

ТЕСТУВАННЯ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ЕКСПРЕС-ДІАГНОСТИКИ СТАНУ РОСЛИН

Вступ. Сьогодні бурхливо розвиваються та впроваджуються у промисловість та повсякдення бездротові технології, до яких відносять і бездротові сенсорні мережі (БСМ). БСМ – багаторівневі, розподілені мережі, побудовані за принципами самоорганізації, з великою кількістю сенсорів та виконавчих механізмів, які об'єднано радіоканалом. Особливості бездротових сенсорних мереж – це розподіленість у просторі, масштабованість, низьке енергоспоживання, надійність та висока якість передачі інформації. Визначаючі фактори розгортання сенсорних мереж – це невисока вартість усіх складових елементів мережі, а також їх невеликі розміри, можливість використання у важкодоступних місцях. Типова БСМ складається із великої кількості простих пристроїв – вузлів для збору інформації та декількох більш складніших пристроїв, які ще називають координаторами, для обробки інформації та керування мережею.

Сенсорні мережі можуть розгортатися як на відкритих територіях, так і у закритих приміщеннях, наприклад, лабораторіях або теплицях. Сенсорні мережі класифікують за призначенням: віддалений моніторинг, медицина, системи контролю та безпеки, сільське господарство, управління. В більшості випадків реалізація залежить від вимог конкретної прикладної задачі. БСМ відрізняються за складом, технічними характеристиками: стандартом передачі даних, дальністю дії, швидкістю та точністю передачі інформації, топологією, протоколами передачі даних. Важливий етап перед запуском серійного виробництва – проведення тестування БСМ.

Мета – виконати огляд та короткий аналіз видів тестування бездротових сенсорних мереж. Розробити план натурального експерименту для тестування БСМ. За результатами натурального експерименту проаналізувати роботу бездротової сенсорної мережі для експрес-діагностики стану рослин.

1. Види тестування бездротових сенсорних мереж – імітаційне моделювання; макетне тестування, натурний експеримент. Розробці бездротової сенсорної

Авторами виконано огляд видів тестування мереж. Розроблено план натурального експерименту та визначено алгоритм тестування бездротової сенсорної мережі для експрес-діагностики стану рослин. Параметри тестування мережі: якість зв'язку мереж, час самоорганізації мережі, дальність зв'язку мереж, час роботи бездротових сенсорів у автономному режимі.

Ключові слова: ZigBee, бездротова сенсорна мережа, сенсор, натурний експеримент.

мережі передують моделювання мережі та її вузлів, що надає можливості оцінити теоретичні розрахунки, спрогнозувати поведінку реальної мережі, протестувати протоколи, провести підбір топології. Ефективний засіб для оцінки показників якості БСМ це імітаційне моделювання, яке проводять за допомогою спеціалізованих програмних середовищ – мережевих симуляторів. Існує велика кількість мережевих симуляторів. Найбільш відомі – Anylogic, TOSSIM, OPNET Modeler, Network Simulator (NS, NS-2, NS-3), GloMoSim, Worldsens, NetSim, OMNeT++, Castalia.

Коротко оглянемо OMNeT++ і Castalia. OMNeT++ – система моделювання на основі дискретних подій, яка може бути використана для таких завдань як: моделювання дротових і бездротових комунікаційних систем; протоколів моделювання; моделювання мереж масового обслуговування. Castalia побудована на платформі OMNeT++ і може використовуватися для планування дослідження власних алгоритмів і протоколів у реалістичному середовищі бездротового каналу та приближеною до реальності поведінкою вузла. Castalia це система моделювання бездротових сенсорних мереж та мереж з малопотужними вузлами. Вона може використовуватися для оцінки різноманітних характеристик мереж для конкретних застосувань. Слід відмітити, що система Castalia не орієнтована на конкретну апаратну платформу, але при цьому вона гарантує загальний спосіб перевірки алгоритму перед його реалізацією на конкретній апаратно-програмній платформі. У роботі [1] автор обґрунтовує вибір середовища моделювання OMNeT++, Castalia. Критерієм вибору цих програм було те, що в сукупності вони здатні досить реально моделювати мережі з малопотужних бездротових вузлів та імітувати певні проблеми в енергоспоживанні таких вузлів, перешкоди та завади радіосигналів. Крім того, вони безкоштовні для некомерційного використання, зазначає І.Б. Галелюка, який є одним із розробників бездротової сенсорної мережі для експрес-діагностики стану рослин. Надалі автор наводить оцінку основних параметрів отриманих у системах OMNeT++ і Castalia, а саме: залежності якості зв'язку мережі від розмірів охопленої території, відстані між вузлами, потужності передавача, часу автономної роботи вузлів, координатора та ін.

