

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

КОВАЛЬОВА ЮЛІЯ ВІКТОРІВНА



УДК 004.7: 004.932

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ
ДАНИХ В МЕРЕЖАХ ЕНЕРГОМОНІТОРИНГУ
НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Бабенко Тетяна Василівна,
професор кафедри кібербезпеки та
захисту інформації
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка, м. Київ.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кіріченко Людмила Олегівна,
професор кафедри прикладної математики
Харківського національного університету
радіоелектроніки, м. Харків;

кандидат технічних наук
Мірошниченко Микола Юрійович,
старший викладач кафедри комп'ютерних наук
Таврійського державного агротехнологічного
університету імені Дмитра Моторного, м. Мелітополь.

Захист відбудеться «13» травня 2021 р. о 13-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.01 у Національній металургійній академії України МОН України за адресою: 49600, м. Дніпро, проспект Гагаріна, 4.

З дисертацією можна ознайомитись на сайті <http://nmetau.edu.ua> та у бібліотеці Національної металургійної академії України МОН України за адресою: 49600, м. Дніпро, проспект Гагаріна, 4.

Автореферат розісланий «09» квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Т.В. Селівборстова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розробка інтелектуальних систем обліку та управління споживанням енергетичних ресурсів на об'єктах критичної інфраструктури, зокрема в сфері житлово-комунального господарства є актуальним і складним завданням. В його вирішенні зацікавлені споживачі і постачальники ресурсів, а також компанії, що займаються їх розподілом. Останні досягнення технологічного прогресу зробили можливим створення мініатюрних приймачів з надзвичайно малим енергоспоживанням, здатних об'єднуватися в мережу і взаємодіяти один з одним за допомогою бездротових каналів зв'язку. Мережі таких пристроїв отримали назву бездротових мереж моніторингу (БММ), що, зокрема, підкреслює їх основне призначення – збір даних з датчиків (лічильників) для подальшого аналізу і передачі керуючих команд. Незважаючи на видимі переваги і потенційні можливості бездротових мереж, вони ще далекі від використання в повсякденному житті. На сьогоднішній день розроблено велику кількість різних реалізацій бездротових мереж, однак всі вони оптимізовані для вирішення окремих прикладних завдань і для оцінки продуктивності тієї чи іншої мережі необхідно розробляти методики, що дозволяють оцінити функціонування мережі у цілому. Таким чином, завдання розробки моделей і алгоритмів просторової організації зони покриття бездротових мереж є центральною при підвищенні якості обслуговування і скороченні часу передачі даних.

Під бездротовою сенсорною мережею (БСМ) розуміється розподілена мережа сенсорів (інтелектуальних автономних електронних пристроїв), кожен з яких оснащений елементом живлення обмеженої потужності, втрати якої в одиницю часу залежать від значень параметрів сенсорів в активному стані. Основним критерієм якості БСМ є час її життя, збільшення якого досягається, зокрема, мінімізацією енерговитрат БСМ. Однією з проблем, що перешкоджають підвищенню енергоефективності БСМ, є проблема нерівномірного споживання енергії вузлами мережі. Для збільшення часу життя БСМ необхідно вирішити цілий ряд задач, зокрема оптимальне розміщення сенсорів, визначення зони дії, а також дальності передачі і пошук оптимального розкладу активності кожного сенсора. Внесок у вирішення зазначених задач внесли В.М. Вишневський, В.С. Жданов, А.П. Кулешов, А.І. Ляхов, І.А. Мізін, О.Е. Кучерявий, Е.А. Саксонов, S. Borst, O. Vohma, M. Conti, R.G. Gallager, L. Kleinrock, P. Kyasanur, M. Neuts, C. Perkins, E. Royer, H. Takagi, W. Willinger, P. Abry та ін. дослідники. Завдяки роботам вчених існує ряд методів, спрямованих на вирішення зазначених завдань. До них відносяться програмна оптимізація каналного рівня протоколу мережі, індивідуальний підбір ємності батарей, щільності розміщення вузлів, потужності передавачів, позиціонування вузлів мережі. Разом з тим, ефективному вирішенню цих завдань перешкоджає як відсутність математичних моделей, що описують зміну енергоспоживання пристроїв в динаміці при зовнішньому втручанні в роботу мережі на фізичному і каналному рівнях, так і існуючі припущення про критичну важливість часу активного режиму роботи приймально-передавального тракту польових

пристроїв. У зв'язку з цим завдання дослідження режимів енергоспоживання та розробка математичних моделей бездротової передачі даних в мережах енергомоніторингу, що дозволяють не тільки оцінити час життя автономних мереж, але і оптимізувати їх роботу за критерієм максимізації часу життя, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика роботи відповідає вимогам, встановленим Законом України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» (від 16 січня 2016 року, №848-VIII), у тому числі розділам «Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави».

Метою роботи є підвищення якості функціонування бездротових сенсорних мереж енергомоніторингу та збільшення часу їх життя за рахунок розробки відповідних математичних моделей і методів дослідження режимів енергоспоживання.

Об'єктом дослідження є процеси мережевої взаємодії, характеристики елементів в інфраструктурі автономної системи моніторингу управління енергоспоживанням.

Предметом дослідження є математичні моделі передачі трафіку та продуктивності мереж; методи аналізу інформаційних потоків, дослідження яких дозволяє розробити найбільш ефективні засоби моніторингу та управління енергоспоживанням.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Провести системний аналіз досліджень в області побудови розподілених автономних бездротових систем моніторингу. Проаналізувати існуючі апаратно-програмні платформи децентралізованих бездротових мереж енергомоніторингу, що самоорганізуються. Виконати аналіз чинників, що впливають на час життя бездротових мереж моніторингу з автономним живленням. Дослідити енергоспоживання польових пристроїв при номінальних режимах експлуатації і в разі зміни умов функціонування мережі.

2. Розробити математичну модель для оцінки ефективності великомасштабних мереж на базі запитів бездротових сенсорних мереж, чії вузли виявляють і ретранслюють події, які корисні тільки протягом обмеженого часу.

3. Встановити фактори, що зумовлюють надійність та якість обслуговування автономних бездротових систем моніторингу за час їх життя впродовж міжпіврічного інтервалу.

4. Модифікувати та адаптувати транспортний протокол SCTM для врахування перешкод розповсюдженню радіосигналу і затримок в мережі передачі даних у відкритому ISM-діапазоні.

5. Розробити комплекс програм параметризації, обліку та управління польовими пристроями бездротової системи енергомоніторингу об'єктів комунального господарства.

Методи дослідження базуються на теорії систем і мереж масового обслуговування, теорії математичного моделювання, теорії графів, теорії обробки експериментальних даних, теорії прийняття рішень та оптимізації, теорії дослідження операцій, теорії ймовірності та математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше розроблено математичну модель функціонування великомасштабних мереж на базі запитів БСМ, чиї вузли виявляють і ретранслюють події, які потрібні тільки протягом обмеженого часу. Це дозволило підвищити точність оцінки затримок передачі даних, розрахунку енергоємності та терміну служби мережі.

2. Вперше запропоновано механізм динамічної адресації польових пристроїв бездротової Інтернет-системи збору даних і управління енергоспоживанням, що унеможливує віддалене стороннє втручання в роботу сегментів системи.

3. Вперше модифіковано протокол SCTMех, який інкапсульовано в транспортні протоколи ZigBee і LoRa, що дозволяє підвищити рівень захисту інформації на рівні польових пристроїв системи.

4. Удосконалено математичну модель оцінки працездатності польових пристроїв з автономним живленням і модернізовано архітектуру системи, в результаті чого час життя системи перевищив нормативний період перевірки приладів обліку.

5. Дістала подальшого розвитку методика побудови захищеної мережі передачі даних і системи в цілому, що базується на розроблених автором вимогах і моделях, в тому числі перехід до децентралізованої архітектури систем, побудованих на принципах технології блокчейн. Зокрема, це дозволяє проводити ідентифікацію польових пристроїв під контролем призначених користувачів.

Практична цінність одержаних результатів. Практичне значення дисертації підтверджується впровадженнями результатів роботи у практику робіт АТ «ДТЕК Дніпровські електромережі» (м. Дніпро) при побудові системи комерційного обліку електроенергії компанії, в ПрАТ «Дніпрополімермаш» під час побудови системи комерційного обліку води, газу та електроенергії товариства, в ТОВ «ЛЕД Азімут» (м. Кам'янське) під час адаптації системи моніторингу та управління загальним освітленням «Smart Lighting Web-ZB», у Департаменті екологічної політики Дніпровської міської ради (м. Дніпро) під час побудови системи моніторингу якості поставок води промисловим і побутовим споживачам.

Практична значущість одержаних результатів полягає у наступному:

- Розроблено апаратну платформу і програмне забезпечення бездротової Інтернет-системи енергомоніторингу. Платформа дозволяє в рамках єдиної системи застосувати стандартні апаратні засоби провідних виробників, які працюють на різних частотах безліцензійного ISM діапазону.

