

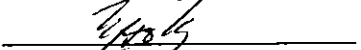
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МЕДИЦИНІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

УДК 621.396

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри
комп'ютерних технологій у
медицині та телекомунікаціях

к.т.н., доц. Чухов В.В.



« 19 » 12 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему "Дослідження можливості застосування радіомодулів NRF24L01 у
сенсорній мережі."

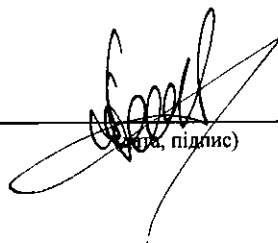
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
освітній ступінь «магістр»

Виконавець роботи
студент 2 курсу, гр.ТРМ-22-1


(дата, підпис)

Макарик Ю. С.

Керівник роботи
к-т техн. наук, доцент


(дата, підпис)

Андреев О.В.

Житомир 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МЕДИЦИНІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему "Дослідження можливості застосування радіомодулів NRF24L01 у
сенсорній мережі."

Виконав: студент 2 курсу,
групи ТРм-22-1 спеціальності

172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Макарик Ю. С.

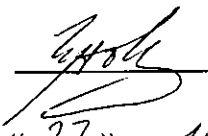
Керівник Андрєєв О. В.

Рецензент _____

Житомир 2023

«Затверджено»

Завідувач кафедри комп'ютерних
технологій у медицині та
телекомунікаціях

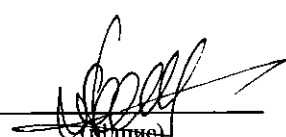
 Владислав ЧУХОВ
« 27 » 10 2022 р.

Завдання на кваліфікаційну магістерську роботу

Макарику Юрію Сергійовичу

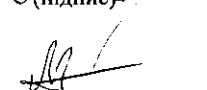
1. Тема роботи: Дослідження можливості застосування радіомодулів NRF24L01 у сенсорній мережі
затверджено наказом по університету від « 22 » листопада 2022 р. № 679
2. Мета дослідження: визначення можливості застосування радіомодулів NRF24L01 для розгортання сенсорної мережі
3. Вихідні дані (характеристики об'єкта, умов дослідження та ін.: частотний діапазон – 2,4, ..., 2,525 ГГц, ширина радіоканалу – 1 МГц, тип модуляції – GFSK, рівень потужності передавача -18, -12, -6, 0 дБм, чутливість приймача -82 дБм, коефіцієнт підсилення антени – 2 дБм;
4. Основні задачі дослідження: розробити методику розрахунку площі розгортання бездротової сенсорної мережі з використанням радіомодулів NRF24L01. Розробити проект IoT з передаванням через шлюз вимірів датчика вуглеводних сполук у хмарний сервіс та визначити максимальне віддалення шлюзу від сенсорної мережі з використанням радіомодулів NRF24L01;
5. Термін подання роботи до захисту: 2 грудня 2023 р.
6. Дата видачі завдання « 27 » жовтня 2022 р.

Науковий керівник
К-т техн. наук, доцент


(підпис)

Андреев О.В.
(прізвище, ініціали)

Завдання прийняв
до виконання


(підпис)

Макарик Ю.С.
(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота присвячена дослідження можливості застосування радіомодулів NRF24L01 у сенсорній мережі.

Основною метою роботи є визначення максимального віддалення шлюзу для доступу в інтернет та розрахунок площі розгортання бездротової сенсорної мережі на основі радіомодулів NRF24L01. Проведена практична перевірка роботи проекту IoT на основі радіомодулів NRF24L01 з передаванням через шлюз вимірів датчика вуглеводних сполук у хмарний сервіс.

ANNOTATION

The qualification paper is devoted to investigating the possibilities of applying NRF24L01 radio modules in a sensor network.

The main goal of the work is to determine the maximum range of the gateway for internet access and calculate the deployment area for a wireless sensor network based on NRF24L01 radio modules. A practical test of the IoT project is conducted using NRF24L01 radio modules, transmitting sensor measurements through the gateway to a cloud service.

РЕФЕРАТ

Мета магістерської атестаційної роботи полягає у визначенні можливості застосування радіомодулів NRF24L01 у сенсорній мережі, розробці методики розрахунку площі розгортання бездротової сенсорної мережі та створення IoT проєкту з передаванням даних через шлюз до хмарного сервісу.

Обсяг атестаційної магістерської роботи - 64 сторінки. Робота складається з чотирьох розділів та містить 12 рисунків, 1 таблицю, 5 додатків та 12 джерел згідно з переліком посилань.

У першому розділі проведено огляд літературних джерел, де розглянуті питання, такі як поняття сенсорної мережі, її можливості, з чого вони складаються, що необхідно для роботи та розглянуті основні стандарти.

У другому розділі проведено розробку моделі та вибір основних компонентів для визначення параметрів мікроклімату. Розроблена структурна схема та алгоритм роботи системи, вибрані компоненти для пристрою та розроблена електрична принципова схема.

У третьому розділі описана розробка IoT системи моніторингу, включаючи методику визначення концентрації газу та налаштування пристрою для роботи сенсорної мережі.

Четвертий розділ містить методику розрахунку площі розгортання сенсорної мережі. Проведено розрахунки максимальної дальності передачі, втрат при передачі на відстань у певній місцевості та проаналізовано отримані дані з розрахунків, що дозволяє зробити висновки щодо ефективності застосування радіомодулів NRF24L01 у сенсорній мережі.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ПОБУДОВИ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ.....	9
1.1 Бездротова сенсорна мережа.....	9
1.2 Датчики та їх типи	14
1.3 Хмарні сервіси	16
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ РОБОТИ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ	19
2.1 АЛГОРИТМ РОБОТИ.	19
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ІОТ ПРОЄКТУ	25
3.1 Налаштування хмарного сервісу «THINGSpeak»	25
3.2 Програма пристрою	26
3.3 Налаштування пристрою для роботи з сервісом «THINGSPEAK»	28
РОЗДІЛ 4 МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПЛОЩІ РОЗГОРТАННЯ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ	32
4.1 МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ ВТРАТ ТА ПЛОЩІ ПОКРИТТЯ	32
4.2 Обчислення втрат та площі покриття за методикою	33
4.3 Аналіз отриманих результатів	36
ВИСНОВКИ.....	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	38
ДОДАТОК А.....	40
ДОДАТОК Б	41
ДОДАТОК В	49
ДОДАТОК Г	54
ДОДАТОК Д.....	63

ВСТУП

У зв'язку з постійним розвитком сучасних технологій та зростанням інтересу до реалізації бездротових мереж у сферах інтернету речей (IoT) та сенсорних систем, особливо важливо дослідження можливостей та ефективності використання радіомодулів NRF24L01. Робота спрямована на вивчення можливостей застосування радіомодулів NRF24L01 у сенсорних мережах. Зосереджуючись на аспектах оптимізації площі розгортання та максимізації віддаленості між вузлами мережі, ми прагнемо визначити, наскільки ефективно ці радіомодулі можуть використовуватися для побудови сенсорних мереж. Дослідження планує врахувати технічні особливості NRF24L01, розробляючи методику для оптимального розташування сенсорів та передавання даних у хмарний сервіс через шлюз.

Метою дослідження є визначення можливості застосування радіомодулів NRF24L01 для розгортання сенсорної мережі.

Предмет досліджень - бездротова сенсорна мережа.

Об'єктом дослідження - методика визначення площі розгортання бездротової сенсорної мережі на основі радіомодулів NRF24L01.

Практичне значення одержаних результатів полягає у визначенні максимального віддалення шлюзу для доступу в інтернет з реалізацією IoT - проекту з використанням радіомодулів NRF24L01.

Наукова новизна полягає в розробці методики розрахунку площі розгортання сенсорної мережі з використанням радіомодулів NRF24L01, як із друкованою, так і зовнішньою антенами. Максимальне віддалення шлюзу для доступу в інтернет в бездротовій сенсорній мережі з використанням радіомодулів NRF24L01 було визначено практично шляхом реалізації IoT - проекту передавання вимірів датчика вуглеводних сполук у хмарний сервіс.

Результати магістерської роботи доповідались та обговорювались на VI всеукраїнській науково-технічній конференції «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення» у м. Житомир 29-30 листопада 2023 р.

Ключові слова: IoT, NRF24L01, бездротова сенсорна мережа.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ПОБУДОВИ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

1.1 Бездротова сенсорна мережа

Визначимо, що являє собою «Бездротова сенсорна мережа». Бездротові сенсорні мережі (WSN) відносяться до мереж просторово розосереджених і виділених датчиків, які контролюють і записують фізичні характеристики навколишнього середовища та передають зібрані дані в центральний пункт розташування. WSN можуть вимірювати умови навколишнього середовища, такі як температура, шум, рівень забруднення, вологість і вітер, сейсмічна активність, тощо. [1]

Вони схожі на бездротові ad-hoc мережі в тому сенсі, що вони покладаються на бездротове підключення та спонтанне формування мереж, щоб дані датчиків могли передаватись бездротовим способом. WSN контролюють фізичні умови, такі як температура, звук і тиск. Сучасні мережі є двонаправленими: вони збирають дані і дозволяють контролювати роботу датчиків [2]. Розробка цих мереж була мотивована військовими застосуваннями, такими як спостереження на полі бою [3]. Такі мережі використовуються в промислових і споживчих програмах, таких як моніторинг і контроль промислових процесів, моніторинг стану машин і сільське господарство.

WSN складається з «вузлів» – від кількох до сотень або тисяч, де кожен вузол підключений до інших датчиків. Кожен такий вузол зазвичай складається з кількох частин: радіопередавача з внутрішньою антеною або з'єднанням із зовнішньою антеною, мікроконтролера, електронної схеми для взаємодії з датчиками та джерела енергії, як правило, батареї або вбудованої форми збору енергії ззовні. Розмір сенсорного вузла може змінюватися від коробки для взуття до (теоретично) порошинки, хоча мікроскопічні розміри ще не визначені. Вартість сенсорного вузла так само змінна і варіюється від декількох до сотень доларів, залежно від складності вузла. Обмеження розміру та вартості обмежують такі

ресурси, як енергія, пам'ять, швидкість обчислення та пропускна здатність зв'язку. Топологія WSN може варіюватися від простої зіркової мережі до розширеної бездротової сітчастої мережі з кількома стрибками. Розповсюдження може використовувати маршрутизацію або заповнення [4].

Існує кілька бездротових стандартів і рішень для підключення сенсорних вузлів. Thread і Zigbee можуть підключати датчики, що працюють на частоті 2,4 ГГц зі швидкістю передачі даних 250 Кбіт/с. Багато хто використовує нижчу частоту для збільшення радіусу дії (зазвичай 1 км), наприклад, Z-wave працює на частоті 915 МГц, а в ЄС широко використовується 868 МГц, але вони мають нижчу швидкість передачі даних (зазвичай 50 кбіт/с). Робоча група IEEE 802.15.4 надає стандарт для підключення пристроїв з низьким енергоспоживанням, і зазвичай датчики та розумні лічильники використовують один із цих стандартів для підключення. З появою Інтернету речей було зроблено багато інших пропозицій щодо підключення датчиків. LoRa є формою LPWAN, яка забезпечує бездротове підключення пристроїв великої дальності з низьким споживанням енергії, що використовується в інтелектуальних лічильниках та інших датчиках великої дії. Wi-SUN підключає пристрої вдома[5]. NarrowBand IOT і LTE-M можуть підключати до мільйонів датчиків і пристроїв за допомогою мобільних технологій.

Для організації бездротової сенсорної мережі мережі малого радіусу дії можливо також використання радіомодулів NRF24L01. На одній частоті можуть працювати до 6 передавачів і 1 приймач (рис. 1.1). При цьому кожному передавачу присвоюється свій унікальний ідентифікатор («Pipe ID» або «Ідентифікатор труби»), а приймачу необхідно привласнити всі ідентифікатори тих передавачів, від яких він буде приймати дані.

Кожен ідентифікатор представляє з себе довільне число, що складається з 5 байт, але він повинен задаватися за певними правилами, а саме:

- на одному і тому ж каналі ідентифікатор кожного передавача повинен бути обов'язково унікальним;
- щоб приймач міг приймати дані від передавачів, йому повинні бути вказані їх ідентифікатори;

- ідентифікатори Pipe0 і Pipe1 повинні відрізнятися всіма п'ятьма байтами, наприклад, Pipe0= 0x7878787878 , а Pipe1= 0xB4B5B6B7F1;
- ідентифікатори Pipe2 - Pipe5 повинні відрізнятися від Pipe1 тільки останнім байтом, наприклад: Pipe1= 0xB4B5B6B7F 1;
Pipe2 = 0xB4B5B6B7CD; Pipe3 = 0xB4B5B6B7A3;
Pipe 4 = 0xB4B5B6B70F; Pipe 5 = 0xB4B5B6B705.

NFR24L01 можна зустріти в таких пристроях, як бездротова клавіатура, миша, джойстик; системи охорони та бездротового доступу; системи спостереження і моніторингу; радіокеровані іграшки та багато іншого.

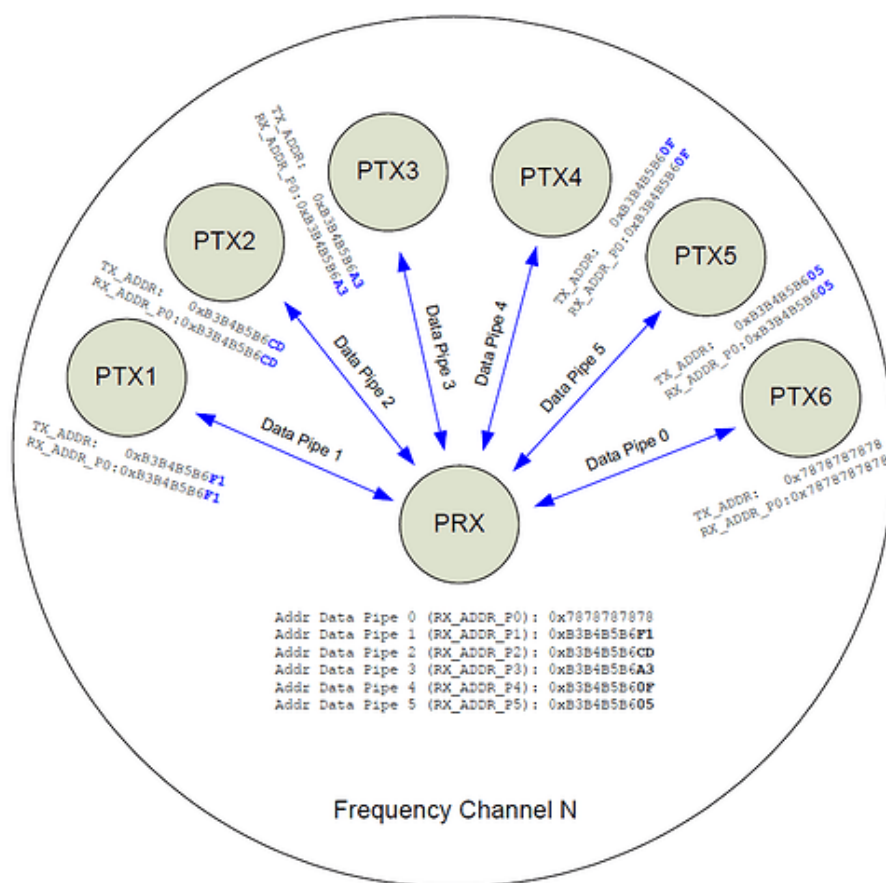


Рисунок 1.1 – Організації міні-мережі NRF24L01

Технічні характеристики модуля NRF24L01[9]:

- напруга живлення 1,9В - 3,6;

- струм живлення: при вихідній потужності 0 дБм - 11,3 мА; при вихідній потужності -18 дБм - 7,0 мА; у режимі приймання на швидкості 2 Мбіт/сек - 12,3 мА; у режимі Standby- 32 мкА;
 - частота прийому та передачі 2,4,...,2,525 ГГц;
 - час перемикання між каналами 130 мкс;
 - тип модуляції: GFSK;
 - девіація частоти : ± 160 кГц при швидкості передачі даних 1Мбіт/с;
 ± 320 кГц при швидкості передачі даних 2Мбіт/с ;
 - швидкість передачі даних: 0.25, 1, 2 Мбіт/с (задається програмно);
 - потужність передавача: -18, -12, -6, 0 дБм (задається програмно);
 - ширина одного радіоканалу 1МГц (на швидкості 2 Мбіт/сек використовується 2 канали);
 - чутливість приймача: -82 dBm;
 - коефіцієнт посилення антени: 2dBi;
- діапазон робочої температури -40°C , ..., 85°C .