Авторами [2] розглянуто вибір іншої платформи моделювання для створення Ad-hoc мережі для потреб сільського господарства. Особливості даної мережі – можливість передачі даних на великій відстані без збільшення потужності передавача; стійкість до змін в топології мережі; можливість швидкої зміни топології за умов несприятливого шумового оточення або виведення з ладу одного з вузлів; висока швидкість розгортання. Враховуючи зазначені особливості мережі, на основі детального та всебічного аналізу систем моделювання автори звернули увагу на середовище моделювання мереж – симулятор дискретних подій NETWORK SIMULATOR 3 (NS-3). NS-3 має розроблені моделі бездротових мереж різних типів, що дозволяють проводити моделювання з рухомими об'єктами у тривимірному просторі. Застосовуючи даний симулятор можна не тільки моделювати розроблювальну мережу, але й тестувати взаємодію різних протоколів у рамках однієї модельованої мережі, наприклад, WiMAX, Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth та ін. Це дає можливість без створення прототипів вузлів мережі тестувати їх поведінку на стику кількох протоколів та отримувати результати, які допоможуть оптимальніше підійти до вибору відповідних апаратних та програмних засобів розроблюваної мережі.

Розглянемо макетне тестування. Його проводять за використанням налагоджувальних наборів або модулів для відпрацювання та тестування програмних та апаратних засобів, що дозволить у короткі терміни забезпечити роботу сенсорів у мережах ZigBee. Налагоджувальні модулі являють собою функціонально закінчені пристрої, що включають антену, приймач-передавач 802.15.4, мікроконтролер, який реалізує стек Zigbee, зовнішній інтерфейс, схеми живлення і керування. Якщо перед розробником постає задача в короткий термін забезпечити роботу сенсорів у мережі ZigBee, то найкраще рішення – використання готових модулів. Такі модулі виробляють багато компаній (Jennic/NXP, Microchip, Panasonic, ST Microelectronics та ін.). Для спрощення процесу розробки пристроїв ZigBee в асортименті фірм виробників є налагоджувальні набори, за допомогою яких

інженер може освоювати роботу з ZigBee і тестувати програмне забезпечення. У такі комплекти, окрім самих модулів ZigBee, можуть входити інтерфейсні плати з перемикачами й індикаторами, програматори, антени, програмне забезпечення тощо. Як правило, в комплекті є два або більше модулів ZigBee, що дозволяє організувати тестову мережу на робочому місці без використання додаткового обладнання.

Як приклад налагоджувального набору наведено набір [3] "JN516X-EK001" від компанії NXP®, рис. 1. Цей набір спеціально розроблено для використання з серією контролерів JN516x. Огляд саме цього набору обґрунтовано тим, що вузли бездротової сенсорної мережі для експрес-діагностики стану рослин виготовлені на базі мікроконтролера JN5168.



РИС. 1. Налагоджувальний набір компанії NXP

Налагоджувальний набір включає кілька бездротових плат, плати розширення, USB-ключі, пульт дистанційного керування, спеціально запрограмований маршрутизатор Cisco та повний набір програмного забезпечення, має все необхідне для розробки системи. Маршрутизатор працює під керуванням прошивки OpenWRT. Надалі дане програмне забезпечення можна використовувати для кінцевих прототипів, застосовуючи мікросхеми або модулі JN516x.

У роботі [4] розглянуто підходи до тестування сенсорних мереж, як вузлів IoT, описано різні види і методи тестування. Як метод дослідження наводять аналіз існуючих видів і підходів до тестування, які використовують у мережах зв'язку в даний час. Проаналізовано види тестування, що проводять для забезпечення стабільної роботи IoT: тестування зручності користування (Usability Testing); тестування мережевих підключень (Connectivity Testing); тестування навантаження (Benchmark Testing); тестування безпеки (Security Testing). В ході такого тестування можна оцінити ймовірно-часові параметри, пов'язані з обміном даними, а також з використанням мережевих ресурсів, протоколів і т. д.

Після проходження стадії імітаційного та натурального моделювання, перед запуском у серійне виробництво, створюється прототип БСМ, який необхідно протестувати у натурних умовах. Тестування допоможе виявити проблеми, обумовлені довкіллям, в якому буде знаходитись мережа: відмовостійкість вузлів, енергоефективність на великих відстанях (при передачі даних на великі відстані вузол витрачає більше енергії). Такий вид тестування прототипу сенсорної мережі і буде натурним експериментом.

