

# КІБЕРНЕТИКА та КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.5.08:004.03; 004.67; 004.75

DOI:10.34229/2707-451X.24.2.8

Г.В. АНТОНОВА

## ОСНОВНІ АСПЕКТИ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ ВУЗЛІВ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

**Вступ.** Бездротові сенсорні мережі (БСМ) це частка Інформаційно комунікаційних технологій і основа технологій Інтернету речей, за допомогою яких, дані збираються, передаються і оброблюються у режимі реального часу.

БСМ – багаторівневі, розподілені мережі, побудовані за принципами самоорганізації, з великою кількістю сенсорів та виконавчих механізмів, які об'єднані радіоканалом. Типова БСМ складається із великої кількості простих кінцевих вузлів – сенсорів та координатору. Особливостями сенсорних бездротових мереж є розподіленість у просторі, масштабованість, низьке енергоспоживання, надійність та висока якість передачі інформації. В основу роботи бездротової мережі покладені стандарти бездротового зв'язку.

На сьогоднішній день БСМ використовують у різних галузях – у промисловості, медицині, військовій справі, а також у цифровому землеробстві, яке впроваджується у промислове сільське господарство. Згідно [1] впровадження цифровізації у промислове сільське господарство відбулось в Україні на урядовому рівні. У роботі [2] надано визначення цифрового землеробства (ЦЗ). Зазначимо, що концепція ЦЗ базується на використанні технологій, сенсорів, штучного інтелекту, «розумної» техніки, а також впровадження технологій Інтернету речей (ІоТ) у промисловий процес.

**Мета** – надання всебічного аналізу бездротового сенсорного вузла для використання у промисловому сільському господарстві, що включатиме: аналіз сучасних стандартів бездротового зв'язку, на основі яких працюють БСМ, складових типового бездротового сенсорного вузла, визначення його основних параметрів для подальшого моделювання, розробку класифікації засобів електроживлення бездротових сенсорних вузлів і мереж, аналіз типів сенсорів для використання у цифровому землеробстві.

*Надано всебічний аналіз бездротового сенсорного вузла для використання у цифровому землеробстві. Представлено огляд сучасних стандартів бездротового зв'язку, на основі яких працюють БСМ. Надано опис складових типового бездротового сенсорного вузла, визначено його основні параметри для подальшого моделювання. Розроблено класифікацію засобів електроживлення бездротових сенсорних вузлів і мереж. Розглянуто систему збору енергії та її компоненти. Обрано фотовольтаїчні перетворювачі енергії та типи мікросхем керування живленням для підключення до бездротового вузла. Проаналізовано типи сучасних сенсорів для використання у цифровому землеробстві, представлених на світовому ринку.*

**Ключові слова:** бездротові сенсорні мережі, бездротовий сенсорний вузол, цифрове землеробство, системи збору енергії, Інтернет речей.

© Г.В. Антонова, 2024

**Стандарти бездротового зв'язку.** В основу прийому/передачі даних у БСМ покладено стандарти бездротового зв'язку. У промисловому сільському господарстві використовуються БСМ, в основу яких покладено наступні стандарти бездротового зв'язку – Wi-Fi, IEEE 802.15.4, ZigBee, Bluetooth 4.0, GPRS, 4G, LoRaWAN та NB-IoT. Наведені стандарти можна поділити на 3 категорії:

1. *Мережі малого радіусу дії:* стандарти Wi-Fi, IEEE 802.15.4, ZigBee, які мають радіус дії, що не перевищує 100 м і Bluetooth 4.0 з радіусом дії до 10 м. Bluetooth 5.0 з радіусом дії до 300 м [3–6].

2. *Мобільні мережі:* стандарти 2G або GPRS, 4G. Стандарт 2G або GPRS працює з повільною швидкістю від 56 до 114 Кбіт/с; стандарт 4G може передавати великі обсяги інформації на високих швидкостях, максимальна швидкість 1 Гб/с. В Україні з 2018 р. оператори зв'язку отримали ліцензії на стандарт 4G LTE на частотах 1,8 ГГц та 2,6 ГГц, а 2020 року на частоту 0,9 ГГц. Однак чим вищий діапазон частот – тим менший радіус дії базової станції (БС). БС діапазону 2,6 ГГц мають невеликий радіус дії: у місті – близько 300–500 м, а в передмісті: 1–1,5 км. БС, що працюють на частоті 1,8 ГГц (LTE-1800) мають зону охоплення 13,5 км та встановлюються у сільській місцевості, в невеликих та великих містах. У діапазоні 0,9 ГГц 4G LTE мають радіус дії близько 26 км.

3. *Глобальні мережі* – стандарти LoRaWAN та NB-IoT. Технологія LoRa, об'єднує у собі метод модуляції LoRa в бездротових мережах LPWAN. Модуляція LoRa є фізичним рівнем, а LoRaWAN (Long Range Wide Area Networks) – це MAC протокол для мереж високої ємності з великим радіусом дії до 15000 км і низьким власним енергоспоживанням. Швидкість передачі даних у режимі LoRaWAN коливається від 0,3 до 50 Кбіт/с [7]. NB-IoT (Narrowband-IoT) – стандарт бездротового зв'язку, вузькосмугова радіотехнологія для пристроїв і додатків M2M та Інтернету речей (IoT), яким потрібні невеликі обсяги даних, низька пропускна здатність і тривалий час автономної роботи. NB-IoT забезпечує можливість роботи при низьких рівнях сигналу та високому рівні шумів, а також економію батарейного живлення. Зазначимо, що стандарт NB-IoT призначений для передачі саме коротких повідомлень. Базові станції діапазону 0,8 ГГц мають радіус покриття до 13,4 км. Діапазон 1,8 ГГц – найбільш використовуваний у світі, він поєднує високу ємність і відносно великий радіус дії 6,8 км. Проте для більшості пристроїв стандарту NB-IoT радіус дії близько 1 км [8].

