу даних через мережеву інфраструктуру на мережевий сервер. Оскільки для IoT технології не має значення спосіб транспортування даних від датчика до сервера додатків, то до БС пред'являється вимога підтримувати той же тип передачі даних, що і передавач. БС відрізняються одна від одної радіусом покриття (от10 до 15 км) і обсягом інформації отримуваної від датчиків.

Мережевий сервер збирає сигнали від сенсорів, "витягає" корисні дані і передає їх на сервер додатків. Завдання мережевого сервера - отримати сигнал від БС, "витягнути" корисні дані і передати їх для подальшої обробки в спеціалізовані системи, а також здійснювати моніторинг і управління облаштуваннями IoT - мережі.

Сервер додатків це програмно-апаратний комплекс, що дозволяє інтерпретувати дані, отримані від датчиків, і представляти користувачеві в зручному для нього виді. Відмінність сервера додатків від мережевого сервера в тому, що сервер додатків нічого не знає про сенсори, оскільки оперує даними, отриманими з мережі, а мережевий сервер управляє пристроями і агрегує сигнали від мережі сенсорів в одній точці. Саме сервер додатків є аналітичним центром, що інтерпретує дані для кінцевого користувача. А оскільки кінцеві користувачі можуть отримувати показники, що цікавлять їх, від ПК, мобільних пристроїв або, використовуючи автоматизовані програмні засоби через API, то розгортання сервера додатків буде найбільш трудомістким процесом при впровадженні IoT - мережі. А основні трудовитрати будуть пов'язані з розробкою програмного забезпечення, API і логіки роботи сервера додатків.

На сьогодні вже існують хмарні сервіси, що надають функції сервера додатків [5]. Архітектура таких IoT- мереж досить проста: БС, отримавши сигнал від сенсора, відразу ж передає його на сервер в хмарі, рис. 1.3, де і відбувається подальша обробка і аналіз даних, надання їх в потрібному форматі. Хмарні сервіси для IoT надають вже більше десяти компаній: Simfony, Amazon web services, Sofia, Cumulocity, sensorup, Smart Plants, solver та ін. Так, наприклад, компанія Amazon

надає сервіс Amazon web services (AWS) IoT, що дозволяє підключати облаштування мережі до хмарного сервісу для подальшого аналізу і обробки даних

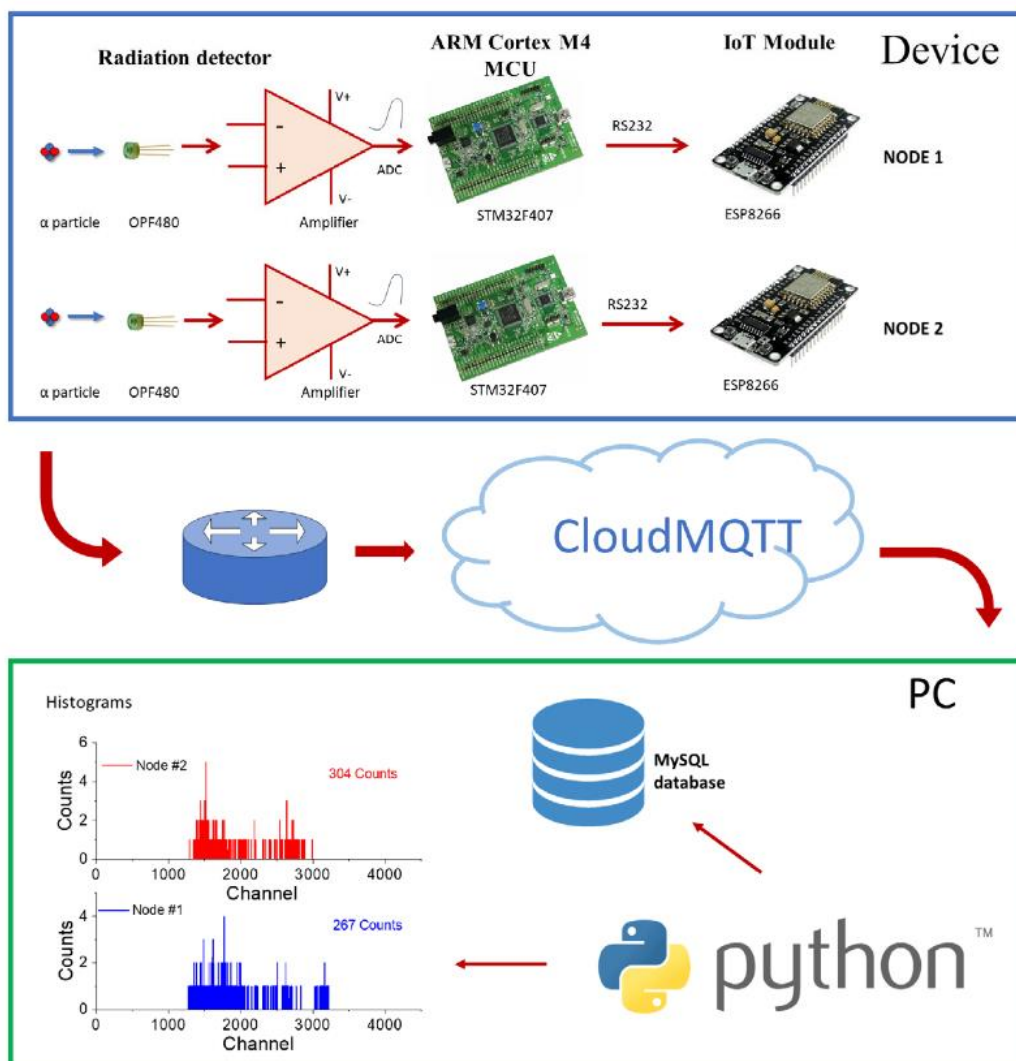


Рисунок 1.3 – Архітектура IoT мережі з підключенням до хмарного сервісу

. А хмарний сервіс Cumulocity надає функціонал управління пристроями, SDK для розробки плагінів і додатків, обстеження даних, безпеку, розмежування прав користувачів, інтеграцію з програмними продуктами третіх компаній-виробників (SAP, Astea, Zapier), аналіз даних, управління даними, аналітику і прогнозування, налаштування правил обробки цих та ін.

Нижче наведені приклади основних напрямків впровадження IoT технологій згідно з даними роботи [6].

Сільське господарство. Компанія Libelium реалізувала проект на підприємстві, що вирощує медичну марихуану в США. В своєму анонсі Libelium зазначила, що «Проект був розроблений в рамках реалізації програми «Розумне

сільське господарство» на плантаціях медичної марихуани для забезпечення максимального врожаю із забезпеченням галузі продуктом найвищої якості». Метою проекту була реалізація бездротової мережі сенсорів для безперервного моніторингу умов зовнішнього середовища в режимі реального часу з мінімальним впливом людського фактору для економії часу та ресурсів. Система сенсорів постійно відстежувала стан середи (температура, якість повітря, тощо), сільськогосподарські показники (грунт, показники роста культури, сонячне випромінювання, характеристики листя), якість води (кислотність, насиченість киснем, засоленість) та інше. Впровадження проекту призвело до економії ресурсів від 15% до 20% на протязі наступних п'яти років.

Транспорт. Аеропорти світового масштабу перетворились в цілі міста з власною транспортною інфраструктурою, готелями, ресторанами, магазинами, місцями для відпочинку та розваг. Мільйони людей проводять у стінах цих міст багато часів до та після польоту. Але, що дійсно робить перебування в аеропорту комфортним, то це зменшення часу очікування, покращення умов перебування та удосконалення процесів роботи терміналів. IoT-технологія дозволяє таким аеропортам, по принципу «розумних міст» або «розумних будинків», зробити перебування в них більш комфортним. При цьому покращення відбуваються по багатьом напрямкам: це контроль якості умов відвантаження багажу, моніторинг парковочних місць і трафіка, відслідковування пасажирських потоків та транспортування багажу, контроль зовнішньої середи і т. д. Міжнародний аеропорт Сантьяго (Чілі) розробив та впровадив проект «Розумний аеропорт». Керівник проекту Alfonso Sardon стверджує, що «ми, надаємо можливість керуючому персоналу отримувати дійсно цінну інформацію про інфраструктуру для гарантування комфортних умов, тим самим підвищуючи задоволеність пасажирів під час перебування в аеропорту». Крім пасажирів, на території аеропорту перебуває велика кількість організації-орендарів. Оскільки співпраця між аеропортом та орендарями на його території базується на принципах концесії, адміністрації аеропорту важливо контролювати якість виконання своїх зобов'язань приватними комерційними організаціями. І в цьому випадку IoT-технології дозволяють забезпечити надійний контроль виконання концесіонерами своїх зобов'язань перед аеропортом із узгодженим рівнем якості.

Муніципальні проекти. Багато міст світу потребують, а інколи навіть зобов'язані, контролювати якість повітря в місті або його окремих районах на відповідність екологічним стандартам. Встановлюються квоти на забруднення повітря, зменшуються викиди шкідливих речовин у повітря, відслідковуються

показники повітря у відповідності до вимог контролюючих організацій. В Глазго (Великобританія) реалізований проект «Sensing the City», метою якого був моніторинг ключових параметрів повітря в різних районах міста в динаміці. З цією метою була впроваджена мережа пересувних бездротових сенсорних станцій, встановлених на автомобілі, для пересування по місту. Це дозволяє в реальному часі відтворювати карту забрудненості повітря, контролювати підприємства, що викидають шкідливі речовини у повітря, приймати дії по усуненню джерел забруднення або їх мінімізації, прогнозувати пересування забруднених повітряних мас та інше.

Перспективи розвитку IoT-технологій в Україні. В першу чергу, ця технологія може бути цікавою для підприємств таких секторів реальної економіки як промисловість та сільське господарство [7]. Як було зазначено вище, для впровадження IoT-технології необхідно мати спеціалізовані датчики, IT-інфраструктуру, яка забезпечить передачу даних від датчиків до аналітичного центру та сам сервер додатків, який забезпечить аналітичну обробку даних. Оскільки в світі вже існує багато компанії-виробників спеціалізованих сенсорів для різного роду вимірювань, то придбати необхідне для своїх потреб не буде за складне. Як правило, ці ж компанії виробляють і сервери додатків.

Для організації «доставки» даних від датчиків до сервера додатків можливо використовувати інфраструктуру операторів зв'язку, БС яких на сьогодні забезпечують практично 100% GSM-покриття території країни. В цьому випадку оператори зв'язку забезпечують передачу даних від сенсорів до сервера додатків в штатному режимі, використовуючи традиційні GSM-мережі.

Компанія ж придбає сенсори, підключить їх до IoT-мережі і отримає можливість передачі та отримання даних, сплачуючи оператору за трафік. Сервер додатків може також бути придбаним компанією, або компанія має підключитись до хмарних серверів. Також можливий варіант використання сервера додатків оператора, якщо в нього такий є в наявності, або хмарних сервісів оператора.

Оператори зв'язку вже надають деякі послуги, що відносяться до функціоналу IoT-технології. Так, наприклад, Київстар пропонує [7]:

- охорону та безпеку: отримання даних від сигналізації та приладів особистої безпеки;
- автоматизовані системи обліку та управління: збір даних з лічильників, керування віддаленими об'єктами, в тому числі віддалене підключення терміналів продажу для безготівкового розрахунку банківською карткою та/або через додатки в смартфоні;

– автоматизовані точки продажу: контроль роботи автоматів продажу кави, чаю, банкоматів і таке інше.

Lifecell пропонує послуги:

- моніторинг рухомих об'єктів;
- мобільна телеметрія (M2M);
- мобільний GPS.

Водафон Україна також пропонує послуги на базі IoT-технологій [7]:

– Послуга Smart Metering – це комплексне рішення, яке дозволяє автоматизувати процес збору та обліку комерційних і технологічних даних про споживані ресурси. Датчики зчитують дані з лічильників і за заданими налаштуваннями передають їх в системи керуючої компанії для тарифікації та моніторингу використання ресурсів. У момент передачі даних пристрій «прокидається», відправляє показники лічильника ресурсів, і знову «засинає». Мережа NB-IoT дозволяє пристрою економно витратити заряд батареї, що гарантує його довгу роботу без необхідності міняти батарею. Послуга призначається для комунальних підприємств, операторів/постачальників ресурсів, обслуговуючих організацій.

– Інтелектуальна система паркування надає інформацію про наявність паркувального місця в режимі реального часу. Це дозволяє економити час, паливо і гроші. Як це працює? Паркомісця в місті обладнані спеціальними датчиками. Водій наближається до місця призначення і йому необхідно знайти парковку. Він орієнтується на інформацію в смартфоні про розташування вільних місць і швидко знаходить найближче. Далі оплачує паркування прямо з мобільного або через паркомат. Ця система підвищує безпеку дорожнього руху, а ще скорочує обсяг викиду вихлопних газів, тому що водії не роблять «холостих» поїздок в пошуках вільного паркувального місця.

– Smart Waste Система Smart Waste дозволяє містам, комунальним і приватним підприємствам економічно ефективно керувати процесом збору твердих побутових відходів, боротися з їх зростаючим обсягом, покращуючи навколишнє середовище і якість надаваних сервісів для населення. Збір даних відбувається за допомогою ультразвукових датчиків, встановлених всередині сміттєвих баків. Вони дозволяють збирати дані про рівень заповнення, температуру, вібрації і рівень заряду батареї в режимі реального часу прямо зі сміттєвого бака. Інформація з датчиків передається в систему, яка аналізує і пропонує найбільш ефективні маршрути для водіїв сервісу.

– Smart каса - Універсальний термінал нового покоління, що об'єднує в собі все необхідне для здійснення розрахункових операцій: касовий апарат, платіжний термінал, фіскалізатор. Пристрій має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс на основі ОС Android. Керування відбувається за допомогою сенсорного екрана. Компактні розміри, вбудований акумулятор та підтримка 3G/4G роблять це рішення незамінним для служб доставки та виїзної торгівлі. Термінал у поєднанні з онлайн-кабінетом дозволяє зручно керувати торговими точками, контролювати персонал, відслідковувати аналітику.

– Диспетчеризація транспорту. Комплексне інтелектуальне міське рішення, яке охоплює моніторинг пересування громадського та комунального транспорту, систему інформування в громадському транспорті та на зупинках, програмне рішення керування транспортними компаніями і диспетчеризацією транспорту.

– Система електронних smart-цінників (Electronic smart Labels) дозволяє суттєво спростити процес зміни ціни: замість паперових цінників використовуються цифрові цінники, об'єднані в мережу за допомогою бездротових технологій передачі даних. Така реалізація гарантує швидку заміну ціни та її відповідність даним у внутрішніх ERP системах. Для магазинів роздрібною торгівлі це можливість зменшити операційне навантаження при виконанні рутинних задач та покращити користувацький досвід покупців.

Охоронні компанії здійснюють контроль безпеки приміщень та моніторинг їх протипожежного стану, фактично використовуючи елементи IoT-технології та, частково, мережі операторів фіксованого зв'язку, таких як наприклад, Укртелеком.

Також з використанням мережевої інфраструктури оператора фіксованого зв'язку Датагруп у Гадяцькому районі на Полтавщині у 2017 році реалізований проект «безпечне місто» [7]. «Безпечне місто» – це єдиний інформаційний простір системи безпеки для українських громад, реалізований як комплекс інноваційних рішень, що забезпечує відеофіксацію транспортного і пішохідного трафіку та дозволяє здійснювати моніторинг і керування діяльністю комунальних служб, поліції та ДСНС у населеному пункті. Він включає у себе сукупність архітектурних рішень, апаратного комплексу, програмного забезпечення, каналів зв'язку, серверного обладнання та центру моніторингу.

У межах проекту «Безпечне місто» пропонується:

- комплексна система відеоспостереження;
- система фіксації порушень правил дорожнього руху;
- відеонагляд за транспортною інфраструктурою;
- інтерактивне освітлення перехресть та автошляхів;

- нагляд за острівцями безпеки на дорогах;
- контроль сучасних пішохідних переходів;
- єдина інформаційно-консультаційна служба міста;
- доступний інтернет у громадських місцях;
- інформаційні панелі для туристів.

Концептуальні засади роботи «Безпечного міста». Система відеоспостереження для відстеження ситуації на вулицях і автодорогах Полтави був реалізований в 2017 році на базі 46 камер встановлених у ключових точках транспортних напрямків Гадяцького району, інформація з яких передавалася на пульт центру оперативного реагування. В 2018 року в проект додали систему інтелектуальної обробки даних. Завдяки цьому було створено єдиний інформаційний комплекс, в якому реалізовано функції отримання, обробки і інтелектуального аналізу інформації на дорогах для оперативного реагування на правопорушення. Система автоматично архівує всі зібрані номери автомобілів, шукає об'єкти за розміром і кольором, а також розпізнає обличчя водіїв. Це дозволило значно зменшити кількість злочинів і правопорушень на автошляхах та збільшити кількість розкритих правопорушень у місті, що підтвердила міська влада. Система інтелектуального відеоспостереження стала одним з основних елементів оперативно-розшукових дій.

В Україні на жаль, вірогідність виділення коштів на розвиток проектів Інтернету речей з держбюджету вкрай низька і практично такий же стан справ з перспективами глобального використання IoT-технології на місцевому рівні окрім окремих прогресивних територіальних громад, які впроваджують локальні «острови» безпечних міст з використанням рішень на базі IoT.

Таким чином, IoT – це і технологія збору даних від множини сенсорів, обробка цих даних з подальшим аналізом і передачею кінцевому користувачу підсумкових результатів. Попри те, що ця технологія добре зарекомендувала себе в Китаї, США і розвинених європейських країнах.

В Україні механізми економічної аргументації для її широкого впровадження ще не відпрацьовані, а обсяг коштів, що виділяються, на моніторинг екологічного стану на державному і муніципальному рівні недостатній. Тому розробка нових низьковитратних IoT технологій в Україні на сьогодні є досить перспективною.