2. Основні означення теорії планування експерименту. *Експеримент* – система операцій, впливів і (або) спостережень, що спрямовані на отримання інформації про об'єкт при дослідницьких випробуваннях. У процесі *натурного експерименту* досліджується реальне явище чи процес.

Експерименти, як правило, мають на меті уточнити характеристики обладнання, явища, процесу чи реального об'єкта, визначити надійність його роботи в непередбачуваних або аварійних режимах, перевірити правильність теоретичних розрахунків тощо. При цьому враховують весь обсяг факторів, що діють на досліджуваній об'єкт. **Дослід** – відтворення досліджуваного явища в певних умовах проведення експерименту при можливості реєстрації його результатів. Дослід – окрема елементарна частина експерименту. **План експерименту** – набір інструкцій щодо проведення експерименту, в якому подається послідовність роботи і вказується характер та значення змінних, наводяться рекомендації до виконання повторних експериментів. Планування експерименту – вибір плану експерименту, що задовольняє заданим вимогам. Під плануванням експерименту розуміють загальну сукупність дій, які направлено на розробку стратегії експериментування від початкових до заключних етапів вивчення об'єкта дослідження (від отримання апріорної інформації до створення працездатної математичної моделі або визначення оптимальних умов). **Об'єкт дослідження** – носій деяких невідомих таких, що підлягають вивченню властивостей і якостей. **Послідовність проведення експерименту (алгоритм)** – порядок, у якому вносять зміни в роботу об'єкта дослідження. **Контрольований експеримент** – такий, при якому вплив зовнішніх змінних виключається, а незалежні змінні можна встановлювати точно за бажанням експериментатора. **Дані експерименту** – будь-яка інформація в символічному вигляді, отримана в момент експерименту (фотознімки, цифри, прості відповіді «так – ні», спектри, сигнали тощо). **Необроблені дані** – дані, отримані безпосередньо з приладів. **Оброблені дані** – та сама інформація, змінена в результаті виконання над нею певних математичних дій [5].

3. Тестування бездротової сенсорної мережі методом проведення натурального експерименту.

Об'єкт дослідження – взірець бездротової сенсорної мережі, розроблено та виготовлено колективом авторів ІК НАНУ імені В.М. Глушкова [6, 7]. Мережа працює на базі стеку протоколу ZigBee стандарту IEEE 802.15.4 у частотному діапазоні 2,4 ГГц. Мережа містить у своєму складі малопотужні бездротові вузли зі змінною потужністю передачі від 0 до – 5 дБм та чутливістю приймання – 95 дБм. Швидкість передавання даних за результатами моделювання складала 250 кбіт/с. Енергоспоживання вузла не перевищує 60 мВт. Усі вузли мережі виготовлено на базі бездротового мікроконтролера JN5168 [8], розробленого компанією NXP, який містить 32-бітовий RISC-процесор. Бездротова сенсорна мережа призначена для експрес-діагностики стану живої рослини на основі методу індукції флуоресценції хлорофілу. Бездротові сенсори за допомогою координатора мережі об'єднуються у бездротову сенсорну мережу для покриття великих територій, є можливість підтримки одноразово до 100 сенсорів у мережі. До складу мережі, що показана на рис. 2, входить один координатор та чотири сенсори. Кожен сенсор має свою MAC адресу. У статті замість MAC адрес використовуються порядкові номери: № 1, № 2, № 3, № 4. Сенсорні вузли виконують вимірювання ІФХ, з'єднуються з координатором, передають виміряні дані по радіоканалу до координатора. Передача даних у мережі здійснюється з використанням технології CCA (clear channel assessment – оцінка доступності каналу), що дозволяє уникати конфлікту каналів при передачі даних. Завдяки функції вибору і об'єднання каналів продуктивність бездротового з'єднання істотно зростає.

Для проведення натурального експерименту розроблено його план з тестування мережі.

План експерименту складається з пунктів. 1. Визначення вимог до прикладної задачі БСМ. 2. Визначення мети експерименту. 3. Визначення параметрів мережі, що будуть протестовані. 4. Вибір місця проведення та умови проведення експерименту. 5. Розробка алгоритму виконання тестування мережі. 6. Розробка стадій з реєстрації результатів вимірювань сенсорами. 7. Визначення етапів тестування мережі. 8. Проведення дослідів тестування мережі за етапами. 9. Формування звіту.



РИС. 2. Візрєць бездротої сенсорної мережі

Натурний експеримент виконано згідно пунктів вищезазначеного плану тестування мережі.