Споживання енергії сенсорним пристроєм має бути мінімізоване, а сенсорні вузли мають бути енергоефективними, оскільки їхній обмежений енергетичний ресурс визначає термін їх служби. Щоб заощадити електроенергію, бездротові сенсорні вузли зазвичай вимикають як радіопередавач, так і радіоприймач, коли вони не використовуються.

Бездротові сенсорні мережі складаються з неконтрольованих сенсорних вузлів низької енергії, малого розміру та малого радіусу дії. Нещодавно було помічено, що періодично вмикаючи та вимикаючи можливості зондування та зв'язку сенсорних вузлів, ми можемо значно скоротити активний час і таким чином подовжити термін служби мережі [6]. Однак таке циклічне виконання роботи може призвести до високої затримки мережі, витрат на маршрутизацію та затримок виявлення сусідів через асинхронне планування сну та пробудження. Ці обмеження вимагають контрзаходів для бездротових сенсорних мереж з робочим циклом, які повинні мінімізувати інформацію про маршрутизацію, навантаження трафіку

маршрутизації та споживання енергії. Дослідники з Університету Sungkyunkwan запропонували спрощену маршрутизацію з інтервалом затримки доставки без збільшення, яка називається LNDIR. Ця схема може виявляти маршрути з мінімальною затримкою в кожному незростаючому інтервалі затримки доставки замість кожного часового інтервалу. Експерименти з моделюванням продемонстрували ефективність цього нового підходу щодо мінімізації інформації про маршрутизацію, що зберігається на кожному датчику. Крім того, ця нова маршрутизація також може гарантувати мінімальну затримку доставки від кожного джерела до приймача. Спостерігається підвищення продуктивності до 12 і 11 разів відповідно до зменшення навантаження на маршрутний трафік та енергоефективності порівняно з існуючими схемами [7].

Операційні системи для вузлів бездротової сенсорної мережі зазвичай менш складні, ніж операційні системи загального призначення. Вони більше нагадують вбудовані системи з двох причин. По-перше, бездротові сенсорні мережі зазвичай розгортаються з урахуванням конкретного застосування, а не як загальна платформа. По-друге, потреба в низьких витратах і низькій потужності призводить до того, що більшість бездротових сенсорних вузлів мають малопотужні мікроконтролери, що гарантує, що такі механізми, як віртуальна пам'ять, або непотрібні, або занадто дорогі для впровадження.

Онлайн-платформи спільного керування даними датчиків. Платформи спільного керування даними датчиків у режимі онлайн — це служби баз даних у режимі онлайн, які дозволяють власникам датчиків реєструвати та підключати свої пристрої для передачі даних у онлайн-базу даних для зберігання, а також дозволяють розробникам підключатися до бази даних і створювати власні програми на основі цих даних. Такі платформи спрощують онлайн-співпрацю між користувачами над різноманітними наборами даних, починаючи від даних про енергетику та навколишнє середовище до даних, зібраних транспортними службами. Інші послуги включають можливість розробникам вбудовувати графіки та віджети в реальному часі на веб-сайти; аналізувати та обробляти історичні дані,

отримані з каналів даних; надсилати сповіщення в реальному часі з будь-якого потоку даних для керування сценаріями, пристроями та середовищами.

1.2 Датчики та їх типи

Датчик - це пристрій, який виробляє вихідний сигнал з метою сприйняття фізичного явища.

У найширшому розумінні датчик - це пристрій, модуль, машина або підсистема, яка виявляє події чи зміни в навколишньому середовищі та надсилає інформацію іншій електроніці, часто комп'ютерному процесору.

Датчики використовуються в повсякденних предметах, таких як сенсорні кнопки ліфта (тактильний датчик) і лампи, які тьмяніють або стають яскравішими від дотику до основи, і в незліченних застосуваннях, про які більшість людей навіть не підозрюють. З прогресом у мікромашинах і простих у використанні платформах мікроконтролерів використання датчиків вийшло за межі традиційних областей вимірювання температури, тиску та потоку [8], наприклад, у датчиках MARG.

Аналогові датчики, такі як потенціометри та резистори вимірювання сили, все ще широко використовуються. Їх застосування включає виробництво та машинобудування, літаки та космонавтика, автомобілі, медицина, робототехніка та багато інших аспектів нашого повсякденного життя. Існує широкий спектр інших датчиків, які вимірюють хімічні та фізичні властивості матеріалів, включаючи оптичні датчики для вимірювання показника заломлення, вібраційні датчики для вимірювання в'язкості рідини та електрохімічні датчики для моніторингу рН рідин.

Чутливість датчика вказує, наскільки змінюється його вихід при зміні вхідної величини, яку він вимірює. Наприклад, якщо ртутний стовпчик у термометрі переміщується на 1 см, коли температура змінюється на 1 °C, його чутливість становить 1 см/°C (це в основному нахил dy/dx за умови лінійної характеристики). Деякі датчики також можуть впливати на те, що вони вимірюють; наприклад, термометр кімнатної температури, вставлений у чашку з гарячою рідиною, охолоджує рідину, а рідина нагріває термометр. Датчики зазвичай

розроблені таким чином, щоб мати незначний вплив на те, що вимірюється; зменшення розміру датчика часто покращує це та може надати інші переваги.

Для вимірів якості повітря було обрано датчик газу з серії «MQ», а саме «MQ-2». Датчик MQ-2 має діапазон чутливості до 10000 ppm та здатний виявляти багато типів газів, у тому числі зріджений вуглеводний газ (LPG), пропан, водень або інший горючий газ, дим, чадний газ.



Рисунок 1.2 - Модуль датчику вуглеводневих сполук MQ-2

Характеристики датчику MQ-2:

- Газ, що детектується - Горючий газ, дим;
- діапазон чутливості: 300-10000 ppm;
- R_s (опір чутливого елемента): 1 ... 20 кОм 50ppm толуол;
- газ, до якого нормується датчик: Ізобутан, 1000ppm;
- час відгуку ≤ 10 с;
- чутливість (R в повітрі) / (R в присутності характерного газу) ≥ 5 с;
- R_h (опір нагрівача) $31\Omega \pm 3\Omega$;
- I_h (струм нагрівача) ≤ 180 мА;
- V_h (напруга нагрівача) $5V \pm 0,2 V$;
- P_h (потужність нагрівача) ≤ 900 мВт;
- V_c (напруга схеми) $\leq 24V$;
- стандартні робочі умови Температура: $-10 \sim + 50^\circ C$, вологість: $\leq 95\% RH$, концентрація кисню: 21% (стандартні умови).

Даний датчик має високу чутливість до зрідженого вуглеводного газу, пропану, водню, може бути використаний для іншого горючого газу. Основними перевагами даного датчику є тривалий термін служби, низька вартість та проста схема керування [11].

Для вимірювання різних видів газів датчик використовує невеликий нагрівач у поєднанні з електрохімічним датчиком, який змінює свій внутрішній опір R_S відповідно до наявної концентрації певного газу. Для регулювання чутливості датчику послідовно з сенсором включається змінний резистор з навантаженням R_L , опір якого може змінюватись від 2 кОм до 47 кОм.

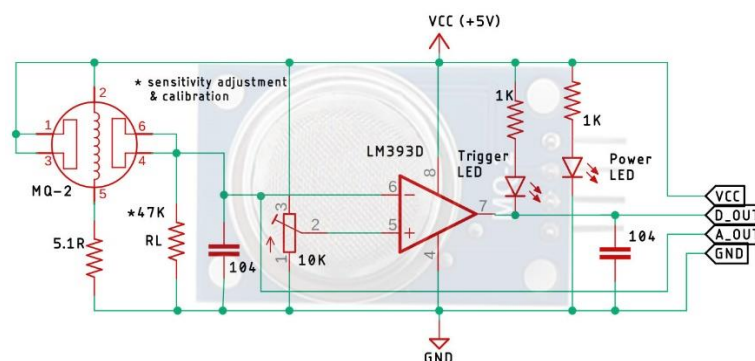


Рисунок 1.3 - Електрична принципова схема модулю сенсора MQ-2

Для роботи нагрівального елементу всередині модуль потребує джерела живлення з вихідною напругою 5 В та потужністю 1 Вт.

1.3 Хмарні сервіси

Хмарні сервіси для бездротових сенсорних мереж - це технології, що дозволяють зберігати, обробляти та передавати дані, отримані від сенсорних вузлів, використовуючи хмарні платформи та інтернет. Ці технології мають багато переваг, таких як:

- Масштабованість. Хмарні сервіси дозволяють легко додавати або видаляти сенсорні вузли, змінювати їх конфігурацію та параметри, а також забезпечувати їх автоматичне управління та оновлення.

- Еластичність. Хмарні сервіси дозволяють адаптувати ресурси та обчислювальні потужності в залежності від потреб та навантаження сенсорних мереж, а також оптимізувати використання енергії та пам'яті.

- Доступність. Хмарні сервіси дозволяють забезпечити надійний та безперебійний доступ до даних сенсорних мереж з будь-якого місця та пристрою, а також гарантувати їх захист від втрати, пошкодження або крадіжки.

- Аналітика. Хмарні сервіси дозволяють проводити ефективну та швидку обробку та аналіз даних сенсорних мереж, використовуючи різні алгоритми, моделі та інструменти, а також візуалізувати та представляти результати у зручному форматі.

Один з прикладів хмарних сервісів для бездротових сенсорних мереж - це ThingSpeak, який дозволяє збирати, зберігати, аналізувати та візуалізувати дані з різних сенсорів, таких як температура, вологість, світло, звук, рух тощо. ThingSpeak надає можливість створювати канали, які представляють сенсорні дані, та використовувати різні функції, такі як:

- TimeControl - для встановлення часових інтервалів для збору та відображення даних.

- React - для виконання дій на основі умов, таких як надсилання повідомлень, включення або вимкнення пристроїв, запуск алгоритмів тощо.

- MATLAB Analysis - для обробки та аналізу даних за допомогою мови програмування MATLAB, яка дозволяє використовувати різні математичні, статистичні та машинне навчання функції.

- MATLAB Visualizations - для візуалізації даних за допомогою графіків, діаграм, карт, теплових карт тощо.

Інші приклади хмарних сервісів для бездротових сенсорних мереж - це:

- IBM Watson IoT Platform - хмарний сервіс від IBM, що дозволяє підключати, керувати та аналізувати сенсорні пристрої з використанням хмарних сервісів IBM, таких як IBM Cloudant, IBM Bluemix, IBM Watson та інші. IBM Watson IoT Platform надає можливість використовувати різні протоколи зв'язку, такі як MQTT, HTTP та WebSockets, а також застосовувати шифрування, аутентифікацію та авторизацію для сенсорних даних.

- Firebase - хмарний сервіс від Google, що дозволяє створювати, розгортати та масштабувати мобільні та веб-додатки, які використовують сенсорні дані.

Firebase надає можливість використовувати різні хмарні сервіси Google, такі як Google Cloud Storage, Google Cloud Functions, Google Cloud Messaging, Google Analytics та інші. Firebase надає можливість використовувати різні протоколи зв'язку, такі як HTTP, WebSocket та XMPP, а також застосовувати шифрування, аутентифікацію та авторизацію для сенсорних даних.

ThingSpeak – це платформа Інтернету речей (IoT) в хмарі, яка надає можливість збирати, відображати та аналізувати поточні дані. Вона дозволяє передавати дані до ThingSpeak з різних пристроїв, конфігурувати їх відображення в реальному часі та відсилати повідомлення через Twitter та Twilio [10].

За допомогою ThingSpeak користувачі можуть відправляти дані з своїх IoT-пристроїв до хмарного сервісу, зберігати їх, візуалізувати та аналізувати, а також взаємодіяти з іншими веб-сервісами і соціальними мережами. Платформа також має вбудовані інструменти аналізу даних за допомогою мови програмування MATLAB.

ThingSpeak дозволяє інженерам та розробникам створювати та вдосконалювати IoT-системи, не заморочуючись на складних налаштуваннях серверів чи розробці власних веб-додатків.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ РОБОТИ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

2.1 Алгоритм роботи.

Алгоритм роботи пристрою є наступним:

Від моменту запуску проводиться ініціалізація усіх необхідних об'єктів, структур, та змінних прилад встановлює режим роботи в залежності від його налаштувань.

Якщо прилад не налаштовано – відповідно він і не буде виконувати ніяких замірів та не пересилатиме дані до хмарного сервісу, а буде лише активовано точку доступу та запущено веб сервер, після підключення до якого буде відображено сторінку для внесення нових параметрів. Після внесення усіх необхідних змін прилад запише отримані дані внесені користувачем з веб-серверу, відповідно обробить їх та запише у пам'ять для подальшої роботи .

Якщо прилад налаштовано в режим роботи передавача – виконується зчитування з пам'яті записаних раніше параметрів та кінцеве доналаштування приладу відповідно до режиму роботи, знову створюється точка доступу та запускається веб сервер для внесення, якщо потрібно, змін і запускається таймер, кінець відліку якого завершить роботу точки доступу та веб серверу. Після проведення усіх налаштувань виконується циклічна робота, де виконується перевірка двох умов: чи час робити заміри і чи не надійшли ще данні від вузлів нижчого рангу. За виконанні умови для отримання замірів виконується зчитування даних від датчику, їх відповідна обробка та надсилання отриманих показників до шлюзу через вузли рангом вище.

Якщо прилад налаштовано в режим роботи шлюзу – також виконується доналаштування, відкриття точки доступу, веб серверу, створення таймеру, але ще додатково виконується підключення до зовнішньої мережі Wi-Fi, яка має мати доступ до мережі Інтернет. У випадку, якщо підключення не вдається, програма буде циклічно продовжувати намагатись встановити підключення до мережі. За

вдаого старту програма перейде до циклічного виконання, де буде так само перевіряти дві умови: чи час виконувати заміри і чи надійшли данні з вузлів нижчого рангу. За виконання умови для замірів буде виконане зчитування та оброблення даних з датчику, але дані вже будуть надсилать у хмарний сервіс. При виконанні умови надходження даних ззовні буде виконана їх обробка та надсилання у хмарний сервіс.