- З метою підвищення рівня захищеності мережі модернізований протокол SCTMех інкапсульовано в протокол транспортного рівня.

Достовірність та обґрунтованість результатів дисертації підтверджуються коректним використанням методів математичного та імітаційного моделювання, теорії випадкових процесів з використанням сучасних уявлень про механізм передачі трафіка у бездротових мережах, їхнім узгодженням з відомими з літератури результатами. Отримані наукові результати є достовірними, забезпечуються коректним використанням математичного апарату та методами обробки інформації, а також шляхом валідації отриманих результатів на незалежних тестових даних. Матеріали дисертації неодноразово обговорювалися на міжнародних конференціях.

Впровадження одержаних результатів. Результати досліджень, виконаних у кандидатській дисертації, впроваджено:

1) в АТ «ДТЕК Дніпровські електромережі» (м. Дніпро) при побудові системи комерційного обліку електроенергії компанії.

2) в ПрАТ «Дніпрополімермаш» (м. Дніпро) під час побудови системи комерційного обліку води, газу та електроенергії товариства.

3) в ТОВ «ЛЕД Азімут» (м. Кам'янське) під час адаптації системи моніторингу та управління загальним освітленням «Smart Lighting Web-ZB».

4) Департамент екологічної політики Дніпровської міської ради (м. Дніпро) під час побудови системи моніторингу якості поставок води промисловим і побутовим споживачам.

5) в навчальний процес Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

Особистий внесок здобувача. Результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист і складають наукову новизну виконаних досліджень, отримані особисто здобувачем. Усі одноосібні публікації за темою дослідження [2, 4, 5, 8, 9, 12, 20, 22-25, 27, 29] виконано авторкою самостійно. У роботах, написаних у співавторстві, авторці належать такі наукові результати: [1] – аналіз проблем водопостачання / водоспоживання з метою синтезу моделей для прогнозування параметрів технологічної системи, [3] – визначено основні вимоги до побудови бездротової моніторингової мережі з автономним живленням, що гарантує термін її функціонування, [6] – новий підхід до процесу управління енергоспоживанням польового обладнання, який враховує стохастичність змінних і адаптує прогнозні моделі для компенсації запізнювання передачі даних та затримки сигналів, [7] – виявлені характерні ознаки проблемних питань в існуючій законодавчій базі України в сфері кібербезпеки об'єктів критичної інфраструктури, [10] – метод перетворення мереж енергопостачання в інтелектуальні мережі, [11] – загальний підхід до синтезу ідентифікаційних моделей на основі нейронних мереж, [13] – модель бездротової мережі, що дозволяє оцінювати час її життя за енергетичними параметрами, [14] – математичні моделі ідентифікації мережевих аномалій, [15] – аналіз вразливостей інтелектуальних лічильників в бездротовій мережі моніторингу енергоресурсів, [16] – побудовано моделі ідентифікації DDoS атак,

[17] – вивчення можливості та ефективності використання технології блокчейн до вирішення проблем безпеки об'єктів критичної інфраструктури, [18] – визначення динамічних властивостей системи енергопостачання і структурування рішень в термінах апаратного і програмного забезпечення, [19] – використання безпроводної системи передачі даних енергоносіїв з використанням протоколу Zigbee, [21] – розглянуто ступінь уразливості інтелектуальної мережі обліку та моніторингу електроенергії та проведено аналіз основних видів загроз, [26] – розробка механізмів захисту від АРТ-атак в системах енергомоніторингу, [28] – метод управління інцидентами в інтелектуальних мережах передачі даних, [30, 32] – аналіз уразливості безпроводної інтелектуальної мережі обліку та моніторингу електроенергії, [31] – побудова моделей на основі нейронних мереж для управління системами в кіберпросторі.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на наукових семінарах кафедри безпеки інформації та телекомунікацій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»; на наукових семінарах кафедри кібербезпеки та захисту інформації Київського національного університету імені Тараса Шевченка; на «14 th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)» (Україна, Львів, 2018); на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Системний аналіз. Інформатика. Управління. САІУ-2011» (Україна, м. Запоріжжя, 10-11 березня 2011); на «The 4th IEEE International Symposium on Wireless Systems within the International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems» (Україна, м. Львів, 20-21 вересня 2018); на VII міжнародній науково-технічній конференції «ITSEC» (Україна, м. Київ, 16 травня 2017); на I Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем» (Україна, м. Київ 5-6 квітня 2018); на XX Ювілейній Міжнародній науково-практичній конференція «Безпека інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах» (Україна, м. Буча, 22-24 травня 2018); на VII Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах» (Україна, м. Чернівці, 8-10 листопада 2018); на VI MIĘDZYNARODOWA KONFERENCJA STUDENTÓW ORAZ DOKTORANTÓW «INŻYNIER XXI WIEKU». (Польща, Бяско Бяла, 2016); на V międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Europejska nauka XXI powieka», (Чехія, Прземісл, 5-15 травня 2009); на VIII mezinárodní vědecko-praktická conference «Moderní vymoženosti vědy», (Чехія Прага, 27 січня – 5 лютого 2012); на Virtual conference «Information Technologies in Science & Education» (Україна, Іспанія, Індія, Італія, 2018); на науково-технічній конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудівництві ITMM-2013» (Україна, м. Дніпропетровськ, 26-28 березня 2013); на XVIII Міжнародній науково-практичній конференція «Безпека інформації у інформаційно-телекомунікаційних системах» (Україна,

м. Київ, 2016); на VII Науково-практичній конференції «Актуальні проблеми управління інформаційною безпекою держави» (Україна, м, 2016); на II науково-практичній конференції «Проблеми безпеки інформаційно-телекомунікаційних систем». (Україна, м. Київ, 23-24 березня 2017); на VII міжнародній науково-технічній конференції «ITSEC» (Україна, м. Київ 2017); на 5 Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів, аспірантів і молодих учених « Молодь: наука та інновації 2017» (Україна, м. Дніпро, 2017); на XX Міжнародній науково-практичній конференції «Безпека інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах» (Україна, м. Буча, 22-24 травня 2018).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 32 наукових робітах, 13 з яких – без співавторів. П'ять статей опубліковано в наукових фахових виданнях України, 3 статті – у закордонних виданнях, 3 роботи індексуються в міжнародній наукометричній базі Scopus; 22 роботи опубліковано у збірниках матеріалів і тез міжнародних та всеукраїнських конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, що налічує 110 найменувань, трьох додатків. Загальний обсяг дисертації – 165 сторінок, обсяг основної частини – 135 сторінок. Робота проілюстрована 62 рисунками та містить 19 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дисертаційної роботи визначено актуальність обраної теми досліджень, об'єкт, предмет і мету наукової роботи, сформульовані завдання дослідження і методи, що використовувались для їх досягнення. Крім того, зазначено наукову новизну отриманих результатів та їх практичне значення, перелічені конференції, на яких доповідались ці результати. Наведено публікації за темою роботи та особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** дисертації розглянуті загальні характеристики і відмінні риси бездротових мереж моніторингу, важливі з точки зору досліджуваної проблеми. Наводиться опис існуючих стандартів в області бездротових сенсорних мереж і можливих областей їх застосування, зокрема ZigBee/802.15.4. Дається загальне визначення часу життя БСМ з автономними джерелами живлення, аналізуються можливі способи його збільшення. Детально розглядається група методів, які використовують енергетичне балансування вузлів мережі, в ній в свою чергу виділяється перспективний метод динамічної реконфігурації мережі з підтримкою режиму «роутерів, що прокидаються». Можливість переведення роутерів в режим сну обумовлена реалізованим механізмом часової синхронізації всіх вузлів Mesh-мережі. В якості маяка виступає координатор. Якщо він виходить з ладу, його функції починає виконувати будь-який інший вузол мережі. Прокладка і відновлення

маршрутів в даній мережі здійснюється автоматично. Подібна побудова гарантує проходження інформації при виході з ладу будь-якого вузла.

У розділі також здійснено аналіз існуючих моделей БСМ з автономними джерелами живлення, обґрунтовано необхідність розробки моделей, оптимізованих під задачі експлуатації на об'єктах житлово-комунального господарства. У результаті проведеного аналізу зроблено висновки, що бездротові сенсорні мережі моніторингу є перспективною технологією в області створення побутових і промислових систем збору даних і управління, а ключовим показником БСМ, визначальним їх застосовність на практиці, є час їхнього життя. Крім того, потрібна загальна модель, яка дозволяла б оцінювати час життя мережі і вирішувати завдання максимізації даного часу шляхом зміни різних параметрів роботи мережі. Маршрутизатори бездротової мережі є найбільш залежними від енергоспоживання пристроями, які критично визначають час життя мережі. Тому використання керованих «роутерів, що прокидаються» як польових пристроїв бездротової мережі моніторингу є одним з найбільш перспективних методів збільшення часу життя комірчастої мережі. З огляду на існування моделей, що описують залежність енергоспоживання від режимів роботи пристроїв стандарту 802.15.4/ZigBee на MAC і NWK рівнях специфікації, певний практичний інтерес представляє розробка математичної моделі для прогнозування часу життя і затримки зв'язку в мережах IEEE 802.15.4 з урахуванням можливого зовнішнього впливу на мережу.