1. Мережу призначено для потреб точного землеробства, для використання на великих відкритих територіях. В основу реалізації даної мережі покладено вимоги конкретної прикладної задачі: захищеність від впливу кліматичних умов для роботи в польових умовах; тривалість автономної роботи без заміни елементів живлення та проведення технічного обслуговування; невисока вартість; мала вага та габаритні розміри; висока надійність роботи; невелика споживна потужність; дальність бездротової передачі даних; топологія сенсорної мережі; апаратні обмеження; модель передачі даних.

2. Мета натурного експерименту – перевірка в натурних умовах коректної роботи всіх елементів мережі, перевірка роботи окремих кластерів мережі та перевірка роботи мережі в цілому.

3. Визначено параметри мережі, що будуть протестовані: час самоорганізації мережі – час за який відбувається під'єднання до мережі усіх її вузлів; дальність зв'язку – відстань, на якій встановлюється стабільний зв'язок між сенсорами та координатором; якість зв'язку – мається на увазі відношення успішно прийнятих повідомлень від конкретного вузла до загальної кількості повідомлень, відісланих цим вузлом; тривалість автономної роботи елементів мережі – роботи вузлів мережі без підзарядки.

4. Місцем проведення натурного експерименту обрано територію плодового саду (порода дерев – черешня), що є наближеним до умов використання користувачем. Розроблено алгоритм тестування мережі. 1. *Підготовчий етап*. Перевірка обладнання у місці розташування мережі: включення координатора мережі та сенсорів, перевірка рівня заряду сенсорів та координатора. 2. *Проведення вимірювань*. Розташування сенсорів на листях дерев згідно розробленої методики [9]; замір висоти розміщення сенсорів; замір відстані сенсорів від координатора; перевірка приєднання всіх сенсорів до мережі, налаштування параметрів вимірювань у меню координатора; запуск вимірювань; перевірка наявності даних у сенсорі; перевірка передачі повідомлень від сенсора до координатора. 3. *Реєстрація даних*. Фіксація у журналі реєстрації. 4. *Обробка даних*. Формування електронного журналу експеримента. Передача даних від координатора до ПК. Обробка даних. Звіт за результатами тестування мережі.

5. Розроблено стадії з реєстрації результатів вимірювань сенсорами, що включають. Розробку паперового журналу реєстрації (де фіксується: відстань сенсорів від координатора; відстань між сенсорами; висота розміщення сенсора над рівнем землі, дата, час вимірювання, номер вимірювання у сенсорі, номер вимірювання у координаторі; тривалість вимірювання; номер сенсора, рівень заряду сенсора до та після вимірювання, наявність сенсора у мережі, успішність передачі даних від сенсорного вузла до координатора); перевірку робочого стану обладнання, перевірку заряду акумуляторних батарей координатора та сенсорів до початку вимірювань; проведення випробовувань згідно з планом експерименту; фіксацію даних у паперовому журналі реєстрації; формування електронного журналу, приклад наведено у табл. 1.

ТАБЛИЦЯ 1. Приклад електронного журналу реєстрації вимірів

№ з/п	Номер сенсора	Номер вимірювання у координаторі	Рівень заряду сенсора до вимірювання	Рівень заряду сенсора після вимірювання	Кількість вимірювань у сенсорі	Світлодіод при вимірюванні	Наявність сенсора у мережі	Передача даних до координатора
1	№ 2	1	75 %	73 %	5	+	+	+

6. Визначення етапів. Тестування мережі здійснюється у п'ять етапів. Для кожного етапу визначено змінні параметри: відстань вузлів мережі (сенсорів) до координатора; щільність розміщення вузлів у просторі, висота розміщення вузлів над рівнем землі (визначається у метрах); визначається кластер мережі, що тестується (обираються окремі сенсори, з яких буде сформовано мережу).

7. Проведення тестування мережі за етапами. Натурний експеримент з тестування БСМ проводиться за алгоритмом (п. б). Згідно підготовчого етапу перевірено обладнання у місці розгортання мережі: включено координатор мережі та сенсори, перевірено рівень заряду сенсорів та координатора та зафіксовано показники у журналі. Визначено кластери для проведення кожного етапу. Надалі для проведення вимірювань сенсори розташовано на листях дерев показано на рис. 3, за схемою, – на рис. 4.



