

КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

V. Romanov, O. Palagin,
I. Galelyuka, O. Voronenko

WIRELESS SENSOR NETWORK FOR PRECISION AGRICULTURE AND ECOLOGICAL MONITORING

In the article the results of the development of the wireless sensor network for precision agriculture and ecological monitoring are considered.

Key words: wireless sensor network.

Приведены результаты разработки беспроводной сенсорной сети для прецизионного земледелия и экологического мониторинга.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть.

Наведені результати розробки безпроводної сенсорної мережі для прецизійного землеробства та екологічного моніторингу.

Ключові слова: безпроводна сенсорна мережа.

© В.О. Романов, О.В. Палагін,
І.Б. Галелюка, О.В. Вороненко,
2014

УДК 681.5

В.О. РОМАНОВ, О.В. ПАЛАГІН,
І.Б. ГАЛЕЛЮКА, О.В. ВОРОНЕНКО

БЕЗПРОВІДНА СЕНСОРНА МЕРЕЖА ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Вступ. Сьогодні не можна уявити технологію прецизійного землеробства або систему екологічного моніторингу без такого важливого елементу як система прийняття рішень та генерації управлінських дій. Основою прийняття рішень у таких системах служать вихідні дані з системи первинних датчиків, які розташовані безпосередньо на досліджуваних об'єктах або територіях, зокрема, сільськогосподарських угіддях або зелених насадженнях паркових і лісових зон. Якість і повнота збору даних визначає правильність прийняття рішень по впровадженню необхідних заходів для збільшення врожаю, зменшення затрат на одиницю продукції, захисту зелених насаджень та попередження можливих втрат рослинного покриву від впливу стресових чинників природного або техногенного походження.

Результати розробки безпроводної сенсорної мережі (БСМ) як системи первинних датчиків для систем підтримки прийняття рішень у прецизійному землеробстві, екологічному моніторингу та захисті навколишнього середовища, які розглядаються у роботі, отримані в Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України при виконанні міжнародного проекту НАН України і РФФД "Створення інформаційної технології для експрес-діагностики стану сільськогосподарських культур з використанням розподіленого "хмарового" середовища" і національного проекту "Мультисенсорна технологія експрес-діагностики стану рослин" в рамках Програми НАН України "Сенсорні прилади

для медико-екологічних та промислово-технологічних потреб".

Слід відзначити, що в значній мірі функціональні можливості системи прийняття рішень у прецизійному землеробстві або при екологічному моніторингу визначаються кількістю, якістю і частотою отримання вихідних даних з досліджуваних територій або об'єктів та швидкістю обробки цих даних. В узагальненому вигляді верхній рівень системи підтримки прийняття рішень та генерації агротехнологічних операцій у прецизійному землеробстві показано на рис. 1.