Другий розділ присвячений моделюванню роботи бездротової сенсорної мережі з оцінюванням часу її життя за енергетичними параметрами. Наведено методику розрахунку ключових параметрів моделі. Сформульовано задачу дослідження, яка полягає в оптимізації енергоспоживання польових пристроїв бездротової мережі з автономним живленням на рівні користувальницького додатка. Для організації систем обліку обрано технологію ZigBee стандарту IEEE 802.15.4, який описує фізичний і канальний рівні еталонної моделі OSI.

Основними джерелами енергоспоживання для вузла бездротової мережі є:

- Передача та прийом пакетів.
- Технологічні втрати енергії, обумовлені процедурами управління: оскільки пакети управління не містять даних, вони розглядаються як додаткове джерело технологічних витрат.
- Зіткнення: якщо відбувається зіткнення, вузли повинні повторно передавати одні й ті ж дані, при цьому різко зростає споживання енергії.
- Прослуховування: коли вузол збирає пакети, призначені для інших вузлів, він споживає більше енергії.
- Безперервне прослуховування: прослуховування прийому трафіку веде до збільшення споживання енергії.

Ці параметри є визначальними для оцінки затримок передачі даних і розрахунку енергоємності мережі. В роботі розглядаються наступні початкові умови:

1) Енергоємність $C_i(t)$ вузла N_i в момент часу t , визначається як відношення повної енергії E , що споживається вузлом в момент часу t , до початкової енергії автономного джерела живлення $E_{\text{поч } i}$:

$$C_i(t) = \frac{E_i(t)}{E_{\text{поч } i}}. \quad (1)$$

2) Рівні енергії спочатку задані з різними значеннями, тому розрахунок енергоємності проводиться в інтервалі $[0, 1]$:

- $C_i(t) = 0$, тобто батарея вузла N_i в момент часу t повністю заряджена.
- $C_i(t) = 1$, тобто батарея вузла N_i в момент часу t розряджена.

3) Якщо в момент часу t батарея найбільш енергоємного вузла вичерпана, то це визначає час життя усієї мережі.

Загальна енергія E , споживана в одиницю часу вузлом БСМ, включає в себе енергію, яка витрачається на передачу $E_{\text{пер}}$ і прийом $E_{\text{пр}}$ пакетів даних, при передачі і прийомі керуючих пакетів $E_{\text{кер}}$, при прослуховуванні каналу $E_{\text{прос}}$ і при прийомі пакетів сусідів $E_{\text{сусід}}$:

$$E = E_{\text{пер}} + E_{\text{пр}} + E_{\text{кер}} + E_{\text{прос}} + E_{\text{сусід}}. \quad (2)$$

Оскільки передача пакетів може завершитися невдачею, то в роботі використовується поняття середнього значення невдалих передач пакета перед успішною передачею $N_{\text{сер}}$.

Енергія, що витрачається вузлом N_i при передачі пакетів в часовому інтервалі $[0, t]$, може бути обчислена як сума кількості енергії, споживаної при пересиланні повідомлень в мережі і при відправці підтверджень:

$$E_{\text{пер } i}(t) = t \cdot P_{\text{пер}} (1 + N_{\text{сер}} N_i) (v_i \cdot T_{\text{підтв}} + T_{\text{пер}} (v_i + w_i)), \quad (3)$$

де $P_{\text{пер}}$ – споживана потужність при передачі одного пакета,

$T_{\text{пер}}$ – час передачі пакета даних,

$T_{\text{підтв}}$ – час передачі підтвердження,

w_i – швидкість генерації пакета для вузла N_i ,

v_i – швидкість пересилання пакетів вузлом N_i .

Аналогічно енергія, що витрачається вузлом N_i при прийомі пакетів в інтервалі часу $[0, t]$, може бути визначена:

$$E_{\text{пр } i}(t) = t \cdot P_{\text{пр}} (1 + N_c N_i) (v_i \cdot T_{\text{пер}} + T_{\text{підтв}} (v_i + w_i)), \quad (4)$$

де $P_{\text{пр}}$ – споживана потужність при отриманні одного пакета.

На додаток до енергії, що витрачається на передачу і прийом пакетів даних, вузол датчика споживає енергію, надсилаючи та приймаючи керуючі пакети, такі як маяки і командні кадри:

$$E_{\text{кер } i}(t) = t (W \cdot T_{\text{кер}} \cdot (P_{\text{пер}} + P_{\text{пр}})), \quad (5)$$

де W – середня швидкість генерації керуючих пакетів,

$T_{\text{кер}}$ – час передачі керуючого пакета.

Енергія, що витрачається на прослуховування каналу в часовому інтервалі $[0, t]$, визначається як:

$$E_{\text{прос } i}(t) = t_{\text{слот}} \cdot P_{\text{прос}} \cdot R \cdot K(t), \quad (6)$$

де $P_{\text{прос}}$ – споживання енергії в режимі очікування,

$t_{\text{слот}}$ – час слота,

$K(t)$ – це кількість пакетів, отриманих за час t ,

R – оцінка каналу, яка використовується вузлом для перевірки, чи вільний канал або зайнятий.

Енергія, що витрачається на прослуховування, залежить від швидкості генерації трафіку w_l і швидкості пересилання v_l сусідів $Z(N_i)$ та визначається наступним співвідношенням:

$$E_{\text{сусід}}(t) = t \cdot P_{\text{пр}} \sum_{k \in Z(N_i)} \left[(N_{\text{сер}} N_l + 1) (v_l \cdot T_{\text{підтв}} + T_{\text{пер}}(v_l + w_l)) \right], \quad (7)$$

де $Z(N_l)$ – множина вузлів, розташованих в околиці вузла N_l і передаючих трафік, призначений для інших вузлів,

w_l – швидкість генерації пакета для вузла N_l ,

v_l – швидкість пересилання пакетів вузлом N_l .

Пристрій збору та передачі даних (ПЗПД) призначений для зчитування показань із лічильників і сенсорів і передачі їх в мережу. Головною його особливістю є підтримка режимів маяка і ретрансляції. В розділі наведені співвідношення для визначення часу передачі повідомлень з урахуванням затримок мережі і ретрансляції, а також середнього часу, що витрачається на передачу кадру в умовах повторних передач. Слід зазначити, що у загальному випадку енергоспоживання польових пристроїв мережі залежить від характеристик апаратних засобів, протоколів фізичного і каналного рівнів, протоколу маршрутизації і топології мережі. Знаючи початкову енергію батареї і загальну енергію E , що витрачає вузол БСМ, оцінюють час його життя, а потім і усієї мережі.

У третьому розділі описана експериментальна частина досліджень, міститься опис експериментальної установки і наведені результати випробувань. Крім того, у розділі розглянуто питання інформаційної безпеки автономних мереж моніторингу з точки зору терміну життя БСМ в цілому і її складових елементів зокрема. Розглянуто категорії атак і види мережевої вразливості. З огляду на актуальність проблеми сформульовані вимоги, що дозволяють підвищити захищеність БСМ від атак на польове обладнання і систему в цілому, що дозволить не тільки захистити мережу моніторингу, а й підвищити гарантований термін життя мережі.

Для фактичного визначення енергоспоживання пристроїв збору та передачі даних, зокрема «Сигма ЗВ» застосована схема побудови випробувального стенду з використанням цифрового осцилографа УНПРО В-121. В роботі здійснено вимірювання параметрів енергоспоживання

при різних режимах роботи мережеских пристроїв, обладнаних трансиверами DIGI (S1;S2) і REXENSE (REX3D). Експериментальне визначення розряду батареї в режимі побудови мережі з встановленим модулем XBeе rev.b потужністю 1 мВт представлено на рис.1.