РИС. 3. Натурні вимірювання ІФХ бездротовими сенсорами

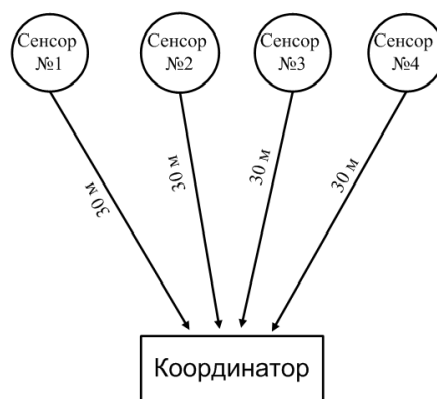


РИС. 4. Схема розгортання БСМ для натурального вимірювання

Результати тестування БСМ. Для перевірки дальності та якості зв'язку мережі тестування проведено кластерами на різних відстанях у п'ять етапів.

Етап 1. Виконано тестування роботи мережі кластером у складі координатора і двох сенсорів: № 2, № 3. Відстань від сенсорів до координатора – 20 м, висота розміщення сенсора над поверхню землі – 1,5 м, відстань сенсорів один від одного – 2 м, тривалість одного вимірювання – 4 хв. Початковий заряд координатора – 49 %, заряди акумуляторних батарей сенсора № 2 – 71 %, сенсора № 3 – 61 %. Кількість вимірювань – 20 (табл. 2).

ТАБЛИЦЯ 2. Результати першого етапу тестування

Сенсори	Рівень падіння заряду акумуляторної батареї за етап, %	Кількість вимірювань за етап	Успішні сеанси передачі даних	Невдалі сеанси передачі даних
№ 2	22	10	10	0
№ 3	13	10	9	1

Етап 2. Виконано тестування роботи мережі кластером у складі координатора і трьох сенсорів: № 1, № 2, № 3. Відстань від сенсорів до координатора – 30 м, висота розміщення сенсорів над поверхнею землі – 2 м, відстань сенсорів один від одного – 3 м, тривалість одного вимірювання – 4 хв. Початковий заряд координатора складав 83 %, заряди акумуляторних батарей сенсорів № 2 – 48 %, № 3 – 47 %, № 1 – 81 %. Кількість вимірювань – 21 (табл. 3).

ТАБЛИЦЯ 3. Результати другого етапу тестування

Сенсори	Рівень падіння заряду акумуляторної батареї за етап, %	Кількість вимірювань за етап	Успішні сеанси передачі даних	Невдалі сеанси передачі даних
№ 1	17	7	7	0
№ 2	8	7	7	0
№ 3	6	7	7	0

Етап 3. Виконано тестування роботи мережі кластером у складі координатора і чотирьох сенсорів: № 1, № 2, № 3, № 4. Відстань від сенсорів до координатора – 30 м, висота розміщення сенсорів над поверхнею землі – 2 м, відстань сенсорів один від одного – 3 м, тривалість одного вимірювання – 4 хв. Початковий заряд координатора складав 81 %, заряди акумуляторних батарей сенсорів № 2 – 89 %, № 3 – 91 %, № 1 – 100 %, № 4 – 100 %. Кількість вимірювань – 40 (табл. 4).

ТАБЛИЦЯ 4. Результати третього етапу тестування

Сенсори	Рівень падіння заряду акумуляторної батареї за етап, %	Кількість вимірювань за етап	Успішні сеанси передачі даних	Невдалі сеанси передачі даних
№ 1	20	10	10	0
№ 2	15	10	8	2
№ 3	18	10	9	1
№ 4	0	10	9	1

Етап 4. Виконано тестування роботи мережі кластером у складі координатора і двох сенсорів: № 2, № 3. Відстань розміщення сенсорів від координатора – 40 м, висота розміщення сенсора над поверхнею землі – 1,5 м, відстань сенсорів один від одного – 2 м. На даному етапі формування мережі у повному складі не відбулось, сенсор № 2 не приєднався до мережі. Сенсор № 3 приєднався до координатора, виконав вимірювання, але передача даних до координатора не відбулась.

Етап 5. Виконано перевірку роботи мережі кластером у складі координатора і двох сенсорів: № 2, № 3. Відстань від сенсорів до координатора – 60 м, висота розміщення сенсора над поверхнею землі – 1,5 м, відстань сенсорів один від одного – 2 м. На даному етапі формування мережі не відбулось. Виконання вимірювань не було здійснено.