**Типовий бездротовий сенсорний вузол.** Однією зі складових БСМ є бездротовий сенсорний вузол. В мережі може бути велика кількість сенсорних вузлів, їх кількість залежить від стандарту бездротового зв'язку, на основі якого побудована бездротова мережа. Кожен сенсорний вузол виконує прикладні дії, такі як: процес періодичного вимірювання даних, їх первинну обробку і передачу до координатора, смартфона або хмарного середовища. При розробці власного зразку бездротового сенсорного вузла, при застосуванні готових пристроїв або при побудові моделей, розробник керується типовим складом елементів, тобто архітектурою типового вузла. На рис. 1 схематично показано архітектуру типового бездротового сенсорного вузла.



РИС. 1. Архітектура типового бездротового сенсорного вузла

Коротко розглянемо функції, які виконує кожен модуль у бездротовому сенсорному вузлі.

*Модуль вимірювання* складається з датчиків та аналого-цифрового перетворювача. Цей модуль виконує функцію збору інформації, що здійснюється за допомогою датчиків. Датчики – компоненти, які збирають дані про оточуюче середовище, такі як: температура, вологість, тиск, рівень освітленості тощо, залежно від конкретного застосування. АЦП – перетворює аналоговий сигнал, отриманий від датчиків вимірювання, у цифровий формат для подальшої обробки та аналізу.

*Обчислювальний модуль.* Основна складова даного модулю – мікроконтролер. Цей елемент виконує набір інструкцій, керує зберіганням тимчасових даних. Мікроконтролер здійснює керування периферійними пристроями, такими як: сенсори, дисплеї, актуатори тощо. Мікроконтролер керує доступом до внутрішньої пам'яті вузла, також здійснює обробку введення/виведення даних від користувача або інших пристроїв. Мікроконтролер керує живленням вузла, режимами сну та оптимізацією споживання енергії, комунікаціями з іншими пристроями або системами через різні інтерфейси, такі як: UART, SPI, I2C, Ethernet, USB, бездротовий канал зв'язку. Ще один з компонентів обчислювального модулю – пам'ять, використовується для зберігання програмного коду, конфігураційних параметрів, проміжних результатів обчислень та іншої інформації.

*Модуль бездротового зв'язку.* Основний компонент – прийомо-передатчик (трансивер), який забезпечує передачу цифрових даних через бездротовий канал зв'язку, перетворює цифрові сигнали на радіохвилі, або інші форми електромагнітного випромінювання для передачі даних; приймає цифрові сигнали з оточуючого середовища через бездротовий канал зв'язку. Трансивер виконує процес модуляції і демодуляції, а також здійснює автоматичне керування параметрами каналу зв'язку, такими як: частота, ширина смуги, потужність сигналу для забезпечення ефективного і надійного зв'язку. Вбудовані алгоритми у трансивері виявляють та коригують помилки в переданих даних для підвищення надійності зв'язку. Трансивер може оптимізувати споживання енергії шляхом регулювання потужності передавача та режимів сну для подовження часу роботи в бездротових пристроях.

*Модуль живлення.* Основна функція модуля полягає у постачанні необхідної електричної енергії для всіх компонентів пристрою: мікроконтролера, датчиків, трансиверу, дисплею та інших електронних компонентів. Забезпечує стабільність напруги та струму. Заряджає акумулятор. Деякі модулі живлення можуть включати у себе функції керування енергоспоживанням, які дозволяють оптимізувати споживання енергії у залежності від режиму роботи пристрою. Модуль живлення може також включати захисні схеми для захисту пристрою від перенапруги, короткого замикання та перевантаження, що виникають через несправність джерела живлення або зовнішні фактори.

**Параметри бездротового сенсорного вузла.** Бездротовий сенсорний вузол, як об'єкт моделювання, потрібно описувати деяким набором параметрів. Визначимо наступний набір параметрів бездротового сенсорного вузла для подальшого моделювання: фізичні, апаратні, енергетичні, функціональні та мережеві.

*Фізичні параметри:* вага, геометричні розміри, стан вузла (працездатність). *Апаратні параметри:* мікроелектронні компоненти та їх властивості. *Енергетичні параметри:* заряд автономної батареї; енергоспоживання при прийомі/передачі даних, енергоспоживання в активному режимі, енергоспоживання в енергозберігаючому режимі; енергоспоживання на обробку подій від датчиків; енергоспоживання у режимі сну, енергоспоживання при ініціалізації вузла, енергоспоживання на прослуховування каналу, потужність передавача; чутливість приймача.

*Функціональні параметри* – оцінка чистоти каналу, вимірювання даних, передача даних, ініціалізація, вибір каналу, оцінка чистоти каналу, придатного для передачі даних, вимірювання даних, передача даних, перехід у режим сну. *Мережеві параметри:* дальність бездротової передачі даних, розмір пакетів; унікальна MAC-адреса вузла; протокол передачі даних, програмне забезпечення.

Визначені нами параметри бездротового сенсорного вузла, допоможуть досліднику обрати один або декілька необхідних параметрів і зосередитись на їх властивостях для моделювання.

**Класифікація засобів електроживлення бездротових сенсорних вузлів і мереж.** Кожна область застосування бездротових мереж призначена для розв'язку певного класу задач або надання користувачам певних сервісів. Тому кожна БСМ розробляється у рамках прикладної задачі, яку зумовлено областю застосування. Однією з важливих вимог до типової БСМ у рамках прикладної задачі промислового землеробства є довготривала і безперебійна автономна робота мережі протягом вегетативного періоду, яка напряму залежить від енергозабезпечення бездротових вузлів мережі.

В даній роботі запропоновано Класифікацію засобів електроживлення бездротового сенсорного вузла, показану на рис. 2. Для якісної класифікації виокремимо три суттєві ознаки засобів електроживлення: електроживлення від електромережі змінного струму, від джерела автономного живлення та джерела живлення від відновлюваної енергії.