Висновки:

Датчики є основою мереж IoT, тому що саме вони наповнюють мережі цифровими даними.

Саме низьке енергоспоживання датчиків зробило можливим впровадженням технології IoT.

IoT технології впроваджуються в усі сфери життя і промисловості в світі і в Україні.

Розробка нових низьковитратних IoT технологій в Україні на сьогодні є досить перспективною.

1.2 Цифрові мережи в зонах підвищеного радіаційного фону

Значна частина кризових ситуацій пов'язана з діяльністю об'єктів підвищеної небезпеки, схильних до як природних (стихійні лиха), так і антропогенних загроз (диверсії, терористичні акти, помилкові дії персоналу та ін.). Об'єктами підвищеної небезпеки можуть бути трубопроводи, мости, портові споруди, сховища запасів палива і хімічних речовин, висотні будівлі, підземні споруди і ін. Виникнення кризових ситуацій здатне призводити до людських жертв і супроводжуватися величезними фінансовими втратами.

Оперативне спостереження за об'єктами підвищеної небезпеки виконують інтелектуальні системи моніторингу стану фізичних параметрів [8]. Завдання таких систем – своєчасне інформування про деформації, зрушення, вібрації контрольованих елементів, зміну параметрів магнітного поля, акустичних коливань, підвищення радіаційного фону в контрольованій зоні.

Кінцевими пристроями систем моніторингу є датчики фізичних величин, чия різноманітність дозволяє створювати системи для контролю різних фізичних параметрів різних об'єктів. Система автоматично фіксує відхилення фізичних параметрів контрольованого об'єкта і, в залежності від ступеня цього відхилення, приймає відповідне рішення.

Найпоширенішою "Розумної системою" є система пожежогасіння, яка існує вже десятки років. Згідно ДБН В.2.5-56:2014 Системи протипожежного захисту [9] в будь-якій системі пожежогасіння мають бути присутні принаймні два типи датчиків: теплової, який реагує на перевищення температури заданого порогового значення, і димовий, який реагує на перевищення концентрації диму. Так само в якості датчиків використовуються ручні сигнальні кнопки і можуть застосовуватися і інші датчики, наприклад, фотодетектори, які спрацьовують від світлового випромінювання від відкритого вогню. При спрацьовуванні будь-якого з датчиків система передає один сигнал тривоги в диспетчерську службу пожежогасіння та іншої сигнал на виконавчий пристрій пожежогасіння, яке

включає дощувальну систему гасіння саме на тій ділянці, на якому відбулося спрацювання датчика, а також третій сигнал на систему звукового і світлового оповіщення на всіх об'єкті.

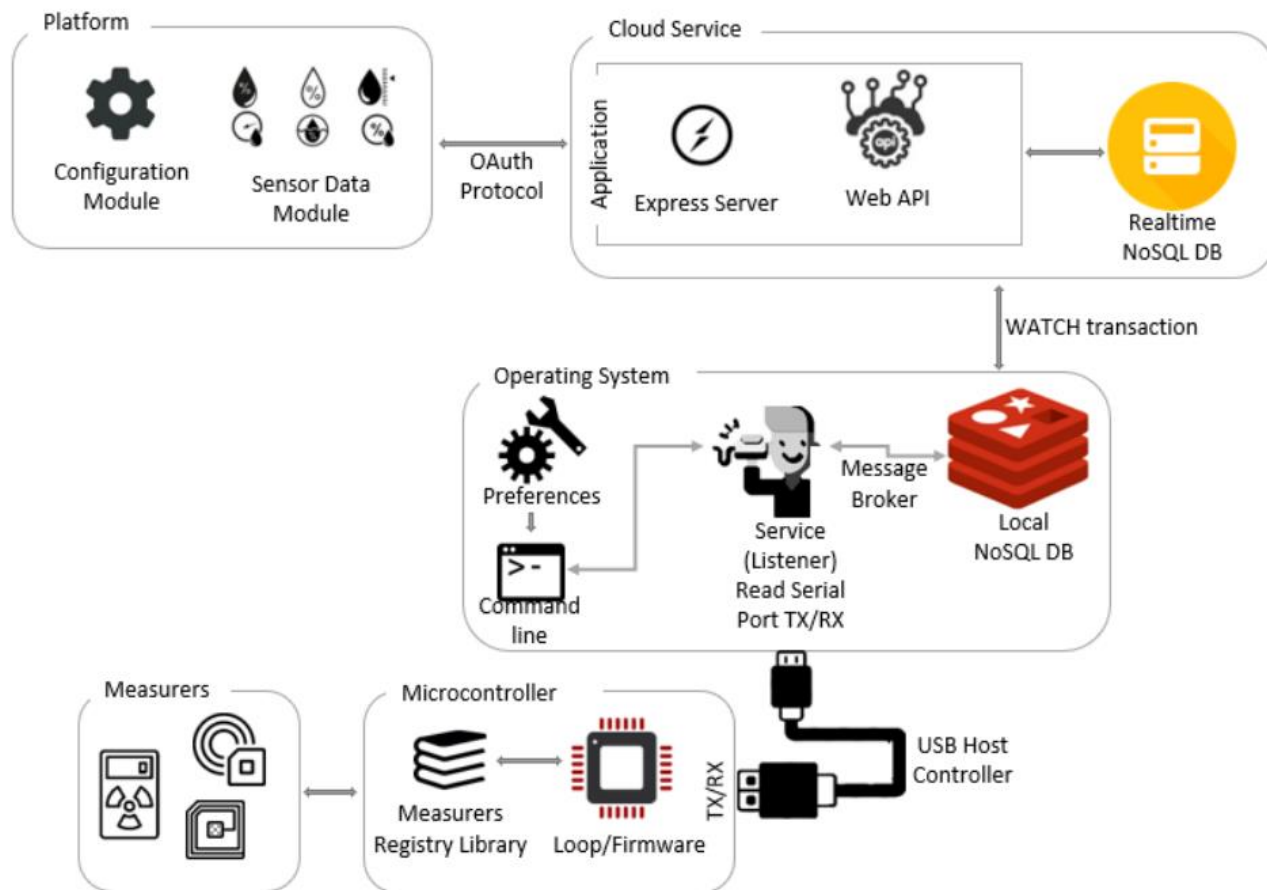


Рисунок 1.4 – Об'єкти, на яких радіація діє на напівпровідникові компоненти цифрових мереж

Оскільки інтелектуальні системи моніторингу коштують недешево, то ними намагаються оснастити ті об'єкти, де присутність людини пов'язана з небезпекою для його здоров'я (рис. 1.4): реактори атомних станцій, прискорювачі елементарних частинок, космічні станції та інші об'єкти з підвищеним фоном іонізуючого випромінювання.

Більш того, радіація діє не тільки на живі клітини організму, але і на напівпровідникові прилади датчиків, підсилювачів, передавачів і виконавчих пристроїв мережі «Інтернету речей» (рис. 1.4). Датчики «Розумного об'єкта» отримуватимуть спотворену інформацію і робота всієї мережі втрачає сенс. Також дія іонізуючого випромінювання призводить до деградації будь-яких напівпровідникових компонентів електронного устаткування контрольованих

об'єктів і опроміненню персоналу.

Для кількісного опису іонізуючого випромінювання застосовують величину, яка характеризує саме випромінювання – це Інтегральний потік випромінювання (флюенс):

$$\Phi = \frac{N}{S \cdot t}, \left[\frac{1}{\text{с} \cdot \text{м}^2} \right].$$

Це число частинок N , яке проникає в обсяг сфери з площею поперечного перерізу $S = 1 \text{ м}^2$ за одиницю часу, вимірюється в $\text{с}^{-1}\text{м}^{-2}$.

Щоб уникнути цього необхідно вносити корективи в покази датчиків в залежності від дози іонізуючого випромінювання, яку отримав об'єкт. Тому системи, які працюють в умовах підвищеного радіаційного фону, завжди оснащуються датчиками іонізуючого випромінювання, а їх вдосконалення є актуальною проблемою на сьогоднішній день.

Висновки:

В першу чергу інтелектуальними системами моніторингу оснащуються об'єкти, де присутність людини пов'язана з небезпекою для його здоров'я.

Всі електронні пристрої, які працюють в умовах підвищеного фону іонізуючого випромінювання повинні оснащуватися датчиками радіації для своєчасного внесення коректив в їх роботу.

1.3 Вимоги до датчиків цифрових мереж

Сучасні технології з використанням новітніх матеріалів і конструкцій дозволяють створювати датчики з як завгодно високою чутливістю. Однак, для роботи в цифрових мережах Інтернету речей датчики повинні задовольняти особливим вимогам. Зазвичай датчик складається з декількох елементів, основним з яких є чутливий елемент.

Сенсорний елемент, або просто сенсор (sensor) – це робоче тіло, яке змінює свої властивості (зазвичай електричні або геометричні) в залежності від ступеня зміни зовнішнього фізичного впливу, яку потрібно виміряти (рис. 1.5).

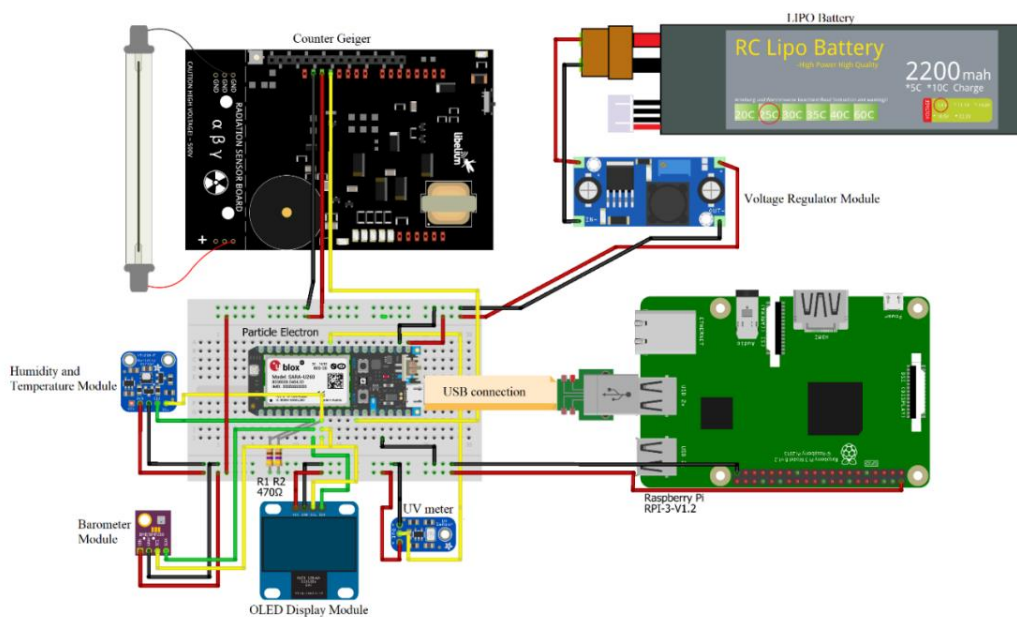


Рисунок 1.5 – Складові частини цифрового датчика

В якості сенсора для вимірювання, наприклад, температури може використовуватися підфарбований спирт в кімнатному термометрі, відрізок мідної або платиного дроту в промислових терморезисторах для теплових лічильників, різні напівпровідникові пристрої (діоди, транзистори) в електроніці.

Сенсор може мати малу чутливість, нелінійну вихідну характеристику (різну залежність вихідного параметра від ступеня зовнішнього впливу в різних діапазонах вимірювання), тому частіше за все, для того, щоб можна було отримувати дані (або показання) необхідно використовувати додаткові пристрої або пристосування.

Датчик (detector) – це готовий пристрій, який перетворює зовнішній фізичний вплив в конкретну фізичну величину, яку можна виміряти і отримати чисельне значення. Наприклад, по кімнатному термометру можна отримувати чисельні значення температури, якщо скляна трубка з підфарбованим спиртом має відповідну довжину і цифрову шкалу. Для промислового термоопору необхідне джерело струму та прилад для вимірювання сили струму.

Якщо вихідним параметром датчика, який змінюється в залежності від зовнішнього впливу є струм або напруга, то такий датчик вважається аналоговим. При роботі таких датчиків в цифрових мережах аналоговий сигнал треба спочатку посилити, потім перетворити в частоту за допомогою аналогово-частотного перетворювача (АЧП). Потім, частотний сигнал необхідно перетворити в машинний цифровий код за допомогою частотно-цифрового перетворювача, і тільки тоді сигнал готовий до процесорної обробки, або просто для індикації за

допомогою цифрового індикатора. Якщо вихідним параметром датчика є частота, то такий датчик вважається частотним. Такий датчик не потребує підсилювачів і аналогово-частотних перетворювачів.

Прості датчики містять один сенсор. Однак останнім часом для поліпшення характеристик датчиків все частіше використовуються складові датчики, які використовують відразу декілька сенсорів.

Для датчиків вже висувуються наступні вимоги, які ми повинні виконати в своєму проекті.

Датчик повинен мати чутливість, яка достатня для отримання сигналу такого рівня, який в подальшому може бути оброблений, виміряний або перетворений. Тому в датчиках часто використовуються різні концентратори фізичних полів або впливів, а також підсилювачі отриманого корисного сигналу.

Також датчик повинен мати лінійну вихідну характеристику, тобто повинен мати однаковий відгук вихідний фізичної величини на однакові зміни зовнішнього впливу у всьому діапазоні вимірювань. Тому в датчиках часто використовуються різні системи корекції лінійності вихідної характеристики.

Крім того, показники датчика конкретного фізичного впливу не повинні залежати від різних інших зовнішніх факторів. Наприклад, показники вуличного термометра не повинні залежати від ступеня його освітленості сонячним світлом, тому його розташовують в тіні. Для стабілізації показань при зміні сторонніх зовнішніх впливів в датчиках використовуються спеціальні стабілізатори вихідного корисного сигналу.

Обчислювачі або лічильники вже містять пристрої первинної обробки сигналу, отриманого від датчика. Найпростіші побутові лічильники спожитої електроенергії або спожитої води фіксують дані від датчика і зберігають їх у вигляді показань на механічній або цифровій шкалі.

"Розумним" може вважатися лічильник, у якого процесор залежно від заданих раніше параметрів при певних показаннях датчика подає сигнал на виконавчий пристрій, а то, в свою чергу, виконує будь-яку дію. Це, наприклад, лічильники спожитої води, які встановила фірма Хуавей на підземному міському водопроводі міста Шеньжень. При відхиленні показань датчика від норми вони автоматично подають сигнал в диспетчерську службу, тим самим запобігаючи підземним витокам води, які непоміченим можуть тривати роками, поки не прорвуться фонтанами назовні. В Україні вже використовуються двотарифні електролічильники, які автоматично перемикають діапазон тарифу в залежності від часу доби, і автоматично передають покази в диспетчерську службу.

В цифрових мережах «Інтернету речей» функції обчислювачів виконують вузлові точки сенсорних мереж, які обробляють інформацію отриману від багатьох датчиків [10], тому в даній роботі ми не розглядаємо елементи первинної обробки сигналів, а обмежимося дослідженням конструкції безпосередньо датчиків.

Можливість сучасних процесорів обробляти дані від сотень і навіть тисяч датчиків накладає додатково ще три умови для використання датчиків в мережах "Інтернету речей". Датчик повинен бути дуже недорогим і складатися з мінімальної кількості елементів, оскільки навіть помірна ціна при складній конструкції окремого датчика може сильно збільшити вартість проекту, де на один процесор доводиться тисяча датчиків. Датчик повинен споживати дуже мало енергії, оскільки навіть помірне енергоспоживання окремого датчика може сильно збільшити енергоспоживання проекту в цілому, де на один процесор доводиться тисяча датчиків. Датчик повинен бути мініатюрним, оскільки цифрові сенсорні мережі найчастіше використовуються в високотехнологічних об'єктах, де завжди обмежено простір і вантажопідйомність.

Висновки: При використанні в мережі «Інтернету речей» датчик повинен мати достатню чутливість, мати лінійну вихідну характеристику, бути стабільним до дії зовнішніх сторонніх впливів, бути мініатюрним, складатися з мінімальної кількості елементів і споживати мало енергії.

Використання в цифрових мережах набагато вигідніше використовувати датчики з частотним виходом, що дозволяє обійтися без підсилювачів і аналогово-частотних перетворювачів. Це економить матеріальні ресурси і споживану енергію.

1.4 Існуючі конструкції дозиметрів

Датчики іонізуючих випромінювань (radiation detectors) відносяться до електронних пристроїв, основне призначення яких полягає в забезпеченні процесу взаємодії потоку іонізуючого випромінювання з фізичним середовищем сенсора випромінювання, і в перетворенні актів взаємодії в електричні сигнали, які можуть бути зареєстровані відповідною вимірювальною апаратурою. У комплекті з вимірювальними блоками сенсори утворюють датчики для виміру іонізуючих випромінювань (спектрометри, радіометри, дозиметри і ін.).

Для виміру радіоактивного випромінювання використовуються декілька типів датчиків.

Сцинтиляційні детектори, принцип дії яких заснований на властивості деяких матеріалів перетворювати іонізуюче випромінювання в світло, інтенсивність якого потім вимірюється за допомогою оптичного детектора або спостерігається людським оком.



Рисунок 1.6 – Лічильник Гейгера

Іонізаційні детектори, в яких під дією іонізуючого випромінювання виникають пари іонів, концентрація яких потім вимірюється тим або іншим способом. За цим принципом, зокрема, працюють камери Вільсона, а також найпростіші і найбільш поширені датчики радіоактивного випромінювання -- лічильники Гейгера, в яких під дією зовнішнього електричного поля виниклі іони прискорюються і іонізують інші молекули газу, що приводить до лавиноподібного наростання числа іонів. Через це датчики Гейгера мають непогану чутливість, але для того потребують високу робочу напругу.