В ході натурного експерименту з тестування БСМ перевірено роботу окремих кластерів мережі та роботу мережі в цілому. За період тестування не виявлено нештатної роботи сенсорів та координатора. Загальна кількість вимірювань за п'ять етапів – 82. Середній час формування мережі складає 6,75 с. Перевірено якість зв'язку БСМ. При тестуванні мережі передача пакетів даних від сенсорів до координатора здебільшого відбувалась успішно. Загальна кількість успішно переданих пакетів даних – 76. Інтегральна оцінка невдалих сеансів передачі даних у мережі складає 7,32 %, по кожному сенсору результати наведено у табл. 5. Отримані результати зумовлені випадковими перешкодами та завадами на шляху радіосигналу і конфліктами при передачі повідомлень.

ТАБЛИЦЯ 5. Невдалі сеанси передачі даних по кожному сенсору

Сенсори	Загальна кількість вимірювань	Успішні сеанси передачі даних	Відсоток невдалих передач даних, %
№ 1	17	17	0
№ 2	27	25	7,41
№ 3	28	25	10,71
№ 4	10	9	10

Перевірено дальність зв'язку мережі. При тестуванні мережі на відстані 20 та 30 м між вузлами та координатором зафіксовано стабільний зв'язок. Мережа формувалась у повному складі, час формування мережі складав 6 с. При збільшенні відстані до 40 – 60 м формування мережі не відбулось.

По кожному сенсору отримано статистику зі зменшення заряду акумуляторної батареї. Процент заряду батареї у всіх сенсорах зменшувався по-різному, як показано на гістограмі рис. 5. Заряд сенсора № 4 не зменшився, рівень заряду залишився 100 %.

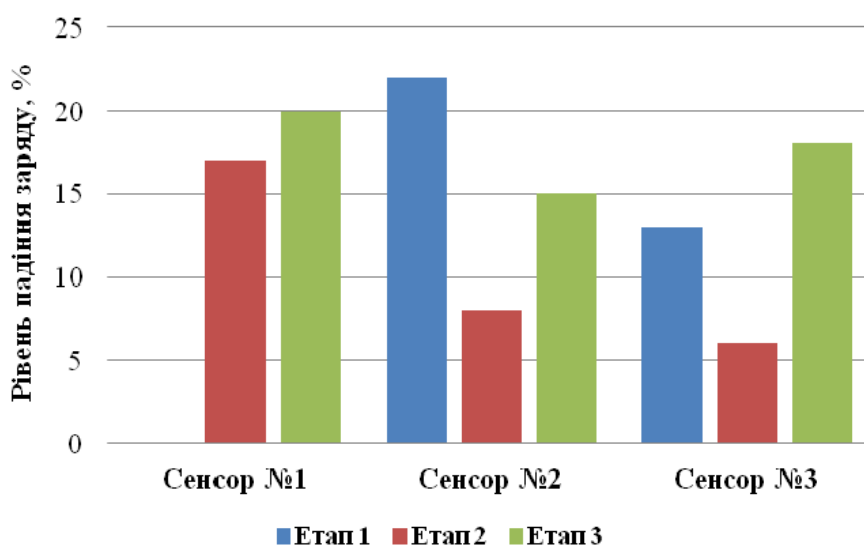


РИС. 5. Рівень падіння заряду сенсорів на різних етапах тестування

Сигнали ІФХ, виміряні сенсорами, успішно передано до ПК у форматі з розширенням CSV та надалі опрацьовано у середовищі MS Excel. Обчислено середні значення по кожному сенсору за кожним етапом, побудовано графіки середніх значень ІФХ. Середні значення ІФХ за третім етапом показано на рис. 6.

За допомогою БСМ успішно виміряно ІФХ дерев черешні, за якими у користувача мережі – працівника агросфери є можливість оцінити стан цих рослин.

За результатами натурного експерименту робота бездротової сенсорної мережі для експрес-діагностики стану рослин вважається успішною.