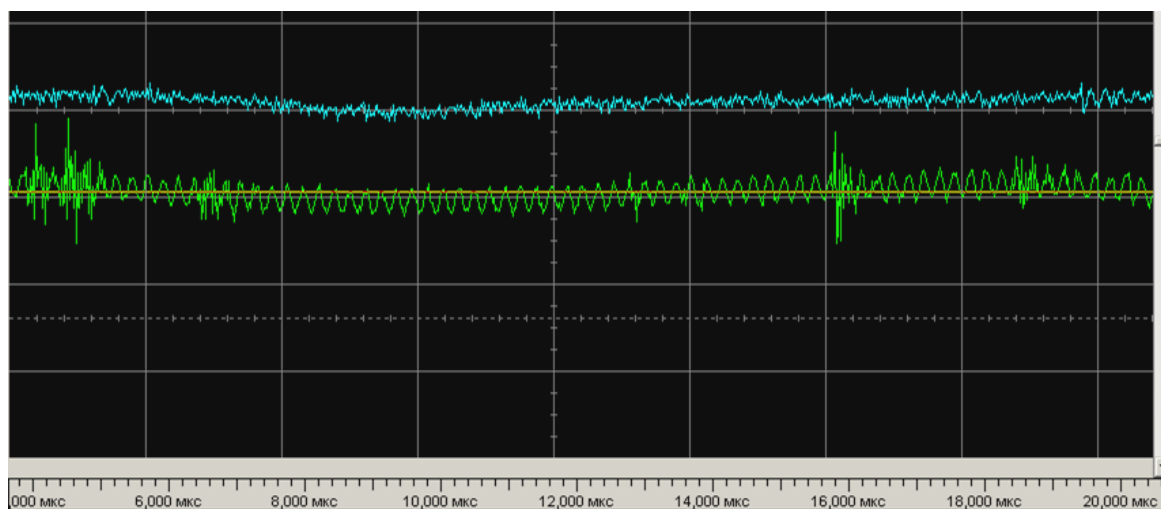


Рисунок 1 – Вид сигналу на моніторі (модуль XBeе rev.b)

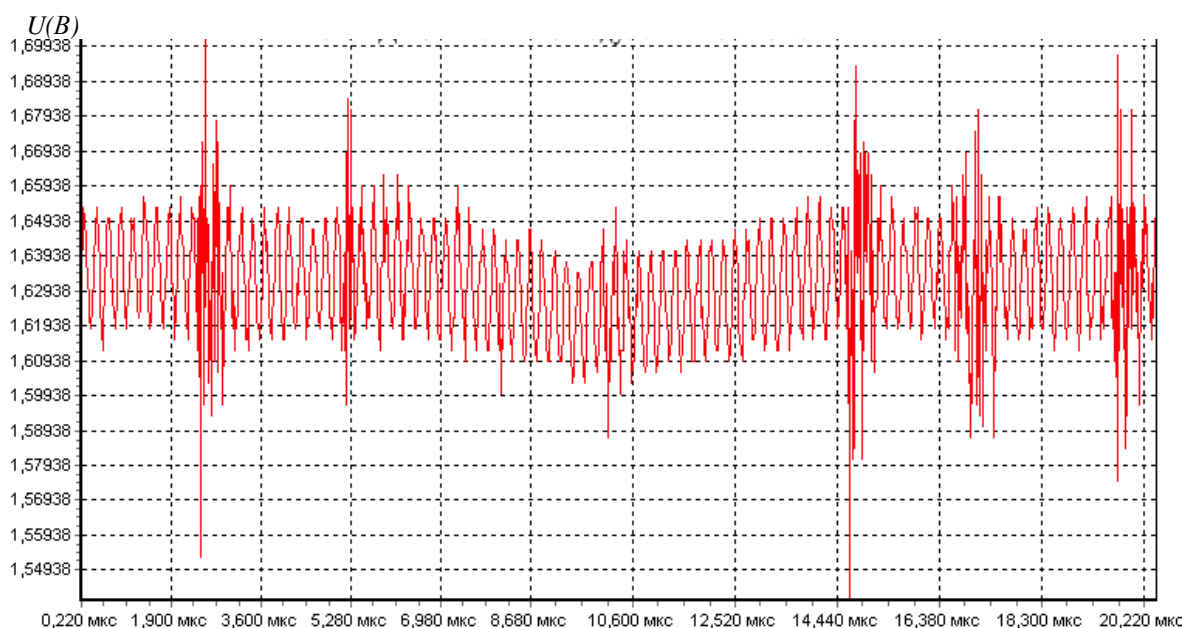


Рисунок 2 –Значення напруги на резисторі

На рисунках 3 і 4 наведено результати вимірювання параметрів енергоспоживання ПЗПД «Сигма-ZB» з встановленим модулем SMT XBeе S2 потужністю 4 мВт.

На рисунках 5 і 6 подано залежності, що отримані при вимірюванні параметрів енергоспоживання ПЗПД «Сигма-ZB» з встановленим модулем REX3D потужністю 6 мВт. Виходячи з відомих значень ефективного значення стандартного відхилення і опору резистора-шунта було визначено ефективне значення середнього струму споживання пристроїв «Сигма-ZB» (табл.1).

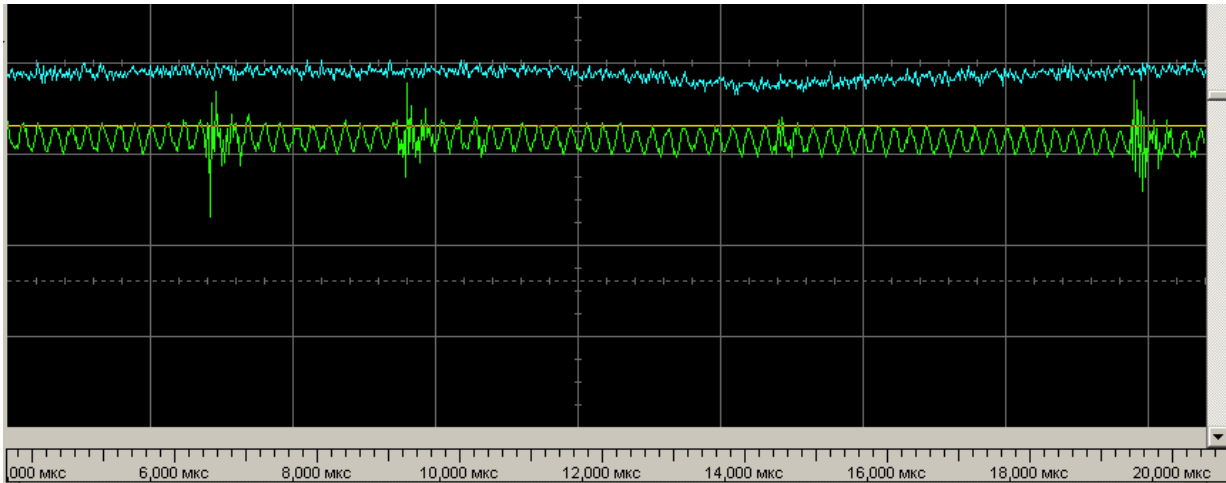


Рисунок 3 – Вид сигналу на моніторі (модуль Xbee S2)