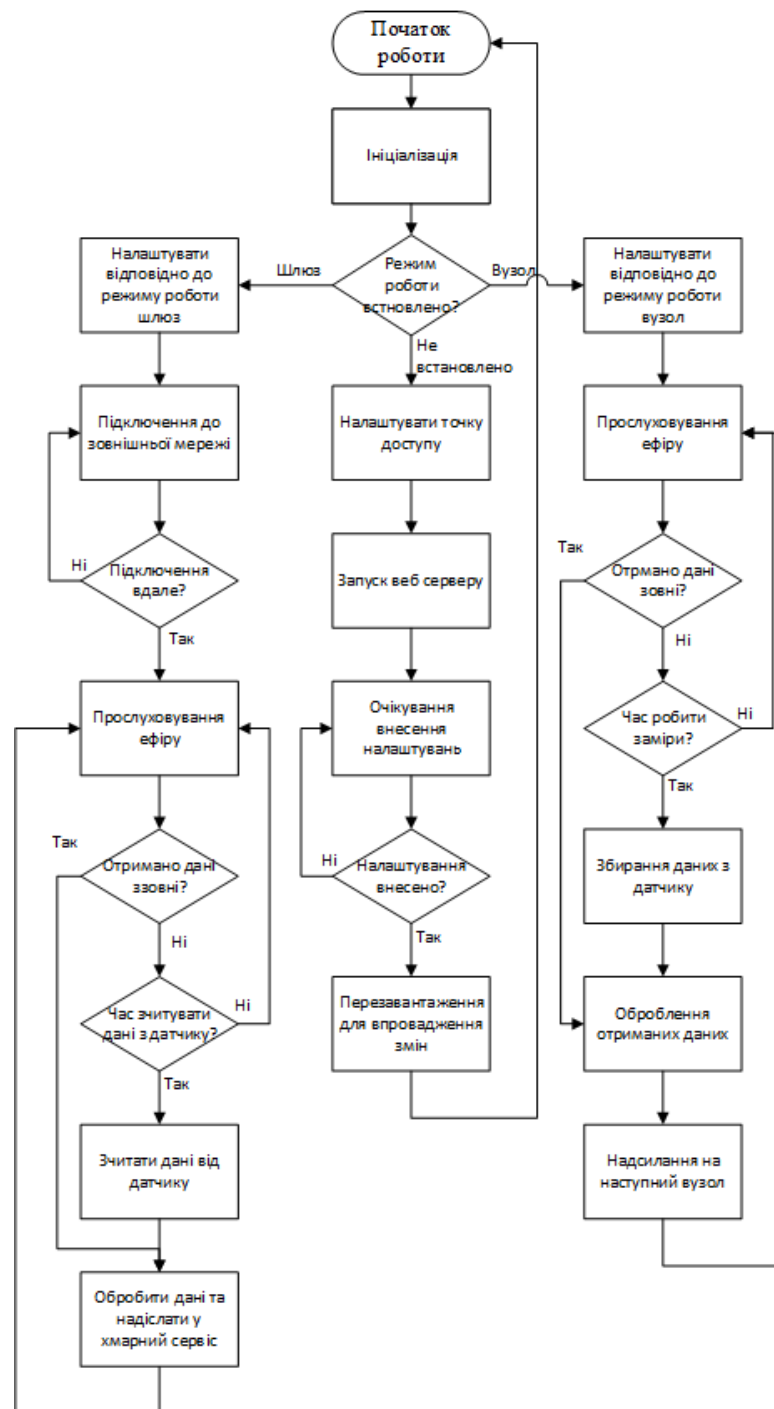


Рисунок 2.1 - Алгоритм роботи пристрою

Для керування пристроєм було обрано модуль ESP8266 версії ESP-12E. Цей модуль оснащений 32-бітним мікропроцесором Tensilica L106, тактується на частоті 80 МГц і має підтримку 160 МГц. Має вбудовану антену та підтримує бездротовий протокол 802.11 b/g/n, що дає можливість підключати його до WiFi мережі або використовувати цей модуль як точку доступу; об'єм Flash-пам'яті у розмірі 4 Мб та можливість розширення до 16 Мб зовнішньої пам'яті дозволяє без проблем завантажувати в нього «громізки» скетчі та навіть звуки та зображення, а звдяки цим характеристикам можна створювати веб-сервери для відображення деякої інформації [12].

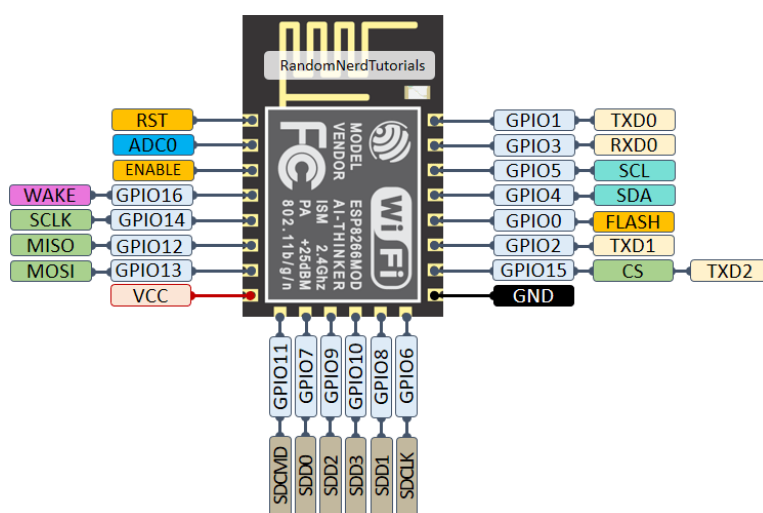


Рисунок 2.2 - ESP-12E та розташування його пінів

Щоб сигнал аналогового датчика використовувався в цифровому обладнанні, його потрібно перетворити на цифровий сигнал за допомогою аналого-цифрового перетворювача. Принципова схема пристрою контролю чадного газу наведена у додатку А.

Аби визначити внутрішній опір RS сенсору MQ2 потрібно врахувати, що вихід датчику являє собою дільник напруги джерела живлення V_{cc} , який створюється опором RS та послідовним включенням опору RL. Так як значення опору RL нам відоме і воно є сталим, то опираючись на значення вихідної напруги датчика можна розрахувати опір RS:

$$RS = \left(\frac{V_{in}}{V_{out}} - 1 \right) \cdot RL \quad (2.1)$$

На рисунку 2.2 відображено графік, що відтворює залежність концентрації газу в частках на мільйон (ppm) від відношення опорів R_S/R_0 , де R_0 - опір датчика у чистому повітрі. Отже, для визначення концентрації чадного газу необхідно встановити значення опору R_0 датчика у чистому повітрі.

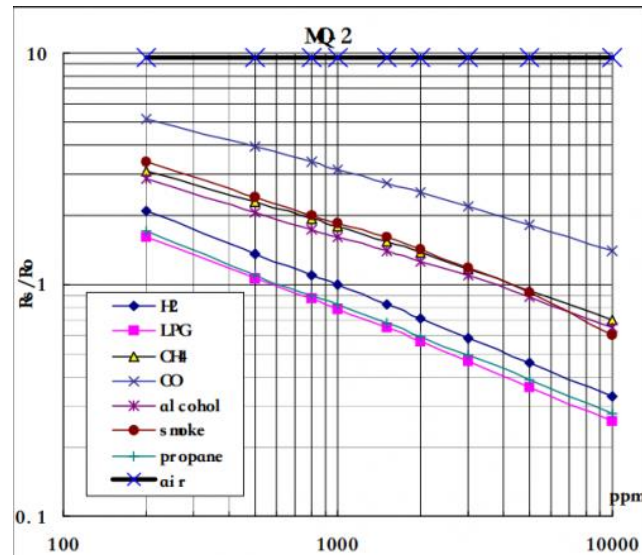


Рисунок 2.3 - Типова характеристика чутливості сенсору MQ-2

Для цього ми використали мультиметр для вимірювання опору резистору навантаження на платі датчика MQ-2, який склав $R_L=2\text{кОм}$. Потім датчик було підключено до джерела живлення з $V_{in}=5\text{В}$ і залишено прогріватися у середовищі з чистим повітрям протягом однієї години. Після цього, через годину, була виміряна напруга на виході датчика, яка склала $V_{out} = 0,138\text{В}$. Далі був розрахований опір сенсора R_S за (2.1).

$$R_S = \left(\frac{5}{0,138} - 1 \right) \cdot 2 = 70,5\text{кОм}.$$

З рисунку 2.8 видно, що у чистому повітрі відношення $\frac{R_S}{R_0} = 9,8$. Тоді значення опору R_0 у чистому повітрі:

$$R_0 = \frac{R_S}{9,8} = \frac{70,5}{9,8} = 7,2\text{кОм}.$$

При відомому значенні опору датчику R_0 у чистому повітрі можна, згідно рисунку 2.3, визначити значення концентрації газу, яке відповідає розрахованому

відношенню виміряного значення внутрішнього опору датчика RS до опору датчика у чистому повітрі $R0$.

Згідно формули для розрахунку виміряного значення внутрішнього опору датчика RS необхідно виміряти поточне значення напруги на виході датчика. Для вимірювання напруги підключимо аналоговий вихід датчика газу MQ-2 до входу A0 вбудованого 10-ти бітного АЦП плати ESP-12E. Тоді поточне значення вихідної напруги датчика можна розрахувати за формулою:

$$V_{out} = \frac{V_{adc} \cdot V_{ref}}{2^n}, \quad (2.2)$$

V_{adc} – цифровий код на виході АЦП;

V_{ref} – опорна напруга АЦП, яка дорівнює напрузі V_{in} ;

n – розрядність АЦП.

Графік залежності концентрації газу від відношення $\frac{RS}{R0}$ на рисунку 2.3 подано у логарифмічному масштабі, тобто :

$$\log(y) = m \cdot \log(x) + b, \quad (2.3)$$

де y – відношення опорів $RS/R0$;

x – значення концентрації газу в ppm;

m – нахил лінії;

b – точка, де графік функції перетинає вісь Y.

Нахил лінії розраховується за виразом:

$$m = \frac{\log(y_2) - \log(y_1)}{\log(x_2) - \log(x_1)}, \quad (2.4)$$

де x_1 – X координата точки початку лінії на графіку;

y_1 – Y координата точки початку лінії на графіку;

x_2 – X координата точки кінця лінії на графіку;

y_2 – Y координата точки кінця лінії на графіку.

Згідно рис. 2.3 початкова точка (x_1, y_1) має координати $(200; 5,17)$, а координати кінцевої точки (x_2, y_2) становлять $(10000; 1,49)$. Тоді, згідно (2.4):

$$m = \frac{\log(1,49) - \log(5,17)}{\log(10\,000) - \log(200)} = -0,32.$$

Після розрахунку нахилу лінії m можна визначити з виразу (2.3) значення b :

$$b = \log(y_0) - m \cdot \log(x_0), \quad (2.5)$$

де: (x_0, y_0) – координати точки, що відповідає середині графіку.

Координати точки, що відповідає середині графіку (рисунок 2.3) становлять $(5000; 1,85)$. Тоді згідно (2.5):

$$b = \log(1,85) - m \cdot \log(5000) = 1,44.$$

Отже, як передус з виразу (3), $\log(x) = \frac{\log(y)-b}{m}$, а виміряне значення концентрації газу у ppm може бути визначено згідно виразу:

$$x = 10^{\frac{\log(y)-b}{m}} = 10^{\frac{\log(RS/R_0)-b}{m}}. \quad (2.6)$$

Дані для розрахунку концентрації газів, такі як значення точок кривих, розраховані значення m та b було занесено до таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Дані для розрахунку концентрації газу

Назва кривої газу	Початкова точка	Середня точка	Кінцева точка	Значення m	Значення b
CO	(200; 5,17)	(5 000; 1,85)	(10 000; 1,49)	-0,32	1,44

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ІОТ ПРОЄКТУ

3.1 Налаштування хмарного сервісу «ThingSpeak»

В якості хмарного сервісу було обрано платформу «ThingSpeak». Дана інтернет-платформа пропонує інструменти для збору, аналізу та візуалізації даних з різних джерел, у тому числі з IoT пристроїв. Основні переваги використання платформи це легкість використання, масштабованість, інтеграція, аналіз та візуалізація, та деякі інші можливості [9].

Для початку роботи з заданим сервісом було створено новий обліковий запис користувача для подальшої роботи. Після реєстрації потрібно створити новий канал, куди будуть відправлятися усі дані, що були отримані з доступної кількості вузлів. Канали зберігають усі дані, які збирає програма ThingSpeak. Кожен канал включає вісім полів, які можуть містити будь-які типи даних, а також три поля для даних про місцезнаходження та одне для даних про статус.

Налаштування каналу доволі просте. Мінімальне що необхідно зробити – проставити відмітки у вибіркові елементи, які потім будуть використані для збору даних.

New Channel

Name

Description

Field 1 ☐

Field 2 ☐

Field 3 ☐

Field 4 ☐

Field 5 ☐

Field 6 ☐

Field 7 ☐

Field 8 ☐

Рисунок 3.1 - Створення каналу у сервісі ThingSpeak.

Кожен створений канал отримує свій власний ідентифікатор, який використовується для зв'язку IoT пристрою з сервісом. Ідентифікатор каналу

можна побачити одразу після створення каналу або перейшовши з головного меню до потрібного каналу.

Окрім ідентифікатору каналу для обміну даними з платформою також необхідно отримати API ключ, який можна знайти на відповідній вкладці API Keys.

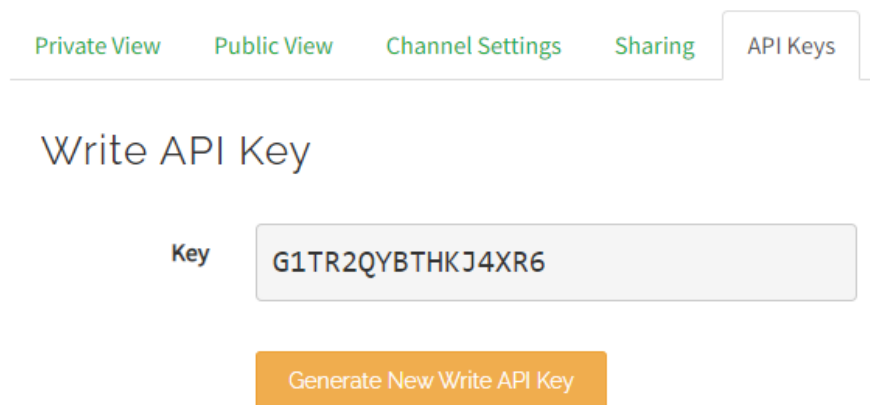


Рисунок 3.2 - Вигляд API ключа

3.2 Програма пристрою

Програма для мікроконтролеру була написана у середовищі розробки Arduino IDE. Для можливості роботи з Wi-Fi мережами було використано бібліотеку «ESP8266WiFi». Для можливості створення і використання Web серверу використовується бібліотека «ESP8266WebServer». Для запису всіх змін в налаштуваннях програми і роботи з пам'яттю контролера використовується бібліотека «EEPROM». Бібліотеки «SPI», «RF24», «RF24Network» задіяні для роботи з радіомодулем NRF24L01. Бібліотеки «ThinkSpeak» та «WiFiClient» використовується для обміну інформацією з відповідним хмарним сервісом ThinkSpeak. «TickTwo» - бібліотека для простого і швидкого створення таймерів. Для зберігання html сторінок, які відображатимуться у Web сервері використовується «index.h», вміст якого міститься в додатку В. Перед основними функціями йде оголошення необхідних глобальних змінних та ініціалізація об'єктів.