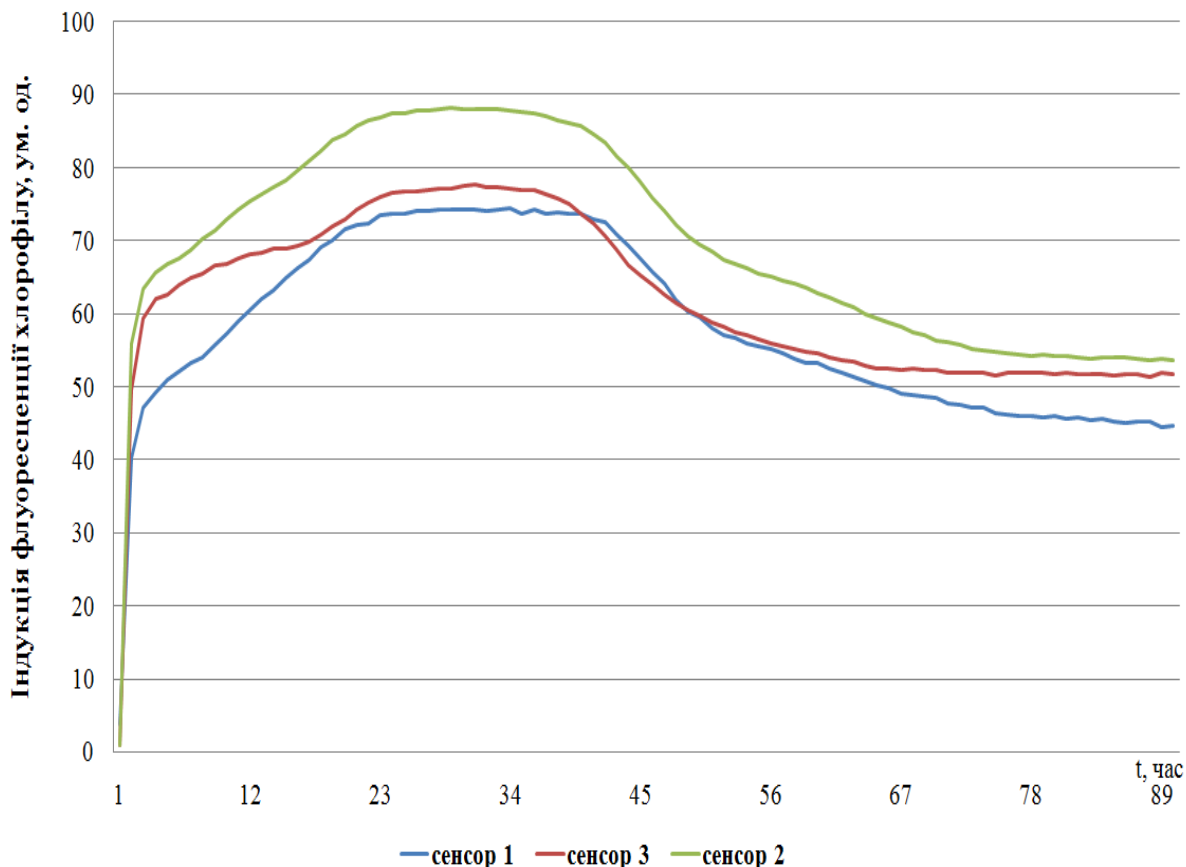


РИС. 6. ІФХ за даними сенсорів

Висновки. Авторами розглянуто види тестувань бездротових сенсорних мереж. Наведено основні означення з теорії планування експерименту, розроблено план натурного експерименту з тестування БСМ. Докладно описано проведення експерименту в природних умовах. Наведено та проаналізовано результати експерименту з тестування взірця бездротової сенсорної мережі для експрес-діагностики стану рослин.

Список літератури

1. Галелюка І.Б. Моделювання бездротових сенсорних мереж. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. 2015. № 14. С. 141–150.
2. Антонова Г.В., Тищенко В.В. Деякі підходи до моделювання бездротових сенсорних мереж. Міжнародна наукова молодіжна школа «Системи та засоби штучного інтелекту», АПС'2018: тези доповідей (м. Київ, 18–19 жовтня 2018 р.). Київ: ІПШІ, 2018. С. 9–11.
3. JN516X-EK001: Evaluation kit - ZigBee, JenNet-IP, or IEEE 802.15.4 network. <https://www.nxp.com/products/no-longer-manufactured/evaluation-kit-zigbee-jennet-ip-or-ieee-802-15-4-network:JN516X-EK001> (дата звернення 02.10.2020)
4. Долгушин Р.А., Киричек Р.В., Кучерявый А.Е. Обзор возможных видов и методов тестирования интернет вещей. *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2016. Т. 4. № 2.
5. Красовский Г.И., Филаретов Г.Ф. Планирование эксперимента. Мн.: БГУ им. В.И. Ленина, 1982. 302 с.