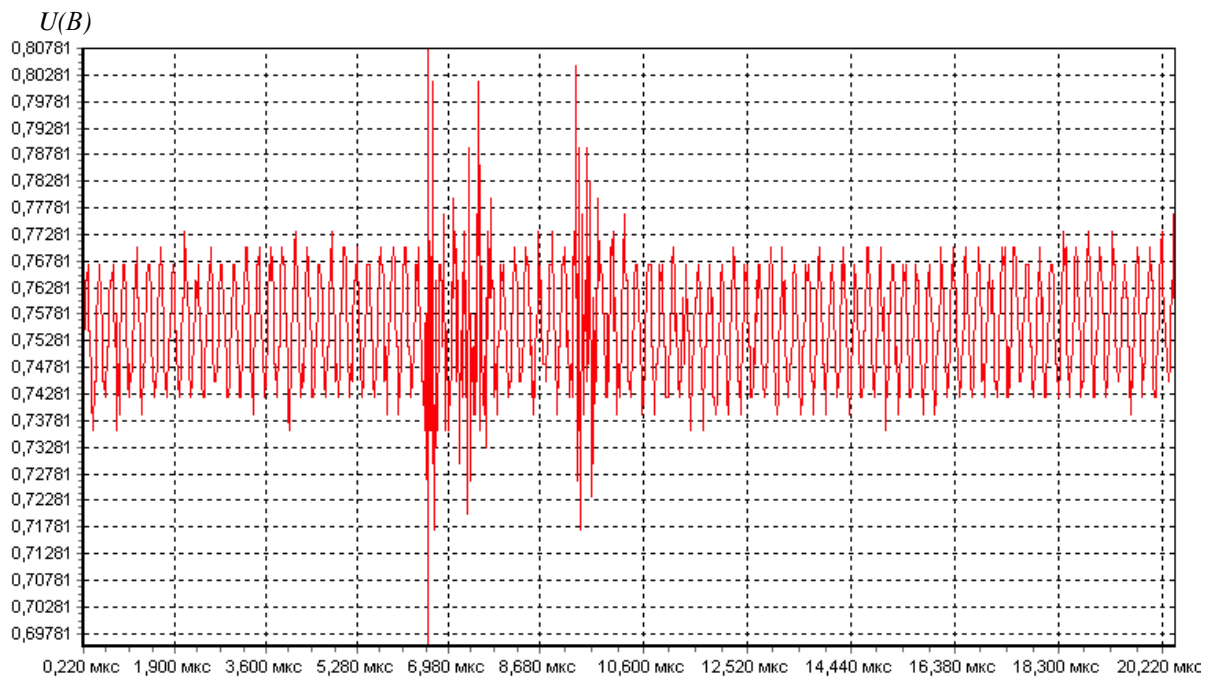


Рисунок 4 – Значення напруги на резисторі

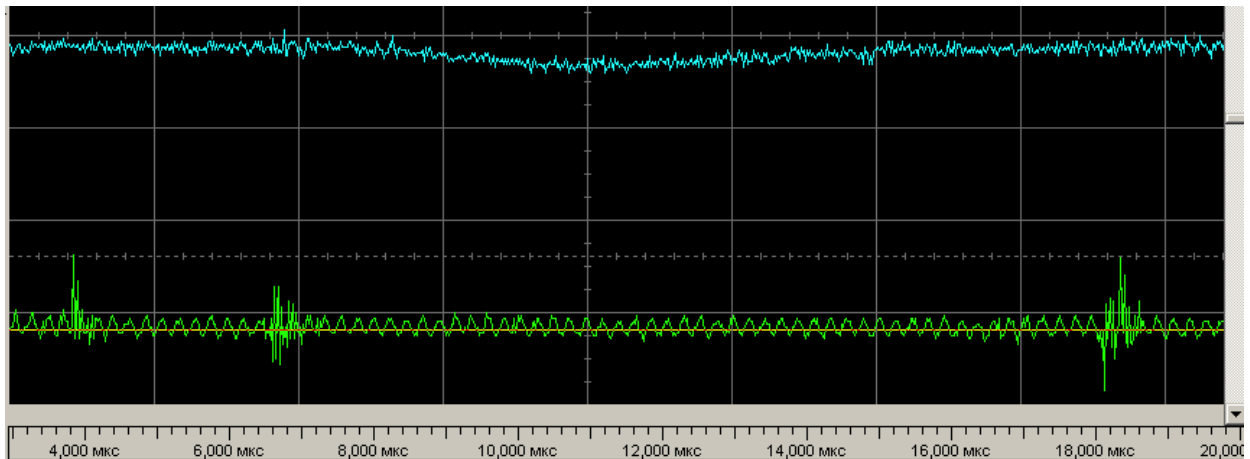


Рисунок 5 – Вид сигналу на моніторі (модуль REX3D)

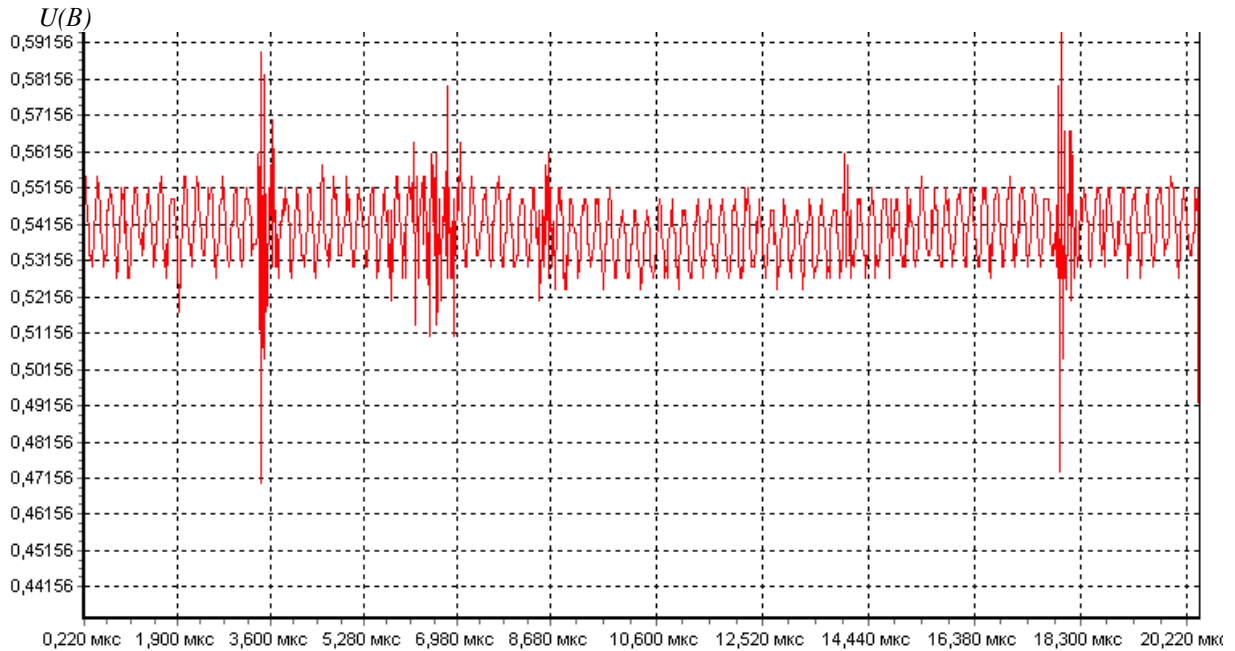


Рисунок 6 – Значення напруги на резисторі

Таблиця 1 – Експериментальні значення в режимі робочої експлуатації

Тип модуля	Потужність, мВт	Стандартне відхилення, мВ	Середнє значення ефективного струму, мА
XBee rev.b	1,0	7,099	2,151
XBee S2	4,0	302,0	91,515
REX3D	6,0	41,599	12,606

З огляду на очікувану залежність енергоспоживання польових пристроїв від розміру переданих по мережі даних пакетів виконано визначення параметрів при різних режимах роботи мережевих пристроїв, обладнаних трансиверами DIGI (S1 і S2) і REXENSE (REX3D). Експеримент проводився в середовищі SCTM-Dialog з фіксуванням характеристик переданих та отриманих пакетів.

Таблиця 2 – Експериментальні значення в режимі синхронізації часу мережі

Тип модуля	Потужність, мВт	Стандартне відхилення, мВ	Середнє значення ефективного струму, мА
XBee rev.b	1,0	2,51	4,14
XBee S2	4,0	25,31	41,77
REX3D	6,0	15,47	25,52

Таблиця 3 – Експериментальні значення в режимі встановлення адреси і розмірі пакету 34 байта

Тип модуля	Потужність, мВт	Стандартне відхилення, мВ	Середнє значення ефективного струму, мА
XBee rev.b	1,0	5,22	8,62
XBee S2	4.0	45,24	74,66
REX3D	6,0	30,14	49,73

Таблиця 4 – Експериментальні значення в режимі адресації мережі і розмірі пакету 62 байта

Тип модуля	Потужність, мВт	Стандартне відхилення, мВ	Середнє значення ефективного струму, мА
XBee rev.b	1,0	3,44	5,68
XBee S2	4.0	33,89	55,92
REX3D	6,0	20,66	34,09

Експериментальні дослідження дозволили зробити висновок, що енергоспоживання польового пристрою визначається взаємодією трансивера з керуючим мікроконтролером, встановленим в польовому пристрої для виконання призначених користувачем функцій. Тобто енергоспоживання визначається верхнім рівнем додатків стека протоколу ZigBee, і не залежить від фізичного і каналного рівня протоколу 802.15.4. Управління розмірами повідомлень є основним резервом збільшення терміну життя пристроїв і системи в цілому.

У розділі здійснено комп'ютерне моделювання бездротової сенсорної мережі з використанням платформи XSTU 6.3.5 для XBee/RF рішень від DIGI Int. Дана платформа дозволяє не тільки виконати всі настройки модуля, провести сканування мережі будь-якої конфігурації, але і виконати тестування мережі з виміром конкретних рівнів сигналу і затримок, що виникають. В якості об'єкту моделювання обрано мережу під'їзду типового 9-ти поверхового житлового будинку. При одній ретрансляції максимальний час ідентифікації вузла становить 0,54 секунди. З огляду на, що повний розмір добового пакета даних ПЗПД в форматі протоколу SCTMех становить 837 байт, для його передачі необхідно 7 сеансів зв'язку з вузлом. Експериментально було визначено оптимальний розмір мереж з MESH-топологією, виходячи з доцільності застосування автономних джерел живлення ємністю 2800 мА·г. Для режиму роботи мережі з 20 ПЗПД час активного режиму становить близько 3 хв., а з 40 ПЗПД – 6 хв. Цей алгоритм роботи з щоденним режимом передачі даних забезпечить безперебійну роботу обладнання протягом 4 років, що відповідає міжповірочному інтервалу більшості лічильників, які використовуються в якості датчиків системи, що розробляється.

Критична уразливість польового пристрою вказала на необхідні заходи щодо зміни не тільки методологічного підходу до інформаційного захисту бездротових мереж, але і до зміни їх архітектури та алгоритму роботи. Актуальним завданням проектування внутрішньобудинкових і локальних мереж комунального моніторингу, що працює на безліцензійних частотах IMS-діапазону (868 МГц і 2,4 ГГц) з застосуванням технології ZigBee, є інкапсуляція захищених пропрієтарних протоколів в існуючий стек ZigBee, що роблять економічно недоцільним злом даних мереж.

З огляду на необхідність розробки системи енергомоніторингу в роботі сформульовані наступні вимоги до програмного забезпечення рівня користувальницького додатка:

- Спосіб авторизації в системі повинен відповідати сучасним вимогам ідентифікації і аутентифікації.
- Спосіб ідентифікації штатних користувачів системи і порядок ідентифікації «незарєєстрованого користувача».
- Визначення механізму захисту доступу суб'єктів (користувачів) до об'єктів (польове обладнання), що містить конфіденційні дані та інформацію.
- Розробка ефективної програми протидії загрозам з боку «інсайдерів».