Напівпровідникові детектори, які мають найкращу роздільну здатність серед сучасних датчиків радіоактивного випромінювання, один з принципів дії яких аналогічний принципу дії іонізаційних детекторів. Уздовж траєкторії іонізуючого фотону, усередині напівпровідникового матеріалу утворюються пари електрон-дірка, поява яких фіксується у вигляді імпульсів струму на р-n-переході. Але більш чутливі напівпровідникові детектори працюють на більш тонких ефектах, таких виникнення дефектів кристалічної структури напівпровідника під дією іонізуючого випромінювання. Ці радіаційні дефекти утворюють центри рекомбінації носіїв заряду (пастки), іонізаційні центри або центри люмінесценції.

Детектор іонізуючого випромінювання (radiation detector) - чутливий елемент засобу вимірів, призначений для реєстрації іонізуючого випромінювання. Дія детектора заснована на явищах, що виникають при проходженні іонізуючого випромінювання через речовину (робоче середовище детектора).

По фізичній суті взаємодії іонізуючих випромінювань з речовиною виділяють наступні типи детекторів:

- іонізаційний, заснований на здатності випромінювань іонізувати середовище, через яке вони проходять;
- сцинтиляційний, реєструючий фотони світла, що виникають в сцинтиляторі під дією іонізуючих випромінювань;
- люмінесцентний, такий, що базується на ефектах радіофотолюмінесценції (ФЛД) і радіотермолюмінесценції (ТЛД). Детектори поглинають і нагромаджують енергію випромінювання в молекулярних центрах фотолюмінесценції, і здатні висвічувати накопичену енергію при освітленні ультрафіолетовим світлом (ФЛД) або при нагріванні (ТЛД);
- хімічний, заснований на вимірі виходу радіаційно-хімічних реакцій (зміна міри забарвлення або кольору), що протікають під дією іонізуючих випромінювань. Метод використовують при реєстрації значних рівнів радіації;
- калориметричний, такий, що базується на вимірі кількості теплоти, що виділяється в детекторі при поглинанні енергії іонізуючих випромінювань;

Як правило, блоки детектування класифікуються по виду реєстрованого випромінювання на датчики заряджених часток, нейтронів і електромагнітного випромінювання (рентгенівських і гамма-квантів). Відповідна спеціалізація досягається використанням детектора такого типу і конструкції, що забезпечують максимальну ефективність реєстрації даного виду випромінювання при мінімальній ефективності реєстрації всіх інших видів випромінювання. Спеціалізація може бути посилена конструкцією датчика, що забезпечує пропускання на детектор певного виду випромінювання при максимальному придушенні супутніх видів, і селекцією сигналів в блоці їх формування або у вимірювальній пристрої. Проте спеціалізація зазвичай не є абсолютною, оскільки робоче середовище детекторів має певну вірогідність взаємодії зі всіма видами випромінювання, так само як і конструкційні матеріали датчика при взаємодії з супутніми видами випромінювання.

По характеру перетворення енергії іонізуючого випромінювання в енергію вихідних сигналів датчики розділяються на три типи: спектрометричні, рахункові і дозові.

Спектрометричні датчики дозволяють реєструвати енергетичний спектр випромінювання. У спектрометричних датчиках амплітудне значення або повний електричний заряд вихідного сигналу пропорційні поглиненої в детекторі енергії частки, що відповідає певному діапазону значень енергії, а значить, певної ділянки спектра іонізуючого випромінювання. Такі датчики дозволяють реалізувати багато чисельні методи ядерно-фізичного аналізу речового складу середовищ, що вивчаються. Спектрометричні датчики використовуються у складі спектрометрів.

Датчики рахункового типа призначені для виміру щільності потоку випромінювання і активності джерел випромінювання (кількості розпадів в одиницю часу в зразку, що вивчається). Фізичною величиною, що реєструється від датчиків рахункового типа, є частота актів взаємодії часток іонізуючого випромінювання з детектором випромінювання, яка пропорційна щільності потоку випромінювання. Зв'язок швидкості реєстрації часток з активністю джерела випромінювання задається умовами і методикою вимірювання. Датчики рахункового типа використовуються у складі радіометрів.

Дозові датчики використовуються у складі дозиметрів і призначені для виміру дози і потужності дози іонізуючого випромінювання, тобто кількості енергії іонізуючого випромінювання, яке сприймається середовищем за певний проміжок часу.

Вимір іонізуючого випромінювання є реєстрацією актів взаємодії випромінювання з детектором (у радіометрах) і кількісною енергетичною оцінкою даної взаємодії (у спектрометрах і дозиметрах). Процес виміру реалізується лише в тому випадку, якщо взаємодія випромінювання з речовиною (робочим середовищем) детектора супроводжується процесом перетворення енергії випромінювання в інший вигляд енергії, зручний для реєстрації.

У промислових датчиках використовуються, в основному, два типи детекторів:

– Іонізаційні детектори з прямим перетворенням енергії часток в електричний заряд. До них відносяться газонаповнені детектори - іонізаційні камери, газорозрядні і пропорційні лічильники, і напівпровідникові детектори (ППД).

– Сцинтиляційні детектори, в яких використовується люмінесценція речовини детектора при поглинанні випромінювання з подальшим перетворенням енергії світлових фотонів в електричний сигнал (за допомогою фотоелектронного помножувача).

По лінійності перетворення енергії випромінювання в енергію вихідного сигналу розрізняють пропорційні і непропорційні детектори. По агрегатному стану робочого середовища детектори підрозділяються на газові, рідинні і твердотільні.

Принцип дії детекторів заснований на виявленні ефекту іонізації або збудження атомів робочого середовища детектора при взаємодії з випромінюванням. Заряджені частки взаємодіють безпосередньо з електричним полем атомів робочого середовища детектора з передачею ним своєї кінетичної енергії.

Гамма кванти і нейтральні частки взаємодіють з детектором через процеси поглинання фотонів, комптонівського розсіяння, утворення електронно-позитронних пар і ядерні реакції в робочому середовищі детекторів і в спеціальних конструкційних матеріалах, які може мати детектор для підвищення вірогідності цих процесів. В результаті цієї взаємодії виникає вторинне випромінювання, що складається із заряджених часток, яке і реєструється в робочому середовищі детектора.

За результатами дослідження поведінки різних матеріалів, які використовуються в якості детекторів випромінювання, було визнано що напівпровідникові пристрої мають величезні переваги при конструюванні датчиків з малим енергоспоживанням, невеликими габаритами і достатньо привабливими характеристиками в оцінці іонізуючого випромінювання. Напівпровідникові структури істотно змінюють свої електричні властивості по дією іонізуючого випромінювання за рахунок декількох механізмів. При безпосередніх впливах малими дозами опромінення провідність напівпровідника зростає за рахунок іонізації атомів. При цьому за рахунок використання гетеро структур (напівпровідників з різною шириною забороненої зони) отримують спектрометричні датчики. При використанні *p-i-n*-діода (*p-n*-переходу з шаром ізолятора) отримують датчики рахункового типу. Для отримання дозових датчиків вже використовується ефект створення радіаційних дефектів структури матеріалу напівпровідника. Такі датчики найбільш цікаві з точки зору корекції працездатності всієї електронної апаратури об'єкта, оскільки в її компонентах виникають аналогічні радіаційні дефекти.

Подальший крок у розвитку напівпровідникового детектора був зроблений поверненням до Ge, що має великий порядковим номером = 32 і тому більшу ефективність для реєстрації гамма-випромінювання. Дрейфові германій-літієві плоскі (планарні) напівпровідникові детектори застосовуються для реєстрації γ -квантів з енергією в декілька сотень кеВ. Для реєстрації γ -квантів з енергією до 10

MeV використовуються коаксіальні германій-літієві детектори (рис. 1.8, в) з чутливим об'ємом що досягає 100 см^3 . Енергетичний розділ германієвих детекторів при реєстрації γ -квантів досягає 0.1%, що в десятки разів вище, ніж у сцинтиляційних детекторів.

Подальший розвиток напівпровідникового детектора пов'язано з отриманням «надчистих» напівпровідникових монокристалів великих розмірів і з можливістю використання GaAs, SiC, CdTe. Напівпровідникові детектори широко застосовуються в ядерній фізиці, фізиці елементарних частинок, а також в хімії, геології, медицині і в промисловості. Напівпровідникові сполуки A_2B_6 є найбільш перспективними для виготовлення охолоджуваних напівпровідникових детекторів X-, γ - та інших видів ядерних випромінювань. Монокристалічні CdTe-детектори довели свої переваги перед Si- і GaAs- детекторами і можуть з успіхом використовуватися для спектрометрії X- і γ -випромінювання в широкому інтервалі енергій іонізуючого випромінювання. Основний недолік детекторних монокристалів на основі A_2B_6 , одержуваних різними способами, це наявність в них значної кількості дефектів різної природи, які погіршують характеристики детекторів. Плівкові детектори вільні від цього недоліку.

В сучасних передових розробках різні напівпровідникові системи широко використовуються в якості датчиків випромінювання і мають різні застосування, наприклад, діоди з *i*-шаром ізолятора між *p*-областю і *n*-областю *p-i-n*-діоди [11], світлочутливі резистори [12], польові транзистори з *p-n*-переходом в якості затвора [13] і польові транзистори із структурою метал-оксид-напівпровідник [14]. Останнім часом все частіше стали використовуватися в якості датчиків радіації польові транзистори з плаваючим затвором типу Floating Gate [15]. Однак для виготовлення таких транзисторів потрібні особливі передові технології, а вони недешево коштують. Крім того всі ці детектори мають аналоговий вихід, тобто інформаційним вихідним параметром є струм або напруга (рис. 1.6). При роботі таких датчиків в цифрових мережах аналоговий сигнал треба спочатку посилити, потім перетворити в частоту за допомогою аналогово-частотного перетворювача, як це робиться в конструкції датчика з роботи [16]. Потім, частотний сигнал необхідно перетворити в машинний цифровий код за допомогою частотно-цифрового перетворювача, і тільки тоді сигнал готовий до машинної обробці.

Тому, в цифрових мережах набагато вигідніше використовувати датчики з частотним виходом (перетворювачів), що дозволяє обійтися без підсилювачів і аналогово-частотних перетворювачів (рис. 1.6). Це економить матеріальні ресурси

і споживання енергії. Тому, дослідження конструкцій датчиків радіації з частотним виходом є актуальним завданням.

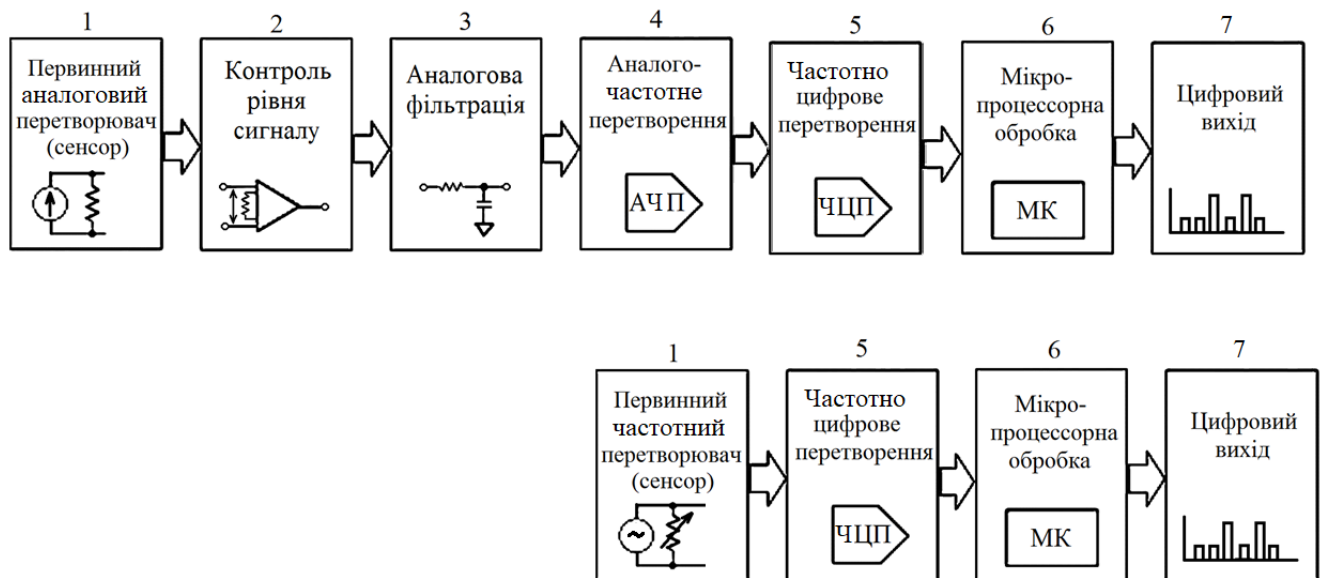


Рисунок 1.6 – Порівняння компонентів датчиків для цифрових мереж на базі аналогового сенсора та на базі перетворювача з частотним виходом

Вже відомі деякі конструкції перетворювачів радіації, в яких іонізуюче випромінювання впливає безпосередньо на вихідну частоту, наприклад з роботи [17], де використовується двовимірний масив сегнетоелектричних резонансних контурів, частота коливань яких чутлива до дії радіації. Однак такий датчик не підходить для роботи в цифрових мережах через його істотні розміри і значну споживану енергію.

Метою цієї роботи є дослідження можливості використання частотного сенсора-перетворювача радіації, зібраного на одноперехідному транзисторі за схемою генератора релаксаційних коливань в якості датчика іонізуючого випромінювання для цифрових мереж.

Висновки: Напівпровідникові пристрої мають величезні переваги при конструюванні датчиків з малим енергоспоживанням, невеликими габаритами і достатньо привабливими характеристиками в оцінці іонізуючого випромінювання.

Дозові датчики найбільш цікаві з точки зору корекції працездатності всієї електронної апаратури об'єкта.

Для виготовлення сучасних напівпровідникових датчиків радіації потрібні особливі передові технології, а вони недешево коштують. Крім того більшість

сучасних детекторів мають аналоговий вихід, а відомі конструкції детекторів радіації з частотним виходом мають істотні розміри і значну споживану енергію.

1.5 Висновки

Всі електронні пристрої, які працюють в умовах підвищеного фону іонізуючого випромінювання повинні оснащуватися датчиками радіації для своєчасного внесення коректив в їх роботу.

В першу чергу інтелектуальними системами моніторингу оснащуються об'єкти, де присутність людини пов'язана з небезпекою для його здоров'я.

При використанні в мережі «Інтернету речей» датчик повинен мати достатню чутливість, мати лінійну вихідну характеристику, и бути стабільним до дії зовнішніх сторонніх впливів. Датчик повинен бути мініатюрним, складатися з мінімальної кількості елементів і споживати мало енергії.

Використання в цифрових мережах набагато вигідніше використовувати датчики з частотним виходом, що дозволяє обійтися без підсилювачів і аналогово-частотних перетворювачів. Це економить матеріальні ресурси і споживану енергію.

Напівпровідникові пристрої мають величезні переваги при конструюванні датчиків з малим енергоспоживанням, невеликими габаритами і достатньо привабливими характеристиками в оцінці іонізуючого випромінювання.

Для виготовлення сучасних напівпровідникових датчиків радіації потрібні особливі передові технології, а вони недешево коштують. Крім того більшість сучасних детекторів мають аналоговий вихід, а відомі конструкції детекторів радіації з частотним виходом мають істотні розміри і значну споживану енергію.

Таким чином, можна зробити загальний висновок, що конструкція напівпровідникового дозового датчика з частотним виходом і мінімальною кількістю елементів є найбільш перспективною для використання в цифрових мережах «Інтернету речей».

2. МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДОЗИМЕТРА

Для того щоб отримати датчик з частотним виходом найбільш простим конструктивним рішенням є генератор, частота якого залежить від дози поглиненого іонізуючого випромінювання.

В електроніці існує можливість зібрати генератор з мінімальним числом елементів. Це генератор релаксаційних коливань всього на одному одноперехідному транзисторі. Це стало можливим завдяки унікальним властивостям одноперехідного транзистора. На його вольт-амперної характеристики є ділянка з негативним диференціальним опором, на якій зі зростанням струму відбувається зменшення падіння напруги.

Метою цієї роботи є дослідження можливості використання частотного сенсора-перетворювача радіації, зібраного на одноперехідному транзисторі за схемою генератора релаксаційних коливань в якості датчика іонізуючого випромінювання для цифрових мереж.

2.1 Вибір сенсорного елемента

У нашій роботі ми досліджували два типи чутливих до дії радіації напівпровідникових елемента: метал-оксид-напівпровідниковий польовий транзистор (МОН ПТ) і одно перехідний (ОП) транзистор.

2.1.1 Теоретичні дослідження дозиметра на МОН ПТ

Найбільш чутливими напівпровідниковими елементами є польові транзистори ПТ з метал-оксид-напівпровідникової (МОН) шаруватою структурою в якості затвора МОН ПТ [14]. Структура МОН ПТ показана на рис. 2.1.

У таких ПТ при опроміненні струм через нього може збільшуватися [18]. Річ у тому, що зміна характеристик таких МОН-транзисторів під дією опромінення обумовлена в основному радіаційними ефектами в оксиді і на межі розділу оксид-напівпровідник [18]. В процесі опромінення в шарі оксиду МОН-транзистора генеруються електронно-діркові пари. Швидші електрони йдуть в метал затвора, а дірки частково захоплюються пастками в оксиді. При позитивному потенціалі на затворі дірки накопичуються біля межі розділу оксид-напівпровідник. Цей позитивний заряд збільшує концентрацію електронів в *n*-каналі, що є основним радіаційним ефектом. Дія радіації безпосередньо на сам канал МОН-транзистора

призводить до протилежного ефекту – зменшення концентрації електронів в ньому. Коли концентрація електронів в каналі і струм насичення до опромінення невеликі, то переважає перший ефект, і струм через транзистор при радіаційній дії збільшуватиметься.