6. Palagin O., Romanov V., Galelyuka I., Hrusha V., Voronenko O. Wireless Smart Biosensor for Sensor Networks in Ecological Monitoring. Proceeding of the 9th IEEE International conference on «*Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*», IDAACS'2017. Bucharest, Romania, September 21–23, 2017. P. 679–683. <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2017.8095177>
7. Romanov V., Galelyuka I., Antonova H., Kovyrova O., Hrusha V., Voronenko O. Application of wireless sensor networks for digital agriculture. Proceeding of the 10th IEEE International conference on «*Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*», IDAACS'2019. Metz, France, September 18–21, 2019. P. 340–344. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1109/IDAACS.2019.8924267>
8. JN5168: ZigBee and IEEE802.15.4 wireless microcontroller with 256 kB Flash, 32 kB RAM. <https://www.nxp.com/products/wireless/proprietary-ieee-802.15.4-based/zigbee-and-ieee802.15.4-wireless-microcontroller-with-256-kb-flash-32-kb-ram:JN5168> (дата звернення 07.09.2020)
9. Palagin O., Grusha V., Antonova H., Kovyrova O., Lavrentyev V. Application Of Biosensors For Plants Monitoring. International Journal «*Information Theories and Applications*». 2017. Vol. 24, No 2. P. 115–126.

Одержано 19.10.2020

Антонова Ганна Валеріївна,

молодший науковий співробітник
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ,
antanna78@gmail.com

Кедич Анна Василівна,

інженер-програміст 1-ої категорії
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ.

УДК 578.01+681.7.08

А.В. Антонова, А.В. Кедич

Испытание беспроводной сенсорной сети для экспресс-диагностики растений

Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ
Переписка: antanna78@gmail.com

Авторами виконан обзор видов тестирования сетей. Самые распространенные – это имитационное моделирование, макетное моделирование, натурный эксперимент. Рассмотрено существующие программные среды для имитационного моделирования и отладочные наборы для макетного тестирования. Приведены основные определения и термины по теории планирования эксперимента. Согласно теории планирования эксперимента авторами разработан план для проведения натурального эксперимента и определен алгоритм тестирования беспроводной сенсорной сети для экспресс-диагностики состояния растений. Параметры тестирования сети – это качество связи сети; время формирования сети; дальность связи сети; время работы беспроводных датчиков в автономном режиме. Подробно описана подготовка и процесс проведения натурального эксперимента по тестированию образца БСМ. Для проверки дальности и качества связи сети, тестирование сети проведено различными кластерами и на разных расстояниях в пять этапов. В ходе эксперимента по испытанию тестового образца БСМ проверена работа отдельных узлов сети, и работа сети в целом, за период тестирования не выявлено нештатной работы сенсоров и координатора. Всего за пять этапов выполнено 82 измерения. Проверено качество связи БСМ. При тестировании сети передача пакетов данных от сенсоров к координатору в основном происходила успешно, по данным каждого этапа сформированы таблицы, подсчитана интегральная оценка неудачных сеансов передачи данных в сети. Проверена дальность связи сети на расстоянии 20, 30, 40 и 60 м. Построен график зависимости мощности сигнала сенсора от расстояния. По каждому сенсору получено статистику по уменьшению заряда аккумуляторной батареи. По результатам натурального эксперимента работа беспроводной сенсорной сети для экспресс-диагностики состояния растений считается успешной.

Ключевые слова: ZigBee, беспроводная сенсорная сеть, сенсор, натурный эксперимент.

UDC 578.01+681.7.08

H. Antonova, A. Kedych

Testing of the Wireless Sensor Network for the Express-Diagnostic of the State of Plant

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Kyiv

Correspondence: antanna78@gmail.com

The authors reviewed the types of network testing. The most common are simulation modeling, mock-up modeling, and full-scale experiments. It was examined existing software environments for simulation and debugging kits for mock testing. The main definitions and terms on the theory of experiment planning are given. According to the theory of experiment planning, the authors developed a plan for conducting a full-scale experiment and defined an algorithm for testing a wireless sensor network for express diagnostics of plants' state. Network testing parameters are the quality of network communication; network formation time; network communication distance; and battery life of sensors. The preparation and process of conducting a full-scale experiment for testing a WSN sample is described in detail. Wireless sensor network testing was carried out by different clusters, at different distances in five stages. During the experiment on testing the WSN, the operation of individual network nodes was checked, and the operation of the network as a whole. During the testing period, no abnormal operation of the sensors and the coordinator was revealed. 82 measurements were made in just five stages. The communication quality of the wireless sensor network has been checked. When testing the network, the transmission of data packets from the sensors to the coordinator was mostly successful. The integral estimate of unsuccessful data transmission sessions in the network was calculated. The communication range of the network at a distance of 20, 30, 40 and 60 m was checked. A graph of the dependence of the sensor signal power on the distance was built. Statistics were obtained on the decrease in the battery charge for each sensor. Based on the results of a full-scale experiment, the operation of a wireless sensor network for express diagnostics of the state of plants is considered successful.

Keywords: Zigbee, wireless sensor network, sensor, full-scale experiment.