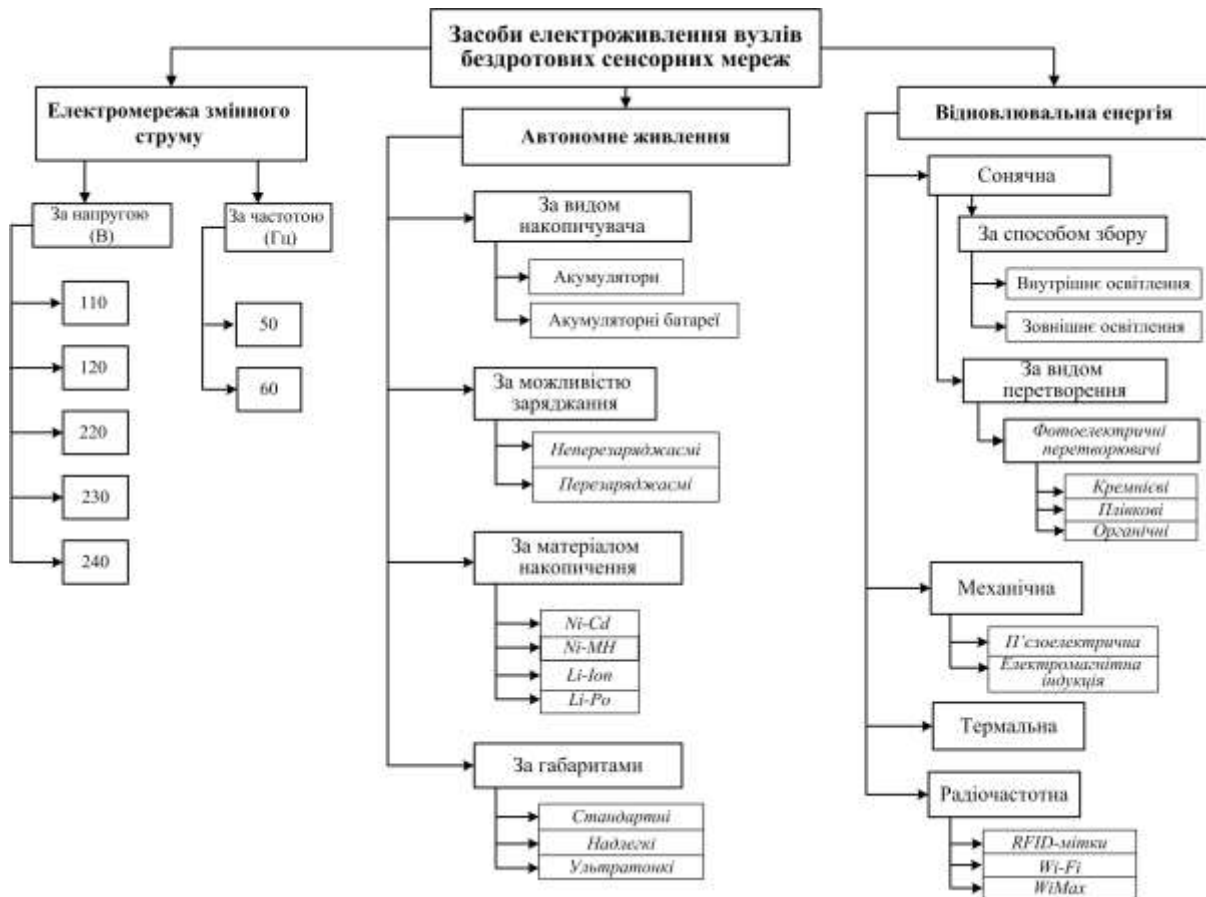


РИС. 2. Класифікація засобів електроживлення бездротових сенсорних вузлів і мереж

Складова «Електромережа змінного струму», згідно класифікації, поділяється на дві групи: за напругою (В) і частотою (Гц). Саме такий розподіл зумовлений різними значеннями напруги і частоти в електромережі змінного струму в світі. Напруга і частота в мережі регулюються стандартами, які відрізняються у різних країнах світу. В Україні діє Національний стандарт – ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності» [9], згідно з Національною приміткою, наведеною в [9], стандартна номінальна напруга має значення  $U_n = 220$  В, а частота напруги електропостачання має бути 50 Гц. У більшості країн Європи за стандартом «BS EN 50160:2022 Voltage Characteristics Of Electricity Supplied By Public

Electricity Networks» [10] напруга мережі становить  $U_n = 230$  В, а загальноприйнята частота змінного струму 50 Гц. На схемі також наведено показники напруги і частоти змінного струму прийнятих у країнах Північної Америки, Великобританії, Південної Кореї, Тайваню. Такий засіб енергоживлення бездротових вузлів БСМ, як електромережа змінного струму має наступні переваги: стабільність, доступність, зручність при заряджанні вузлів. Але з іншого боку, має істотний недолік – обмеження або повна відсутність доступу до електромережі змінного струму у польових умовах.

Складову *Автономне живлення*, за класифікацією, поділено на 4 групи. За видом накопичувача 1 група: акумулятори виконуються як у вигляді одного елемента, так і декількох – акумуляторних батарей. Акумуляторна батарея – послідовно включені й розміщені в одному корпусі елементи. Акумулятори й акумуляторні батареї – група 2, поділено на два види: перезаряджаємі та неперезаряджаємі. Для використання у бездротових вузлах сенсорної мережі доцільно використовувати акумулятори, що перезаряджаються, це зумовлено довшим життєвим циклом. За матеріалом накопичення, група 3: нікель-кадмієві (NiCad), нікель-металогідридні (NiMH), літій-іонні (Li-Ion), літій-полімерні (Li-Po), саме зазначені матеріали найчастіше використовують для акумуляторів бездротових сенсорних вузлів. За габаритами 4 група, поділена на: стандартні; ультратонкі; надлегкі. Стандартні акумулятори мають циліндричну форму і типи АА, ААА, розміри від 10 x 22 мм до 18,5 x 65 мм, номінальну напругу 3,7 В [11]. Сучасні ультратонкі перезаряджуванні батареї, мають наступні характеристики: товщина 2,0 – 0,5 мм, номінальна напруга 3,7 В, вага 3 – 6 г [12]. Надлегкі акумулятори мають вагу до 330 мг, номінальну напругу 3,6 В, товщину 3 – 5 мм, вагу 1,2 – 2 г [13].