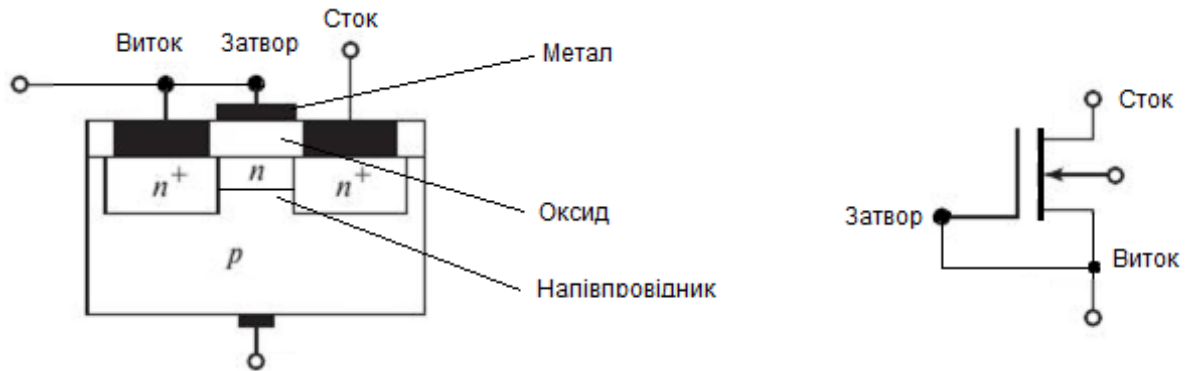


Рисунок 2.1 – Структура і позначення МОН ПТ зі вбудованим каналом

Якщо використовувати двополюсну схему включення транзистора (рис. 2.1), коли виток замкнутий з затвором, то теоретична модель вольт-амперної характеристики транзистора значно спрощується [19]:

$$I_c = \frac{\mu C U_3^2}{2l^2}, \quad (2.1)$$

де I_c – струм стоку, А;

U_3 – напруга на затворі, В;

μ – рухливість електронів в n -каналі, $\text{м}^2 / \text{В} / \text{с}$;

C – електроємність затвору, Ф;

l – довжина каналу, м.

Щоб зменшити вплив напруги живлення на показання сенсора зручно досліджувати залежність струму стоку в режимі насичення, коли він не залежить від напруги:

$$I_n = Bn^2\mu, \quad (2.2)$$

де I_n – струм насичення стоку, А;

n – концентрація електронів в n -каналі, $1 / \text{м}^2$;

B – постійна, Дж·м⁴.

Опромінення створює в шарі оксиду МОН-структури радіаційні дефекти, які генерують електронно-діркові пари. Більш швидкі електрони йдуть в метал затвору, а дірки здебільшого захоплюються пастками в шарі оксиду і накопичуються біля межі розділу оксид-напівпровідник. Цей позитивний заряд збільшує концентрацію електронів в n -каналі, а згідно (2.2) і струм насичення. Це основний радіаційний ефект в МОН ПТ. Однак цей ефект переважає в транзисторах котрі мають невелику концентрацію електронів n в каналі до опромінення, а оскільки $I_n \sim n^2$, то й невелике значення струму насичення до опромінення.

Висновок: Теоретично передбачається, якщо струм насичення МОН ПТ до опромінення невеликий, то при опроміненні його струм насичення буде зростати.

2.1.2 Експериментальні дослідження дозиметра на МОН ПТ

Для перевірки теоретичних припущень ми експериментально виміряли струми насичення зразків стандартних промислових МОН ПТ типу КП305 з вбудованим затвором, які зазнали радіаційного опромінення різними дозами.

Досліджувалися 30 зразків транзисторів які були відібрані заздалегідь по малому значенню струму насичення стоку $I_{н0} < 1\text{mA}$ до опромінення. Ці 30 зразків транзисторів були поділені на 6 груп: в першій групі знаходилися зразки що не піддавалися опроміненню, а в інших п'яти групах зразки вже були піддані опроміненню потоком електронів Φ_e величиною 10^{12} , 10^{13} , 10^{14} , 10^{15} и 10^{16} cm^{-2} відповідно в кожній групі. Зразки кожної групи були піддані опроміненню тільки однієї величини потоку електронів Φ_e з енергією 5 Мев на лінійному прискорювачі "Електроніка".

Роботи по опроміненню проводилися в Інституті ядерних досліджень НАН України в рамках НДР, яка виконувалась в ОНАЗ ім. О.С. Попова за замовленням МОН України № держреєстрації 0115U000855.

Для вимірювання струму насичення МОН ПТ використовувався джерело постійного струму, магазин опорів і два комбінованих цифрових прилади лабораторної установки, показаної на рис. 2.2. Характеристики приладів, які використовувалися для вимірювання характеристик транзисторів представлені в Таблиці 2.1.

Поступово збільшуючи напругу живлення ми знаходили область насичення струму стоку, коли він не залежав від прикладеної напруги, і фіксували значення струму насичення стоку. Потім ми знаходили середнє значення величини струму насичення стоку для зразків, які отримали одне значення дози опромінення.

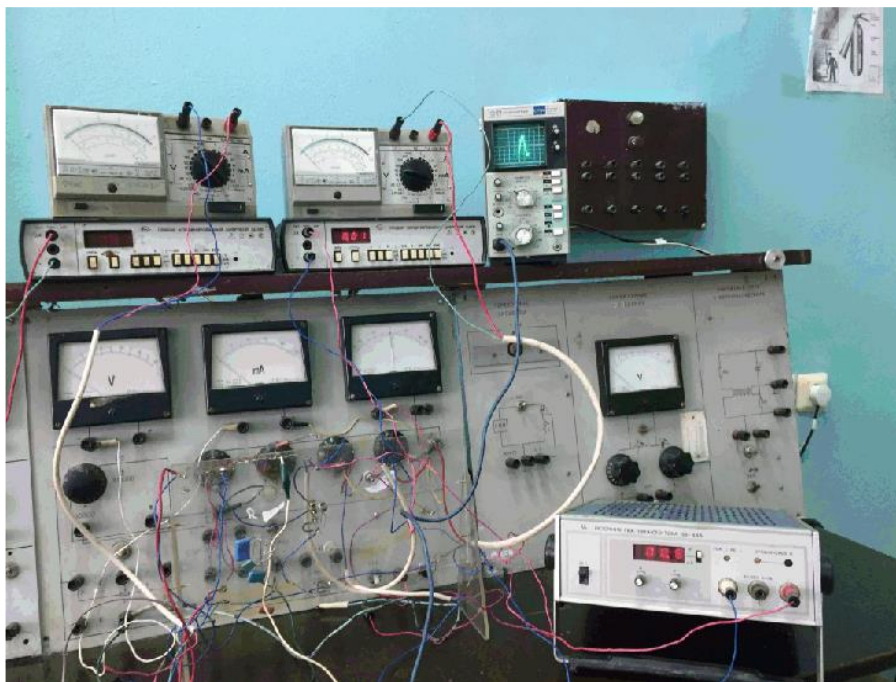


Рисунок 2.2 – Лабораторна установка для вимірювання характеристик транзисторів

Характеристики приладів, які використовувалися для вимірювання характеристик транзисторів представлені в Таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Характеристики приладів лабораторної установки

№	Найменування	Тип	Межа шкали	Ціна поділки	Абсолютна похибка
1	Комбінований цифровий прилад	Щ4300	2000 В	0,1 мВ	0,1 мВ
2	Комбінований цифровий прилад	Щ4300	20 А	0,1 мкА	0,1 мкА
3	Джерело постійного струму	Б5-44А	30 В	0,1 В	0,1 В
4	Магазин опорів	КМС-6	10000 Ом	0,1 Ом	0,02 Ом
5	Генератор	ГЗ-36А	$2 \cdot 10^5$ Гц	2 Гц	2 Гц
6	Термометр ртутний	РТ	250 °С	0,5 °С	0,5 °С
7	Осцилоскоп	С1-94	10 V	0,01 V	0,01 V
8	Осцилоскоп	С1-94	50 μ s	0,1 μ s	0,1 μ s

Результати досліджень показані на рис. 2.3, де зображена крива зміни струму насичення стоку ΔI_H МОН ПТ (відносно до його значення до опромінення I_{H0}) після опромінення потоком електронів для зразків з малим струмом насичення стоку до опромінення $I_{H0} < 1$ мА.

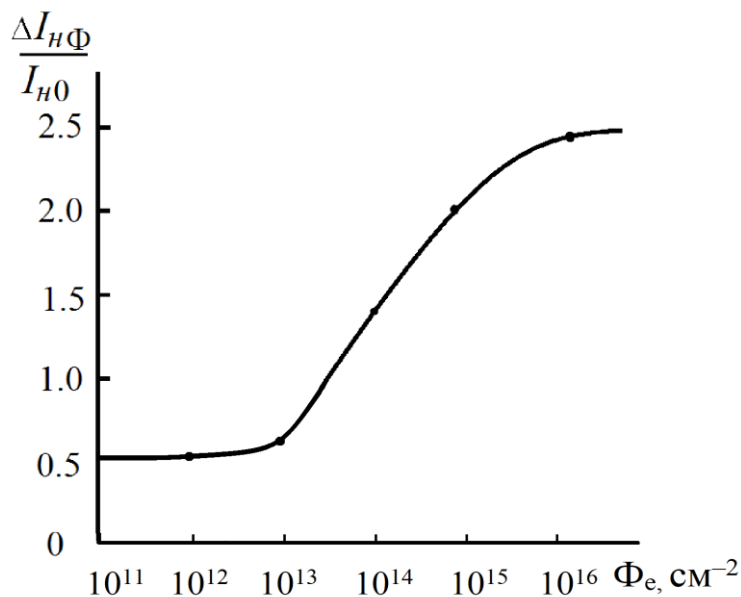


Рисунок 2.3 – Експериментальні залежності відносної зміни струму насичення стоку МОН ПТ після опромінення потоком електронів

З рис. 2.9 видно, що струм насичення всіх МОН ПТ починає зростати при потоках $\Phi_e \sim 10^{13} \text{см}^{-2}$ завдяки ефекту додаткового накопичення заряду в шарі оксиду за рахунок радіаційних дефектів в структурі оксиду.

Аналогічно змінюється струму насичення при опроміненні потоком нейтронів або гамма квантів. При цьому потоку електронів $\Phi_e = 10^{13} \text{см}^{-2}$ відповідає потік нейтронів $\Phi_n = 10^{12} \text{см}^{-2}$ або гамма випромінювання інтенсивністю $D = 10^4 \text{Р}$.

Висновок: Експериментально доведено, якщо струм насичення МОН ПТ до опромінення невеликий, то при опроміненні його струм насичення буде зростати.

МОН ПТ типу КП305 можна використовувати в якості сенсора радіації.

2.1.3 Теоретичні дослідження характеристик ОПТ

Одним із шляхів підвищення чутливості транзисторних датчиків є використання транзистору з ділянкою з негативним опором, тому що параметри ділянки вольт-амперної характеристики з негативним опором дуже чутливі до впливу зовнішніх факторів [20]. Одним з таких приладів є одноперехідний транзистор (ОПТ), який має S-типу вольт-амперну характеристику. ОПТ випускаються серійно провідними виробниками, такими як Philips (2N2646) і Motorola (2N4949) [21, 22].

На відміну від ПТ (рис. 2.1) у одноперехідного транзистора *p-n*-перехід є точковим (рис. 2.4, а). При включенні транзистора напруга на всій базі розподіляється між нижньою її частиною і верхньою. Коли напруга на емітері U_E

менша за напругу нижньої частини бази, то скрізь емітер тече малий зворотній струм p - n -переходу. Це відповідає нижньої ділянці вольт амперної характеристики (рис. 2.4, б).

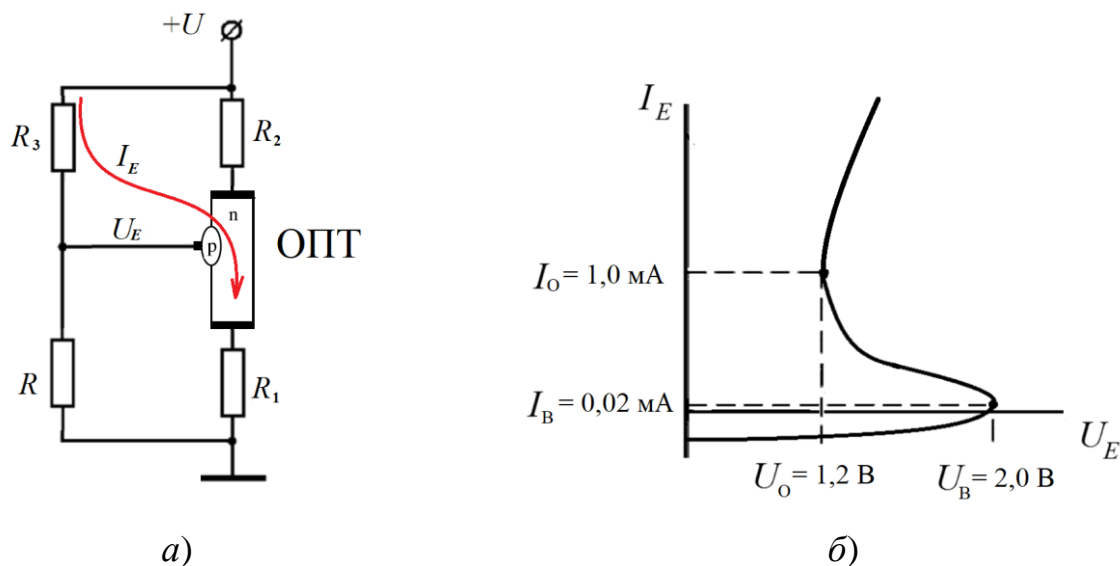


Рисунок 2.4 – Електрична схема одноперехідного транзистора а) та його емітерна вольт амперна характеристика б)

Коли напруга на емітері U_E зрівняється з напругою нижньої частини бази, транзистор готовий до включення, тому відповідна напруга зветься напругою включення U_B . Це відповідає піку U_B вольт амперної характеристики (рис. 2.4, б).

При найменшому підвищенні напруги на емітері емітерний p - n -перехід стає зміщеним в прямому напрямку і буде інжектувати в базу дірки. Під дією електричного поля в базі, інжектовані з емітера до бази дірки рухаються до нижньої частини бази, внаслідок чого її опір зменшується, що призводить до подальшого зменшення напруги нижньої частини бази. Внаслідок цього інжекція носіїв і струм через p - n -перехід продовжують збільшуватися. Такий само прискорювальний процес призводить до лавинного зростання струму через p - n -перехід I_E (стрілка на рис. 2.4, а) та ще більшому зменшенню падіння напруги нижній частині бази та напруги на емітері U_E до значення остаточної напруги U_0 . Це відповідає ділянці з негативним опором зі зростанням струму від I_B до I_0 та одночасним зменшенням напруги від U_B до U_0 (рис. 2.4, б).

При подальшому підвищенні напруги від U_0 струм емітера починає зростати від I_0 пропорційно напрузі на емітері, як у звичайного транзистора. Тільки при подачі негативного імпульсу на транзистор він виключається.

Таким чином, вольт-амперна характеристика ОПТ визначається двома

характерними точками: напругою включення U_B , при якій струм різко зростає від I_B до I_O , і остаточною напругою U_O на емітері, коли транзистор знаходиться у включеному стані. Суттєвою відмінністю S -характеристики одноперехідного транзистора від аналогічних характеристик інших приладів є те, що включення відбувається при практично нульових струмах емітера I_B .

Напруга включення U_B несуттєво змінюється при опроміненні, а найбільш чутливим до радіації є остаточно напруга U_O , оскільки вона залежить від опору бази [19]:

$$U_O = I \cdot r_{B1} = I \cdot \eta \cdot r_B, \quad (2.3)$$

де I – струм через нижню частину бази транзистора, А;

$r_{B1} = \eta \cdot r_B$ – опір нижньої частини бази між емітерним переходом і нижнім базовим контактом, Ом;

r_B – опір усієї бази, Ом;

$\eta = 0,6$ – відношення опорів нижній частині бази і всієї бази [19].

Іонізуюче випромінювання, яке потрапляє в напівпровідник виділяє значну енергію, яка викликає не тільки тимчасову генерацію нових носіїв заряду, а навіть вибиває атоми напівпровідника з кристалічної решітки, тобто створює постійні дефекти. Це призводить до зміни питомого опору напівпровідника. Таким чином, вплив опромінення на параметри одноперехідного транзистора ОПТ визначається зміною опору бази r_B .

Питомий опір напівпровідникового матеріалу змінюється при дії опромінення відповідно до виразу [23]:

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{K_\rho \Phi_e}, \quad (2.4)$$

де ρ_0 – питомий опір напівпровідника до опромінення, Ом·м;

K_ρ – коефіцієнт радіаційної зміни питомого опору, см²;

Φ_e – величина потоку електронів, см⁻².

Коефіцієнт радіаційної зміни питомого опору K_ρ визначається питомим опором напівпровідника до опромінення ρ_0 [23]:

$$K_\rho = 1,53 \cdot 10^{-17} (\rho_0)^{1,2}. \quad (2.5)$$

Опір бази ОПТ залежить від її розмірів

$$r_B = \rho \frac{L}{a \cdot b}, \quad (2.6)$$

де L – довжина бази, м;

a – висота бази, м;

b – ширина бази, м.