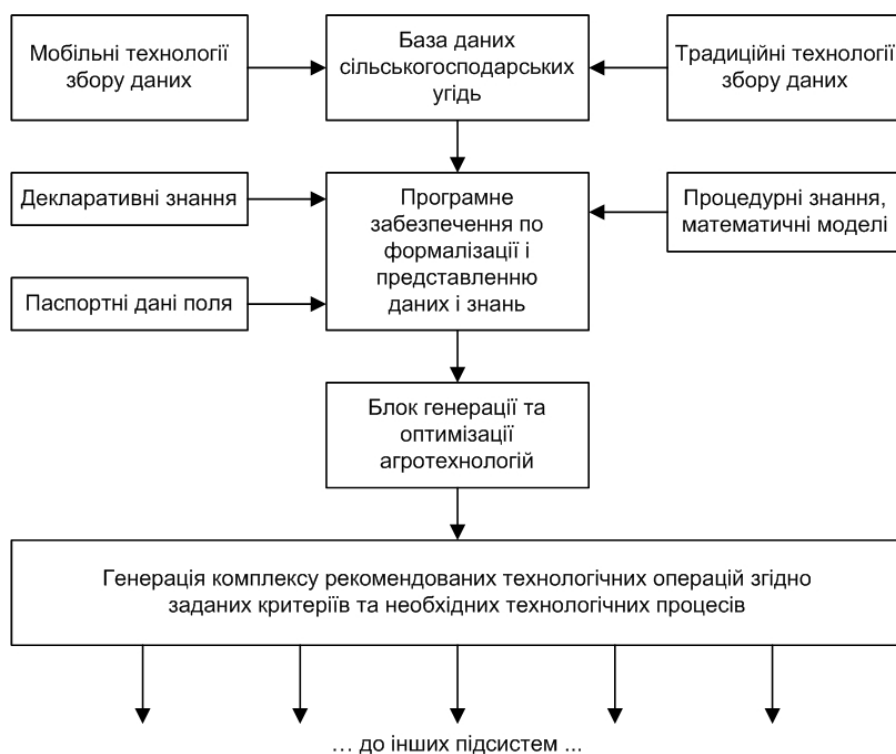


РИС. 1. Верхній рівень системи підтримки прийняття рішень у прецизійному землеробстві

Сукупність мобільних та традиційних технологій збору даних, баз даних сільськогосподарських угідь та програмного забезпечення з первинної обробки даних можна назвати базовою агротехнологією. Відповідно ту частину, яка прямує за базовою агротехнологією, а саме блок генерації та оптимізації агротехнологій можна назвати адаптивною агротехнологією [1].

До даних, які збираються безпосередньо на досліджуваній території, слід віднести метеорологічні дані, інформацію про стан ґрунтів і, що не менш важливо, інформацію про стан рослин.

Саме тому, отримання оперативної та об'єктивної інформації про стан рослинного покриву в багатьох випадках є важливим фактором, який зумовлює подальшу стратегію по догляду за сільськогосподарськими угіддями, зеленими

насадженнями мегаполісів, національними заповідниками, лісовими та парковими зонами та прийняття відповідних рішень. Звичайно, ідеальним було б отримання інформації про покращення або погіршення стану зелених насаджень не постфактум, а завчасно. Це дозволить зберегти рослини від втрат, зменшити витрати на їхній захист та зменшити негативний вплив стресових чинників природного або техногенного походження.

Як видно з рис. 1, мобільні та традиційні технології збору даних відіграють важливу роль у прецизійному землеробстві, екологічному моніторингу та захисті навколишнього середовища. З цією метою в Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова НАНУ створюється бездротова система збору даних, яка в реальному часі знімає інформацію про стан рослин на певній території сільськогосподарських угідь або зелених насаджень. Структурна організація розроблених систем збору даних у цілому розглянута в [2]. Але подальший аналіз літературних джерел та існуючих прикладних рішень показав, що на сьогодні більш перспективним для збору первинних даних є застосування технології БСМ.

Сучасні досягнення в мікроелектроніці, біосенсоріці та інформаційно-телекомунікаційних технологіях дозволяють створювати безпроводні сенсорні мережі для експрес-діагностики стану рослин на великих територіях з використанням ефекту індукції флуоресценції хлорофілу, який лежить в основі роботи автономних приладів сімейства "Флоратест" [3]. Застосування в БСМ мініатюрних сенсорів для вимірювання додаткових показників стану повітря та ґрунту дозволяє діагностувати не тільки загальний стан рослин, але і такі параметри, як вміст пестицидів у ґрунті, воді та рослинах, рівень корозії ґрунту, забруднення повітря тощо.

БСМ є інформаційною технологією майбутнього. Сьогодні технології безпроводних сенсорних мереж використовуються в різних областях прецизійного землеробства та екологічного моніторингу, але основними сферами їх застосування є збір просторових даних та даних з метою підтримки прийняття управлінських рішень. Фактично, за останні роки було опубліковано значну кількість робіт про застосування БСМ у прецизійному землеробстві та екологічному моніторингу.

Автори праць [4, 5] розробили БСМ, яка призначена для збору даних про стан ґрунту та навколишнього середовища. Основним призначенням системи є моніторинг, який здатен охоплювати великі території. Мобільна система збору даних, яка розглянута в [6], призначена для збору просторових даних та даних для управління врожайністю і встановлюється безпосередньо на сільськогосподарську техніку. Система збирає дані про вміст вологи у ґрунті, щільність ґрунтів, рівень біомаси, індекс листової поверхні, температуру листя, вміст хлорофілу у листі, рівень води у листі, локальні кліматичні показники, зараження рослин хворобами тощо. В роботі [7] розглянуто систему просторового моніторингу, яка містить модулі GPS, динамометричні сенсори, сенсори вологості та комунікаційний безпроводний Bluetooth-модуль. Автори публікації [8] розробили безпроводну інфрачервону термометричну систему для збору даних безпосередньо у полі. Система складається з інфрачервоних сенсорів, програмованих логі-