Складову *Відновлювальна енергія*. Згідно з визначенням, що надає ООН, відновлювана енергія – це енергія, отримана з природних джерел, яка поповнюється з більшою швидкістю, ніж споживається [14]. Як джерело живлення бездротових вузлів БСМ для накопичення енергії прийнятні такі види відновлювальної енергії – сонячна, механічна, термальна і радіочастотна енергії [15], які є групами складової Відновлювальна енергія.

Запропонована класифікація побудована на суттєвих ознаках засобів електроживлення, які у свою чергу поділено на групи, що дозволить спростити процес вибору засобів електроживлення БСМ під час проектування мережі.







**Energy Harvesting Systems (EHS) – Системи збору енергії.** В науково-технічній літературі існує спеціальний термін, який використовується для позначення перетворення відновлюваної енергії навколишнього середовища в електричну – Energy Harvesting – збір енергії. Збір енергії – це процес, за допомогою якого, енергія отримується із зовнішніх джерел, таких як: сонячна або світлова енергія, теплова енергія тощо і зберігається для невеликих бездротових автономних пристроїв [16–18]. У БСМ збір енергії може бути використаний для подолання проблеми енергоспоживання бездротового вузла. Параметри основних видів Системи збору енергії наведено в табл.1.

ТАБЛИЦЯ 1. Параметри Основних видів Energy Harvesting Systems

Джерело енергії	Технологія збору	Технологія	Ефективність
Сонячна	Фотони від сонячного та штучного світла перетворюються на електрику за допомогою фотоелектричних елементів	Фотовольтаїчна	$32 \pm 1.5 \%$
			$25 \pm 1.5 \%$
Механічна	За допомогою коливань, спричинених потоком, кінетичної енергії та енергії поверхневої деформації	П'єзоелектрична, Електростатична, Електромагнітна	$50 - 100$ кВт/см <sup>2</sup>
Термальна	Різниця температур, нагрівання або охолодження піроелектрика. Ефект Зеебека	Термоелектрична	$0,1 \pm 3.5 \%$
Радіочастотна	Електромагнітні хвилі перетворюються на електрику шляхом випрямлення змінних струмів, індукованих в антені	Радіочастотна	50 %

Для використання БСМ у цифровому землеробстві, важливими критеріями бездротового вузла є мала вага, невеликі розміри, а також робоча напруга діапазону від 3,3 до 4,5 В . На основі цих критеріїв запропоновано перелік фотовольтаїчних перетворювачів енергії з метою підключення у контур EHS для енергоживлення бездротового вузла наведено табл. 2.

ТАБЛИЦЯ 2. Фотовольтаїчні перетворювачі енергії

Тип батарей	Розміри (Д x Ш x В), мм Вага, г	Електричні параметри
IXOLAR™ KX22-01X8F, монокристалічна 	22 x 7 x 1,8 Вага: 0,5	Робоча напруга: 3,4 В постійного струму Струм короткого замикання: 3,8 мА Максимальна потужність: 18,6 мВт Ефективність пластини: 22 %
IXOLAR™ SM141K06L, монокристалічна 	42 x 23 x 2,10 Вага: 3,4	Робоча напруга: 3,35 В постійного струму Струм при макс. потужності: 55,1 мА Максимальна потужність: 18,6 мВт Ефективність пластини: 25 %
IXOLAR™ SM111K06L, монокристалічна 	41,0 x 21 x 1,8 ± 0,3 Вага: 3,0	Робоча напруга: 3,35 В постійного струму Струм при макс. потужності: 43,9 мА Максимальна потужність: 146,9 мВт Ефективність пластини: 25 %
IXOLAR™ SM141K06LV, монокристалічна 	45 x 22 x 1,8 ± 0,3 Вага: 3,4	Робоча напруга: 3,35 В постійного струму Струм при макс. потужності: 55,1 мА Максимальна потужність: 184 мВт Ефективність пластини: 25 %
IXOLAR™ SLMD121H06L, монокристалічна 	41 x 21 x 1,8 ± 0,3 Вага: 3,0 ± 0,3	Робоча напруга: 3,18 В постійного струму Струм при макс. потужності: 42,9 мА Максимальна потужність: 136,5 мВт Ефективність пластини: 22 %
PANASONIC Amorton AM-5610CAR 	25 x 20 x 1,8 Вага: 2,2	Робоча напруга: 3,3 В постійного струму Струм при макс. потужності: 5,1 мА Максимальна потужність: 16,83 мВт

**Основні компоненти системи збору енергії** – це пристрої збору енергії, мікросхеми керування живленням, пристрій зберігання енергії, регулятор напруги. Пристрої збору енергії забезпечують невелику кількість енергії для низькоенергетичної мікроелектроніки. На рис. 3 показано приклад функціональної схеми Системи збору енергії.



РИС. 3. Функціональна схема Системи збору енергії

Одним з головних компонентів системи збору енергії є мікросхема керування живленням (PMIC – power management integrated circuits), яка виконує функції із заряджання акумулятора, масштабування напруги та DC/DC перетворювача. Для роботи системи може знадобитися більша або нижча напруга, ніж та, що забезпечується пристроєм збору енергії. Це може забезпечити понижуючий перетворювач. Понижуючий перетворювач – це перетворювач DC/DC струму, який знижує вхідну напругу на виході. І навпаки, підвищувальний перетворювач – це DC/DC перетворювач, який підвищує вхідну напругу на виході. Ефективність PMIC коливається приблизно від 85 до 95 %. Невелика кількість потужності втрачається через внутрішній опір і втрати при перемиканні [18].