Тоді згідно з (2.3) формула моделі залежності остаточної напруги від дози іонізуючого випромінювання буде:

$$U_O = I_O \cdot \eta \cdot \rho_0 \frac{L}{a \cdot b} e^{K(\rho_0)^{1,2} \Phi_e}. \quad (2.7)$$

де I_O – остаточної струм транзистора, А;

Φ_e – величина потоку електронів, см^{-2} .

Для досліджень використовувалися серійні ОПТ типу КТ117, які були вироблені з n -кремнію та мали питомій опору матеріалу бази $\rho_0 = 3,05 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ до опромінення та наступні розміри: $L \times a \times b = 2 \times 1,7 \times 1,8 \text{ мм}$.

Для $\rho_0 = 3,1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ згідно з (2.5) значення K_p складає $5,83 \cdot 10^{-16} \text{ см}$.

Остаточної струм транзистора типу КТ117 складає $I_O = 1 \text{ мА}$.

Опір бази згідно з (2.6) склав $r_B = 1993 \text{ Ом}$.

На основі наведених вище параметрів були розраховані значення остаточної напруги транзистора типу КТ117 для різних значень доз опромінення по формулі моделі (2.7):

для потоку електронів $\Phi_{e1} = 10^{12} \text{ см}^{-2}$

$$U_{O1} = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6 \cdot 1993 \cdot \exp(5,83 \cdot 10^{-16} \cdot 10^{12}) = 1,20 \text{ В};$$

для $\Phi_{e2} = 10^{13} \text{ см}^{-2}$

$$U_{O2} = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6 \cdot 1993 \cdot \exp(5,83 \cdot 10^{-16} \cdot 10^{13}) = 1,20 \text{ В};$$

для $\Phi_{e3} = 10^{14} \text{ см}^{-2}$

$$U_{O3} = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6 \cdot 1993 \cdot \exp(5,83 \cdot 10^{-16} \cdot 10^{14}) = 1,29 \text{ В};$$

для $\Phi_{e4} = 10^{15} \text{ см}^{-2}$

$$U_{O4} = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6 \cdot 1993 \cdot \exp(5,83 \cdot 10^{-16} \cdot 10^{15}) = 2,20 \text{ В};$$

для $\Phi_{e5} = 10^{16} \text{ см}^{-2}$

$$U_{O5} = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6 \cdot 1993 \cdot \exp(5,83 \cdot 10^{-16} \cdot 10^{16}) = 4,65 \text{ В};$$

для $\Phi_{e6} = 10^{17} \text{ см}^{-2}$

$$U_{O6} = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6 \cdot 1993 \cdot \exp(5,83 \cdot 10^{-16} \cdot 10^{17}) = 8,20 \text{ В}.$$

Для потоків електронів більших за $\Phi_e = 10^{17} \text{ см}^{-2}$ розрахункова остаточно напруга має значення, яке перевищує гранично допустимі значення напруг транзистора.

Розрахункові залежності остаточної напруги транзистора типу КТ117 від значень потоку електронів Φ_e при опроміненні представлені на рис. 2.5.

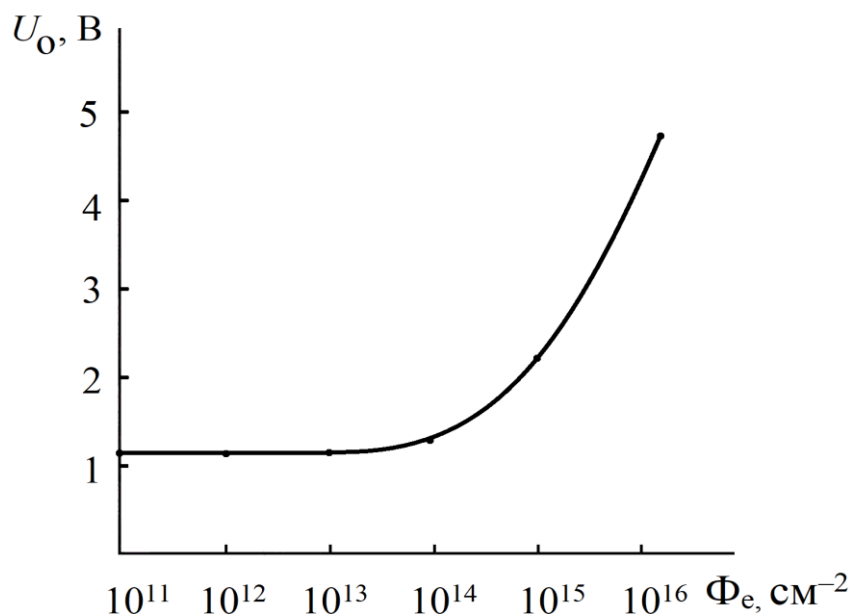


Рисунок 2.5 – Розрахункова залежність напруги включення транзистора типу КТ117 від потоку електронів Φ_e

Розрахунки показали, що напруга включення транзистора типу КТ117 починає зростати з потоків електронів 10^{14} см^{-2} , і зростає дуже швидко при подальшому опроміненні.

Оскільки напруга включення ОПТ пропорційна питомому опору матеріалу бази, то визначення впливу радіації на ОПТ зводиться до його зміни при опроміненні. Зміна питомого опору відбувається при опроміненні бази електронами, гамма-квантами або швидкими нейтронами. При цьому в кристалічній решітці напівпровідника виникають радіаційні дефекти, які призводять до зменшення концентрації основних носіїв і їх рухливості, а отже, і до зростання опору бази та напруги включення.

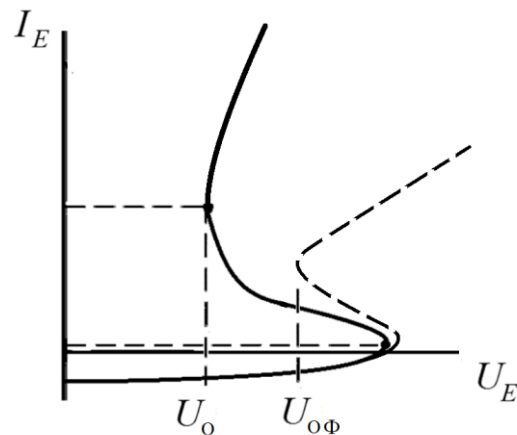


Рисунок 2.6 – Емітерна вольт амперна характеристика ОПТ за відсутності зовнішніх впливів (суцільна крива) і після дії радіації (пунктирна крива)

Таким чином можна визначити основні зміни вольт амперної характеристики ОПТ після радіаційного впливу: через зростання опору бази остаточна напруга значно збільшиться, емітерний струм буде мати менші значення, а напруга включення не зміниться. Зразковий вид вольт амперної характеристики ОПТ після опромінення показаний на рис. 2.6 пунктирною лінією.

Висновок: Теоретично передбачається, що остаточна напруга ОПТ при опроміненні буде зростати, при цьому напруга включення практично не зміниться.

2.1.4 Експериментальні дослідження характеристик ОПТ

Для перевірки теоретичних припущень ми експериментально виміряли напругу включення зразків стандартних промислових ОПТ типу КТ117, які зазнали радіаційного опромінення різними дозами.

Досліджувалися 30 зразків транзисторів. Ці 30 зразків транзисторів були поділені на 6 груп: в першій групі знаходилися зразки що не піддавалися опроміненню, а в інших п'яти групах зразки вже були піддані опроміненню потоком електронів Φ_e величиною 10^{12} , 10^{13} , 10^{14} , 10^{15} и 10^{16} см^{-2} відповідно в кожній групі. Зразки кожної групи були піддані опроміненню тільки однієї величини потоку електронів Φ_e з енергією 5 Мев на лінійному прискорювачі "Електроніка".

Роботи по опроміненню проводилися в Інституті ядерних досліджень НАН України в рамках НДР, яка виконувалась в ОНАЗ ім. О.С. Попова за замовленням МОН України № держреєстрації 0115U000855.

Для вимірювання напруги включення ОПТ використовувався джерело постійного струму, магазин опорів і два комбінованих цифрових прилади

лабораторної установки, показаної на рис. 2.2. Характеристики приладів, які використовувалися для вимірювання характеристик транзисторів представлені в Таблиці 2.1.

Поступово збільшуючи напругу на емітері ОПТ ми фіксували значення остаточної напруги, коли струм емітера змінювався стрибкоподібно від значення приблизно $I_B = 0,02$ мА до значення $I_O = 1$ мА. Потім ми знаходили середнє значення величини остаточної напруги для зразків, які отримали одне значення дози опромінення.

На рис. 2.7 показана експериментальна залежність остаточної напруги промислового ОПТ типу КТ117 від потоком електронів Φ_e .

З рис. 2.7 добре видно, що експериментальна залежність остаточної напруги від потоку опромінення електронами узгоджується з розрахунковою (рис. 2.5) для малих доз опромінення. При потоках, які є більшими за 10^{15} см⁻² помітні суттєві розбіжності. Це пов'язано з тим, що розроблена нами теоретична модель (2.7) враховує не всі явища, які відбуваються в напівпровіднику при сильному впливі радіації.

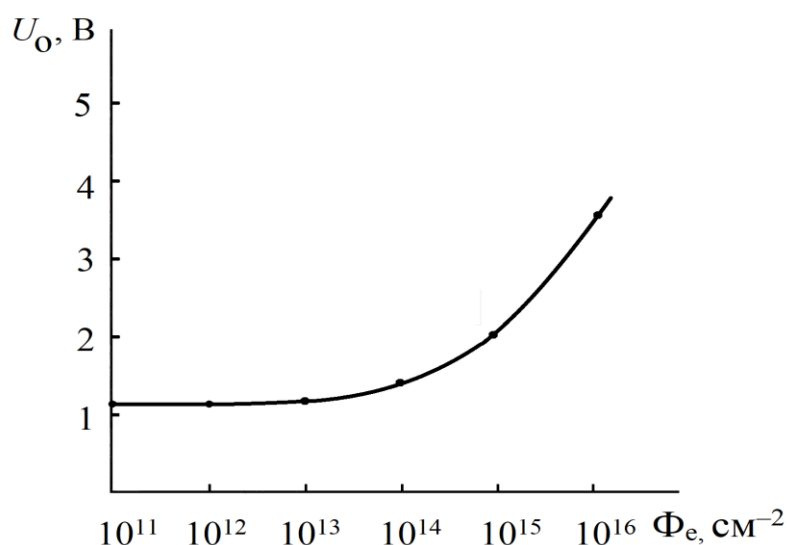


Рисунок 2.7 – Експериментальна залежність остаточної напруги транзистора типу КТ117 від потоком електронів Φ_e

Таким чином, експериментально встановлено, що іонізуюче випромінювання збільшує напругу включення транзистора типу КТ117 починаючи з потоків опромінення електронами 10^{13} см⁻².

Висновки: Експериментально підтверджено, що напруга включення ОПТ типу КТ117 при опроміненні буде зростати.

ОПТ типу КТ117 можна використовувати в якості сенсора радіації.

Висновки до підрозділу 2.1:

Експериментально доведено теоретичні розрахунки, якщо струм насичення МОН ПТ до опромінення невеликий, то при опроміненні його струм насичення буде зростати, тому спеціально підібрані заздалегідь зразки МОН ПТ типу КП305 можна використовувати в якості сенсорів радіації.

Експериментально підтверджено теоретичні розрахунки, що напруга включення ОПТ типу КТ117 при опроміненні буде зростати, тому ОПТ типу КТ117 можна використовувати в якості сенсора радіації.

2.2 Частотний детектор на одному ОПТ

Згідно з висновками попереднього підрозділу ОПТ істотно змінює свої властивості при впливі радіації, і його можна використовувати в якості чутливого елемента в датчиках радіації. У цьому підрозділі досліджується можливість використовувати ці властивості ОПТ для отримання пристрою, частота якого залежить від дози отриманого іонізуючого опромінення.

Найбільш простою схемою радіаційно-чутливого пристрою з частотним виходом є генератор релаксаційних коливань [19], зібраний лише на одному одноперехідному транзисторі (ОПТ) з мінімальною кількістю елементів (рис. 2.7). Для такого генератора можна використовувати як і вітчизняні промислові ОПТ типу КТ117, так і зарубіжні аналоги 2N2646 і 2N4949 [21, 22]. Такі генератори широко застосовуються, зокрема, в пристроях плавного регулювання потужності.

2.2.1 Теоретичні дослідження дозиметра на одному ОПТ

Для генерації змінного сигналу певної частоти крім резисторів, які задають струм першої бази (резистор R_1), струм другий бази (резистор R_2) і струм емітера (резистор R_3), необхідно додати елемент (конденсатор C), який буде періодично заряджатися та розряджатися, і тим самим задавати частоту генератора.

Принцип генерації змінного сигналу полягає в наступному. При подачі постійної напруги $+U$ конденсатор C заряджається струмом I_3 (на рис. 2.8 позначений стрілкою) через опір R_3 до напруги включення емітерного переходу U_B , при якій ОПТ відкривається.

Тоді конденсатор починає розряджатися струмом I_3 (на рис. 2.8 позначений стрілкою) через емітерний перехід до остаточної напруги U_0 . При цій напрузі транзистор закривається, конденсатор починає знову заряджатися струмом I_3 через

опір R_3 і процес повторюється.

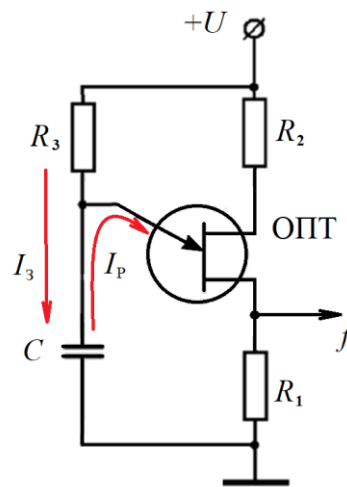


Рисунок 2.8 – Схема перетворювача радіації на одному ОПТ

Період коливань релаксаційного генератора на ОПТ задається відомою формулою [19]:

$$T = R_3 C \ln \left(\frac{U - U_O}{U - U_B} \right), \quad (2.8)$$

де U – напруга живлення, В;

C – електроємність конденсатора, Ф;.

З урахуванням того, що струм зарядки конденсатора обмежується опором R_3 і визначається як $I_3 = U/R_3$, після розкладання логарифма в ряд Маклорена, отримуємо формулу моделі для частоти релаксаційного генератора на ОПТ в режимі постійного струму емітера

$$f \approx \frac{I_3}{C(U_B - U_O)}. \quad (2.9)$$

де I_3 – струм зарядки конденсатора, А.

Проаналізуємо формулу моделі (2.9). Після радіаційного впливу струм зарядки конденсатора I_3 не зміниться, оскільки його величина визначається резистором R_3 . Згідно з висновками Підрозділу 2.1.3 остаточна напруга U_O при опроміненні буде зростати, при цьому напруга включення U_B практично не зміниться.

Висновок: Теоретична модель передбачає збільшення частоти коливань вихідної напруги релаксаційного генератора на одному ОПТ при радіаційному опроміненні.

2.2.2 Експериментальні дослідження дозиметра на одному ОПТ

Для перевірки теоретичних припущень ми експериментально виміряли частоти коливань вихідної напруги релаксаційного генератора, зібраного на базі зразків стандартних промислових ОПТ типу КТ117, які зазнали радіаційного опромінення різними дозами.

Досліджувалися 30 зразків транзисторів. Ці 30 зразків транзисторів були поділені на 6 груп: в першій групі знаходилися зразки що не піддавалися опроміненню, а в інших п'яти групах зразки вже були піддані опроміненню потоком електронів Φ_e величиною 10^{12} , 10^{13} , 10^{14} , 10^{15} и 10^{16} см^{-2} відповідно в кожній групі. Зразки кожної групи були піддані опроміненню тільки однієї величини потоку електронів Φ_e з енергією 5 Мев на лінійному прискорювачі "Електроніка".

Роботи по опроміненню проводилися в Інституті ядерних досліджень НАН України в рамках НДР, яка виконувалась в ОНАЗ ім. О.С. Попова за замовленням МОН України № держреєстрації 0115U000855.

Для вимірювання частоти коливань вихідної напруги генератора використовувався джерело постійного струму, магазин опорів, два комбінованих цифрових прилади і осцилоскоп С1-94 лабораторної установки, показаної на рис. 2.2. Характеристики приладів, які використовувалися для вимірювання характеристик транзисторів представлені в Таблиці 2.1.

У схемі генератора був використаний конденсатор електроємність якого складала $C = 50$ мкФ і резистор $R_3 = 1500$ Ом. В таку схему генератора по черзі приєднувалися досліджувані зразки транзисторів. Напруга живлення складала $U = 10$ В. На екрані осцилографа отримували чітку картину змінного сигналу пилкоподібної форми.

Період проходження імпульсів відраховується за шкалою осцилографа. Для неопромінених зразків його середнє значення становило приблизно $T = 4,5$ мкс, що відповідає частоті $f = 1/T = 222$ Гц. Подібним чином фіксувалася частота для опромінених зразків. Потім знаходилося середнє значення величини частоти для зразків, які отримали одне значення дози опромінення.

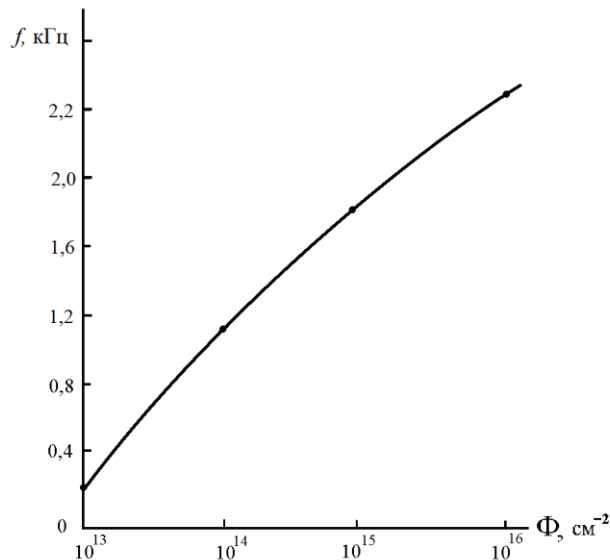


Рисунок 2.9 – Вихідна характеристика датчика радіації на базі ОПТ типу КТ117 при опроміненні потоком електронів Φ_e

На рис. 2.9 показана експериментальна залежність вихідної частоти датчика радіації на базі промислового ОПТ типу КТ117 від потоку електронів Φ_e .