чних контролерів і радіопередавачів з низьким енергоспоживанням для збору даних в полі та подальшої їх передачі до віддалених приймачів за межами поля. В роботі [9] показано, як безпроводні сенсори використовуються в системі для супроводження підтримки прийняття рішень при створенні графіків поливів з використанням зібраних кліматичних даних та даних зондування ґрунту. В роботі [10] описано систему моделювання, яке демонструє можливості застосування БСМ у прецизійному землеробстві. Автори роботи [11] описали платформу, яку вони розробили для локальних і регіональних безпроводних сенсорних мереж.

Наведені публікації становлять лише невелику частку опублікованих за останні роки праць, які присвячені розробці та застосуванню БСМ у прецизійному землеробстві та екологічному моніторингу. Як впливає з огляду цих праць, кожна система розробляється з урахуванням критеріїв конкретної прикладної задачі.

Розробка сенсорної мережі. Головна мета роботи – це створення універсальної інтелектуальної системи для експрес-діагностики стану рослин та вироблення управлінських рішень на основі отриманих даних про стан рослин та навколишнього середовища. Збір первинних даних про стан рослин та параметри оточуючого середовища в системі покладено на БСМ.

Створювана система збору даних – це безпроводна сенсорна мережа, а саме: мережа великої кількості сенсорів, які об'єднані між собою радіоканалом. Площа покриття подібної мережі може складати від декількох метрів до декількох кілометрів за рахунок здатності ретранслювати дані від одного елемента до іншого. Основна перевага безпроводної сенсорної мережі – це здатність контролювати в реальному часі стан сільськогосподарських рослин чи параметрів навколишнього середовища на великих територіях.

Зупинимося на особливостях розробки типової безпроводної сенсорної мережі. Типова сенсорна мережа має відповідати більшості вимог, які пред'являються прецизійним землеробством та екологічним моніторингом до БСМ. Ці вимоги враховують показники відмовостійкості, масштабування, витрати на виробництво, вид операційного середовища, топологію сенсорної мережі, апаратні обмеження, модель передачі даних та споживчу потужність.

Так, наприклад, деякі вузли можуть вийти з ладу із-за збоїв енергопостачання, фізичних пошкоджень або стороннього втручання. Але відмова одного вузла мережі не має впливати на роботу усієї БСМ, яка має задовольняти вимогам відмовостійкості. Слід звернути увагу на те, що відмовостійкість мережі можна забезпечити шляхом правильного застосування чи розробки відповідних протоколів передачі даних або алгоритмів функціонування. Оскільки створювана БСМ призначається для роботи в умовах суттєвого впливу кліматичних умов, її відмовостійкість має бути досить високою.

Масштабування розроблюваної сенсорної мережі для кожної прикладної задачі обмежується кількістю вузлів від кількох десятків до кількох тисяч вузлів, причому вартість одного вузла має бути такою, щоб виправдати загальну вартість мережі. Вважається, що БСМ виправдовує вкладені в неї кошти, якщо її розгортання є дешевшим від системи збору і обробки даних на основі тради-

ційних датчиків. Саме тому, вартість одного вузла має бути мінімально можливою.

Не зважаючи на те, що велика кількість вузлів, а також можливість автоматизації їх розгортання (розкидування з літака, розташування роботом або випадковим чином людиною) виключає розташування їх у відповідності з чітко розробленим планом, схеми початкового розгортання мають відповідати наступним вимогам:

- зменшувати витрати на монтаж;
- усувати необхідність будь-якої попередньої організації і планування;
- підвищувати гнучкість розташування;
- сприяти самоорганізації та відмовостійкості.

Оскільки вузли мережі часто відмовляють із-за розрядження батареї або впливу фізичних факторів, тому структурі БСМ притаманні часті зміни топології після розгортання самої мережі. Зміна топології зумовлює зміну характеристик самих вузлів, а саме: положення, доступність (із-за завад, шумів, рухомих перешкод і т. д.), рівень заряду батареї, неполадки, зміна поставлених задач або ролі в мережі.