Зробивши аналіз PMIC, з оглядом на критерії прикладної задачі, що вирішує БСМ, обрано варіанти PMIC для підключення до системи збору енергії, які наведені в табл. 3.

ТАБЛИЦЯ 3. Типи мікросхем керування живленням

Тип PMIC	Джерело енергії	V <sub>вх.</sub> (мін), В	V <sub>вх.</sub> (макс), В	Ціна, \$	Розміри, мм
LTC4013	Сонячна	4,5	60	4,72	4 x 5 x 0,75
LTC4020	Сонячна	4,5	55	5,90	5 x 7
LTC4000-1	Сонячна	3	60	4,72	4 x 5 x 0,75
LT3652HV	Сонячна	4,95	34	4,08	3 x 3
LTC3105	Сонячна	0,2	5	3,25	3 x 3
LTC3106	Сонячна, Термоелектрична	0,85	5,1	3,53	3 x 4 x 0,75
LTC3119	Сонячна	0,25	18	8,49	4 x 5 x 0,75
LTC3130	Сонячна	2,4	25	4,01	3x 4 x 0,75
LTC4121	Сонячна	4,4	40	3,14	3 x 3 x 0,75
LTC3652	Сонячна	4,95	34	4,08	3 x 3

Отже, однією з практичних задач, які безпосередньо пов'язані з проблемами енергоефективності БСМ, є збільшення часу автономної роботи мережі. Технологічним рішенням – методом по збільшенню енергоефективності мережі може бути підключення Energy Harvesting Systems до бездротового сенсорного вузла.

**Типи сенсорів для використання у цифровому землеробстві.** На світовому ринку представлено різні типи сенсорів, які призначені для використання у цифровому землеробстві [19]. До них належать:

- оптичні сенсори,
- електрохімічні сенсори для виявлення поживних речовин у ґрунті,
- механічні сенсори ґрунту,
- діелектричні сенсори вологості ґрунту,
- сенсори розташування,
- сенсори IoT.

Розглянемо детально кожен вид сенсора за принципом дії; параметрами, що вимірюються, значимо переваги та недоліки використання різних видів сенсорів, наведемо приклади.

**Оптичні сенсори.** Принцип дії базується на аналізі спектральних характеристик випромінювання, яке відбивається чи випромінюється рослинами. Характеристика, що вимірюється – різні ділянки спектра електромагнітного випромінювання, включаючи видиме світло та інфрачервоне випромінювання. Переваги використання: точність даних про стан рослин та ґрунту; дозволяють автоматизувати процеси моніторингу та управління сільськогосподарськими угіддями; ефективність використання ресурсів. Недоліки: залежність від погодних умов; висока вартість обладнання; необхідність спеціальних знань та навичок для ефективного використання. Приклад: NDVI сенсори

(Normalized difference vegetation index), мультиспектральні камери, гіперспектральні сенсори, інфрачервоні сенсори.

**Електрохімічні сенсори для виявлення поживних речовин у ґрунті.** Принцип дії базується на іон-селективності та зміні потенціалів. Характеристика, що вимірюється – рівень поживних речовин у ґрунті: азот, фосфор, калій; вимір РН ґрунту. Переваги використання: надають точні дані про концентрацію поживних речовин у ґрунті у реальному часі, висока роздільна здатність. Недоліки: обмеженість у чутливості до певних речовин, необхідність регулярного обслуговування та калібрування; залежність від текстури ґрунту: вимірювання можуть бути менш точними у різних типах ґрунту. Приклад: Сенсори на основі іон-селективних електродів, амперометричні датчики.

**Механічні датчики ґрунту.** Принцип дії – зміна електричного опору між двома електродами; використання вібраційного методу для оцінки щільності ґрунту; використання термісторів. Характеристика, що вимірюється – фізичні властивості ґрунту: вологість, щільність, температура, або вміст солей. Переваги використання: простота використання та обслуговування, невисока ціна, порівняно з іншими типами сенсорів, вимірювання різних фізичних параметрів ґрунту. Недоліки: можливість пошкодження під час експлуатації, не вимірюють хімічні параметри. Приклади: гігрометри, датчики температури ґрунту, датчики вмісту солі у ґрунті тощо.

**Діелектричні сенсори вологості ґрунту.** Принцип дії – використовують зміни електричних властивостей ґрунту для вимірювання вологості. Характеристика, що вимірюється – електрична провідність або діелектрична проникність ґрунту, яка змінюється залежно від його вологості. Переваги використання: висока чутливість навіть до невеликих змін вологості ґрунту; працюють безпосередньо у ґрунті, що дозволяє уникати проблем, пов'язаних із забрудненням або корозією контактів; можливість вимірювання на різних глибинах, що корисно для агрономічного аналізу кореневої зони. Недоліки використання: чутливість до факторів, таких як засолення чи наявність інших хімічних речовин у ґрунті; висока ціна; не надають інформації про хімічний склад ґрунту. Приклад: TDR (Time Domain Reflectometry) сенсори, конденсаторні та мікрохвильові сенсори вологості.