Функція «wifi_ap()» використовується для налаштування і запуску на ESP8266 точки доступу. Необхідна для можливості підключення користувача до веб-серверу для внесення налаштувань.

Функція «wifi_client()» використовується для налаштування і запуску режиму роботи «клієнт» для підключення до існуючої мережі Wi-Fi. Необхідна для роботи пристрою в режимі шлюзу для передавання даних у зовнішню мережу.

Функції «handleNode()» та «handleGateway()» використовуються для зчитування тексту html сторінок та передають їх для відображення сторінок на Web-сервері. Тексти html сторінок представлені в додатку В. Функція «handleNode()» відповідає за відображення за запитом веб-сторінки налаштування пристрою як вузла. Функція «handleGateway()» відповідає за відображення за запитом веб-сторінки налаштування пристрою як шлюзу.

Функція «resetEeprom()» використовується для очищення налаштувань, які були внесені користувачем раніше.

Функція «setup()» – стандартна функція, яка містить основний код налаштування пристрою. В ній виконується зчитування налаштувань з пам'яті про режим роботи, встановлення ідентифікатору вузла, куди необхідно надсилати отримані з датчика дані, параметри для підключення до зовнішньої мережі та інше.

Функція «findRatio()» використовується для вираховування відношення опорів датчика, які надалі будуть необхідні для використання при розрахунку концентрації газу.

Функція «findPPM()» використовується для знаходження концентрації газу в повітрі. Використовує функцію «findRatio()» як один з параметрів для розрахунку концентрації.

Функція «loop()» – стандартна функція, в якій код виконується циклічно. В даній функції виконується опитування датчика по таймеру та, в залежності від режиму роботи, виконується або приймання та обробка надійшовших даних від іншого вузла та пересилання даних на наступний вузол, або просто надсилаються дані на наступний вузол, або приймаються дані з інших вузлів та надсилаються до хмарного сервісу.

Повний текст коду знаходиться в додатках Б та В.

3.3 Налаштування пристрою для роботи з сервісом «ThinkSpeak»

Для роботи мережі необхідно спочатку налаштувати головний вузол. Для цього необхідно ввімкнути пристрій, після чого підключитися до створеної ним мережі Wi-Fi з назвою точки доступу «ESP_NODE_SETUP», пароль до мережі «qwertyui». Після підключення до пристрою в браузері необхідно буде перейти за IP-адресою «192.168.5.1», де за вказаною адресою буде відкрито веб сторінку з налаштування пристрою як одного з віддалених вузлів мережі, які не матимуть можливості підключитися до зовнішньої мережі Wi-Fi. На цій веб сторінці необхідно перейти до «Налаштувати як шлюз», після чого відобразиться веб-сторінка налаштування вузла як пристрою шлюзу.

×
⚠
Налаштування вузла
192.168.5.1
🔗
🔖
⋮

Налаштування шлюзу

Канал ThingSpeak*	channel
ThingSpeak API KEY*	API KEY
SSID мережі Wi-Fi*	SSID
Пароль мережі Wi-Fi*	password
Канал передачі*	0...125
Потужність передавача*	0...3, 0=(-18dBm), 3=(0dBm)
Кількість вимірів на годину*	Число

Зберегти зміни

>> [Назад](#)

Рисунок 3.3 - Сторінка налаштування шлюзу

На сторінці необхідно у відповідні поля ввести адресу каналу , та API ключ, які було отримано раніше з сервісу «ThingSpeak», назву та пароль від зовнішньої мережі Wi-Fi, до якої буде виконане підключення, вказати номер каналу зв'язку, який має бути використаний для налаштування наступних вузлів, вказати потужність передавача за числовим параметром від 0 до 3, де 0 відповідає потужності MIN (-18 дБм), 1 відповідає потужності LOW (-12 дБм), 2 відповідає потужності HIGH (-6 дБм) і 3 відповідає потужності MAX (0 дБм). Наостанок залишається зазначити кількість вимірів, які необхідно буде провести за одну годину. Для збереження змін необхідно натиснути кнопку «Зберегти зміни». Після натискання внесені дані будуть опрацьовані та записані в пам'ять пристрою, а сам пристрій перезавантажиться.

×
⚠

Налаштування вузла
192.168.5.1

🔗
🔖
⋮

Налаштування вузла	
ID Вузла*	Число, OCT формат
Канал передачі*	0...125,
Потужність передавача*	0...3, 0=(-18dBm), 3=(0dBm)
Номер треду ThinkSpeak*	2...8
Кількість вимірів на годину*	Число
Зберегти зміни	
>> Налаштувати як Шлюз	

Рисунок 3.4 - Сторінка налаштування вузла

Для налаштування пристрою в режимі роботи вузол необхідно виконати майже ті самі умови що і для налаштування пристрою як шлюзу, але залишитись на сторінці налаштування вузла і вказати всі необхідні параметри, які є на сторінці. Для поля ID вузла необхідно вказати число у вісімковій системі числення в діапазоні від 01 до 05555. Наприклад, якщо головний вузол матиме адресу 00, то його підопічні можуть мати адреси від 01 до 05, якщо вузол матиме адресу 053, то його підопічними будуть вузли 0153-0553, в той час як вузол з адресою 053 буде підопічним вузла 03, який в свою чергу вже підключається до 00. Схема підключення зображена на рисунку на рисунку 3.5. Канал для зв'язку необхідно використати такий самий, як було вказано на вузлі шлюзу. Номер треду вказує на те в яке поле потрібно внести зміни у сервісі ThingSpeak. Поле номер 1 завжди буде зайнятий вузлом шлюзу. Також необхідно вказати кількість вимірів на одну годину. Після внесення всіх значень необхідно зберегти зміни натиснувши відповідну кнопку.

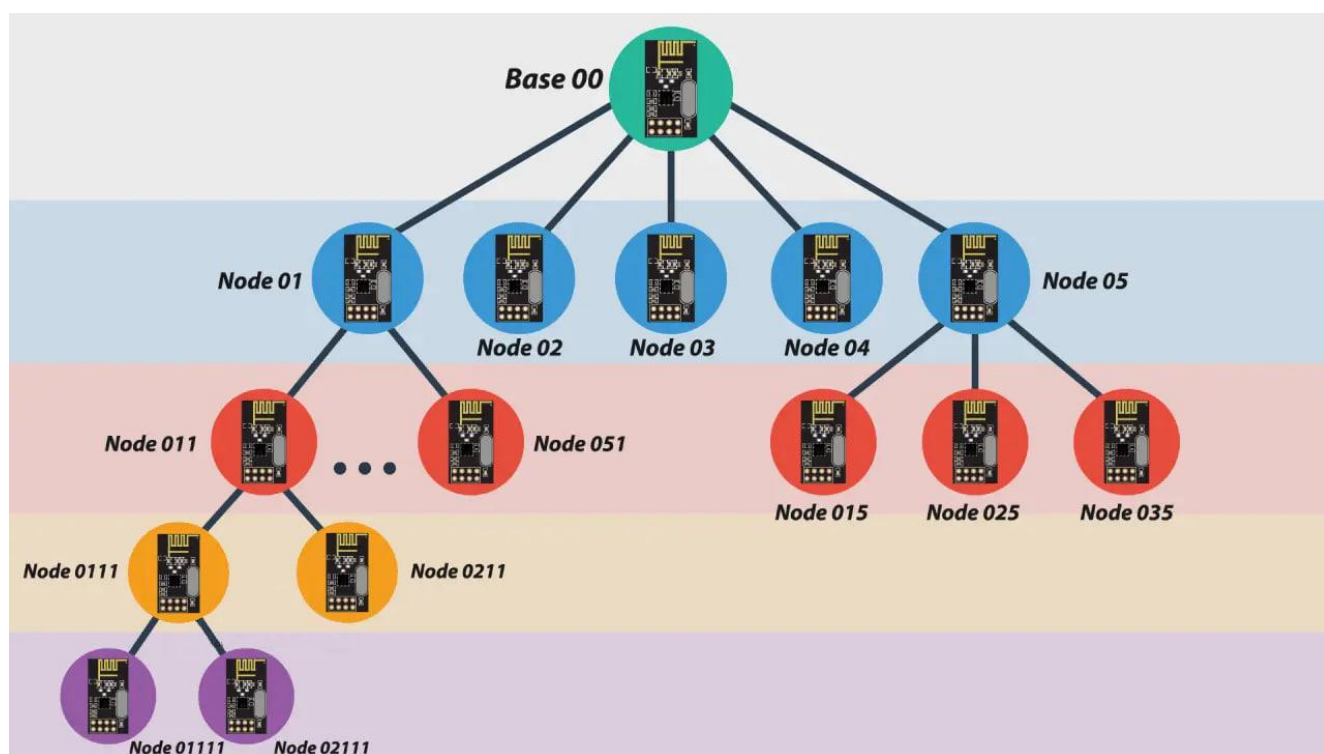


Рисунок 3.5 - Приклад можливих підключень вузлів та визначення їх ідентифікатора

Для змін налаштувань потрібно перезавантажити пристрій та повторити процедуру налаштування. Точка доступу пристрою буде діяти протягом 5 хв з моменту запуску або перезавантаження вузла.

Для скидання до «заводських» налаштувань необхідно перейти за адресою 192.168.5.1/resetEeprom .

Для перевірки роботи таким чином було налаштовано 3 вузли які було з'єднано в лінію: головний – виконує роль шлюзу, робить заміри та надсилає усі отримані дані до хмарного сервісу; вузол-маршрутизатор, який окрім збирання даних про вуглеводенві сполуки виконує пересилання даних від вузла, який стоїть нижче по мережі до вузла, який стоїть вище (в даному випадку до вузла-шлюзу); ще один вузол, який виконує тільки збирання даних та надсилає їх до вузла-маршрутизатору.

Після нетривалого очікування стало видно результат, який з'явився на графіках в хмарному сервісі, що свідчить про коректну роботу модулів.

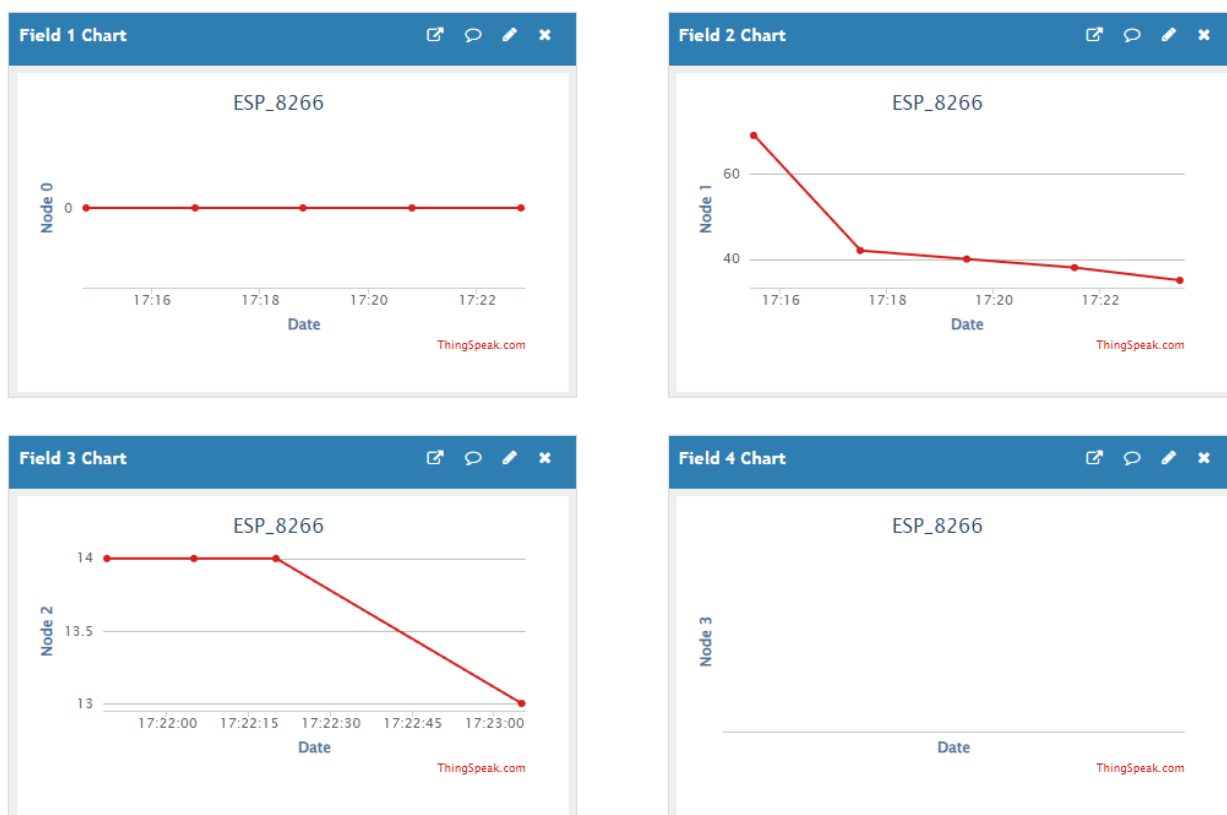


Рисунок 3.6 - Результат перевірки налаштованих пристроїв

РОЗДІЛ 4 МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПЛОЩІ РОЗГОРТАННЯ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

4.1 Методика розрахунків втрат та площі покриття

Дальність зв'язку R від передавача потужністю P_{Tx} до приймача з чутливістю P_{Rx} , при умові що в радіолінії використовуються радіохвилі довжина яких становить λ , можна визначити з формули [13]:

$$R^2 = \frac{P_{Tx} \cdot G_{Tx} \cdot G_{Rx} \cdot \gamma \cdot \lambda^2 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2}{(4\pi)^2 \cdot P_{Rx}}, \quad (4.1)$$

де: γ – множник послаблення сигналу при розповсюдженні радіохвиль від передавача до приймача

η_1, η_2 – ККД антено-фідерного передавального та приймального трактів;

G_{Tx}, G_{Rx} – коефіцієнт підсилення передавальної та приймальної антен.

Множник послаблення сигналу при розповсюдженні вздовж поверхні можна визначити за виразом:

$$\gamma = \frac{4\pi h_{Tx} h_{Rx}}{\lambda R}, \quad (4.2)$$

де $h_{Tx} h_{Rx}$ – висота передавальної та приймальної антен;

λ – довжина хвилі.

Коефіцієнт корисної дії антено-фідерного тракту як для передавача, так і для приймача $\eta_1 = \eta_2 = 0,9$. Висота, на якій розташовуються антени: $h_1 = h_2 = 1$ м.

Виходячи з формул (4.1) та (4.2) максимальну дальність зв'язку можна буде розрахувати за наступною формулою:

$$R = \sqrt[3]{\frac{P_{Tx} \cdot G_{Tx} G_{Rx} \cdot h_{Tx} \cdot h_{Rx} \cdot \lambda \cdot \eta_T \cdot \eta_R}{4\pi \cdot P_{Rx}}}, \quad (4.3)$$

Для оцінки втрат $L_{втр}$ в сенсорній мережі, добре підходить модель розповсюдження радіохвиль Окамура-Хати [14].