З рис. 2.9 добре видно, що вихідна частота суттєво зростає зі збільшенням отриманої дози опромінення, починаючи з потоків опромінення електронами приблизно 10^{13} см⁻². Вихідна частота генератора f після опромінення потоком електронів $\Phi_e = 10^{15}$ см⁻² з енергією 4 МеВ збільшувалася з 222 Гц до 1.8 кГц при напрузі живлення $U = 10$ В. Аналогічно змінюється частота генератора при опроміненні ОПТ потоком нейтронів або гамма-квантів. При цьому потоку електронів $\Phi_e = 10^{14}$ см⁻² відповідає потік нейтронів $\Phi_n = 10^{13}$ см⁻² або гамма-випромінювання дозою $D_\gamma = 10^5$ Р.

Чутливість датчика визначається як відношення зміни частоти до зміни потоку електронів

$$\beta = \frac{\Delta f}{\Delta \Phi}. \quad (2.10)$$

Для датчика радіації на базі одного ОПТ вона становить $\beta = 158$ Гц·см². Також з рисунку видно невелика нелінійність вихідної характеристики. Споживана потужність такого датчика складає близько $P = 1$ мВт.

Висновки: Експериментально підтверджено теоретичні припущення, що вихідна частота датчика радіації на базі одного промислового ОПТ типу КТ117 при опроміненні буде зростати.

Релаксаційний генератор на базі одного ОПТ типу КТ117 можна використовувати в якості сенсора радіації з частотним виходом, але він має нелінійну вихідну характеристику та недостатню чутливість, що є перешкодою для його широкого використання в цифрових мережах Інтернету речей, оскільки вимагає додаткових схем корекції лінійності вихідної характеристики.

2.3 Висновки

Проведено теоретичні розрахунки та доведено експериментально, що, коли струм насичення МОН ПТ до опромінення невеликий, то при опроміненні його струм насичення буде зростати, тому спеціально підібрані заздалегідь зразки серійних МОН ПТ типу КП305 можна окремо використовувати в якості сенсорних елементів радіації.

Проведено теоретичні розрахунки та підтверджено експериментально, що напруга включення ОПТ типу КТ117 при опроміненні буде зростати, тому серійні ОПТ типу КТ117 можна окремо використовувати в якості сенсора радіації.

Експериментально підтверджено теоретичні припущення, що вихідна частота датчика радіації на базі одного промислового ОПТ типу КТ117 при опроміненні буде зростати. Тому релаксаційний генератор на базі одного ОПТ типу КТ117 можна використовувати в якості датчика різних видів радіації, вихідним параметром якого є частота сигналу як функція потоку електронів, гамма-випромінювання або нейтронів.

Однак такий перетворювач має недостатню чутливість та нелінійну вихідну характеристику, що є перешкодою для його широкого використання в цифрових мережах Інтернету речей, оскільки вимагає додаткових схем корекції лінійності вихідної характеристики.

3. ШЛЯХИ ПОКРАЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДОЗИМЕТРА З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

У другому розділі досліджені характеристики датчика радіації з частотним виходом на базі одного ОПТ типу КТ117 в схемі релаксаційного генератора та зроблено висновки, що такий перетворювач має недостатню чутливість та нелінійну вихідну характеристику, що є перешкодою для його широкого використання в цифрових мережах Інтернету речей, оскільки вимагає додаткових схем корекції лінійності вихідної характеристики.

У Підрозділі 1.3 були сформульовані основні вимоги до датчиків, які використовуються в мережах Інтернету речей серед яких достатня чутливість і лінійність вихідної характеристики. Тому необхідно знайти шляхи поліпшення характеристик досліджуваного датчика для можливості його використання в цифрових мережах.

Крім того існує проблема сполучення такого датчика з цифровими мережами. Цю проблему можна вирішити існуючими стандартними методами.

У цьому розділі досліджуються шляхи поліпшення характеристик досліджуваного датчика для можливості його використання в цифрових мережах та метод сполучення такого датчика з цифровими мережами.

3.1 Рішення проблеми підвищення чутливості та покращення лінійності вихідної характеристики дозиметра з частотним виходом

Оскільки досліджуваний датчик, на відміну від використовуваних в даний час аналогів, містить лише один активний елемент і споживає мінімальну енергію, то існує можливість підвищити чутливість досліджуваного датчика за рахунок внесення в схему релаксаційного генератора додаткового чутливого елемента.

Найбільш чутливими до впливу іонізуючого опромінення елементами є польові транзистори. Крім того з усіх активних елементів вони споживають мінімальну енергію.

3.1.1 Теоретичні дослідження дозиметра на двох транзисторах

Оскільки вихідна частота датчика на одному транзисторі збільшується при дії радіації, то для ще більшого її збільшення відповідно до формули теоретичної моделі (2.9) необхідно щоб при радіаційному впливі збільшувався струм зарядки

конденсатора I_3 . Струм зарядки конденсатора в схемі релаксационного генератора задається постійним резистором R_3 , опір якого на залежить від радіаційного опромінення, тому в схемі генератора на одному транзисторі зарядки конденсатора не змінюється при опроміненні. У Підрозділі 2.1 досліджувався МОН ПТ типу КП305 з малими струмами насичення, близько 1 мА. Було підтверджено експериментально, що струм насичення такого транзистора збільшується при радіаційному впливі. Тому, якщо замість резистора R_3 підключити такий МОП ПТ при двополюсному включенні (рис. 3.1), то струм зарядки конденсатора буде збільшуватися при дії опромінення.

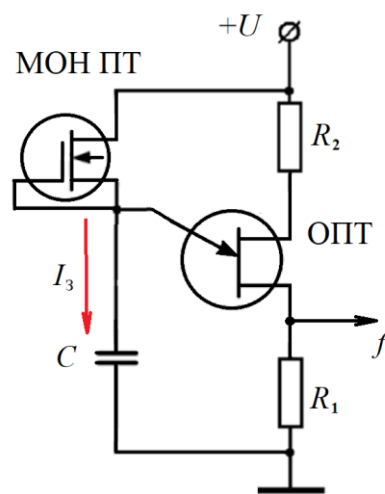


Рисунок 3.1 – Схема датчика радіації на двох транзисторах

У цьому випадку, після опромінення в співвідношенні (3.1) частота буде збільшуватися за рахунок двох факторів: буде зменшуватися знаменник, за рахунок збільшення остаточної напруги ОПТ U_0 , і одночасно буде збільшуватися чисельник, за рахунок збільшення струму I_3 , якій задається чутливим до дії радіації МОП ПТ. Разом ці фактори призводять до більшої зміни частоти генерації $f(\Phi_e)$, а відповідно, до підвищення чутливості датчика.

Висновок: Теоретична модель передбачає збільшення частоти коливань вихідної напруги релаксационного генератора на двох транзисторах при радіаційному опроміненні за рахунок двох факторів.

3.1.2 Експериментальні дослідження дозиметра на двох транзисторах

Для перевірки теоретичних припущень ми експериментально виміряли частоти коливань вихідної напруги релаксационного генератора, зібраного на базі зразків стандартних промислових ОПТ типу КТ117 та МОН ПТ типу КП305, які

знали радіаційного опромінення різними дозами.

Досліджувалися 30 зразків кожного типу транзисторів транзисторів. Ці 30 зразків типу транзисторів були поділені на 6 груп: в першій групі знаходилися зразки що не піддавалися опроміненню, а в інших п'яти групах зразки вже були піддані опроміненню потоком електронів Φ_e величиною 10^{12} , 10^{13} , 10^{14} , 10^{15} и 10^{16} см^{-2} відповідно в кожній групі. Зразки кожної групи були піддані опроміненню тільки однієї величини потоку електронів Φ_e з енергією 5 Мев на лінійному прискорювачі "Електроніка".

Роботи по опроміненню проводилися в Інституті ядерних досліджень НАН України в рамках НДР, яка виконувалась в ОНАЗ ім. О.С. Попова за замовленням МОН України № держреєстрації 0115U000855.

Для вимірювання частоти коливань вихідної напруги генератора використовувався джерело постійного струму, магазин опорів, два комбінованих цифрових прилади і осцилоскоп С1-94 лабораторної установки, показаної на рис. 2.2. Характеристики приладів, які використовувалися для вимірювання характеристик транзисторів представлені в Таблиці 2.1.

У схемі генератора був використаний конденсатор електроємність якого була $C = 50$ мкФ. В таку схему генератора по черзі приєднувалися досліджувані зразки обох типів транзисторів: ОПТ типу КТ117 та МОН ПТ типу КП305. Напруга живлення складала $U = 10$ В. На екрані осцилографа отримували чітку картину змінного сигналу пілкоподібної форми. Період проходження імпульсів відраховується за шкалою осцилографа. Для неопромінених зразків його середнє значення становило приблизно $T = 5,5$ мкс, що відповідає частоті $f = 1/T = 182$ Гц. Подібним чином фіксувалася частота для опромінених зразків. Потім знаходилося середнє значення величини частоти для зразків, які отримали одне значення дози опромінення.

На рис. 3.2 показана експериментальна залежність вихідної частоти датчика радіації на базі двох транзисторів ОПТ типу КТ117 та МОН ПТ типу КП305 від потоку електронів Φ_e .

З рис. 3.2 добре видно, що вихідна частота такого датчика на двох транзисторах суттєво зростає зі збільшенням отриманої дози опромінення, починаючи з потоків опромінення електронами приблизно 10^{13} см^{-2} . Вихідна частота генератора f після опромінення потоком електронів $\Phi_e = 10^{15}$ см^{-2} з енергією 4 МеВ збільшувалася з 182 Гц до 7.3 кГц при напрузі живлення датчика $U = 10$ В. Аналогічно змінюється частота генератора на двох транзисторах при опроміненні потоком нейтронів або гамма-квантів. При цьому потоку електронів

$\Phi_e = 10^{14} \text{ см}^{-2}$ відповідає потік нейтронів $\Phi_n = 10^{13} \text{ см}^{-2}$ або гамма-випромінювання дозою $D_\gamma = 10^5 \text{ Р}$.

Для датчика радіації на базі двох транзисторів радіаційна чутливість вже становить $\beta = 712 \text{ Гц}\cdot\text{нм}^2$ на відміну від датчика на одному транзисторі, яка становить лише $\beta = 158 \text{ Гц}\cdot\text{нм}^2$. Також з рисунку видно чітка лінійна вихідна характеристика. Споживана потужність такого датчика складає близько $P = 1,2 \text{ мВт}$.

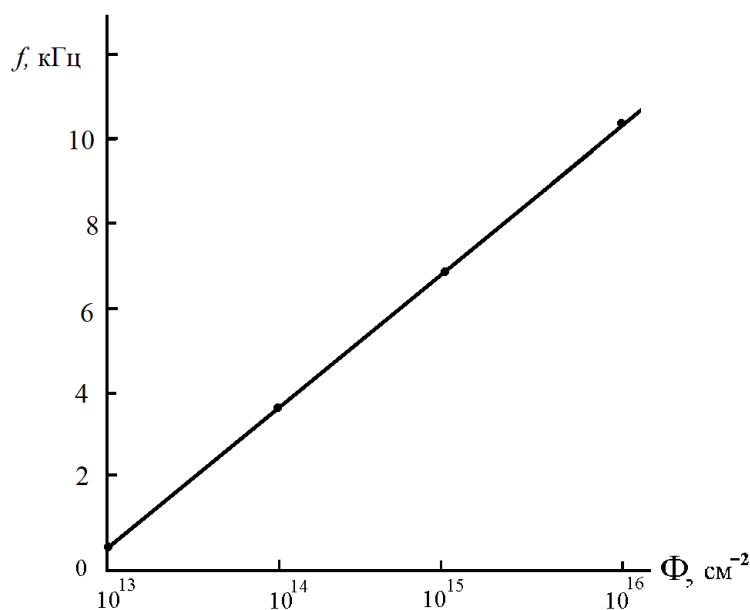


Рисунок 3.2 – Вихідна характеристика датчика радіації на базі двох транзисторів при опроміненні потоком електронів Φ_e

На відміну від сучасних детекторів радіації [11-17], які вимагають спеціальних технологій виготовлення і значних витрат, даний датчик зібраний на двох серійних транзисторах, що істотно зменшує матеріальні витрати і споживану енергію [29].

Мінімальна кількість елементів датчика дозволяє досліджувати шляхи подальшого його вдосконалення: замість опору R_2 в колі другої бази можна підключити третій чутливий до радіації елемент, що додатково буде збільшувати частоту генератора при опроміненні.

Висновки: Експериментально підтверджено теоретичні припущення, що вихідна частота датчика радіації на базі двох промислових транзисторів: ОПТ типу КТ117 та МОН ПТ типу КП305 при опроміненні буде зростати сильніше, ніж у датчика на одному транзисторі. Датчик на двох транзисторах має лінійну вихідну характеристику. Для датчика радіації на базі двох транзисторів радіаційна

чутливість становить $\beta = 712 \text{ Гц}\cdot\text{нм}^2$ в порівнянні з $\beta = 158 \text{ Гц}\cdot\text{нм}^2$ для датчика на одному ОПТ.

Висновки до підрозділу 3.1: Релаксаційний генератор на базі двох транзисторів: ОПТ типу КТ117 та МОН ПТ типу КП305 можна використовувати в якості сенсора радіації з частотним виходом в цифрових мережах Інтернету речей, тому що він відповідає вимогам до датчиків цифрових мереж: має лінійну вихідну характеристику, достатню чутливість, малу споживану потужність, компактність, мінімальну кількість елементів та не потребує для виготовлення складних коштовних технологій.

3.2 Принципи поєднання датчика з цифровими системами сенсорних мереж

Для практичного використання досліджуваного датчика необхідно передбачити певне функціональне оточення та необхідно врахувати ряд умов, що дозволить вбудувати його в цифрову систему «Інтернету речей».

В якості базового технологічного рішення виберемо технологію LoRaWAN щодо системи контролю рівня іонізуючого випромінювання, потрібно узгодити вихідні дані датчика з вимогами до кінцевого пристрою що існують в концепції LPWAN. Так датчик під впливом іонізуючого випромінювання в залежності від його інтенсивності видає електричні коливання в частотній смузі від 100 Гц до 8 кГц в частотному вигляді. Для передачі до центру збору інформації (сервера додатків відповідно до архітектури цифрової мережі) сигнал від датчика повинен бути перетворений до машинного цифрового коду із залученням частотно-цифрового перетворювача (ЧЦП), упакований належним чином у пакет для передачі у мережі до найближчого шлюзу (базової станції мережі) та переданий відповідно до встановленого розкладу радіообміну у сеансі зв'язку.

Крім того, датчик іонізуючого випромінювання повинен бути прокаліброваним із застосуванням еталонів іонізуючих випромінювань. Це дозволить наповнити результати вимірювань інформаційним змістом. Моніторингова система повинна надавати інформацію, яка може бути співставлена з існуючими санітарними нормами рівня іонізуючого випромінювання та автоматично визначати загрозові ситуації з генерацією відповідних сигналів констатуючих загрози. Виконання всього вище переліченого фактично і є побудовою кінцевого сенсора системи моніторингу на базі розглянутого датчика. Тобто, мова йде про розробку клієнтського пристрою для даної системи.

Безумовно, можливо ставити завдання про розробку відповідних технічних рішень щодо створення клієнтського пристрою так би мовити «з нуля». Але це не є раціональним шляхом. Вже напрацьовано декілька варіантів кінцевого обладнання, яке доступно на світовому ринку і яке дозволяє вирішити усі технічні питання узгодження роботи датчика в системі. Нижче наведений матеріал ілюструючий такий підхід із використанням мініатюрного LoRaWAN-модуля RFM6501W, який позиціонується як унікальне рішення для «Інтернету речей» [23].

Для розробки клієнтських LoRa- пристроїв існують різні радіотрансивери, але усі вони базуються на чипах від компанії Semtech [24] - власника авторських прав на LoRa- модуляцію. Для забезпечення компактності стандартні LoRa-трансивери часто розміщуються разом з мікро контролерами, що управляють, що дозволяє досягти малих габаритів при високій функціональності. Крім того, для зручності розробників чипсети часто поставляються у вигляді виробів-напівфабрикатів, або модулів. У них, включені необхідні стабілізатори живлення, налагоджені високочастотні ланцюги узгодження і перемикання, а також передбачений кварцовий генератор, що забезпечує трансивер опорною частотою потрібної точності і стабільності.



Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд LoRaWAN- модуля RFM6501W

До числа таких рішень відноситься і модуль від компанії Hoperf - RFM6501W [25], що відрізняється від аналогічних пристроїв в першу чергу розмірами - всього 16×16 мм (рис. 3.3), при цьому виводи для приєднання зовнішніх ланцюгів у нього розташовані по периферії з кроком 2 мм, що значно спрощує його монтаж в кінцевих пристроях. Модуль випускається в трьох модифікаціях залежно від частотного діапазону: 470, 868 і 915 МГц. Для України придатні перші два.

Модуль - RFM6501W, виконаний на кристалі (SoC) ASR6501, рис. 3.4. Його система включає вбудований LoRa FSK трансивер SX1272 і мікро контролер Cypress PSoC4100s Plus з архітектурою Cortex M0 і широким спектром периферії.

Модуль містить коло живлення, антени і кварцовий генератор, що дозволяє легко інтегрувати його в різні облаштування автоматики і телеметрії.