**Сільськогосподарські метеостанції.** Принцип дії – метеостанції оснащені різноманітними сенсорами для вимірювання різних параметрів, збирають дані, які потім обробляються вбудованим комп'ютером або мікроконтролером, обладнані системою передачі даних, яка може відправляти дані на сервери чи інші платформи для зберігання та подальшого аналізу. Метеостанції збирають інформацію від сенсорів, які вимірюють різні параметри довкілля. До їх складу можуть бути включені сенсори для вимірювання температури, вологості, атмосферного тиску, швидкості та напрямку вітру, опадів, рівня сонячної радіації, інші параметри клімату та ґрунту. Переваги використання: дозволяють аграріям оптимізувати та автоматизувати різні процеси вирощування; забезпечують точні дані для прийняття управлінських рішень; забезпечують нагляд і контроль за різними аспектами виробництва, що дозволяє швидко реагувати на зміни. Недоліки: висока вартість, залежність ефективності роботи сенсорів від умов навколишнього середовища. Приклад: GPS-датчики (Global Positioning System), RFID-датчики (Radio-Frequency Identification), датчики активності та руху, камери та сенсори візуального спостереження.

**Сенсори IoT.** Принцип дії – вимірювання різних параметрів в умовах поля і передача даних у режимі реального часу. Сенсори надають інформацію у режимі реального часу про такі параметри: температуру повітря, ґрунту та точки роси; кількість опадів, вологість листя, напрям та швидкість вітру, відносну вологість, сонячну радіацію та атмосферний тиск. Переваги використання – передача даних у реальному часі; оптимізація використання ресурсів, моніторинг здоров'я рослин. Недоліки: неоднорідність покриття мережі, складність в експлуатації.

**Огляд та аналіз сенсорів для цифрового землеробства.** Спираючись на дані аналізу, бачимо, що кожен тип сенсора для промислового землеробства виконує певні функції. Для повного розуміння про те, що відбувається з рослинами у полі, теплиці, або у дослідній лабораторії, треба засто-



совувати різні типи сенсорів. Для вимірів рівня вологості ґрунту, для спостереження за метеорологічними умовами, необхідно використовувати різні типи сенсорів. Тому важливим є огляд і аналіз представлених на ринку сенсорів. Нами проаналізовано за технічними характеристиками ряд сучасних сенсорів для використання у цифровому землеробстві [20–23], результат наведено в табл. 4.

ТАБЛИЦЯ 4. Сенсори для використання у цифровому землеробстві

№	Назва сенсора, номер моделі, виробник	Тип сенсора/ застосування/ тип електроду/ спосіб використання	Напруга живлення	Стандарт бездротового зв'язку	Діапазон вимірювання параметрів	Ціна за од., \$
1	2	3	4	5	6	7
1.	Wireless Temperature Humidity Sensor Alarm Transmitter CWT-L1TH-AM Comwintop	Сенсор контролю за температурою і вологістю Теплиці	9-28 В постійного струму	GPRS/ 3G, 4G/ WI-FI	температура: -40°C – 80°C; вологість: 0 ~ 100 %	85,00
2.	Soil Temperature and Soil PH Controller SPHAG-RD-12 HONDETEC	Сенсор кислотності і температури ґрунту 2 в 1. Сільське господарство. Електрод – Зонд. Контактний	2~5 В/ 5~24 В	LORA/ LORAWAN/ GPRS/ 4G/ WIFI	температура: -40° ~85°C кислотність: 3 ~ 100 %;	69,10
3.	3 IN 1 Soil NPK sensor; RD-NPK-02 HONDETEC	Сенсор вмісту речовин ґрунту: азоту, фосфору, калію. Сільське господарство. Електрод-зонд. Контактний	5-30 В постійного струму	GPRS/LORA/ LORAWAN/ WIFI/ 4G/ NB-IOT	вміст азоту, фосфору, калію: 1-1999 мг/кг	55,00
4.	Soil moisture sensor RD-SM-P-02 HONDETEC	Сенсор вологості ґрунту 2 в 1. Сільське господарство. Електрод-зонд. Контактний	а) 5-24 В постійного струму б) 12~24 В постійного струму	GPRS/LORA/ LORAWAN/ WIFI/ NB-IOT	вологість: 0 – 100 %	19,80
5.	Soil Moisture and Temperature 2 in 1 sensor; RD-SMT-P-O-02; HONDETEC	Сенсор 2 в 1 для моніторинг вологості та температури ґрунту. Сільське господарство. Електрод-зонд. Контактний	а) 5-24 В постійного струму б) 12~24 В постійного струму	GPRS/ LORA/ LORAWAN/ WIFI / NB-IOT	температура: -30 ~ 70° С вологість: 0 – 100 %	38,90
6.	Soil moisture and temperature and EC and Salinity 4 in 1 sensor, RD-STMES-P-02 HONDETEC	Датчик вологості ґрунту 4 в 1. Вимірює: температуру, вологість, солоність, електропровідність Сільське господарство. Електрод – зонд. Контактний	4,5~30 В постійного струму	LORA/ LORAWAN GPRS/4G/ WIFI(DTU)/ NB-IOT	температура: -30 ~ 70°C ± 0,2°C вологість: 0 ~ 100 % ± 2 %; провідність: 0~20000±3 % мкС/см	72,00
7.	Capacitive soil moisture sensor RD-SM-C-02, HONDETEC	Ємнісний датчик вологості ґрунту. Онлайн-моніторинг вологості ґрунту. Електрод-зонд. Контактний	5 В постійного струму	GPRS/ LORA/ LORAWAN/ WIFI/ NB-IOT	вологість: 0 ~ 100 % ±2 %	16,50