Більшість можливих атак на БММ спрямовані на виведення з ладу бездротових вузлів мережі на порушення протоколів маршрутизації, а також збій роботи мережі в цілому. Вбудовування засобів забезпечення безпеки в самі об'єкти поки обмежено з технологічних причин. Оскільки число входів в систему зростає експоненціально, побудова централізованої системи безпеки стає неможливою. Цим покладено новий етап в індустрії захисту інформації – захист мереж збору даних інтелектуальних датчиків і пристроїв обліку енергоресурсів, що володіють обмеженими обчислювальними ресурсами. У розділі наведено аналітичні залежності погіршення якості системи моніторингу за рахунок можливої атаки та енергоспоживання в системі.

У четвертому розділі описаний комунікаційний протокол БСМ і обґрунтовано необхідність його інкапсулювання в стек ZigBee для роботи в радіомережах стандарту 802.15.4, що є визначальним з точки зору вирішення завдань забезпечення надійної роботи пристроїв в бездротових мережах складної архітектури та досягнення цілей дисертаційної роботи.

У розділі коротко розглянуто можливості протоколу SCTM, який як відомо розроблено для дротових мереж з метою забезпечення надійного й достовірного обміну даними по лініях зв'язку низької якості (низьке співвідношення сигнал/шум, підвищений рівень шумів й імпульсних перешкод, високі фазові спотворення). Для забезпечення надійної роботи пристроїв в бездротових мережах складної архітектури в радіомережах стандарту 802.15.4/ZigBee даний протокол було модифіковано. Протокол SCTMех є розширенням протоколу SCTM за рахунок декількох початкових байт блоку даних. У будь-якому повідомленні запиту і відповіді є заголовок і блок даних. Поняття «квитанція» в протоколі SCTMех означає той же запит, тільки з іншим

номером квитанції в заголовку. Це необхідно для правильної ідентифікації повідомлення при передачі в умовах затримок бездротових мереж, а також для маршрутизації повідомлень на рівні додатку.

Основні характеристики SCTMех:

- Клас організації обміну даними: «запит / відповідь».
- Тип передачі: асинхронний.
- Режим роботи: напівдуплексний.
- Формат кадру фізичного рівня: 8 біт даних, 1 стартовий біт, 1 стоповий біт.
- Формат повідомлення канального рівня: кадр класу FT1.2 з постійною і змінною довжиною.
- Виявлення помилок: контроль циклічним виключенням АБО (XOR).
- Система нумерації повідомлень.

Запит

Заголовок - 13 байт							Блок даних							
Состояние		Адрес Slave	№ блока данных	№ квитанции	Длина блока данных	Контр. сумма загол.	Начало текста STX	Адрес Master	Шифр. 0 - выкл. 1 - вкл.	Номер сообщ. данных	Поле данных	Конец текста ETX	Контр. сумма данных	
0 - ответ	1 - запрос													
Старт	1 - запрос	0 - 65534	1-1	0 - начало данных	0 - 255	59	2	00001	0	123	P O W E R	0	3	125
SON	2 - ответ длинный	0 - 65534	1-1	1-9 - след. данные	0 - 255	59	2	00001	0	123	P O W E R	0	3	125
1	1	00012	1	0	0 1 9	59	2	00001	0	123	P O W E R	0	3	125
DEC	ASCII	ASCII	ASCII	ASCII	ASCII	DEC	DEC	ASCII	ASCII	ASCII	ASCII	DEC	DEC	
Данные для подсчета контр. суммы (через XOR)							Данные для XOR							

Відповідь

Заголовок - 13 байт							Блок даних							
Состояние		Адрес Slave	№ блока данных	№ квитанции	Длина блока данных	Контр. сумма загол.	Начало текста STX	Адрес Master	Шифр. 0 - выкл. 1 - вкл.	Номер сообщ. данных	Поле данных	Конец текста ETX	Контр. сумма данных	
0 - ответ	1 - запрос													
Старт	0 - ответ	0 - 65534	1-1	0 - начало данных	0 - 255	59	2	00001	0	123	P O W E R	0	3	125
SON	2 - ответ длинный	0 - 65534	1-1	1-9 - след. данные	0 - 255	59	2	00001	0	123	P O W E R	0	3	125
1	0	00012	1	0	0 1 9	59	2	00001	0	123	P O W E R	0	3	125
DEC	ASCII	ASCII	ASCII	ASCII	ASCII	DEC	DEC	ASCII	ASCII	ASCII	ASCII	DEC	DEC	
Данные для подсчета контр. суммы (через XOR)							Данные для XOR							

Рисунок 7 – Формат повідомлення по протоколу SCTMех

Для моделювання систем зв'язку бездротової P2P системи моніторингу використовується протокол TCP/IP. Враховуючи, що застосування P2P архітектури мережі можливо реалізувати на рівні додатків TCP/IP протоколу без зміни фізичного і канального рівня системи, у розділі визначено мінімальні вимоги до інфраструктури БММ для успішного застосування P2P в енергомоніторингу. Встановлено, що провідна широкосмугова мережа достатня для інтеграції платформи P2P при збільшенні кількості мереж до 200. Мережа GPRS з легким трафіком достатня для інтеграції платформи P2P. Однак, збільшення складності трафіку призводить до значних затримок і робить проблематичним застосування P2P через її критичну залежність від рівня фонового трафіку в мережі.

В ході виконання роботи була розроблена спеціалізована програмно-апаратна платформа «Smart Utility Web» на базі бездротового модуля XBEE S2. Ці модулі на момент розробки мали найкращі характеристики з точки зору простоти використання, побудови мереж меш-топології, підтримки режимів сну. Автор дисертаційної роботи брав участь у проекті зі створення експериментальної бездротової системи моніторингу споживання води

побутовими споживачами КП «Водоканал», м. Запоріжжя. Система включає: прилади обліку, пристрої збору і передачі даних (ПЗПД) «Сігма ZB», модем-координатор системи «Сігма RF», хмарний SaaS сервіс. Функціональність системи полягає в забезпеченні одночасного знімання показань з усіх приладів обліку; контроль режиму споживання і сигналізація про виникнення аварійних ситуацій; виявлення витоків і аномальних витрат на ранній стадії; ведення балансу споживання; дистанційний моніторинг і управління. Доступ до даних здійснюється через будь-який Web-браузер або мобільний додаток (iOS, Android, Win).

Експлуатація системи «Smart Utility Web» показала коректність підходу до побудови бездротової системи моніторингу на основі технології «роутерів, що прокидаються». Даний підхід дозволив забезпечити надійність захисту та високий рівень достовірності даних і експлуатаційну надійність, що підтверджено впровадженнями.

ВИСНОВКИ

В дисертаційному дослідженні розв'язано важливу науково-прикладну задачу підвищення якості функціонування бездротових сенсорних мереж енергомоніторингу та збільшення часу їх життя за рахунок розробки відповідних математичних моделей і методів дослідження режимів енергоспоживання. У роботі запропоновано новий підхід до вирішення проблеми енергозбереження в сенсорних мережах енергомоніторингу, що дозволяє одночасно скоротити енергоспоживання мережевих пристроїв і час доставки повідомлень.

Отримано наступні основні результати, які мають наукову новизну та практичну цінність:

1. Проведений аналіз досліджень в області побудови розподілених автономних бездротових систем моніторингу показав, що БММ є перспективною технологією в області створення побутових і промислових систем збору даних і управління, а ключовим показником БСМ, визначальним їх застосовність на практиці, є час їхнього життя. За результатами проведеного аналізу обґрунтовано необхідність розробки математичних моделей і методів дослідження режимів енергоспоживання з метою збільшення часу життя автономних БММ.
2. Системно обґрунтовано, що використання керованих «роутерів, що прокидаються» в якості польових пристроїв БММ є одним з найбільш перспективних методів збільшення часу життя комерційної мережі. З огляду на енергоємність процесу передачі даних, саме управління розмірами повідомлень є основним резервом збільшення терміну життя пристроїв і системи в цілому, а оптимізація енергоспоживання польових пристроїв бездротової мережі з автономним живленням на рівні користувальницького додатка, дозволяє застосовувати приймально-передавачі різних виробників в пристроях збору і передачі даних.