Повинна бути передбачена можливість включення в БСМ резервних вузлів для заміни несправних вузлів або у зв'язку з розширенням мережі та відповідних її функцій.

Перш за все, виділимо характеристики БСМ для конкретної прикладної задачі:

- кількість вузлів може бути на порядок вище, ніж у традиційній розподіленій мережі збору і обробки даних;
- вузли можуть розташовуватися дуже щільно;
- можуть відбуватися збої у роботі вузлів під впливом факторів природного чи техногенного походження;
- топологія мережі може змінюватися випадковим чином;
- вузли, як правило, обмежені в енергоспоживанні, обчислювальних можливостях, обсязі пам'яті;
- вузли не можуть мати глобальних ідентифікаційних номерів із-за значних додаткових витрат та порівняно великої кількості вузлів.

Розробку БСМ для нашої прикладної задачі, а саме, для застосування в прецизійному землеробстві та екологічному моніторингу, було розпочато з розробки окремого вузла мережі. За основу взято типовий вузол такої системи, який складається з кількох основних елементів (рис. 2): блоку збору даних, блоку обробки даних, передавача і блоку живлення [12].

Наявність додаткових модулів залежить від прикладної задачі БСМ. До додаткових модулів можна віднести систему визначення місцезнаходження, силовий генератор і мобілізатор. Модуль збору даних, як правило, складається з двох частин: сенсора і АЦП. Сигнал від сенсора після перетворення в АЦП передається в блок обробки. Передавач служить для під'єднання вузла до мережі.

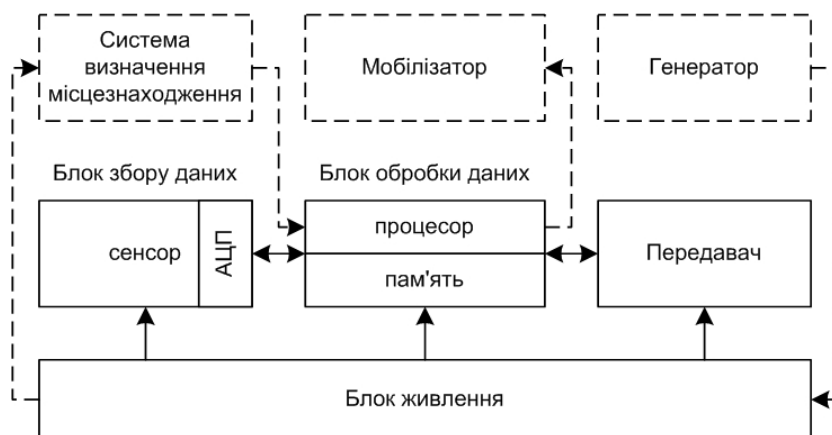


РИС. 2. Типовий вузол безпроводної сенсорної мережі

В роботі [13] розглянуто один з можливих варіантів передачі даних, а саме мобільний зв'язок. Не зважаючи на те, що засоби мобільного зв'язку добре підходять для традиційних систем збору і обробки даних, вони не можуть у повній мірі забезпечити вимоги, які пред'являються до сучасних БСМ. Одним з варіантів вирішення цієї задачі є організація радіозв'язку між сенсорами з використанням промислових частот, які доступні без ліцензії у більшості країн. Для сенсорних мереж малого розміру і малої потужності не потрібні підсилювачі сигналу, що є певною перевагою. Апаратні обмеження та знаходження компромісу між ефективністю антени і споживанням енергії накладають певні обмеження на вибір частоти передачі даних. Основною перевагою використання радіочастот промислового призначення є широкий спектр частот і їх доступність у всьому світі. Але можна зробити висновок, що вимоги прецизійного землеробства та екологічного моніторингу до БСМ ускладнюють задачу вибору середовища передачі даних.