Втрати в місті знаходяться за наступною формулою:

$$L_{\text{місто}} = 69,55 + 26,16 \lg(f_{[\text{МГц}]}) - 13,83 \lg(h_{Tx}) - a(h_{Rx}) + \\ + (44,9 - 6,55 \lg(h_{Tx})) \lg(R_{[\text{км}]}) , \quad (4.4)$$

де a – поправочний коефіцієнт;

$f_{[\text{МГц}]}$ – частота передачі;

$R_{[\text{км}]}$ – дальність.

Для малого та середнього міста $a(h_{\text{МС}})$ розраховується за наступною формулою:

$$a(h_{Rx}) = (1,11 \cdot \lg(f_{[\text{МГц}]}) - 0,7) \cdot h_{Rx} - (\lg(f_{[\text{МГц}]}) - 0,8) . \quad (4.5)$$

Втрати в передмісті:

$$L_{\text{передмістя}} = L_{\text{місто}} - 2 \left(\lg \left(\frac{f_{[\text{МГц}]}}{28} \right) \right)^2 - 5,4, \text{ дБ}. \quad (4.6)$$

Втрати в сільській місцевості:

$$L_{\text{село}} = L_{\text{місто}} - 4,78 (\lg(f_{\text{МГц}}))^2 + 18,33 \lg(f_{\text{МГц}}) - 40,94. \quad (4.7)$$

Для розрахунку максимальної дальності з урахуванням втрат:

$$R_{\text{max}}^2 = \frac{P_{Tx} \cdot G_{Tx} \cdot G_{Rx} \cdot \lambda^2 \cdot \eta_T \cdot \eta_R}{(4\pi)^2 \cdot P_{Rx} \cdot L_{\text{Loss}}}, \quad (4.8)$$

де L_{Loss} – втрати сигналу при розповсюдженні від передавача до приймача;

Площа покриття розраховується за формулою:

$$S = \pi R_{\text{max}}^2. \quad (4.9)$$

4.2 Обчислення втрат та площі покриття за методикою

Виконаємо обрахунки згідно з методики, описаної у розділі 4.1.

Для розрахунку максимальної дальності у вільному просторі для радіомодулю з потужністю передавача $P_{Tx} = 0$ дБм, чутливістю приймача $P_{Rx} = -85$ дБм, підсиленням антени $G_{Tx} = G_{Rx} = 0$ дБм, ККД антено-фідерного тракту

яких становить $\eta_1 = \eta_2 = 0,9$, і при висоті розташування антен $h_1 = h_2 = 1$ м використаємо формулу (4.3), попередньо перевевши дБм у мВт.

$$R = \sqrt[3]{\frac{1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,125 \cdot 0,9 \cdot 0,9}{4\pi \cdot 3,162 \cdot 10^{-9}}} = 136,58 \text{ м.}$$

Якщо взяти радіомодуль з додатковим підсилювачем та зовнішньою антеною, потужність передавача становитиме $P_{Tx} = 20$ дБм, чутливість приймача становитиме $P_{Rx} = -95$ дБм, то максимальна дальність у вільному просторі за формулою (4.3) становитиме:

$$R = \sqrt[3]{\frac{100 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,125 \cdot 0,9 \cdot 0,9}{4\pi \cdot 3,162 \cdot 10^{-10}}} = 1366 \text{ м.}$$

Розрахуємо втрати в місті за формулою (4.4). Для цього спочатку розрахуємо поправочний коефіцієнт a для малого та середнього міста за формулою (4.5):

$$a = (1,11 \cdot \lg(2400) - 0,7) - (\lg(2400) - 0,8) = 12,68 \text{ дБ.}$$

Наступні розрахунки були проведені за умови що висота передавальної антени $h_{Tx} = 5$ м, висотрю передавальної антени $h_{Rx} = 5$ м, дальність 1 км.

$$L_{\text{місто}} = 69,55 + 26,16 \cdot \lg(2400) - 13,83 \lg(5) - 0,472 + \\ + (44,9 - 6,55 \lg(5)) \cdot \lg(1) = 119,584 \text{ дБ.}$$

Знайшовши втрати в місті можна розрахувати втрати в передмісті та втрати в сільській місцевості. Для розрахунку втрат в передмісті використаємо формулу (4.6) та результати розрахунків втрат в місті.

$$L_{\text{передмістя}} = 147,838 - 2 \left(\lg \left(\frac{2400}{28} \right) \right)^2 - 5,4 = 106,711 \text{ дБ.}$$

Розрахунок втрат для сільської місцевості визначаємо за формулою (4.7):

$$L_{\text{село}} = 147,838 - 4,78(\lg(2400))^2 + 18,33 \lg(2400) - 40,94 = 85,988 \text{ дБ.}$$

Отримавши усі необхідні виміри втрат ми можемо знайти максимальну дальність з'вязку з урахуванням втрат для кожного типу місцевості за формулою (4.8).

Максимальна дальність передачі в місті для радіомодулю з підсилювачем:

$$R_{\text{max_місто}}^2 = \frac{100 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,125^2 \cdot 0,9 \cdot 0,9}{(4\pi)^2 \cdot 3,162 \cdot 10^{-10} \cdot 119,584} = 2,12 \cdot 10^5 \text{ м}^2.$$

Звідки:

$$R_{\text{max_місто}} = 460,07 \text{ м.}$$

Максимальна дальність передачі в передмісті для радіомодулю з підсилювачем:

$$R_{\text{max_передмістя}}^2 = \frac{100 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,125^2 \cdot 0,9 \cdot 0,9}{(4\pi)^2 \cdot 3,162 \cdot 10^{-10} \cdot 134,964} = 2,375 \cdot 10^5 \text{ м}^2.$$

Звідки:

$$R_{\text{max_передмістя}} = 487,36 \text{ м.}$$

Максимальна дальність передачі в сільській місцевості для радіомодулю з підсилювачем:

$$R_{\text{max_село}}^2 = \frac{100 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,125^2 \cdot 0,9 \cdot 0,9}{(4\pi)^2 \cdot 3,162 \cdot 10^{-10} \cdot 114,242} = 2,948 \cdot 10^5 \text{ м}^2.$$

Звідки:

$$R_{\text{max_село}} = 542 \text{ м.}$$

Площу покриття розрховуємо за (4.9).

Для міста:

$$S_{\text{місто}} = 1,715 \cdot 10^5 \cdot \pi = 6,659 \cdot 10^5 \text{ м}^2.$$

Для передмістя:

$$S_{\text{передмістя}} = 1,878 \cdot 10^5 \cdot \pi = 7,462 \cdot 10^5 \text{ м}^2.$$

Для сільської місцевості:

$$S_{\text{село}} = 2,219 \cdot 10^5 \cdot \pi = 9,261 \cdot 10^5 \text{ м}^2.$$

Поїдбним чином було виконано розрахунки, кожен раз змінюючи висоту передавальної та приймальної антен, а також дальність. Висоту передавальної антени h_{Tx} взято від 5 до 30 метрів з кроком 5 метрів, висоту приймальної антени взято від 5 до 30 метрів, з кроком 5 метрів, дальність від 1 до 5 км з кроком 1 км. Отримані результати внесені в табл. додатку Г.

4.3 Аналіз отриманих результатів

Проаналізувавши отримані результати, які містяться в таблиці, яка наведена в додатку Г, можна побачити що зі змінами висоти передавальної та приймальної антен збільшується максимальна дальність передачі та зменшуються втрати у просторі кожного типу місцевості і відповідно збільшується площа покриття. Також можна побачити, що зі збільшенням відстані між вузлами збільшуються величина втрат у просторі, що призводить до зменшення максимальної дальності передачі і зменшує площу покриття. За методикою розділу 4.1 було розроблено програму та за її допомогою було обраховано дальність при зміні висоти передавальної та приймальної антени. Відстань між вузлами підібрано таким чином, аби вона була максимально наближеною до максимальної відстані передачі для кожного типу місцевості. Таким чином ми отримали результати, які свідчать, що максимальна площа покриття, за заданимим у розділі 4.2 параметрами, для кожного типу місцевості досягається при висоті передавальної та приймальної антен $h_{Tx} = h_{Rx} = 30$ метрів. Максимальна площа покриття в місті досягається за відстані між вузлами $R = 0,756$ км, де максимальна дальність передачі даних $R_{\text{max_місто}} = 756,08$ метрів і становить $S_{\text{місто}} = 1,8$ км². Втрати для міста на цій відмітці становлять $L_{\text{місто}} = 44,29$ дБ. Для передмістя максимальна площа покриття $S_{\text{передмістя}} = 2,37$ км², при відстані між вузлами $R = 0,869$ км, максимальній дальності передачі з урахуванням втрат для передмістя $R_{\text{max_передмістя}} = 869,21$ метри. Втрати при цьому становлять $L_{\text{передмістя}} = 33,55$ дБ. Для сільської місцевості площа становитиме $S_{\text{село}} = 4,5$ км², отримана з відстані між вузлами $R = 1.196$, максимальною відстанню передачі $R_{\text{max_село}} = 1.196,32$ метри, втрати $L_{\text{село}} = 17,71$ дБ. У додатку Д міститься таблиця, у якій представлено відстань між вузлами, яка максимально наближена до максимальної відстані передачі, втрати сигналу на цій відстані та максимальна площа покриття для кожного типу місцевості та комбінації висот передавальної та приймальної антен.

ВИСНОВКИ

Метою дослідження було визначення можливості застосування радіомодулів NRF24L01 для розгортання у сенсорних мережах.

У ході написання роботи було розроблено методику обрахунку площі розгортання сенсорної мережі при використанні радіомодулі NRF24L01. За даною методикою було визначено максимальну дальність зв'язку для міста, передмістя та сільської місцевості, а також вираховано площу покриття сенсорної мережі. Показано, що максимальна площа покриття досягається при висоті передавальної та приймальної антен $h_{Tx} = h_{Rx} = 30$ метрів. Максимальна площа покриття в місті становить $S_{\text{місто}} = 1,8 \text{ км}^2$ і досягається за відстані між вузлами 756 метрів. Для передмістя максимальна площа покриття склала $2,37 \text{ км}^2$, при відстані між вузлами 869 метри. Для сільської місцевості площа покриття становить $4,5 \text{ км}^2$ для відстані передачі 1,2 км.

Було реалізовано проєкт інтернету речей (IoT), де дані з сенсорів вуглеводневих сполук передавалися через шлюз до хмарного сервісу. Для цього було розроблено структурну та електричну принципову схему пристрою вузла, розроблено код програми для мікроконтролера, а також показано етапи налаштування пристрою, після чого зібрано тестові макети та перевірено працездатність пристроїв.

Отримані результати свідчать про можливість використання радіомодулів NRF24L01 для створення бездротових сенсорних мереж при рекомендованій відстані між вузлами не більше 1 км.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ullo, Silvia Liberata; Sinha, G. R. (2020-05-31). "Advances in Smart Environment Monitoring Systems Using IoT and Sensors".
2. FrancescoMario, Di; K, DasSajal; AnastasiGiuseppe (2011-08-01). "Data Collection in Wireless Sensor Networks with Mobile Elements". ACM Transactions on Sensor Networks. 8: 1–31
3. Wireless Sensor Networks for Battlefield Surveillance [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://www.cse.unsw.edu.au/~wenh/lwc2006_v4.pdf
4. Dargie, W.; Poellabauer, C. (2010). Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice. John Wiley and Sons. pp. 168–183, 191–192.
5. What Is LoRa? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>
6. Hassan, T. A. H.; Selim, G.; Sadek, R. (2015). "A novel energy efficient vice Cluster Head routing protocol in Wireless Sensor Networks". 2015 IEEE Seventh International Conference on Intelligent Computing and Information Systems (ICICIS). Cairo. pp. 313–320
7. "LNDIR: A lightweight non-increasing delivery-latency interval-based routing for duty-cycled sensor networks" [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.1177%2F1550147718767605>
8. Bennett, S. (1993). A History of Control Engineering 1930–1955. London: Peter Peregrinus Ltd. on behalf of the Institution of Electrical Engineers.
9. Види хмарних сервісів та приклади їх використання. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://denovo.ua/blog/vidi-hmarnih-servisiv-yakij-obratita-oglyad-hmarnih-provaid-8>
10. nRF24L01+ - Single Chip 2.4GHz Transceiver [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:

https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf

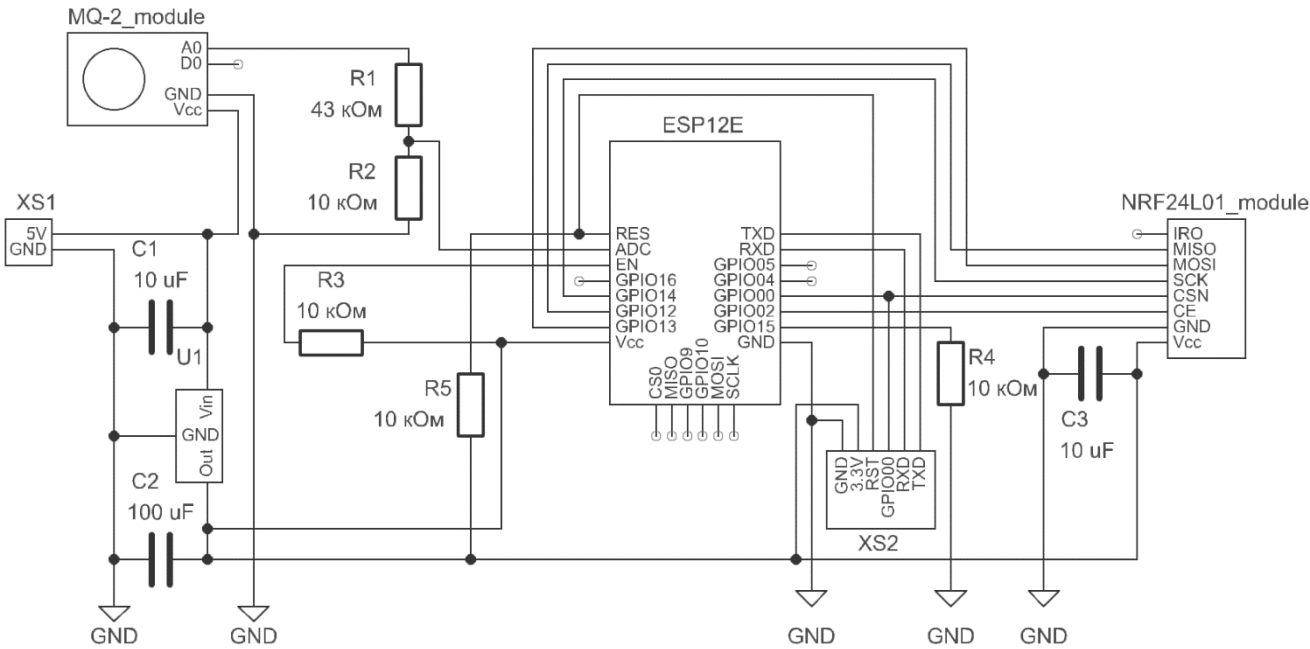
11. MQ-2 Semiconductor Sensor for Combustible Gas [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.pololu.com/file/0J309/MQ2.pdf>

12. ESP-12F Datasheet [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://docs.ai-thinker.com/_media/esp8266/docs/esp-12f_product_specification_en.pdf