3. На підставі проведеного аналізу сформульована задача розробки бездротової системи моніторингу з автономним живленням, що володіє гарантованим терміном життя зі забезпеченням захищеності інформації, переданої в публічних мережах передачі даних. З огляду на необхідність розробки системи енергомоніторингу сформульовані вимоги до програмного забезпечення рівня користувальницького додатка.
4. Вперше розроблено математичну модель функціонування великомасштабних мереж на базі запитів БСМ, чії вузли виявляють і ретранслюють події, які потрібні тільки протягом обмеженого часу. Це дозволило підвищити точність оцінки затримок передачі даних, розрахунку енергоємності та терміну служби мережі.
5. Удосконалено математичну модель оцінки працездатності польових пристроїв з автономним живленням і модернізовано архітектуру системи, в результаті чого час життя системи перевищив нормативний період перевірки приладів обліку.
6. Вперше запропоновано механізм динамічної адресації польових пристроїв бездротової Інтернет-системи збору даних і управління енергоспоживанням, що унеможливує віддалене стороннє втручання в роботу сегментів системи.
7. Вперше модифіковано протокол SCTMех, який інкапсульовано в транспортні протоколи ZigBee і LoRa, що дозволило підвищити рівень захисту інформації на рівні польових пристроїв системи.
8. Розроблено спеціалізовану програмно-апаратну платформу «Smart Utility Web» на базі бездротового модуля XBEE S2. Експериментальна експлуатація системи показала коректність підходу до побудови бездротової системи моніторингу на основі технології «роутерів, що прокидаються». Простота інсталяції обладнання системи і надійність захисту даних забезпечує високий рівень достовірності даних та експлуатаційних характеристик. Управління розміром блоків даних і шифруванням на рівні користувальницького додатка дозволяє домогтися оптимального з точки зору терміну життя системи енергоспоживання при збереженні необхідного рівня якості обслуговування.
9. Аналіз стійкості бездротових мереж моніторингу до зовнішніх атак вказав на їх критичну уразливість, обумовлену централізованою архітектурою, тому найбільш дієвим і ефективним механізмом захисту інформації в бездротових мережах моніторингу є перехід до децентралізованих систем, зокрема побудованих на принципах технології блокчейн. Зроблено висновок, що найбільш прийнятним рішенням для БСМ є сервісний або приватний блокчейн, що дозволяє проводити ідентифікацію польових пристроїв під контролем призначених користувачів.
10. Результати роботи впроваджені в навчальний процес Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» та ряді організацій різних форм власності.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Роботи, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. **Почта Ю.В.**, Бабенко Т.В. Water supply systems in settlements of Ukraine. Науковий вісник НГУ, м. Дніпропетровськ, 2012 № 2. С. 105-108. ISSN: 2071-2227.

(Наукове фахове видання України, індексується в міжнародній реферативній наукометричній базі Scopus, Index Copernicus та ін.).

2. **Почта Ю.В.** Интеллектуальные информационно-управляющие системы водоснабжения и водопотребления. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць «Системні технології», м. Дніпропетровськ, 2013, №3'(86). С.93-96. ISSN: 1562-9945.

(Наукове фахове видання України, індексується в національному електронному інформаційному ресурсі “Україна наукова”, National Library of Ukraine (Vernadsky), Index Copernicus).

3. **Kovalova Y.**, Babenko T., Oksiiuk O., Myrutenko L. Optimization of Lifetime In Wireless Monitoring Networks. International Journal of Computing. Research Institute for Intelligent Computer Systems, 2020 № 19 (2), Pp. 267–272. ISSN: 2312-5381.

(Наукове фахове видання України, індексується в міжнародній реферативній наукометричній базі Scopus, National Library of Ukraine (Vernadsky), Index Copernicus, Google Scholar).

4. **Ковальова Ю.В.** Математичне моделювання процесу бездротової передачі даних в мережах енергомоніторингу. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць «Системні технології». м. Дніпро, 6 (131) 2020. С.186-195. ISSN: 1562-9945.

(Наукове фахове видання України, індексується в національному електронному інформаційному ресурсі “Україна наукова”, National Library of Ukraine (Vernadsky), Index Copernicus).

5. **Ковальова Ю.В.** Моделювання топології бездротових сенсорних мереж. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць «Системні технології», м. Дніпро, 1 (132) 2021. С.92-98. ISSN: 1562-9945.

(Наукове фахове видання України, індексується в національному електронному інформаційному ресурсі “Україна наукова”, National Library of Ukraine (Vernadsky), Index Copernicus).

6. **Kovaleva Yuliia**, Babenko Tetiana, Ignisca Vira. Models And Methods Of Wireless Decentralized Networks for Energy Monitoring of Critical Infrastructure Facilities. Scientific and practical cyber security journal. Georgia. Issue No: 4, December, 2020. P.74-78. ISSN: 2587-4667.

(Закордонне періодичне видання).

7. **Kovalova Y.**, Babenko T. The representative of national problems in the field of cybersecurity. Power engineering and information technologies in technical objects control. / London: Taylor & Francis Group: CRC Press / Balkema. London, UK 2016. P. 151-155. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315197814>.

(Закордонне видання).

8. **Ковальова Ю.В.** Технологические аспекты беспроводных сетей мониторинга. Монографія «Innovative Technologies in the Formation and Development of Human Capital», Вища Технічна Школа, м. Катовіца, Польща, 2018. С. 27-37.

9. **Почта Ю.В.**, Система дистанционного считывания показаний и управления энергопотреблением «EnergyWeb-ХВ». Международный электротехнический журнал «Электрик», м. Київ, 2009 №9. С. 31-33.

10. **Почта Ю.В.**, Ленда І.В. Интеллектуальные системы энергоучета. Журнал «Мир Автоматизации», м. Київ №2, 2010. С. 48-51.

Роботи, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

11. Babenko T., Toliupa S., **Kovalova Y.** LVQ models of DDOS attacks identification. 14 th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv, 2018, pp. 510-513, doi: 10.1109/TCSET.2018.8336253.

(Індексується в міжнародній реферативній наукометричній базі Scopus).

12. **Почта Ю.В.** Захист та впровадження бездротових систем моніторингу, II Всеукраїнська науково-практична конференція «Системний аналіз. Інформатика. Управління. САІУ-2011, м. Запоріжжя, 10-11 березня 2011. С. 162-163.

13. **Kovalova Y.**, Oksiiuk O., Babenko T. The Optimization of Lifetime in Wireless Monitoring Network. The 4th IEEE International Symposium on Wireless Systems within the International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems. Lviv Polytechnic National University. Lviv 20-21 September 2018.

14. Бабенко Т.В., Толюпа С.В., **Ковальова Ю.В.** Моделі ідентифікації мережевих аномалій на основі карти самоорганізації. VII міжнародна науково-технічна конференція «ITSEC». Київ, 16 травня 2017.

15. **Ковальва Ю.В.**, Бабенко Т.В. Аналіз вразливостей інтелектуальних лічильників в бездротовій мережі моніторингу енергоресурсів. Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Збірник матеріалів доповідей та тез I Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем». М. Київ 5-6 квітня 2018. С. 24-26.

16. **Ковальва Ю.В.**, Бабенко Т.В. Нейромережеві моделі ідентифікації DDoS атак. XX Ювілейна Міжнародна науково-практична конференція «Безпека інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах», Буча, 22-24 травня 2018.

17. **Ковальва Ю.В.**, Бабенко Т.В. Застосування технології блокчейн в енергетичних системах. VII Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах». М. Чернівці, 8-10 листопада 2018.

18. **Kovalova Y.**, Babenko T. The Discrete Model of Dynamic Energy Systems and Reliability of Data Consumption. VI MIĘDZYKONFERENCJA STUDENTÓW ORAZ DOKTORANTÓW «INŻYNIER XXI

WIEKU». Bielsko-Biała, 2016. P. 181-184. ISBN 978-83-65182-51-7.

19. **Почта Ю.В.**, Кузнецов Г.В. Исследование беспроводной технологии ZigBee в области защиты информации. V międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Europejska nauka XXI powieka», Przemysl, 5-15 травня 2009. С. 60-61. ISBN: 978-966-8736-05-6.

20. **Почта Ю.** Управление энергоресурсами на базе беспроводных технологий передачи данных. VIII mezinárodní vědecko-praktická conference “Moderní vymoženosti vědy”, Publishing House “Education and Science”, Praha, 27 січня – 5 лютого 2012. С. 78-81. ISBN: 978-966-8736-05-6.

21. **Kovalova Y.**, Mieszkov V. Information protection in communication networks. Virtual conference «Information Technologies in Science & Education», India, Ukraine, Spain, Italy.

22. **Почта Ю.** Новітні технології у сфері ЖКГ. Вісник Дніпропетровської міської ради. М. Дніпропетровськ 2009 №009.

23. **Почта Ю.В.** Интеллектуальные информационно-управляющие системы, Научно-техническая конференция «Информационные технологии в металлургии и машиностроении. ITMM-2013», м. Дніпропетровськ, 26-28 березня 2013.

24. **Ковальова Ю.В.** Особливості використання протоколу SCTM в інтелектуальних мережах Smart Grid. Збірник матеріалів доповідей та тез XVIII Міжнародної науково-практичної конференції «Безпека інформації у інформаційно-телекомунікаційних системах», м. Київ, 2016, стор. 54.

25. **Ковальова Ю.В.** Проблеми в сфері забезпечення кібернетичної безпеки об'єктів критичної інфраструктури. Збірник матеріалів доповідей та тез VII Науково-практична конференція «Актуальні проблеми управління інформаційною безпекою держави», м. Київ 2016.