Безпроводний вузол є мікроелектронним пристроєм з батарейним живленням, яке має обмежений ресурс. Відповідно, час функціонування вузла напряму залежить від ресурсу батарейного живлення. В мережі, де кожний вузол одночасно є модулем збору даних і маршрутизатором, вихід з ладу декількох вузлів може привести до значних змін в структурі мережі, що обумовлює необхідність повторного пересилання пакетів та реорганізації мережі. Таким чином, адаптивне керування живленням є важливим додатковим фактором функціонування БСМ. Саме тому, багато дослідників нині зосереджені на розробці енергозберігаючих протоколів і алгоритмів для сенсорних мереж. Застосування певних протоколів може бути компромісним за рахунок зниження інших показників (наприклад, збільшення часу реакції і зменшення пропускної здатності). Основними задачами вузла є виявлення подій, виконання швидкої локальної обробки даних, передача даних. Відповідно, енергія споживається на цих трьох етапах. Пе-

ріодичний збір даних потребує меншого енергоспоживання енергії, ніж постійний моніторинг.

Вузол витрачає максимум енергії при передачі або прийманні даних. Відомо, що для зв'язку на невеликі відстані з малою потужністю випромінювання передача та приймання даних вимагають приблизно однакової енергії споживання. В цьому випадку слід враховувати не тільки активну потужність, але і споживання електроенергії, яка витрачається на запуск передавача. Запуск передавача займає доли секунди, але при передачі малих пакетів даних потужність запуску може бути більшою за потужність передачі, що робить недоцільним постійно включення та вимикання передавача.

Вузли, як правило, розташовані випадковим чином на всій території спостережень. Кожний з них може здійснювати збір даних і визначати маршрут передачі в центральний вузол до кінцевого користувача. Як правило, в створюваній мережі можна виділити два типи пристроїв. Перший тип – це повнофункціональний вузол. Він може слугувати як координатором окремих ланок мережі, так і окремим звичайним вузлом мережі. Такий вузол реалізує загальну модель зв'язку, яка дозволяє "спілкуватися" з іншими вузлами мережі. Також цей вузол може передавати дані на вищий рівень мережі, в такому випадку він є координатором мережі. Другий тип пристроїв – вузли з облегшеними функціями. Тобто це прості вузли з малим ресурсом і вимогами до мережі. Переважно такі вузли можуть зв'язуватися з повнофункціональними пристроями і не можуть слугувати координаторами мереж. Організація фрагменту безпроводної сенсорної мережі показана на рис. 3. Саме така архітектура створюваної мережі відповідає вимогам прикладних задач у прецизійному землеробстві та екологічному моніторингу.

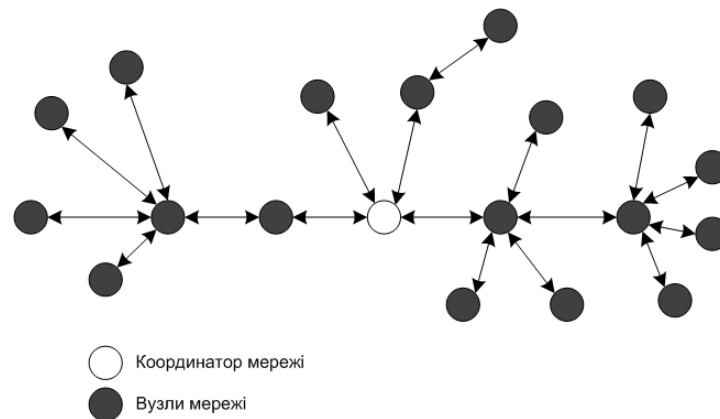


РИС. 3. Організація зв'язку в безпроводній сенсорній мережі

Координатор (рис. 3) здійснює загальний зв'язок системи з сервером верхнього рівня та планування збору і передачі даних усією мережею. Тим не менш, не слід виключати з розгляду такі прості структури, як однорангові або структу-

ри типу "зірка". Саме прості структури організації безпроводних мереж у багатьох випадках є більш прості в розгортанні та економічно виправдані. Організація передачі даних у простих безпроводних мережах та швидкість і простота їх розгортання є часто одними з головних показників ефективності функціонування (або життєвого циклу) БСМ. Слід зауважити, що навіть у простих мережах один з вузлів має бути повнофункціональним і виконувати функції координатора.

До теперішнього часу розроблено більше 100 різноманітних алгоритмів самоорганізації БСМ, які можна умовно розбити на такі групи:

Кластери [14]. Цей підхід полягає у тому, що група з кількох вузлів мережі об'єднується в кластер. З вузлів цієї групи вибирається голова кластера. Всі вузли кластера збирають інформацію і передають її голові кластера, а потім голова кластера обробляє отриману інформацію і передає її на вузол збору даних.