13. Anamaria Bjelopera, Matej Kajinić, Emil Dumic. Educational Simulation Tools for Radio Wave Propagation Models. – 2019. – Режим доступа до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/333340116_Educational_Simulation_Tools_for_Radio_Wave_Propagation_Models

14. Alejandra Pinto, Luis Suárez Zambrano, Fabián Cuzme-Rodríguez, Edgar Jaramillo-Vinueza. Study Case: LPWAN Propagation Power Estimation in Outdoor Scenarios, Based on the Okumura-Hata Model. - 2023. DOI - 10.1007/978-3-031-24327-1_10

Схема пристрою контролю чадного газу



Додаток Б

Лістинг програми пристрою

```

#include <ESP8266WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <ESP8266WebServer.h>
#include <EEPROM.h>
#include <SPI.h>
#include <RF24.h>
#include <RF24Network.h>
#include "ThingSpeak.h"
#include <TickTwo.h>

#include "index.h"

#define adcPin A0 // Пін входу АЦП
float VCC = 5.0; // Напруга живлення датчика, В
float Vref = 1.0; // Напруга живлення АЦП, В
float Vdiv = 2.77; // Коефіцієнт зменшення напруги резистивним
дільником
float RL = 2.0; // Номінал резистору RL, кОм
float R0 = 7.62; // Відкаліброване значення R0
int readSample = 10; // Кількість виборок АЦП
float coCurve[2] = { -0.32, 1.44 }; // Розраховані значення кривої для CO газу

unsigned long last_sent = 0; //для таймеру виміру
unsigned long interval; //для таймеру виміру

//для обох
int isNode;
int isGateway;
int radioChannel;
int radioPower;
int measurementsPerHour;
int treadThinkSpeak;
//для вузла
uint16_t nodeId;
uint16_t masterNodeId;
unsigned long channel;
//для шлюзу
long channelThingSpeak;
String apiKeyThingSpeak;
String ssidWiFi;
String passwordWiFi;
String globalApiKey;
int coPPM;

struct payload_t { // Структура
    long node; //вузол, який надсилає

```

Продовження додатку Б

```

    long measurement;
    int treadThinkSpeak; //вимір з датчика
};

RF24 radio(D4, D3);          //ініціалізація об'єкта RF24 з використанням пінів D3
                              (CE) і D4 (CSN)
RF24Network network(radio); //створення об'єкта RF24Network
ESP8266WebServer server(80); //ініціалізація об'єкта ESP8266WebServer з
                              використанням порту 80 для веб-сервера
WiFiClient client;

void stopAP() { //функція відключення точки доступу та закриття веб серверу
    WiFi.softAPdisconnect(true);
    server.close();
}

TickTwo timer(stopAP, 5 * 60 * 1000, 1); //ініціалізація об'єкта TickTwo для
створення таймеру

void wifi_ap() { //функція, яка задає параметри точки
доступу
    IPAddress ip(192, 168, 5, 1);          // IP-адреса точки доступу
    IPAddress gateway(192, 168, 5, 1);     // IP-адреса шлюзу
    IPAddress subnet(255, 255, 255, 0);    // Маска підмережі
    WiFi.softAPConfig(ip, gateway, subnet); //встановлення конфігурації точки доступу
    char *ssid_ap = "ESP_NODE_SETUP";      //назва точки доступу
    char *password_ap = "qwertyui";        //пароль точки доступу, порожня строка або
NULL означає відсутність пароля
    WiFi.softAP(ssid_ap, password_ap);    //створення точки доступу з вказаним ім'ям
та паролем
}
//функція підключення до зовнішньої мережі Wi-Fi за заданими параметрами

void wifi_client(const char *ssid_l, const char *password_l) {

    WiFi.begin(ssid_l, password_l);
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(1000);
        Serial.println("Connecting to WiFi...");
    }
}

void handleNode() { //функція, яка викликається при обробці html
запиту
    String s = mainPage;                  //прочитати сторінку з пам'яті
    server.send(200, "text/html", s);     //надіслати результат

```

Продовження додатку Б

```
}
```

```
void handleGateway() {                                //функція, яка викликається при обробці html
запиту
    String s = gatewaySetupPage;                      //прочитати сторінку з пам'яті
    server.send(200, "text/html", s);                 //надіслати результат
}
```

```
void resetEeprom() {                                  //функція скидання EEPROM
    for (int i = 0; i <= 192; i++) {                  //записати 0 у кожен комірку EEPROM
        EEPROM.write(i, 0);
    }
    EEPROM.commit(); // Зберігаємо зміни в EEPROM
    //ESP.restart(); //перезавантажити контролер
}
```

```
void setup() {
    Serial.begin(115200); //Ініціалізація послідовного порту
    while (!Serial) {     // потрібно для деяких плат з USB
    }
    EEPROM.begin(192);    //ініціалізація роботи з EEPROM пам'яттю
    //resetEeprom();
    EEPROM.get(4, isNode);
    EEPROM.get(8, isGateway);
    //якщо не було внесено налаштувань
    if (EEPROM.read(0) != 1) {
        wifi_ap(); // запустити точку доступу
    }

    if (isNode || isGateway) { //інакше (налаштування все ж були)

        wifi_ap();
        //якщо не вдалось встановити з'єднання з модулем - за циклити в очікуванні на
з'єднання
        if (!radio.begin()) {
            Serial.println(F("Radio hardware not responding!"));
            while (1) {
                // Нескінченний цикл у випадку, якщо не опізнано радіомодуль
            }
        }
        EEPROM.get(12, radioChannel);
        radio.setChannel(radioChannel); //зазначаємо канал для передачі (записаний
раніше) (0-125)
        radio.setDataRate(RF24_1MBPS); //встановлюємо швидкість передачі даних, при
якій чутливість приймача -85 дБм
    }
}
```

Продовження додатку Б

```

EEPROM.get(16, radioPower);
switch (radioPower) { //встановлення потужності передавача
  case 0:
    radio.setPALevel(RF24_PA_MIN);
    break;
  case 1:
    radio.setPALevel(RF24_PA_LOW);
    break;
  case 2:
    radio.setPALevel(RF24_PA_HIGH);
    break;
  case 3:
    radio.setPALevel(RF24_PA_MAX);
    break;
}
EEPROM.get(20, measurementsPerHour);
interval = 3600 * 1000 / measurementsPerHour; //розраховуємо інтервал між
вимірами
//якщо вузол не є шлюзом - зчитати отриманий раніше ідентифікатор
if (isNode) {
  EEPROM.get(24, treadThinkSpeak);
  EEPROM.get(28, nodeId);
  EEPROM.get(32, masterNodeId);
  network.begin(nodeId); //початок роботи мережі
  //якщо вузол є шлюзом - встановити його значення 0
}
if (isGateway) {
  network.begin(00);
  ThingSpeak.begin(client);
  treadThinkSpeak = 1;
  EEPROM.get(36, channelThingSpeak);
  char apiKeyThingSpeak[17];
  EEPROM.get(52, apiKeyThingSpeak);
  globalApiKey = String(apiKeyThingSpeak);
  EEPROM.get(70, ssidWiFi);
  EEPROM.get(128, passwordWiFi);
  wifi_client(ssidWiFi.c_str(), passwordWiFi.c_str());
}

}

server.on("/", handleNode); //обробник події веб серверу для кореневого шляху
server.on("/setupGateway", handleGateway); //обробник події веб серверу для шляху
налаштування шлюзу
server.on("/writeNode", HTTP_GET, []() { //обробник отримання даних від
користувача при налаштуванні вузла
  if (server.hasArg("nodeId") && server.hasArg("radioChannel") &&
server.hasArg("radioPower") && server.hasArg("treadThinkSpeak") &&

```

Продовження додатку Б

```

server.hasArg("measurementsPerHour") && server.hasArg("isNode") &&
server.hasArg("isGateway")) { //якщо всі дані прийшли

    //обробити отримані дані
    String nodeIdStr = server.arg("nodeId");
    radioChannel = server.arg("radioChannel").toInt();
    radioPower = server.arg("radioPower").toInt();
    treadThinkSpeak = server.arg("treadThinkSpeak").toInt();
    measurementsPerHour = server.arg("measurementsPerHour").toInt();
    isNode = server.arg("isNode").toInt();
    isGateway = server.arg("isGateway").toInt();
    if (EEPROM.read(0) != 1) {
        EEPROM.put(0, 1);
    }
    uint16_t nodeId = strtoul(nodeIdStr.c_str(), nullptr, 8);
    String masterNodeAddressString;
    for (int i = 0; i < nodeIdStr.length(); i++) {
        if (i != 1) {
            masterNodeAddressString += nodeIdStr[i];
        }
    }
    uint16_t masterNodeId = strtoul(masterNodeAddressString.c_str(), nullptr, 8);

    //записати оброблені дані в пам'ять керуючого пристрою
    EEPROM.put(4, isNode);
    EEPROM.put(8, isGateway);
    EEPROM.put(12, radioChannel);
    EEPROM.put(16, radioPower);
    EEPROM.put(20, measurementsPerHour);
    EEPROM.put(24, treadThinkSpeak);
    EEPROM.put(28, nodeId);
    EEPROM.put(32, masterNodeId);
    EEPROM.commit();

    //відзвітувати про успішність виконання та перезавантажити контролер для
застосування змін
    server.send(200, "text/plain", "Data written to EEPROM");
    delay(100);
    ESP.restart();

} else { //інакше відзвітувати про помилку отримання даних
    server.send(400, "text/plain", "Invalid request");
}
});

server.on("/writeGateway", HTTP_GET, []() { //обробник отримання даних від
користувача при налаштуванні як шлюзу, той самий принцип як і при налаштуванні вузла
    if (server.hasArg("channelThingSpeak") && server.hasArg("apiKeyThingSpeak") &&
server.hasArg("ssidWiFi") && server.hasArg("passwordWiFi") &&
server.hasArg("radioChannel") && server.hasArg("radioPower") &&

```

Продовження додатку Б

```

server.hasArg("measurementsPerHour") && server.hasArg("isNode") &&
server.hasArg("isGateway")) {

    if (EEPROM.read(0) != 1) {
        EEPROM.put(0, 1);
    }

    isNode = server.arg("isNode").toInt();
    isGateway = server.arg("isGateway").toInt();
    radioChannel = server.arg("radioChannel").toInt();
    radioPower = server.arg("radioPower").toInt();
    measurementsPerHour = server.arg("measurementsPerHour").toInt();
    channelThingSpeak = server.arg("channelThingSpeak").toInt();
    char apiKeyThingSpeak[17];
    String apiKeyFromServer = server.arg("apiKeyThingSpeak");
    apiKeyFromServer.toCharArray(apiKeyThingSpeak, sizeof(apiKeyThingSpeak));
    ssidWiFi = server.arg("ssidWiFi");
    passwordWiFi = server.arg("passwordWiFi");

    EEPROM.put(4, isNode);
    EEPROM.put(8, isGateway);
    EEPROM.put(12, radioChannel);
    EEPROM.put(16, radioPower);
    EEPROM.put(20, measurementsPerHour);
    EEPROM.put(36, channelThingSpeak);
    EEPROM.put(52, apiKeyThingSpeak);
    EEPROM.put(70, ssidWiFi);
    EEPROM.put(128, passwordWiFi);
    EEPROM.commit();

    server.send(200, "text/plain", "Data written to EEPROM");
    delay(100);
    ESP.restart();
} else {
    server.send(400, "text/plain", "Invalid request");
}
});
server.on("/resetEeprom", resetEeprom);
server.begin();
timer.start(); //розпочинаємо відлік таймеру до вимкнення точки доступу та
закриття веб-серверу
}

float findRatio(int pin) { // Розрахунок відношення RS/RO float sum = 0;
    for (int i = 0; i < readSample; i++) {
        sum += analogRead(pin) * Vref * Vdiv / 1024.0;
    }
    float adc = sum / readSample;
}

```

Продовження додатку Б

```

float RS = (VCC / adc - 1.0) * RL;
float ratio = RS / R0;
return ratio;
}

int findPPM(float ratio, float *curve) { // Розрахунок ppm для різних газів

    int ppm = pow(10, (log10(ratio) - curve[1]) / curve[0]);
    if (ppm > 10000) {
        ppm = 10000;
    }
    return ppm;
}

void loop() {

    server.handleClient(); //тримати веб-сервер активним

    if (isNode || isGateway) { //якщо було попередньо налаштовано
        payload_t payload_resived; // Оголосити тут перед використанням
        timer.update(); //Оновлення таймера до закриття веб-серверу
та точки доступу

        network.update(); //функція обслуговування внутрішніх процесів
rf24network
        unsigned long now = millis(); //оновити значення таймеру для зчитування
даних з датчику
        if (now - last_sent >= interval) { //якщо час настав
            last_sent = now; //встановити поточний час як час останнього
виміру
            float ratio = findRatio(adcPin); //розархувати RS/R0
            coPPM = findPPM(ratio, coCurve); //розрахувати значення ppm
            if (isGateway) {
                const char *globalApiKeyChar = globalApiKey.c_str();
                ThingSpeak.writeField(channelThingSpeak, treadThinkSpeak, coPPM,
globalApiKeyChar);
            }
            if (isNode) {
                payload_t payload = { nodeId, coPPM, treadThinkSpeak }; //записати дані в
структуру (який вузол та які виміри)
                RF24NetworkHeader header(/*to node*/ masterNodeId); //створення
заголовка пакету для відправлення на вузол з адресою master_node.
                network.write(header, &payload, sizeof(payload));
            }
        }
    }
    while (network.available()) { // Перевірка на наявність вхідного повідомлення
        if (isGateway) {
            payload_t payload_resived;

```

Продовження додатку Б

```

// Прийняти і обробити

RF24NetworkHeader header_resived; //створення об'єкта заголовка для отриманого
пакету в мережі RF24Network.
network.read(header_resived, &payload_resived, sizeof(payload_resived));
const char *globalApiKeyChar = globalApiKey.c_str();
ThingSpeak.writeField(channelThingSpeak, payload_resived.treadThinkSpeak,
payload_resived.measurement, globalApiKeyChar); //зчитування даних з отриманого
об'єкту
}

if (isNode) {
    payload_t payload_resived;
    RF24NetworkHeader header_resived; //створення об'єкта заголовка для отриманого
пакету в мережі RF24Network.
    network.read(header_resived, &payload_resived, sizeof(payload_resived));
    payload_t payload = { payload_resived.node, payload_resived.measurement,
payload_resived.treadThinkSpeak }; //записати дані в структуру (який вузол та які
виміри)
    RF24NetworkHeader header(/*to node*/
masterNodeId); //створення
заголовка пакету для відправлення на вузол з адресою master_node.
    network.write(header, &payload, sizeof(payload));
}
}
}

```

Вміст файлу index.h

```

const char mainPage[] PROGMEM = R"====(

<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
    <meta charset="UTF-8">
    <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
    <title>Налаштування вузла</title>
    <style>
        table {
            border-collapse: collapse;
            width: 30%;
            margin: 20px;
        }
        table, th, td {
            border: 1px solid black;
        }
        th, td {
            padding: 10px;
            text-align: left;
        }
        th {
            background-color: #f2f2f2;
        }
    </style>
</head>
<body>
    <table>
        <tr>
            <th colspan="2"><h1>Налаштування вузла</h1></th>

        </tr>
        <tr>
            <td>ID Вузла*</td>
            <td><input style="width: 250px;" type="text" id="nodeId" placeholder="Число,
ОСТ формат"></td>
        </tr>
        <tr>
            <td>Канал передачі*</td>
            <td><input style="width: 250px;" type="text" id="radioChannel"
placeholder="0...125, 32 by def."></td>
        </tr>
        <tr>
            <td>Потужність передавача*</td>
            <td><input style="width: 250px;" type="text" id="radioPower"
placeholder="0...3, 0=(-18dBm), 3=(0dBm), 0 by def."></td>
        </tr>
    </table>
)";