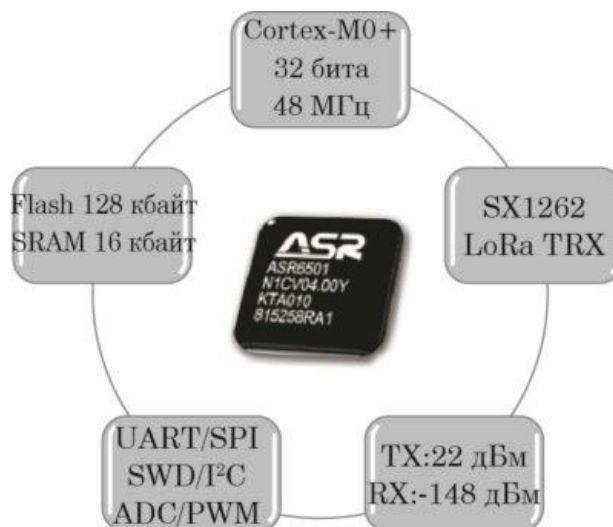


Рисунок 3.4 – Система на кристалі ASR6501

Чутливість приймача трансивера залежить від параметрів каналу і може досягати рекордного значення 137 дБ при коефіцієнті розширення спектру $S_F = 12$ і ширині смуги пропускання $B_W = 125$ кГц. Потужність передавача управляється програмно і в тестовому режимі може досягати 22 Вт (при цьому струм споживання складе 107 мА). При напрузі живлення 2,4-3,7 В струм споживання в режимі безперервного прийому складає 9 мА, а в різних режимах «сну» може бути понижений до декількох мікроампер.

Модуль управляється AT-командами через універсальний асинхронний передавач UART. Передбачена можливість підключення I2C-пристроїв (наприклад, зовнішньої пам'яті і різних датчиків). Крім того, є цифрові лінії загального призначення і вхід швидкого 12-бітового АЦП.

Стандартна заводська прошивка забезпечує роботу модуля в якості клієнтського пристрою в LoRaWAN мережі і підтримує режими А (періодична передача по таймеру з подальшим коротким вікном прийому), В (вікно прийому, що періодично відкривається) і С (постійний прийом).

RFM6501W має унікальний ідентифікатор для реєстрації в мережах LoRaWAN - і підтримку спеціальних режимів реєстрації OTAA і ABP. Також доступні тестові команди, призначені для проведення радіочастотних випробувань, наприклад при сертифікації пристрою.

Більш широкі можливості відкриваються при розробці власного вбудованого програмного забезпечення, що дозволяє використати внутрішній контролер для

обробки призначених для користувача даних, а також організувати роботу "точка-точка" і Mesh-мережі.

Модуль RFM6501W базується на SoC ASR6501, виробництва компанії ASR Microelectronics [36] за технологією Stacked SiP з використанням корпусу QFN - 48 розмірами 6×6×0,9 мм (рис. 3.4). У цьому корпусі розміщені кристали трансивера SX1262 і мікро контролера Cypress PSoC4100s Plus, рис. 3.5.

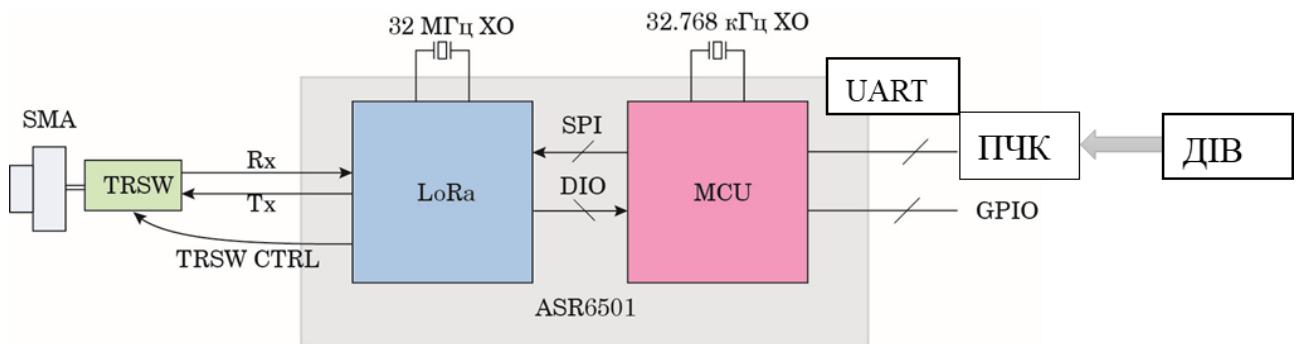


Рисунок 3.5 – Блок-схема SoC ASR6501 з підключеним датчиком іонізуючого випромінювання

На рис. 3.5 використані такі скорочення:

ДІВ – датчик іонізуючого випромінювання;

ПЧК – перетворювач частота-код;

UART – Universal Asynchronous Receiver-Transmitter – вузол обчислювальних пристроїв, призначений до організації зв'язку з іншими цифровими пристроями, входить до складу MCU;

MCU – Micro Controller Unit – контролер – мікросхема призначена для управління електронними пристроями;

SPI – послідовний синхронний стандарт передачі даних в режимі повного дуплексу;

SMA – високочастотний з'єднувач трансивера з антеною;

TRSW – електронно комутуємий перемикач радіочастотних сигналів;

XO – кварцовий генератор;

DIO – Direct I/O пряий ввід/вивід.

На рис. 3.5 показано розташування перетворювача частота-код (ПЧК) в схемі підключення модуля RFM6501W до інших елементів системи радіообміну за протоколами LoRaWAN.

У роботі [26] представлений спосіб побудови функціонального перетворювача частоти синусоїдальних сигналів для частотних датчиків з

використанням принципу ФАПЧ, що реалізується електронно-керованим фазообертачем. Такий пристрій дозволяє вирішити досить складне завдання забезпечення високої точності, швидкодії і універсальності виміру без додаткових перетворень у фізичних параметрах вимірюваних величин і може використовуватися в системах контролю та управління, як промисловими об'єктами, так і в різноманітних проектах «Інтернету речей».

Запропоновані в [26] технічні рішення, дозволяють досить економним способом, з точки зору енергоспоживання, вирішити завдання сполучення виходу датчика іонізуючого випромінювання з входом підсилювально-перетворюючої апаратури, в якій здійснюється подальша обробка і підготовка до відправки на базову станцію, результатів вимірів стану об'єкту спостереження. Важливим є і те, що вимоги до джерела електроживлення такого перетворювача практично ідентичні вимогам з боку датчика іонізуючого випромінювання.

Вбудований трансивер SX1262 [27] є продовженням лінійки Semtech SX12xx і підтримує типи модуляції LoRa і (G)FSK. У режимі LoRa швидкість передачі даних складає 0,018-62,5 Кбит/с і визначає ширину робочої смуги в межах 7,8-500 КГц. Швидкість передачі залежить від чинника розширення спектру, який може приймати значення SF5 - SF12 (що, відповідно, викликає зменшення швидкості передачі в 64-4096 разів). У режимі (G)FSK швидкість передачі даних значно вище і може бути задана в межах 0,6-300 Кбит/с. Максимальна вихідна потужність складає 22 дБм у безперервному діапазоні частот 150-960 МГц.

Трансивер містить вхідний широкосмуговий малошумливий підсилювач приймача з АРУ і підсилювач потужності передавача, синтезатор частоти з кроком близько 61 Гц, LoRa - і FSK- модеми і елементи стабілізації живлення (DC/DC і LDO).

Блок-схема трансивера показана на рис. 3.6. Для управління вбудованим трансивером і реалізації різних мережевих протоколів, у тому числі LoRaWAN, використовується спеціально створена ASR6501 EVK & SDK, код якої доступний на платформі Github [28]. Це середовище розробки підтримує різні мережеві моделі (LoRaWAN, Mesh і т. п.), адаптується під різне устаткування (в даному випадку під SoC ASR6502 і його мікро контролер Cypress PSoC4100s Plus) і дозволяє реалізувати різні датчики в одному пристрої. SDK забезпечена готовими проектами-прикладми, що швидко адаптуються до вимог конкретного завдання.

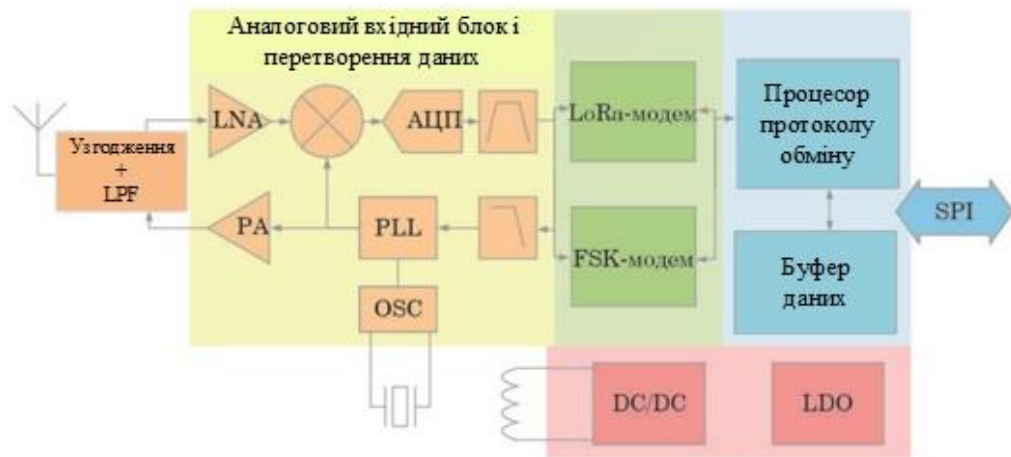


Рисунок 3.6 – Блок-схема трансивера SX1261

На рис. 3.6 використані такі скорочення:

LPF – low-pass filter - фільтр нижніх частот;

LNA – low noise amplifier – мало шумливий підсилювач;

PA – Power Amplifier - підсилювач потужності;

PLL – Phase-Locked Loop це спеціальний генератор зі схемою підстроювання частоти;

DC/DC – Direct/current перетворювачі. Якщо живлення апаратури здійснюється від гальванічних елементів чи акумулятора, то перетворення напруги до потрібного рівня можливо тільки за допомогою DC/DC.

LDO – Low DropOut - тип стабілізаторів напруги, які мають мале падіння напруги на регулюючому елементі.

Таким чином, цей LoRaWAN модуль RFM6501W від компанії Hore RF це універсальне рішення підключення датчика до цифрової мережі, яке розробник може використати у сенсорних системах моніторингу. Модуль управляється AT-командами через інтерфейс UART, тому при необхідності можна створити власне вбудоване програмне забезпечення, що реалізовує автономний сенсорний пристрій.

Також у продажу доступні самі чипи ASR6501, що дозволяє проектувати мініатюрні LoRaWAN рішення при самостійній коректній реалізації високочастотних резонансних і комутаційних кіл, забезпеченні стабільності живлення і 32 МГц частоти опорного кварцового генератора з точністю не гірше 10 PPM в усьому робочому діапазоні.

Висновки: Використання серійного малопотужного LoRaWAN модуля RFM6501W від компанії Hore RF для сполучення датчика іонізуючого випромінювання з цифровими мережами дозволяє отримати універсальний

програмований пристрій моніторингу радіаційної обстановки, яке може працювати в будь-яких сенсорних мережах Інтернету речей.

3.3 Висновки

Експериментально підтверджено теоретичні припущення, що вихідна частота датчика радіації на базі двох промислових транзисторів: ОПТ типу КТ117 та МОН ПТ типу КП305 при опроміненні буде зростати сильніше, ніж у датчика на одному транзисторі. Датчик на двох транзисторах має лінійну вихідну характеристику. Для датчика радіації на базі двох транзисторів радіаційна чутливість становить $\beta = 712 \text{ Гц}\cdot\text{нм}^2$ в порівнянні з $\beta = 158 \text{ Гц}\cdot\text{нм}^2$ для датчика на одному ОПТ.

Релаксаційний генератор на базі двох транзисторів: ОПТ типу КТ117 та МОН ПТ типу КП305 можна використовувати в якості сенсора радіації з частотним виходом в цифрових мережах Інтернету речей, тому що він відповідає вимогам до датчиків цифрових мереж: має лінійну вихідну характеристику, достатню чутливість, малу споживану потужність, компактність, мінімальну кількість елементів та не потребує для виготовлення складних коштовних технологій.

Використання серійного малопотужного LoRaWAN модуля RFM6501W від компанії Hore RF для сполучення датчика іонізуючого випромінювання з цифровими мережами дозволяє отримати універсальний програмований пристрій моніторингу радіаційної обстановки, яке може працювати в будь-яких сенсорних мережах Інтернету речей.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В першому розділі магістерської роботи на базі вивчення концептуальних засад побудови мереж «Інтернету речей», особливостей використання «Інтернету речей» в зонах підвищеного ризику, здійсненого огляду технічних вимог, які пред'являються до датчиків при їх використанні в мережах Інтернету речей, а також конструкцій існуючих сучасних датчиків іонізуючого випромінювання, зроблено висновки:

а) При використанні в мережі «Інтернету речей» датчик повинен мати достатню чутливість, мати лінійну вихідну характеристику, и бути стабільним до дії зовнішніх сторонніх впливів. Датчик повинен бути мініатюрним, складатися з мінімальної кількості елементів і споживати мало енергії.

б) Конструкція напівпровідникового дозового датчика з частотним виходом і мінімальною кількістю елементів є найбільш перспективною для використання в цифрових мережах «Інтернету речей».

В другому розділі магістерської роботи на базі теоретичної моделі та проведеного розрахунку залежності струму насичення польового транзистора від потоку радіації, проведеного теоретичного аналізу впливу радіаційних дефектів на характеристики польового та одноперехідного транзистора та вихідну частоту релаксаційного генератора, проведених експериментальних досліджень залежності струму насичення польового транзистора, параметрів вольт-амперної характеристики одноперехідного транзистора та залежності вихідної частоти релаксаційного генератора від потоку радіації зроблено висновки:

а) Експериментально підтверджено теоретичні припущення, що коли струм насичення метал-оксидно-напівпровідникового польового транзистора (МОН ПТ) до опромінення невеликий, то при опроміненні його струм насичення буде зростати, тому спеціально підібрані заздалегідь зразки серійних МОН ПТ типу КП305 можна окремо використовувати в якості сенсорних елементів радіації.

б) Експериментально підтверджено теоретичні припущення, що напруга включення одноперехідного транзистора (ОПТ) типу КТ117 при опроміненні буде зростати, тому серійні ОПТ типу КТ117 можна окремо використовувати в якості сенсора радіації.

в) Експериментально підтверджено теоретичні припущення, що вихідна частота датчика радіації на базі одного промислового ОПТ типу КТ117 при опроміненні буде зростати. Тому релаксаційний генератор на базі одного ОПТ типу

КТ117 можна використовувати в якості датчика різних видів радіації, вихідним параметром якого є частота сигналу як функція потоку електронів, гамма-випромінювання або нейтронів. Однак такий перетворювач має недостатню чутливість та нелінійну вихідну характеристику, що є перешкодою для його широкого використання в цифрових мережах Інтернету речей, оскільки вимагає додаткових схем корекції лінійності вихідної характеристики.

В третьому розділі на основі досліджень методів покращення параметрів датчика радіації на базі ОПТ та дослідження конкретних способів поєднання датчика з цифровими системами мереж «Інтернету речей» зроблено висновки:

а) Експериментально підтверджено теоретичні припущення, що вихідна частота датчика радіації на базі двох промислових транзисторів: ОПТ типу КТ117 та МОН ПТ типу КП305 при опроміненні буде зростати сильніше, ніж у датчика на одному транзисторі. Датчик на двох транзисторах має лінійну вихідну характеристику. Для датчика радіації на базі двох транзисторів радіаційна чутливість становить $\beta = 712 \text{ Гц}\cdot\text{нм}^2$ в порівнянні з $\beta = 158 \text{ Гц}\cdot\text{нм}^2$ для датчика на одному ОПТ.

б) Релаксаційний генератор на базі двох транзисторів: ОПТ типу КТ117 та МОН ПТ типу КП305 можна використовувати в якості сенсора радіації з частотним виходом в цифрових мережах Інтернету речей, тому що він відповідає вимогам до датчиків цифрових мереж: має лінійну вихідну характеристику, достатню чутливість, малу споживану потужність, компактність, мінімальну кількість елементів та не потребує для виготовлення складних коштовних технологій.

г) Використання серійного малопотужного LoRaWAN модуля RFM6501W від компанії Nore RF для сполучення датчика іонізуючого випромінювання з цифровими мережами дозволяє отримати універсальний програмований пристрій моніторингу радіаційної обстановки, яке може працювати в будь-яких сенсорних мережах Інтернету речей.

Результати досліджень дозволяють рекомендувати використання датчика радіації на базі двох промислових транзисторів: ОПТ типу КТ117 та МОН ПТ типу КП305 для сенсорних мереж «Інтернету речей» в якості недорогих ефективних дозиметрів.

Результати роботи апробовані на X Міжнародної науково-практичної конференції «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє».