Ланки зв'язків [15]. З багатьох сенсорних вузлів будуються ланки до одного з вузлів, який згодом передає отримані дані на вузол збору даних.

Деревоподібні структури [16]. Цей підхід подібний до попереднього. Відмінність полягає у тому, що будуються не ланки, а дерева зв'язків, у коренях яких знаходяться вузли збору даних.

Географічні підходи [17]. У географічних підходах використовується знання про місце розташування вузлів, отриманих, наприклад, за допомогою встановлених у вузлах модулів GPS. Використовуючи ці дані, вузли можуть організуватися у відповідну структуру.

Підхід, який використовує **різноманітність вузлів мережі** [18]. Передбачається наявність у мережі різноманітних вузлів. Вузли одного типу забезпечують збирання даних, а вузли іншого типу забезпечують винятково розповсюдженням зібраних даних по мережі. При цьому вузли організовуються в окремі групи, які об'єднуються у групи більшого розміру. Таким чином, в мережі організовується ієрархічна групова структура.

Розробка базових засобів БСМ розділена на кілька етапів: етапи розробки функціональних і принципів електричних схем окремого вузла системи з радіоканалом, розробки алгоритмів функціонування розробленого вузла, розробки конструктивів.

Вимоги до вузла БСМ наступні:

- тривалий час автономної роботи без заміни елементів живлення;
- висока надійність передавання та отримання даних;
- велика дальність зв'язку;
- малі розміри та вага;
- стійкість до впливу кліматичних факторів.

Перш за все, в рамках виконання проектів розроблено функціональну схему вузла БСМ, яка показана на рис. 4. Основним елементом схеми є мікроконтролер, який керує роботою цілого вузла та окремими його елементами. Результати вимірювання передаються від сенсора через АЦП до мікроконтролера. Отримані дані обробляються у мікроконтролері і записуються в пам'ять для збереження або в модуль радіопередавача для подальшої передачі. Для налаштування мікроконтролера та його перепрограмування служить USB-інтерфейс. Живлення всіх

модулів забезпечується від автономних джерел живлення. Як допоміжні модулі у вузлі можуть бути використані джерела опорних напруги і частоти.

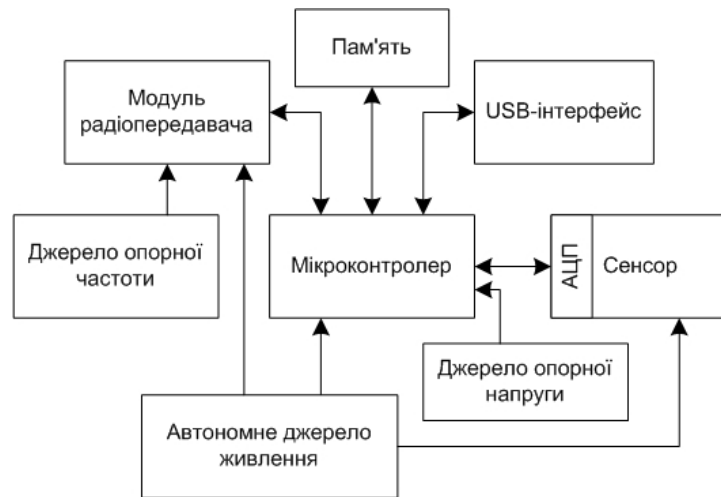


РИС. 4. Функціональна схема вузла безпроводної сенсорної мережі

Мікроконтролер вузла БСМ реалізовано на ІМС JN5168 виробництва компанії NXP. Він містить 32-бітний RISC-процесор з тактовою частотою 32 МГц, модуль безпроводного зв'язку, сумісний зі стандартом IEEE802.15.4, вбудований 4-канальний 10-бітний АЦП, аналогові та цифрові входи/виходи тощо. Цей мікроконтролер за своїми характеристиками повністю відповідає вимогам щодо реалізації робочого вузла БСМ, який забезпечує збір, зберігання і передачу даних до координатора.