```

Продовження додатку В

```

<tr>
  <td>Номер треду ThinkSpeak*</td>
  <td><input style="width: 250px;" type="text" id="treadThinkSpeak"
placeholder="2...8"></td>
</tr>
<tr>
  <td>Кількість вимірів на годину*</td>
  <td><input style="width: 250px;" type="text" id="measurementsPerHour"
placeholder="Число, 6 by def."></td>
</tr>

<tr>
  <td colspan="2"><button onclick="writeToEEPROMMain()">Зберегти
зміни</button></td>

</tr>
<tr>
  <th colspan="2"><a href="/setupGateway"> > Налаштувати як Шлюз</a></th>

</tr>
</table>

<script>
function writeToEEPROMMain() {
  var nodeId = document.getElementById("nodeId").value;
  var radioChannel = document.getElementById("radioChannel").value;
  var radioPower = document.getElementById("radioPower").value;
  var treadThinkSpeak = document.getElementById("treadThinkSpeak").value;
  var measurementsPerHour =
document.getElementById("measurementsPerHour").value;
  var isNode = 1;
  var isGateway = 0;

  var url = "/writeNode?nodeId=" + nodeId + "&radioChannel=" + radioChannel +
"&radioPower=" + radioPower + "&treadThinkSpeak=" + treadThinkSpeak +
"&measurementsPerHour=" + measurementsPerHour + "&isNode=" + isNode + "&isGateway=" +
isGateway;

  if (nodeId.trim() === "" || radioChannel.trim() === "" || radioPower.trim()
=== "" || treadThinkSpeak.trim() === "" || measurementsPerHour.trim() === "") {
    alert("Необхідно заповнити усі поля з *");
  }
  else {
    var xhr = new XMLHttpRequest();
    xhr.open("GET", url, true);
    xhr.send();
  }
}

```

Продовження додатку В

```

    }
    </script>

</body>
</html>

)=====";

const char gatewaySetupPage[] PROGMEM = R"=====(
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
    <meta charset="UTF-8">
    <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
    <title>Налаштування вузла</title>
    <style>
        table {
            border-collapse: collapse;
            width: 30%;
            margin: 20px;
        }
        table, th, td {
            border: 1px solid black;
        }
        th, td {
            padding: 10px;
            text-align: left;
        }
        th {
            background-color: #f2f2f2;
        }
    </style>
</head>

<body>
    <table>
        <tr>
            <th colspan="2"><h1>Налаштування шлюзу</h1></th>

        </tr>
        <tr>
            <td>Канал <br>ThingSpeak*</td>
            <td><input style="width: 250px;" type="text" id="channelThingSpeak"
placeholder="channel"></td>
        </tr>
        <tr>
            <td>ThingSpeak <br>API KEY*</td>

```

Продовження додатку В

```

        <td><input style="width: 250px;" type="text" id="apiKeyThingSpeak"
placeholder="API KEY"></td>
    </tr>
    <tr>
        <td>SSID мережі <br>Wi-Fi*</td>
        <td><input style="width: 250px;" type="text" id="ssidWiFi"
placeholder="SSID"></td>
    </tr>
    <tr>
        <td>Пароль мережі <br>Wi-Fi*</td>
        <td><input style="width: 250px;" type="password" id="passwordWiFi"
placeholder="password"></td>
    </tr>
    <tr>
        <td>Канал передачі*</td>
        <td><input style="width: 250px;" type="text" id="radioChannel"
placeholder="0...125, 32 by def."></td>
    </tr>
    <tr>
        <td>Потужність передавача*</td>
        <td><input style="width: 250px;" type="text" id="radioPower"
placeholder="0...3, 0=(-18dBm), 3=(0dBm), 0 by def."></td>
    </tr>
    <tr>
        <td>Кількість вимірів на годину*</td>
        <td><input style="width: 250px;" type="text" id="measurementsPerHour"
placeholder="Число, 6 by def."></td>
    </tr>
    <td colspan="2"><button onclick="writeToEEPROMGateway()">Зберегти
зміни</button></td>

</tr>
<tr>
    <td colspan="2"><a href="/"> >> Назад</a></td>
</tr>
</table>

<script>
function writeToEEPROMGateway() {
    var channelThingSpeak = document.getElementById("channelThingSpeak").value;
    var apiKeyThingSpeak = document.getElementById("apiKeyThingSpeak").value;
    var ssidWiFi = document.getElementById("ssidWiFi").value;
    var passwordWiFi = document.getElementById("passwordWiFi").value;
    var radioChannel = document.getElementById("radioChannel").value;
    var radioPower = document.getElementById("radioPower").value;

    var measurementsPerHour =
document.getElementById("measurementsPerHour").value;
    var isNode = 0;

```

Продовження додатку В

```

var isGateway = 1;

    if (channelThingSpeak.trim() === "" || apiKeyThingSpeak.trim() === "" ||
ssidWiFi.trim() === "" || passwordWiFi.trim() === "" || radioChannel.trim() === "" ||
radioPower.trim() === "" || measurementsPerHour.trim() === "") {
        alert("Необхідно заповнити усі поля з *");
    }
    else {
        var url = "/writeGateway?channelThingSpeak=" + channelThingSpeak +
"&apiKeyThingSpeak=" + apiKeyThingSpeak + "&ssidWiFi=" + ssidWiFi + "&passwordWiFi="
+ passwordWiFi + "&radioChannel=" + radioChannel + "&radioPower=" + radioPower +
"&measurementsPerHour=" + measurementsPerHour + "&isNode=" + isNode + "&isGateway=" +
isGateway;
        var xhr = new XMLHttpRequest();
        xhr.open("GET", url, true);
        xhr.send();
    }
</script>

</body>
</html>

)=====";

```

Додаток Г

Розрахунки втрат та площі покриття сенсорної мережі при використанні додаткового підсилювача та зовнішньої антени

Висота передавальної антени, м	Висота приймальної антени, м	Дальність у вільному просторі, км	Втрати в місті, дБ	Втрати в передмісті, дБ	Втрати в сільській місцевості, дБ	Дальність дії з врахуванням втрат у місті, м	Дальність дії з врахуванням втрат у передмісті, м	Дальність дії з врахуванням втрат у сільській місцевості, м	Площа покриття у місті, км ²	Площа покриття у передмісті, км ²	Площа покриття у сільській місцевості, км ²
5	5	0,4	119,584	106,7106	85,98779	460,3691	487,3477	542,9055	0,665828	0,746153	0,925973
5	5	0,8	131,722	118,8486	98,12584	438,6453	461,7911	508,2191	0,604473	0,669948	0,811431
5	5	1,2	138,8223	125,9489	105,2261	427,2804	448,5857	490,7732	0,573556	0,63218	0,756679
5	5	1,6	143,8601	130,9867	110,2639	419,7324	439,8748	479,4309	0,553471	0,607866	0,722107
5	10	0,4	104,3238	91,45041	70,72762	492,8911	526,4411	598,6158	0,763224	0,870662	1,125761
5	10	0,8	116,4619	103,5885	82,86567	466,4991	494,6374	553,0385	0,683678	0,768641	0,960861
5	10	1,2	123,5622	110,6888	89,96598	452,8975	478,5098	530,7665	0,644391	0,719336	0,885028
5	10	1,6	128,5999	115,7265	95,00373	443,938	467,9788	516,5024	0,619148	0,688022	0,838098
5	15	0,4	89,06363	76,19024	55,46744	533,4485	576,7572	675,964	0,893994	1,045047	1,43548
5	15	0,8	101,2017	88,32829	67,6055	500,4363	535,6643	612,2822	0,786769	0,901437	1,17775
5	15	1,2	108,302	95,4286	74,70581	483,7539	515,3513	582,4592	0,735189	0,834366	1,065813
5	15	1,6	113,3397	100,4663	79,74355	472,8807	502,2643	563,7608	0,702511	0,792528	0,998481

Продовження додатку Г

5	20	0,4	73,80346	60,93007	40,20727	586,009	644,9512	793,9449	1,078844	1,306783	1,980298
5	20	0,8	85,94151	73,06812	52,34533	543,0517	588,9504	695,8309	0,926472	1,089701	1,521098
5	20	1,2	93,04182	80,16843	59,44563	521,9195	562,2649	652,9541	0,85577	0,993189	1,339415
5	20	1,6	98,07957	85,20618	64,48338	508,339	545,3899	626,9296	0,811814	0,934467	1,234774
5	25	0,4	58,54328	45,66989	24,9471	657,967	744,9509	1007,935	1,36006	1,743433	3,191649
5	25	0,8	70,68134	57,80795	37,08515	598,8117	662,1386	826,6899	1,126498	1,37736	2,147015
5	25	1,2	77,78165	64,90826	44,18546	570,8265	624,8743	757,3611	1,023665	1,226691	1,802004
5	25	1,6	82,81939	69,946	49,22321	553,1929	601,9511	717,5591	0,961398	1,138341	1,617578
5	30	0,4	43,28311	30,40972	9,686926	765,2149	912,9278	1617,52	1,839572	2,61832	8,219572
5	30	0,8	55,42117	42,54778	21,82498	676,2462	771,799	1077,62	1,436678	1,871364	3,648223
5	30	1,2	62,52147	49,64808	28,92529	636,69	714,4822	936,0603	1,273521	1,603735	2,752691
5	30	1,6	67,55922	54,68583	33,96304	612,4919	680,7776	863,8521	1,178557	1,455997	2,344384
10	5	0,4	116,2054	103,332	82,60918	467,0136	495,2509	553,8964	0,685187	0,770549	0,963844
10	5	0,8	127,7499	114,8765	94,15368	445,4125	469,7071	518,8287	0,623268	0,693113	0,845664
10	5	1,2	134,503	121,6296	100,9068	434,0869	456,4814	501,167	0,591975	0,65463	0,789069
10	5	1,6	139,2944	126,421	105,6982	426,5558	447,7474	489,6761	0,571612	0,629819	0,753299
10	10	0,4	100,9452	88,0718	67,34901	501,0717	536,4438	613,447	0,788768	0,904062	1,182235
10	10	0,8	112,4897	99,6163	78,89351	474,664	504,4028	566,7898	0,707819	0,799291	1,009239

Продовження додатку Г

10	10	1,2	119,2428	106,3694	85,64661	461,0272	488,1286	543,9858	0,667733	0,748546	0,929662
10	10	1,6	124,0342	111,1608	90,43801	452,0349	477,4928	529,3796	0,641939	0,716281	0,880408
10	15	0,4	85,68502	72,81163	52,08883	543,8639	589,9868	697,542	0,929245	1,093539	1,528588
10	15	0,8	97,22952	84,35613	63,63334	510,5562	548,131	631,1031	0,818912	0,943884	1,251268
10	15	1,2	103,9826	91,10923	70,38643	493,699	527,4259	600,0648	0,765728	0,873922	1,131218
10	15	1,6	108,774	95,90063	75,17784	482,7031	514,0814	580,6277	0,731998	0,830259	1,05912
10	20	0,4	70,42485	57,55146	36,82866	599,9012	663,6124	829,5636	1,130601	1,383499	2,161968
10	20	0,8	81,96935	69,09596	48,37316	556,0539	605,6425	723,8364	0,971368	1,152345	1,646003
10	20	1,2	88,72245	75,84906	55,12626	534,4732	578,0529	678,0526	0,897432	1,049748	1,444364
10	20	1,6	93,51385	80,64046	59,91766	520,6006	560,6169	650,3771	0,85145	0,987375	1,328863
10	25	0,4	55,16468	42,29129	21,56849	677,8165	774,1359	1084,009	1,443358	1,882714	3,691607
10	25	0,8	66,70918	53,83579	33,11299	616,3819	686,1311	874,8699	1,193575	1,478986	2,404566
10	25	1,2	73,46228	60,58889	39,86609	587,3683	646,7645	797,335	1,083854	1,314142	1,997246
10	25	1,6	78,25368	65,38029	44,65749	569,1022	622,6145	753,3478	1,017491	1,217835	1,782957
10	30	0,4	39,9045	27,03111	6,308318	796,9512	968,3017	2004,407	1,995323	2,945583	12,62181
10	30	0,8	51,449	38,57561	17,85282	701,8659	810,562	1191,487	1,547598	2,06406	4,459934
10	30	1,2	58,2021	45,32871	24,60592	659,8927	747,7492	1014,899	1,368033	1,756555	3,235904
10	30	1,6	62,9935	50,12011	29,39732	634,3001	711,1097	928,5147	1,263978	1,588631	2,708491

Продовження додатку Г

5	5	0,4	114,229	101,3556	80,63282	471,0364	500,0561	560,6434	0,697042	0,785574	0,987469
15	5	0,8	125,4263	112,5529	91,83011	449,5193	474,5307	525,3516	0,634814	0,707422	0,867062
15	5	1,2	131,9763	119,1029	98,38011	438,2225	461,2979	507,5619	0,603308	0,668518	0,809334
15	5	1,6	136,6236	123,7502	103,0274	430,7049	452,5533	495,9824	0,582787	0,643412	0,772827
15	10	0,4	98,96883	86,09544	65,37265	506,05	542,566	622,6509	0,80452	0,924815	1,217977
15	10	0,8	110,1661	97,29274	76,56994	479,6436	510,3903	575,3253	0,722748	0,81838	1,039865
15	10	1,2	116,7161	103,8427	83,11994	465,9907	494,0315	552,1919	0,682188	0,766759	0,957922
15	10	1,6	121,3634	108,49	87,76723	456,9816	483,3344	537,3738	0,656066	0,733914	0,907199
15	15	0,4	83,70866	70,83527	50,11248	550,2467	598,1607	711,1639	0,951185	1,12405	1,588874
15	15	0,8	94,90595	82,03257	61,30977	516,7684	555,8396	642,9509	0,838961	0,970619	1,29869
15	15	1,2	101,456	88,58256	67,85977	499,8088	534,895	611,134	0,784798	0,898849	1,173337
15	15	1,6	106,1032	93,22986	72,50706	488,7405	521,3929	591,2246	0,750424	0,854044	1,098133
15	20	0,4	68,44849	55,5751	34,8523	608,5002	675,309	852,7602	1,163245	1,432699	2,284566
15	20	0,8	79,64578	66,77239	46,0496	564,1067	616,09	741,8733	0,999706	1,192445	1,729057
15	20	1,2	86,19578	73,32239	52,59959	542,2501	587,9283	694,147	0,923739	1,085922	1,513745
15	20	1,6	90,84308	77,96969	57,24689	528,198	570,1377	665,3754	0,876483	1,021197	1,39086
15	25	0,4	53,18832	40,31493	19,59213	690,2947	792,8841	1137,37	1,49699	1,97501	4,063998
15	25	0,8	64,38561	51,51222	30,78942	627,4054	701,4351	907,2811	1,236649	1,545699	2,58603