Закінчення таблиці 4

1	2	3	4	5	6	7
8.	Automatic weather station AMS-O-01 HONDETECH	Автоматична метеостанція. Вимірює: швидкість та напрямок вітру, температуру повітря, вологість, кількість опадів, освітленість. Використання: теплиці, навколишнє середовище, у приміщенні, на відкритому повітрі	Сонячні панелі 50 Вт	GPRS/ LORA / LORAWAN / WIFI та інші модулі бездротової передачі	температура повітря: -30~70°C± 0,2°C вологість повітря: 0~100 % ±3 %; освітленість: 0~200 клк ±3 %; швидкість вітру: 0 – 60 ±0,3 м/с; опади: 0–4±2 % м/хв	34,00
9.	Ten Meteorological parameters weather station HD-WSM-U-0A-01 HONDETEC	Метеостанція. Вимірює 10 метеорологічних параметрів: температура, вологість, швидкість і напрямок вітру, тиск, кількість опадів, освітлення. Сільське господарство	Не вказано	LORA/ LORAWAN/ GPRS/4G/	швидкість вітру: 0 – 60 м/с ±0,3 температура повітря -40 – 60°C ±0,3°; вологість: 0 – 100 %; опади: 0–200 мм/год освітленість: 0 – 200 клк	20,00
10.	Soil Conductivity Sensor EM500-SMTC, MILESIGHT	Сенсор для вимірювання вологості ґрунту, температури та електропровідності. Сільське господарство, розумне садівництво. Електрод-зонд. Контактний	19000 мАг Li-SOCL2 батарея (ER34615)	LORAWAN	провідність: 0~20000±5 % мкС/см температура -40° ~ 80°C ±0,5°C; вологість: 0 % ~ 100 % ±2 %	–
11.	Multi depth soil moisture sensor for water-saving irrigation NIUBOL	Сенсор вимірювання вологості ґрунту для декількох глибин: 10 см, 20 см, ..., 60 см.	12~24 В постійного струму	GPRS	вологість: 0 % ~ 100 %	–
12.	Large Fruit diameter sensor, NBL-GS01 NIUBOL	Сенсор росту стебла / плоду рослини, онлайн-моніторинг швидкості росту плодів, діапазон вимірювання: 50–250 мм	12-24 В постійного струму	GPRS	точність: ±1 %; максимальний діапазон ходу: +3 мм	–
13.	Automatic Weather Station AWS810 Vaisala	Метеостанція. Вимірює: швидкість і напрямок вітру, температуру повітря, відносну вологість, точку роси, опади, ультрафіолетове випромінювання, температуру ґрунту, глибину снігу, рівень води, висоту хмар.	Зовнішній 15–28 В постійного струму. Сонячна панель 70 Вт, внутрішня резервна батарея: 12В/24–28 А год	UMTS/ HSPA+GSM/ GPRS/ EDGE	Не вказано на сайті виробника	€7776

На основі аналізу параметрів сенсорів для цифрового землеробства можна зробити висновок, що бездротові сенсори саме для експресної оцінки стану рослин на світовому ринку практично відсутні. Подібний сенсор на базі ефекту індукції флуоресценції хлорофілу було розроблено в Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова в рамках проекту УНТЦ № 6064 [24, 25].

**Висновки.** На основі аналізу стандартів бездротового зв'язку зроблено висновок, що основними стандартами, які використовуються у БСМ для цифрового землеробства є Wi-Fi, IEEE 802.15.4, ZigBee, Bluetooth 4.0, GPRS, 4G, LoRaWAN та NB-IoT. Проаналізовано архітектуру і функції модулів типового бездротового сенсорного вузла. Визначено основні параметри бездротового сенсорного вузла: фізичні, апаратні, енергетичні, функціональні та мережеві, які доцільно використовувати для подальшого моделювання. На основі вимог до бездротового сенсорного вузла для цифрового землеробства запропоновано перелік фотовольтаїчних перетворювачів. Також, обрано варіанти мікросхем керування живленням для підключення у контур EHS для енергоживлення бездротового вузла. Розроблена Класифікація засобів електроживлення бездротових сенсорних вузлів і мереж. Класифікація побудована на суттєвих ознаках засобів електроживлення, що дозволяє спростити вибір засобів електроживлення БСМ при проєктуванні мережі. На основі аналізу параметрів сенсорів для цифрового землеробства зроблено висновок, що бездротові сенсори саме для експресної оцінки стану рослин на світовому ринку практично відсутні.

#### Список літератури

1. Антонова Г.В., Ковирьова О.В. Бездротові технології як ланка цифровізації сільського господарства. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. 2018. № 17. С. 53–59. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kzms\\_2018\\_17\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Kzms_2018_17_10)
2. <http://breakthrough.unglobalcompact.org/disruptive-technologies/digital-agriculture> (звернення: 16.03.2024)
3. <https://www.wi-fi.org/> (звернення: 10.01.2024)
4. <https://standards.ieee.org/> (звернення: 10.01.2024)
5. <https://ezzigbee.com/> (звернення: 10.01.2024)
6. <https://www.bluetooth.com/> (звернення: 10.01.2024)
7. <https://lora-alliance.org/about-lorawan/> (звернення: 10.01.2024)
8. <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-iot/lpwan/nb-iot-narrowband-iot/> (звернення: 10.01.2024)
9. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. [https://dnaop.com/html/61662/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3\\_EN\\_50160\\_2014](https://dnaop.com/html/61662/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_EN_50160_2014)
10. <https://www.en-standard.eu/> (звернення: 22.12.2023)
11. <https://www.powerstream.com/li-cylindrical.htm> (звернення: 14.12.2023)
12. <https://www.powerstream.com/thin-lithium-ion.htm> (звернення: 14.12.2023)
13. <https://www.powerstream.com/ultra-light.htm> (звернення: 14.12.2023)
14. <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-renewable-energy> (звернення: 14.12.2023)
15. <https://www.iea.org/energy-system/renewables> (звернення: 14.12.2023)
16. Engmann F., Katsriku F.A., Jamal-Deen Abdulai, Kofi Sarpong Adu-Manu K.S., Banaseka F.K. Prolonging the Lifetime of Wireless Sensor Networks: A Review of Current Techniques. *Hindawi Wireless Communications and Mobile Computing*. Vol. 2018, Article ID 8035065. 23 p. <https://doi.org/10.1155/2018/8035065>
17. Shokoor F., Shafik W. Harvesting energy overview for sustainable wireless sensor networks. *Journal of Smart Cities and Society*. 2023. Vol. 2, No. 4. P. 165–180. <https://doi.org/10.3233/SCS-230016>
18. Persson E. Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks. UPTec E19 014 Examensarbete 30 hp June 2019. Tryckt av: Uppsala ISSN: 1654-7616, UPTec E19 014. P.70. <https://geopard.tech/blog/what-are-the-types-of-sensors-used-in-agriculture/> (звернення: 24.01.2024)
19. <https://www.niubol.com/Product-catalog/>, (дата звернення 24.01.2024)
20. <https://www.milesight.com/solution/smart-agriculture> (звернення: 24.01.2024)
21. <https://store.comwintop.com/> (звернення: 24.01.2024)
22. <https://www.vaisala.com> (звернення: 24.01.2024)
23. 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>
24. Romanov V., Galelyuka I., Hrusha V., Voronenko O., Kovyrova O., Antonova H., Kedych A. Wireless Sensor Networks for Digital Agriculture, Environmental Protection, and Healthcare. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2023. Vol. 59, No. 6. P. 1023–1030. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00638-3>