Висновки. Показано, що розробка та створення БСМ для прецизійного землеробства та екологічного моніторингу це досить складна і комплексна проблема. При виконанні міжнародного і національного проектів авторами знайдено розумний компроміс між відмовостійкістю, енергоспоживанням та апаратними обмеженнями вузлів безпроводної сенсорної мережі.

1. Якушев В.В. Система поддержки принятия решений (СППР) в земледелии // Материалы международной конференции "Современная агрофизика – Высоким агротехнологиям". – С-Пб, РФ. – 2007. – С. 21–31.
2. Palagin O.V., Romanov V.O., Galelyuka I.B. et al. Data acquisition systems of plants' state in precision agriculture // Proceeding of the 6th IEEE International conference on "Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications", IDAACS'2011. – Prague, Czech Republic. – 2011, September 15–17. – P. 16–19.
3. Romanov V., Brayko Yu., Galelyuka I. et al. Portable Biosensor: from Idea to Market // International Journal "Information Theories & Applications. Vol. 19, N 2. – Sofia, Bulgaria. – 2012. – P. 126–131.

4. *López J., Soto F., Iborra A. et al.* Design and Implementation of a Wireless Sensor Network for Precision Horticulture // in book "Sensor Applications, Experimentation, and Logistics", N. Komninos (Ed.), 2009. – P. 27–42.
5. *Haldar N., Banerjee D., Ghosh K. et al.* An Automated Scheme for Precision Agriculture through Data Acquisition and Monitoring System using Multiple Sensors Network // 2nd National Conference on Computing, Communication and Sensor Network, 2011. – P. 19–24
6. *Gomide R.L., Inamasu R.Y., Queiroz D.M. et al.* An automatic data acquisition and control mobile laboratory network for crop production systems data management and spatial variability studies in the Brazilian center-west region. ASAE Paper No.:01-1046. The American Society of Agriculture Engineers, St. Joseph. – Michigan, USA. – 2001.
7. *Lee W.S., Burks T.F., Schueller J.K.* Silage yield monitoring system. ASAE Paper No.: 02-1165. The American Society of Agriculture Engineers, St. Joseph. – Michigan, USA – 2002.
8. *Mahan J., Wanjura D.* Upchurch, Design and Construction of a Wireless Infrared Thermometry System. The USDA Annual Report. Project Number: 6208-21000-012-03. – May 01, 2001–September 30, 2004.
9. *Evans R., Bergman J.* Relationships Between Cropping Sequences and Irrigation Frequency under Self-Propelled Irrigation Systems in the Northern Great Plains (Ngp). USDA Annual Report. Project Number: 5436-13210-003-02. – June 11, 2003–December 31, 2007.
10. *Camilli A., Cugnasca C.E., Saraiva et al.* From wireless sensor to field mapping: Anatomy of an application for precision agricultura. *Comput // Electron. Agric.* 58, 2007. – P. 25–36.
11. *Pierce F.J., Elliot, T.V.* Regional and on-farm wireless sensor networks for agricultural systems in Eastern Washington // *Comput. Electron. Agric.* 61, 2008. – P. 32–43.
12. *Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y. et al.* Wireless sensor networks: a survey // *Computer Networks.* – 2002. – N 38. – P. 393–422.
13. *Palagin O., Romanov V., Galelyuka I. et al.* Data acquisition systems for precision farming // *Information Technologies & Knowledge.* Vol. 5, Number 2. – Sofia, Bulgaria. – 2011. – P. 103–109.
14. *Handy M.J., Haase M., Timmermann D.* Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic Cluster-Heads selection // *Proc. 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network.* – 2002. – P. 368–372.
15. *Lindsey S., Raghavendra C.S.* Pegasus: Power-efficient gathering in sensor information systems // *Proc. of the IEEE.* – 2002. – P. 924–935.
16. *Perkins C.E., Belding-Royer E.M., Das S.* Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing // *IETF RFC.* – 2003.
17. *Xu Y., Heidemann J., Estrin D.* Geography-informed energy conservation for ad hoc routing // *Proc. of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking.* – 2001. – P. 70–84.
18. *Subramanian L., Katz R.H.* An architecture for building self-configurable systems // *Proc. Mobile Ad Hoc Network Comput. Workshop.* – 2000. – P. 63–73.

Одержано 12.09.2014