Продовження додатку Г

15	25	1,2	70,93561	58,06222	37,33942	597,7375	660,6871	823,8703	1,12246	1,371329	2,132395
15	25	1,6	75,5829	62,70951	41,98672	579,0697	635,7347	776,9386	1,053444	1,269702	1,896371
15	30	0,4	37,92814	25,05476	4,331959	817,4512	1005,767	2418,803	2,099296	3,177935	18,38023
15	30	0,8	49,12544	36,25205	15,52925	718,2728	836,135	1277,519	1,620797	2,196356	5,127252
15	30	1,2	55,67543	42,80204	22,07925	674,7002	769,5031	1071,397	1,430117	1,860247	3,606209
15	30	1,6	60,32273	47,44934	26,72654	648,1898	730,8488	973,8033	1,31994	1,67805	2,97915
20	5	0,4	112,8268	99,95337	79,23057	473,9544	503,5516	565,5829	0,705705	0,796595	1,004945
20	5	0,8	123,7777	110,9043	90,18152	452,503	478,0446	530,1318	0,643269	0,717938	0,882912
20	5	1,2	130,1836	117,3102	96,58741	441,2295	464,8092	512,2505	0,611616	0,678734	0,824356
20	5	1,6	134,7286	121,8553	101,1325	433,7232	456,0585	500,6075	0,590983	0,653418	0,787308
20	10	0,4	97,56659	84,6932	63,9704	509,6736	547,0391	629,4382	0,816083	0,940127	1,244675
20	10	0,8	108,5175	95,64414	74,92134	483,2732	514,7703	581,6207	0,733728	0,832486	1,062746
20	10	1,2	114,9234	102,05	81,32724	469,6111	498,3519	558,2448	0,69283	0,780229	0,979037
20	10	1,6	119,4685	106,5951	85,87229	460,5916	487,6116	543,2705	0,666472	0,746961	0,927219
20	15	0,4	82,30641	69,43302	48,71023	554,9142	604,1706	721,3277	0,96739	1,146751	1,634613
20	15	0,8	93,25736	80,38397	59,66117	521,3161	561,5106	651,7736	0,853792	0,990526	1,334576
20	15	1,2	99,66325	86,78986	66,06706	504,2839	540,3911	619,37	0,798914	0,917416	1,205175
20	15	1,6	104,2083	91,33491	70,61212	493,1641	526,7739	599,1051	0,764069	0,871763	1,127602

Продовження додатку Г

20	20	0,4	67,04624	54,17285	33,45005	614,8306	683,9932	870,4508	1,187574	1,469784	2,380337
20	20	0,8	77,99719	65,1238	44,401	570,0372	623,8394	755,5206	1,020837	1,222631	1,793257
20	20	1,2	84,40308	71,52969	50,80689	547,9785	595,2501	706,2872	0,943359	1,113138	1,567157
20	20	1,6	88,94813	76,07474	55,35195	533,7947	577,1948	676,6689	0,895155	1,046634	1,438475
20	25	0,4	51,78607	38,91268	18,18988	699,5781	807,0438	1180,396	1,537525	2,046181	4,37729
20	25	0,8	62,73701	49,86362	29,14083	635,5954	712,9363	932,5921	1,269145	1,596803	2,732331
20	25	1,2	69,14291	56,26952	35,54672	605,4368	671,1291	844,3896	1,151563	1,415018	2,239936
20	25	1,6	73,68796	60,81457	40,09177	586,4681	645,5633	795,0877	1,080535	1,309265	1,986003
20	30	0,4	36,5259	23,65251	2,92971	832,9947	1035,152	2941,239	2,179889	3,36634	27,17757
20	30	0,8	47,47684	34,60345	13,88066	730,6372	855,821	1351,256	1,677078	2,300995	5,736212
20	30	1,2	53,88273	41,00934	20,28655	685,8322	786,1424	1117,734	1,477698	1,941567	3,924886
20	30	1,6	58,42779	45,5544	24,8316	658,617	745,8947	1010,277	1,362749	1,747853	3,206494
25	5	0,4	111,7391	98,8657	78,1429	476,2556	506,3139	569,5055	0,712574	0,805359	1,018933
25	5	0,8	122,499	109,6256	88,90277	454,8587	480,8247	533,9309	0,649984	0,726312	0,895612
25	5	1,2	128,7931	115,9197	95,19688	443,605	467,5888	515,9781	0,618219	0,686875	0,836397
25	5	1,6	133,2588	120,3854	99,66263	436,1086	458,8341	504,2855	0,597502	0,661396	0,798919
25	10	0,4	96,47892	83,60553	62,88273	512,5384	550,586	634,8585	0,825283	0,952358	1,266204
25	10	0,8	107,2388	94,36539	73,64259	486,146	518,2464	586,6487	0,742478	0,843767	1,0812

Продовження додатку Г

25	10	1,2	113,5329	100,6595	79,93671	472,4782	501,7822	563,0792	0,701316	0,791007	0,996068
25	10	1,6	117,9986	105,1253	84,40246	463,4513	491,0086	547,9805	0,674774	0,757405	0,943366
25	15	0,4	81,21874	68,34535	47,62256	558,6175	608,9591	729,5185	0,980345	1,165001	1,671947
25	15	0,8	91,97861	79,10522	58,38242	524,9274	566,0308	658,8728	0,865662	1,006538	1,363808
25	15	1,2	98,27272	85,39933	64,67654	507,8391	544,7728	625,9927	0,810219	0,932354	1,231086
25	15	1,6	102,7385	89,86508	69,14229	496,6794	531,0644	605,4396	0,775001	0,886021	1,151573
25	20	0,4	65,95857	53,08518	32,36239	619,8792	690,9649	884,9575	1,207158	1,499899	2,460337
25	20	0,8	76,71844	63,84505	43,12225	574,7683	630,0559	766,6408	1,037852	1,247119	1,846434
25	20	1,2	83,01255	70,13916	49,41637	552,549	601,1217	716,1554	0,959161	1,135206	1,611255
25	20	1,6	87,4783	74,60491	53,88211	538,2605	582,8529	685,8361	0,910196	1,067254	1,477715
25	25	0,4	50,6984	37,82501	17,10221	707,0425	818,5649	1217,353	1,570511	2,10502	4,655677
25	25	0,8	61,45826	48,58487	27,86208	642,1737	722,2576	953,753	1,295552	1,638831	2,857733
25	25	1,2	67,75238	54,87899	34,15619	611,6182	679,5785	861,4061	1,175197	1,450872	2,331126
25	25	1,6	72,21813	59,34474	38,62194	592,4061	653,509	810,0757	1,102526	1,341692	2,061584
25	30	0,4	35,43823	22,56484	1,842041	845,6812	1059,806	3709,309	2,246794	3,528604	43,22509
25	30	0,8	46,19809	33,3247	12,6019	740,68	872,0864	1418,158	1,7235	2,38929	6,318282
25	30	1,2	52,49221	39,61882	18,89602	694,8567	799,8193	1158,13	1,516842	2,009711	4,213712
25	30	1,6	56,95795	44,08456	23,36177	667,0609	758,2272	1041,573	1,397915	1,806128	3,408235

Продовження додатку Г

30	5	0,4	110,8504	97,97701	77,25421	478,1609	508,6049	572,7717	0,718287	0,812664	1,030654
30	5	0,8	121,4541	108,5807	87,85795	456,8109	483,1325	537,0963	0,655576	0,733301	0,906263
30	5	1,2	127,6569	114,7835	94,06074	445,5746	469,8972	519,085	0,623722	0,693674	0,8465
30	5	1,6	132,0579	119,1845	98,46169	438,0871	461,14	507,3516	0,602936	0,66806	0,808664
30	10	0,4	95,59023	82,71684	61,99404	514,9154	553,5358	639,3927	0,832955	0,96259	1,284355
30	10	0,8	106,194	93,32057	72,59778	488,5317	521,1395	590,8551	0,749783	0,853214	1,096761
30	10	1,2	112,3968	99,52336	78,80057	474,8602	504,6382	567,1239	0,708405	0,800037	1,010429
30	10	1,6	116,7977	103,9243	83,20152	465,8279	493,8375	551,9212	0,681712	0,766157	0,956982
30	15	0,4	80,33005	67,45666	46,73387	561,699	612,9573	736,4221	0,991191	1,180349	1,703741
30	15	0,8	90,93379	78,0604	57,33761	527,9345	569,8063	664,8488	0,875608	1,02001	1,388659
30	15	1,2	97,13658	84,26319	63,5404	510,8004	548,4332	631,5645	0,819695	0,944925	1,253099
30	15	1,6	101,5375	88,66414	67,94134	499,608	534,6489	610,767	0,784167	0,898022	1,171928
30	20	0,4	65,06988	52,19649	31,4737	624,0978	696,8222	897,3643	1,223644	1,525436	2,529807
30	20	0,8	75,67362	62,80023	42,07743	578,7225	635,2754	776,1006	1,052182	1,267868	1,892282
30	20	1,2	81,87641	69,00302	48,28022	556,3694	606,0502	724,5328	0,97247	1,153897	1,649172
30	20	1,6	86,27736	73,40397	52,68117	541,9937	587,6015	693,6094	0,922865	1,084715	1,511401
30	25	0,4	49,80971	36,93632	16,21352	713,3221	828,3538	1250,27	1,598531	2,155666	4,910863
30	25	0,8	60,41345	47,54006	26,81726	647,7029	730,1512	972,1549	1,317958	1,674848	2,969072

Продовження додатку Г

30	25	1,2	66,61624	53,74285	33,02005	616,8117	686,7242	876,1002	1,19524	1,481544	2,411334
30	25	1,6	71,01719	58,1438	37,421	597,3941	660,2235	822,9718	1,121171	1,369405	2,127746
30	30	0,4	34,54954	21,67615	0,953351	856,4885	1081,313	5156,041	2,304586	3,673272	83,51847
30	30	0,8	45,15327	32,27989	11,55709	749,2005	886,0876	1480,875	1,76338	2,466625	6,889485
30	30	1,2	51,35606	38,48267	17,75988	702,5008	811,5402	1194,6	1,550399	2,069045	4,483273
30	30	1,6	55,75701	42,88362	22,16083	674,2065	768,7709	1069,423	1,428025	1,856708	3,592934

Додаток Д

Розрахунки максимально допустимої площі покриття сенсорної мережі при використанні додаткового підсилювача та зовнішньої антени

Висота передавальної антени, м	Висота приймальної антени, м		Відстань між радіомодулями для міста, км	Втрати сигналу в місті, дБ	Максимальна дальність передачі з урахуванням втрат в місті, м	Площа покриття в місті, км ²		Відстань між радіомодулями для передмістя, км	Втрати сигналу в передмісті, дБ	Максимальна дальність передачі з урахуванням втрат в передмісті, м	Площа покриття в передмісті, км ²		Відстань між радіомодулями для сільської місцевості, км	Втрати сигналу в сільській місцевості, дБ	Максимальна дальність передачі з урахуванням втрат в сільській місцевості, м	Площа покриття в сільській місцевості, км ²
5	5		0,456	121,88	456,02	0,65		0,480	109,90	480,22	0,72		0,528	90,85	528,18	0,88
5	10		0,485	107,70	485,11	0,74		0,514	95,84	514,24	0,83		0,574	77,05	573,52	1,03
5	15		0,520	93,66	520,20	0,85		0,556	81,96	556,10	0,97		0,632	63,48	631,88	1,25
5	20		0,564	79,82	563,49	1,00		0,609	68,29	609,20	1,17		0,710	50,26	710,15	1,58
5	25		0,619	66,19	618,80	1,20		0,679	54,94	679,22	1,45		0,822	37,56	821,45	2,12
5	30		0,692	52,88	692,29	1,51		0,777	42,04	776,47	1,89		0,994	25,63	994,47	3,11
10	5		0,462	118,61	462,26	0,67		0,488	106,64	487,50	0,75		0,538	87,55	538,05	0,91
10	10		0,493	104,43	492,65	0,76		0,523	92,54	523,34	0,86		0,586	73,71	586,38	1,08
10	15		0,530	90,37	529,57	0,88		0,568	78,65	567,66	1,01		0,649	60,15	649,12	1,32

Продовження додатку Д

10	20		0,576	76,50	575,60	1,04		0,625	64,98	624,51	1,23		0,735	46,96	734,63	1,70
10	25		0,635	62,86	634,96	1,27		0,701	51,64	700,60	1,54		0,860	34,32	859,38	2,32
10	30		0,715	49,58	714,99	1,61		0,809	38,76	808,61	2,05		1,060	22,54	1060,39	3,53
15	5		0,466	116,70	466,03	0,68		0,492	104,70	492,01	0,76		0,544	85,60	544,13	0,93
15	10		0,497	102,48	497,31	0,78		0,529	90,61	528,87	0,88		0,594	71,76	594,29	1,11
15	15		0,535	88,41	535,43	0,90		0,575	76,70	574,85	1,04		0,660	58,20	659,89	1,37
15	20		0,583	74,53	583,13	1,07		0,634	63,02	634,19	1,26		0,750	45,01	750,42	1,77
15	25		0,645	60,91	645,08	1,31		0,714	49,68	714,29	1,60		0,884	32,40	884,41	2,46
15	30		0,730	47,65	729,34	1,67		0,830	36,85	829,36	2,16		1,105	20,75	1105,26	3,84
20	5		0,469	115,34	468,76	0,69		0,495	103,32	495,28	0,77		0,549	84,23	548,53	0,95
20	10		0,501	101,12	500,63	0,79		0,533	89,23	532,96	0,89		0,600	70,38	600,11	1,13
20	15		0,540	87,05	539,59	0,91		0,580	75,30	580,14	1,06		0,668	56,81	667,92	1,40
20	20		0,589	73,16	588,58	1,09		0,641	61,62	641,31	1,29		0,762	43,63	762,15	1,82
20	25		0,653	59,53	652,50	1,34		0,724	48,29	724,49	1,65		0,903	31,05	903,40	2,56
20	30		0,740	46,25	740,30	1,72		0,845	35,47	845,33	2,24		1,141	19,49	1140,35	4,09
25	5		0,471	114,28	470,94	0,70		0,498	102,27	497,82	0,78		0,552	83,14	552,12	0,96
25	10		0,503	100,04	503,34	0,80		0,536	88,15	536,21	0,90		0,605	69,31	604,73	1,15
25	15		0,543	85,96	542,98	0,93		0,584	74,22	584,36	1,07		0,674	55,72	674,42	1,43

Продовження додатку Д

25	20		0,593	72,07	593,01	1,10		0,647	60,55	646,97	1,31		0,772	42,57	771,60	1,87
25	25		0,659	58,45	658,50	1,36		0,733	47,23	732,57	1,69		0,919	30,01	918,91	2,65
25	30		0,749	45,18	749,02	1,76		0,858	34,41	858,21	2,31		1,170	18,50	1170,37	4,30
30	5		0,473	113,41	472,72	0,70		0,500	101,39	499,97	0,79		0,555	82,26	555,06	0,97
30	10		0,506	99,19	505,49	0,80		0,539	87,28	538,87	0,91		0,609	68,42	608,61	1,16
30	15		0,546	85,09	545,76	0,94		0,588	73,35	587,82	1,09		0,680	54,85	679,75	1,45
30	20		0,597	71,20	596,64	1,12		0,652	59,67	651,72	1,33		0,780	41,69	779,70	1,91
30	25		0,664	57,56	663,55	1,38		0,740	46,35	739,49	1,72		0,932	29,15	932,39	2,73
30	30		0,756	44,29	756,48	1,80		0,869	33,55	869,21	2,37		1,196	17,71	1196,32	4,50