26. **Ковальова Ю.В.**, Бабенко Т.В. Забезпечення кібербезпеки об'єктів енергетичної інфраструктури. Збірник матеріалів доповідей та тез II науково-практична конференція «Проблеми безпеки інформаційно-телекомунікаційних систем», м. Київ, 23-24 березня 2017. С. 121-123.

27. **Ковальова Ю.В.** Моделі ідентифікації мережевих аномалій на основі карти самоорганізації. Збірник матеріалів доповідей та тез VII міжнародної науково-технічної конференції «ITSEC», м. Київ 2017.

28. Твердохліб І.С., **Ковальова Ю.В.** Управління інцидентами кібербезпеки на малих комерційних підприємствах. Збірник матеріалів доповідей та тез. П'ята всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих учених «Молодь: наука та інновації 2017». Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, 2017. Т.12. С.9-10.

29. **Ковальова Ю.В.** Інформаційна безпека бездротових мереж моніторингу. Збірник матеріалів доповідей та тез. П'ята всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих учених «Молодь: наука та інновації 2017». Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, 2017. Т.12. С.40-42.

30. Доколяса О.С., **Ковальова Ю.В.** Кібербезпека в інформаційному просторі України. Збірник матеріалів доповідей та тез. П'ята всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих учених «Молодь: наука та інновації 2017». Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, 2017. Т.12. С.34-35.

31. **Ковальова Ю.В.**, Бабенко Т.В. Нейромережеві моделі ідентифікації DDoS атак. Збірник матеріалів доповідей та тез XX Міжнародної науково-практичної конференції «Безпека інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах», м. Буча, 2018. С. 32-33.

32. Кручинін О.В., Тимофєєв Д.С., **Ковальова Ю.В.** Інформаційна безпека бездротових мереж моніторингу. Збірник матеріалів доповідей та тез XX Міжнародної науково-практичної конференції «Безпека інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах», м. Буча, 2018. С. 247.

АНОТАЦІЯ

Ковальова Ю.В. Математичні моделі та методи бездротової передачі даних в мережах енергомоніторингу на об'єктах критичної інфраструктури. – *На правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». Національна металургійна академія України, Дніпро, 2021.

В дисертації розв'язано важливу науково-прикладну задачу підвищення якості функціонування бездротових сенсорних мереж енергомоніторингу та збільшення часу їх життя за рахунок розробки відповідних математичних моделей і методів дослідження режимів енергоспоживання.

За результатами проведеного аналізу системно обґрунтовано, що з огляду на енергоємність процесу передачі даних, саме управління розмірами повідомлень є основним резервом збільшення терміну життя пристроїв і системи в цілому, а оптимізація енергоспоживання польових пристроїв бездротової мережі з автономним живленням на рівні користувальницького додатка дозволяє застосовувати приймально-передавачі різних виробників в пристроях збору і передачі даних.

В роботі розроблено математичну модель функціонування великомасштабних мереж на базі запитів БСМ, чиї вузли виявляють і ретранслюють події, які потрібні тільки протягом обмеженого часу. Це дозволило підвищити точність оцінки затримок передачі даних, розрахунку енергоємності та терміну служби мережі. Модифіковано протокол SCTMech, який інкапсульовано в транспортний протокол ZigBee, що дозволило підвищити рівень захисту інформації на рівні польових пристроїв системи. Розроблено спеціалізовану програмно-апаратну платформу «Smart Utility Web» на базі бездротового модуля XBEE S2. Експериментальна експлуатація системи показала коректність підходу до побудови бездротової системи моніторингу на основі технології «роутерів, що прокидаються». Простота інсталяції обладнання системи і надійність захисту даних забезпечує високий рівень

достовірності даних та експлуатаційних характеристик. Управління розміром блоків даних і шифруванням на рівні користувальницького додатка дозволяє домогтися оптимального з точки зору терміну життя системи енергоспоживання при збереженні необхідного рівня якості обслуговування.

Ключові слова: бездротова сенсорна мережа, енергомоніторинг, об'єкти критичної інфраструктури, математична модель, енергоспоживання, протокол.

АННОТАЦИЯ

Ковалева Ю.В. Математические модели и методы беспроводной передачи данных в сетях энергомониторинга на объектах критической инфраструктуры. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. Национальный технический университет «Днепровская политехника». Национальная металлургическая академия Украины, Днепр, 2021.

В диссертационной работе решена важная научно-прикладная задача повышения качества функционирования беспроводных сенсорных сетей энергомониторинга и увеличения времени их жизни за счет разработки соответствующих математических моделей и методов исследования режимов энергопотребления.

По результатам проведенного анализа системно обосновано, что, учитывая энергоемкость процесса передачи данных, само управление размерами сообщений является основным резервом увеличения срока жизни устройств и системы в целом, а оптимизация энергопотребления полевых устройств беспроводной сети с автономным питанием на уровне пользовательского приложения позволяет применять приемно-передатчики различных производителей в устройствах сбора и передачи данных.

В работе разработана математическая модель функционирования крупномасштабных сетей на базе запросов БСС, что позволило повысить точность оценки задержек передачи данных, расчета энергоемкости и срока службы сети. Модифицирован протокол SCTMex, который инкапсулирован в транспортный протокол ZigBee, что позволило повысить уровень защиты информации на уровне полевых устройств системы. Разработана специализированная программно-аппаратная платформа «Smart Utility Web» на базе беспроводного модуля XBEE S2. Простота инсталляции оборудования системы и надежность защиты данных обеспечивает высокий уровень достоверности данных и эксплуатационных характеристик. Управление размером блоков данных и шифрованием на уровне пользовательского приложения позволяет добиться оптимального с точки зрения срока жизни системы энергопотребления при сохранении необходимого уровня качества обслуживания.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, энергомониторинг, объекты критической инфраструктуры, математическая модель, энергопотребление, протокол.

ABSTRACT

Kovalova Yu.V. Mathematical models and methods of wireless data transmission in energy monitoring networks at critical infrastructure facilities. – Manuscript.

A thesis for obtaining a scientific degree of the Candidate of Technical Sciences in the specialty 01.05.02 – Mathematical Modeling and Computational Methods. Dnipro University of Technology. National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2021.

This dissertation work is concerned with the important scientific and applied problem of increasing the quality of functioning of wireless sensor networks (WSN) for energy monitoring and increasing their life time was solved through the development of appropriate mathematical models and methods for studying energy consumption modes.

The analysis of research in the field of building distributed autonomous wireless monitoring systems showed that wireless sensor networks are a promising technology in the field of creating household and industrial data collection and control systems, and the key indicator of WSN that determines their applicability in practice is their lifetime. Based on the analysis results it was systematically substantiated that, taking into account the energy consumption of the data transmission process, the very control of message sizes is the main reserve for increasing the life of devices and the system as a whole, and optimization of the energy consumption of self-powered wireless field devices at the user application level allows the use of transceivers of various manufacturers in data collection and transmission devices.

The work developed a mathematical model of the functioning of large-scale networks based on requests from the wireless sensor network, which made it possible to increase the accuracy of estimating data transmission delays, calculating the power consumption and service life of the network. Relationships are given for determining the transmission time of messages taking into account the network and retransmission delays, as well as the average time spent on the transmission of a frame in conditions of retransmissions. It should be noted that in general, the power consumption of network field devices depends on the characteristics of the hardware, the physical and link layer protocols, the routing protocol, and the network topology. This dissertation work formulates requirements to increase the WSN protection from attacks on field equipment and the system as a whole, which will not only protect the monitoring network, but also increase the guaranteed life of the network.

The SCTMex protocol has been modified. It is encapsulated in the ZigBee transport protocol, which made it possible to increase the level of information security at the level of system field devices. The SCTMex protocol is an extension of the SCTM protocol due to the few initial bytes of the data block.

Analysis of the resistance of wireless monitoring networks to external attacks indicated their critical vulnerability due to the centralized architecture, so the most effective and efficient mechanism for protecting information in wireless monitoring networks is the transition to decentralized systems, including those based on

blockchain technology. It is concluded that the most acceptable solution for WSN is a service or private blockchain, which allows the identification of field devices under the control of designated users.

In this work, a computer simulation of a wireless sensor network was carried out using the XCTU 6.3.5 platform for XBee/RF solutions from DIGI Int. This platform allows not only to perform all the module settings, scan a network of any configuration, but also perform network testing with the measurement of specific signal levels and delays that occur.

A specialized software and hardware platform “Smart Utility Web” based on the XBEE S2 wireless module has been developed. The ease of installation of the system hardware and the reliability of data protection ensure a high level of data reliability and performance. By managing block size and encryption at the user application level, you can achieve optimal power consumption in terms of system lifespan while maintaining the required level of quality of service.

Keywords: wireless sensor network, energy monitoring, critical infrastructure objects, mathematical model, power consumption, protocol.

Підписано до друку 01.04.2021
Формат 210×297 мм. 24 стор.
Тираж 100 пр. Зам. №2456
Приватне підприємство «Артіль-Д»
Довідка АА № 651053 КВЕД-2010 18.13
Адреса оперативної поліграфії:
вул. Казакевича 6/209 4, Дніпро, 496066