Одержано 04.04.2024

**Антонова Ганна Валеріївна**,  
 молодший науковий співробітник  
 Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ.  
<https://orcid.org/0000-0002-1876-8267>  
[antanna78@gmail.com](mailto:antanna78@gmail.com)

УДК 681.5.08:004.03; 004.67; 004.75

**Г.В. Антонова**

## Основні аспекти бездротових сенсорних вузлів для цифрового землеробства

*Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ*  
 Листування: [antanna78@gmail.com](mailto:antanna78@gmail.com)

**Вступ.** Бездротові сенсорні мережі це частина інформаційно-комунікаційних технологій та основа технологій Інтернету речей. За допомогою WSN дані збираються, передаються та обробляються у режимі реального часу. Типова БСМ складається з великої кількості бездротових сенсорних вузлів та координатора. Бездротова мережа базується на стандартах бездротового зв'язку. Сьогодні БСМ використовуються у різних галузях, таких як медицина, військова справа та цифрове землеробство.

**Мета** – надати всебічний аналіз бездротового сенсорного вузла для цифрового землеробства.

**Результати.** Автором проаналізовано стандарти бездротового зв'язку, на основі яких працюють БСМ у цифровому землеробстві. Виконано аналіз архітектури типового бездротового вузла. Виокремлено параметри бездротового вузла для подальшого моделювання. Розглянуто і проаналізовано види Систем збору енергії. На основі вимог бездротового вузла для цифрового землеробства запропоновано перелік фотовольтаїчних перетворювачів енергії. Також запропоновано перелік видів мікросхем керування живленням Системи збору енергії. Розроблено Класифікацію засобів електроживлення бездротових сенсорних вузлів і мереж. Проаналізовано типи сенсорів для використання у цифровому землеробстві.

**Висновки.** Основними стандартами бездротового зв'язку, які використовуються у БСМ для цифрового землеробства є Wi-Fi, IEEE 802.15.4, ZigBee, Bluetooth 4.0, GPRS, 4G, LoRaWAN та NB-IoT. Запропоновані у статті параметри бездротового сенсорного вузла доцільно використовувати для подальшого моделювання. Надано перелік фотовольтаїчних перетворювачів енергії для підключення до бездротового сенсорного вузла. Запропоновано варіанти мікросхем керування живленням для підключення у контур EHS для енергоживлення бездротового вузла. Розроблена Класифікація засобів електроживлення бездротових сенсорних вузлів і мереж побудована на суттєвих ознаках засобів електроживлення, що дозволяє спростити процес вибору засобів електроживлення БСМ під час проектування мережі. На основі аналізу параметрів сенсорів для цифрового землеробства зроблено висновок, що бездротові сенсори саме для експресної оцінки стану рослин на світовому ринку практично відсутні.

**Ключові слова:** бездротові сенсорні мережі, бездротовий сенсорний вузол, цифрове землеробство, системи збору енергії, Інтернет речей.

UDC 681.7.08:004.03; 004.67; 004.75

**Hanna Antonova**

## The Main Aspects of Wireless Sensor Nodes for Digital Agriculture

*V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Kyiv*  
 Correspondence: [antanna78@gmail.com](mailto:antanna78@gmail.com)

**Introduction.** Wireless sensor networks are a part of information and communication technologies and the basis of the Internet of Things technologies. Data are collected, transmitted and processed in real time with the wireless sensor networks. The typical WSN consists of the large number wireless sensor nodes and the coordinator. The wireless network is based on wireless communication standards. Today, WSNs are used in the variety of industries such as medicine, military and digital agriculture.

**The purpose** is to provide a comprehensive analysis of a wireless sensor node for use in digital agriculture.

**Results.** The author analysed wireless communication standards for use in digital agriculture. The typical wireless node architecture is analysed. The parameters of the wireless node are identified. The types of Energy Harvesting Systems (EHS) and their functions are reviewed and analysed. Based on the requires of the wireless node for digital agriculture, the list of photovoltaic energy converters is proposed. In addition, the list of power management integrated circuits is suggested for the Energy Harvesting System. A Classification of Power Supplies for Wireless Sensor Nodes and Networks are developed. The types of sensors for use in digital agriculture are analysed.

**Conclusions.** The main wireless communication standards for digital agriculture are Wi-Fi, IEEE 802.15.4, ZigBee, Bluetooth 4.0, GPRS, 4G, LoRaWAN and NB-IoT. The parameters of the wireless node are identified for further modelling. The list of photovoltaic energy converters is given. The types of power management integrated circuits are proposed. The classification enable to simplify the selection of WSN power supplies for network development. Based on the analysis of sensor parameters for digital agriculture, it is concluded that practically there are no wireless sensors on the world market for the express estimation of plants state.

**Keywords:** wireless sensor node, wireless sensor network, digital agriculture, Energy Harvesting Systems, Internet of Things.