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Mahatab, T.A., Muradi, M.H., Ahmed, S., & Kafi, A. (2018). Design and Analysis of IoT Based Ionizing Radiation Monitoring System. 2018 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISSET), 432-436.
2. Torres-Hoyos F., Baena-Navarro R., Vergara-Villadiego J., Pérez Gómez A. Design and assembly of an IoT based device to determine Absorbed dose of gamma and UV radiation in skin. Proceedings of the ISSSD 2019, October 7 to 11th, 2019. Zacatecas, Zac. Mexico.
3. Gallego Manzano, L. & Boukabache, Hamza & Heracleous, S. & Murtas, Fabrizio & Perrin, Daniel & Pirc, Vasja & Alfaro, Alejandro & Zimmaro, Alessandro & Silari, Marco. (2021). An IoT LoRaWAN Network for environmental radiation monitoring. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. PP. 1-1. 10.1109/TIM.2021.3089776
4. Sharaf, A.; Zorkany, M.; Shiple, M. High efficient low-cost gamma-ray radiation sensor based on IoT platform. J. Radiat. Res. Appl. Sci. 2022, 15, 100463. [Google Scholar] [CrossRef]
5. Tran-Quang, V., Dao-Viet, H. An internet of radiation sensor system (IoRSS) to detect radioactive sources out of regulatory control. Sci Rep 12, 7195 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11264-y>
6. Román-Raya J. Light-Dependent Resistors as Dosimetric Sensors in Radiotherapy / I. Ruiz-García, P. Escobedo, A.J. Palma, et.al. // Sensors, – 2020, – Vol. 20, – P. 1568-1581; DOI:10.3390/s20061568.
7. Garcia-Moreno E. Floating Gate CMOS Dosimeter with Frequency Output / E. Isern, M. Roca, R. Picos, et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science, – 2012, – Vol. 59, – No. 2, – P. 373-378; DOI: 10.1109/TNS.2012.2184301.
8. Ilić S. Floating-Gate MOS Transistor with Dynamic Biasing as a Radiation Sensor / A. Jevtić, S. Stanković, G. Ristić // Sensors, – 2020, – Vol. 20, – No. 1, – P. 3329-3341; DOI: <https://doi.org/10.3390/s20113329>.
9. Hernández-Gutiérrez, C.A.; Avila-Avendano, C.; Solís-Cisneros, H.I.; Conde, J.; Sevilla-Camacho, P.Y.; Quevedo-López, M.A. Modeling and SPICE Simulation of the CdS/CdTe Neutron Detectors Integrated with Si-Poly TFTs Amplifiers. IEEE Trans. Nucl. Sci. 2022, 69, 1310–1315. [Google Scholar] [CrossRef]
10. Davidović V. NBTI and Irradiation Effects in P-Channel Power VDMOS Transistors / D. Danković, A. Ilić, I. Manić, et. al. // IEEE Trans. Nucl. Sci., – 2016, – Vol, 63, – P. 1268-1275; DOI:10.1109/TNS.2016.2533866.

11. Vikulin I. M., Gorbachev V. E., Verem'eva A. V., Markolenko P. Y. Radiation Sensors Based on Field-Effect and Unijunction Transistors //, / Journal of Communications Technology and Electronics, – 2018, – Vol. 63, – No. 4, – P. 399-402; DOI: 10.1134/S1064226918040137.

12. Vikulin I. M., Gorbachev V. E. Radiation Sensitive Detector Based on Field-Effect Transistors. Radioelectronics and Communications Systems. Allerton Press, Inc. // – 2017, – v. 60, – № 9, – p. 401-404. ISSN 0735-2727. DOI: 10.3103/S0735272717090035

13 Kaya S. FET-based radiation sensors with Er₂O₃ gate dielectric / A. Jaksic, R. Duane, N. Vasovic, et. al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Beam Interact. Mater. At.. – 2018. – V. 430. – P. 36 – 41.

14 Davidovi'c V. NBTI and Irradiation Effects in P-Channel Power VDMOS Transistors / D. Dankovi'c, A. Ili'c, I. Mani'c, et. al. // IEEE Trans. Nucl. Sci.. – 2016. – V. 63. – P. 1268 – 1275. Режим доступа: 10.1109/TNS.2016.2533866

15 Ilić S. Floating-Gate MOS Transistor with Dynamic Biasing as a Radiation Sensor / A. Jevtić, S. Stanković, G. Ristić // Sensors. – 2020. – V. 20. – № 1. – P. 3329 - 3341. Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/s20113329>

16 Garcia-Moreno E. Floating Gate CMOS Dosimeter With Frequency Output / E. Isern, M. Roca, R. Picos, et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2012. – V. 59. – № 2. – P. 373 – 378. Режим доступа: 10.1109/TNS.2012.2184301

17 Tidrov S. C. Ferroelectric radiation detector employing frequency modulated readout / F. Crowne, D. M. Pтperka, B. J. Rod // U.S. Patent 8,143,578 B2. – 2012. Mar. 27.

18 Radiation Sensors Based on Field-Effect and Unijunction Transistors // I. M. Vikulin, V. E. Gorbachev, P. Yu. Markolenko / Journal of Communications Technology and Electronics, © Pleiades Publishing, Inc. – 2018. – V. 63. – № 4, – P. 399 – 402.

19 Викулин И. М. Физика полупроводниковых приборов / И. М. Викулин, В. И. Стафеев. – М.: Радио и связь, 1990. – 264 с.

20 Ching H. L. Negative differential resistance and characteristic nonlinear electromagnetic response of a Topological Insulator [электронный ресурс] / H. L. Ching. – 2016. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1503.01097.pdf>

21 Philips Semiconductors. 2N2646 Silicon unijunction transistor; Datasheet Library. [электронный ресурс]. – 2019. Режим доступа: <https://datasheetspdf.com/pdf/490471/Philips/2N2646/1>

22 Silicon transistors. Motorola. 2N4949 Silicon PN unijunction transistor. Datasheet Library. [электронный ресурс]. – 2019. Режим доступа: <https://datasheetspdf.com/pdf/74715/MotorolaInc/2N4949/2>

23 Кулаков В. М. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / В. М. Кулаков, Л. Е. Ладыгин – М.: Сов. радио, 1980. – 264 с.

24 Довгаль В. А. Интернет Вещей: концепция, приложения и задачи / В. А. Довгаль, Д. В. Довгаль // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. Естественно-математические и технические науки. – 2018. – № 1 (216). – С. 129-135. Режим доступа: <http://vestnik.adygnet.ru>

25 Гаевский С. Чипсеты SX127x с радиоканалом LoRa: архитектура, управление и применение в системах связи / С. Гаевский // CHIP NEWS Украина. Инженерная микроэлектроника. – 2017. – № 3. – С. 12 - 15.

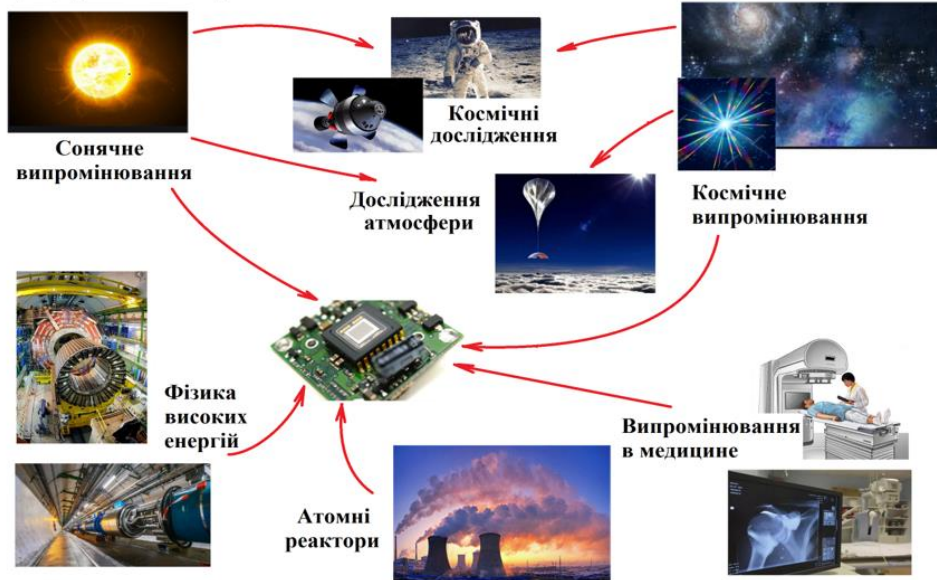
26 Гаевский С. Н. Построение корпоративной сети LoRaWAN с использованием открытого программного обеспечения / С. Н. Гаевский // CHIP NEWS Украина. Инженерная микроэлектроника. – 2017. – № 3. – С. 52 - 55. Режим доступа: <https://wireless-e.ru/gsm/postroenie-seti-lorawan/?link=1>.

27 Гаевский С. Миниатюрный LoRaWAN-модуль RFM6501W как уникальное решение для «Интернета вещей» [электронный ресурс] / С. Гаевский // CHIP NEWS Украина. – 2019. – № 3 (167). С. 1 - 9. Режим доступа: <https://wireless-e.ru/lorawan/rfm6501w/>

28 Шалагинов А. LPWA-сети на основе открытого стандарта LoRa / А. Шалагинов // Connect – WIT. Серия: Мир информационных технологий. [электронный ресурс]. – 2019. – № 1-2. – С. 38-40. Режим доступа: http://www.connect-wit.ru/wp-content/uploads/2019/03/01_64_Connect_1-2_19_Sm.pdf

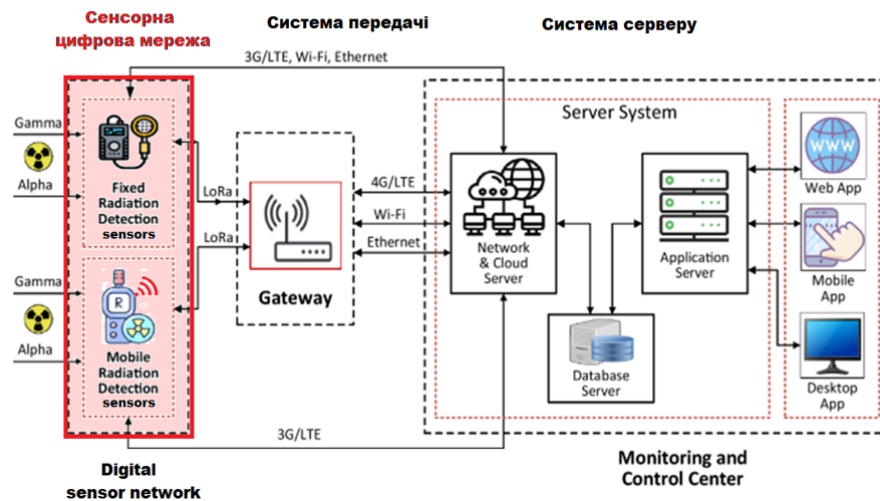
Додаток А
ПЕРЕЛІК КОПІЙ ДЕМОНСТРАЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

1 Радіаційні об'єкти діють на напівпровідникові пристрої цифрової мережі



Слайд А1 – Радіаційні об'єкти які діють напівпровідникові пристрої цифрової мережі (рис. 1.1 с. 12)

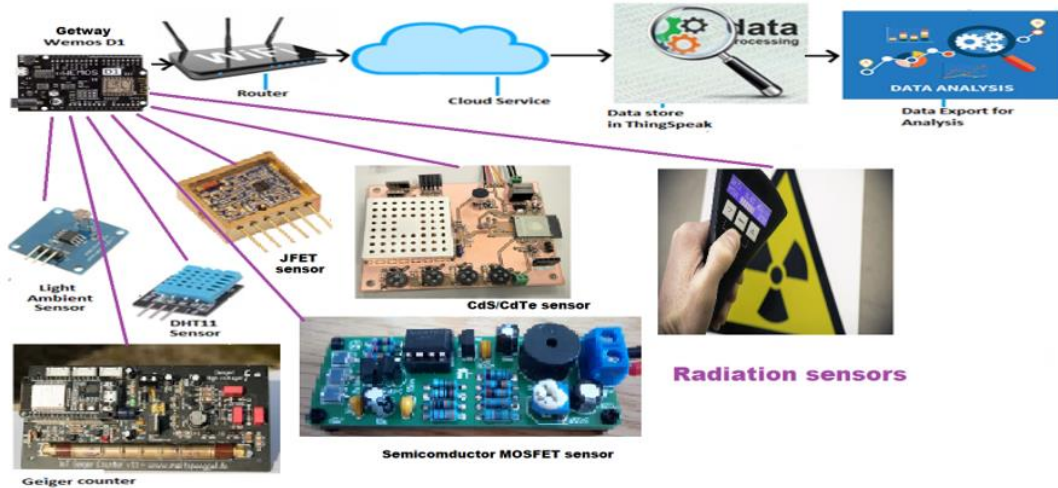
2 Сучасні системи моніторингу радіації мають поширену сенсорну мережу датчиків.



Слайд А2 – Сучасні системи моніторингу радіації (рис. 1.4 с. 23)

3 Сучасні конструкції датчиків радіації

для достатньої чутливості використовують складні технології і спеціальні компоненти, складаються з безліч деталей, тому **дуже дорогі**.



Тому, **дозиметри для сенсорних цифрових мереж повинні:**

- **бути сумісним з цифровою електронікою;**
- **мати мінімальну кількість елементів;**
- **бути недорогими;**
- **мати достатню чутливість.**

Мета роботи: дослідити при яких умовах дозиметр, який зібраний на базі промислових недорогих транзисторів, може бути використано для роботи в сучасних цифрових сенсорних мережах.

Слайд А3 – Сучасні конструкції датчиків радіації (рис. 1.2 с. 8, рис. 1.6 с. 32)

4 Чутливий елемент на базі MOSFET (метал-оксид-напівпровідникового польового транзистора)

використовується майже в усіх сучасних мікросбірках дозиметрів, тому що вони виготовляються по CMOS-технології.

Більш того, **MOSFET** – самий економічний і найбільш чутливий до дії радіації транзистор.

Тому була досліджена **теоретична модель вихідної характеристики дозиметра -**
(залежність струму насичення транзистора I_n від дози опромінення Φ):

$$I_n \uparrow = B \cdot n_{\Phi}^2 \cdot \mu_{\downarrow\Phi},$$

де B – постійна (не залежить від Φ); μ – рухливість електронів в каналі.
 При дії радіації в шарі оксиду і каналі створюються дефекти і виникає позитивний заряд, який збільшує концентрацію електронів $n_{\Phi} \uparrow$ в каналі:
 $n_{\Phi} \uparrow = n_0 \cdot \exp(K_1 \cdot \Phi \uparrow)$, $\mu_{\downarrow\Phi} = 1/(\mu_0^{-1} + K_2 \cdot \Phi \uparrow)$, тому $I_n \uparrow$ зростає!
 де K_1, K_2 – коефіцієнти радіаційної зміни концентрації і рухливості.

експериментальні розрахунки вихідної характеристики дозиметра
 проводилися за допомогою комп'ютерної моделі на мові C#.
 По параметрам транзистора КП305 з роботи [12] отримано графік залежності відносної зміни струму насичення MOSFET від дози опромінення Φ

Отримано що:

- вихідна характеристика дозиметра на MOSFET **нелінійна**, це потребує додаткових систем корекції, що мають велику кількість елементів.
- дозиметр має **аналоговий вихід**.

Слайд А4 – Чутливий елемент на базі MOSFET

5 при Порівняння блок-схем сполучення чутливих елементів з цифровими мережами видно

що Звичайний датчик на базі аналогового MOSFET сенсора має сім блоків:



Датчик з частотним виходом має лише чотири,

оскільки **не потребує підсилювачів, фільтрів і аналогово-частотних перетворювачів:**



Слайд А5 – Порівняння блок-схем сполучення чутливих елементів з цифровими мережами

Додаток Б

РОЗРОБЛЕНІ СКРИПТИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Моделювання експерименту дослідження параметрів аналогового сенсорного елемента:

```
using System;
using System.Windows.Forms.DataVisualization.Charting;

class Program
{
    static void Main()
    {
        // Значення констант
        double D = 14.35;
        double n = 25.17;
        double k = 2.5;

        // Значення переменной F
        double[] FValues = { 0, 0.1, 1, 10, 100 };

        // Создание объекта
        Chart chart = new Chart();
        chart.Size = new System.Drawing.Size(800, 600);

        // Добавление области
        ChartArea chartArea = new ChartArea();
        chart.ChartAreas.Add(chartArea);

        // Добавление серии данных
        Series series = new Series();
        series.ChartType = SeriesChartType.Line;

        // Вычисление значений функции для каждого значения F и добавление
их в серию данных
        foreach (double F in FValues)
        {
            double I = D * Math.Pow(n, 2) * Math.Exp(-2 * k * F);
            series.Points.AddXY(F, I);
        }

        // Добавление серии данных
        chart.Series.Add(series);
    }
}
```

```

// Создание формы для отображения
Form form = new Form();
form.Text = "График функции  $I=D*n^2*exp(-2*k*F)$ ";
form.Controls.Add(chart);

// Отображение формы
Application.Run(form);
}
}

```

Модуль база даних і обробка з системи Cloudfile

```

/* Private function prototypes -----*/
void SystemClock_Config(void);
static void MX_GPIO_Init(void);
static void MX_USART1_UART_Init(void);
static void MX_ADC1_Init(void);
static void MX_TIM3_Init(void);
/* USER CODE BEGIN PFP */

unsigned int value [3];
unsigned int max_value;
volatile unsigned int i = 0;
volatile unsigned int i_sample;
volatile unsigned int i_max = 3;
volatile unsigned int j = 0;

/* Analog Watchdog interrupt service routine */
void HAL_ADC_LevelOutOfWindowCallback(ADC_HandleTypeDef* hadc){
if(hadc->Instance == ADC1){

    value[i] = HAL_ADC_GetValue(&hadc1);    // Read the ADC
    if(i == i_max){
        i = 0;
        // Find the greatest of 3 numbers
        max_value = value [0];
        for(j=1;j<=i_max;j++){
            if(value[j]>max_value){
                max_value = value[j];
            }
        }
    }
    }else{
        i++;
    }
    HAL_ADC_Start_IT(&hadc1);
}
}

void HAL_UART_RxCpltCallback (UART_HandleTypeDef *huart){
printf("%c\n\r",buffer);
HAL_UART_Receive_IT(&huart1,(uint8_t *)&buffer,1);
}

```