

Т. З. Бубела, В. М. Ванько, П. Г. Столярчук  
Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра метрології, стандартизації та сертифікації

## ЗАСАДИ ПОБУДОВИ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВОМ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

© Бубела Т. З., Ванько В. М., Столярчук П. Г., 2015

Досліджено основні етапи контролю та управління виробництвом зернових культур. Визначено засади щодо побудови кіберфізичних систем (КФС) у цій сфері. Здійснено розподіл даних та функцій багаторівневої базової платформи ефективного моніторингу агровиробництва зерна.

Ключові слова: кіберфізична система контролю, виробництво зернових культур, алгоритм прийняття рішення, бездротова сенсорна мережа, міжнародні вимоги.

## PRINCIPLES OF CONSTRUCTING THE CYBERPHYSICAL SYSTEMS OF GRAIN PRODUCTION CONTROL AND MANAGEMENT

© Bubela T., Vanjko V., Stolyarchuk P., 2015

In this article the basic stages of an analytical study of control and management of production of cereals is made. The principles of constructing of cyber physical systems (CFS) in this area is created. The distribution of data and multi-core platform functions effectively monitor agricultural production of grain is done.

Key words: cyber-physical control system, the grain production, the decision algorithm, wireless sensor networks, international requirements.

### Вступ

Сьогодні КФС активно починають впроваджуватись у різні галузі людської діяльності, пріоритетними напрямками їх застосування є виробництво, медицина, транспорт, енергетика, екологія. Не підлягає сумніву, що домінуючою галуззю економіки нашої країни є агровиробництво, що теж належить до цього переліку, зокрема виробництво зерна. Важливість цього сектору доводить той факт, що в 2014 р. Україна стала третім світовим експортером зерна після США та ЄС. Тому важливим є забезпечення належної якості зерна, яка досягається в процесі його виробництва. Останнє має контролюватись відповідно до вимог чинних нормативних документів та бути повністю керованим.

### Аналіз публікацій

Модернізування таких систем управління повинно здійснюватись з упровадженням інноваційних технологій на основі побудови кіберфізичних систем [1]. Потенційними користувачами таких КФС можуть стати самі виробники, серед яких є закордонні інвестори, зацікавлені у впровадженні таких систем у своїх господарствах. Крім того, це можуть бути служби контролю, тобто органи сертифікації та органи державної влади. Для кожного з них КФС мала би розв'язувати свої задачі, а саме: починаючи від контролю виробництва, завершуючи моніторингом процесу реалізації готової продукції. Архітектура КФС може містити кілька рівнів опрацювання отриманих даних, кожен з яких виконує власну функцію у роботі такої системи. Різні автори демонструють різні підходи до побудови КФС [1–4], проте, як впливає з огляду цих робіт, кожна система розробляється з урахуванням критеріїв конкретної прикладної задачі. Тому головним завданням є створення на базі універсальної інтелектуальної системи [5] (рис. 1) апарату для вироблення управлінських рішень в конкретній галузі, зокрема, в нашому випадку, під час контролю виробництва зернових культур.

1) фізичний світ
2) засоби взаємодії з фізичним світом
3) засоби збирання та доставлення інформації
4) засоби опрацювання інформації
5) засоби прийняття рішень
6) засоби персонального сервісу

Рис. 1. Елементи узагальненої структури КФС

#### Постановка завдання

Отже, необхідно дослідити технологію виробництва зернових культур з позицій створення кіберфізичної системи, за результатами чого структурувати показники та тип інформації, на основі якої встановлюватимуться значення цих показників і прийматимуться управлінські рішення КФС.

#### Результати досліджень

Для того, щоб адаптувати загальну структуру КФС до поставленої задачі управління виробництвом зернових культур, останню доцільно розділити на підзадачі, якими можуть бути, наприклад: підготовка сільськогосподарських угідь до посіву; процес виробництва (виросування); процес сертифікації продукції такого виробництва та інше. Для кожного з рівнів КФС структурні елементи зазнаватимуть певної модифікації, але уніфікація вимог до них забезпечуватиметься як на рівні об'єкта дослідження (грунт, вода, повітря тощо), так і стосовно готового продукту (зерна). Загалом для побудови КФС виробництва зернових культур структуруємо основні етапи цього процесу [6] (рис. 2), на кожному з яких КФС прийматиме рішення, необхідні для виконання певних управлінських дій з оптимізування цього процесу.

Отже, для елемента № 6 структури КФС (рис. 1), насамперед, треба визначити суб'єктів-користувачів такої системи, якими мають стати агрогосподарства або органи контролю. На цьому ж рівні варто уточнити множину класів задач  $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_n\}$ , на які орієнтована проектувана система (дослідницькі, технологічні, управлінські тощо), та фізичних об'єктів, що описуються реальними параметрами і характеристиками, до яких належать ці задачі (в цьому випадку основними об'єктами КФС стануть параметри ґрунтів, повітря, посівів, врожаю).

Засоби прийняття рішень № 5 (рис. 1) призначені для формування оптимальних виконавчих дій, спрямованих на покращання об'єкта. Так, наприклад, для зернових на етапі А (рис. 2) необхідно прийняти рішення про місце висівання, яке залежить від типу попередників та вмісту вологи у ґрунті перед посівом (рис. 3) (табл. 1).

А. Визначення місця зернових у сівозміні
Б. Обробіток ґрунту
В. Внесення добрив
Г. Підготовка посівного матеріалу
Д. Висівання
Е. Догляд за посівами
Є. Збирання врожаю
Ж. Контроль показників якості зібраного врожаю

Рис. 2. Основні етапи технології вирощування зернових культур

## Структурування типу інформації для роботи КФС на етапі А

Назва показника	Тип інформації
номенклатура попередників	довідкова інформація
вміст вологи у ґрунті, %	вимірювальна інформація

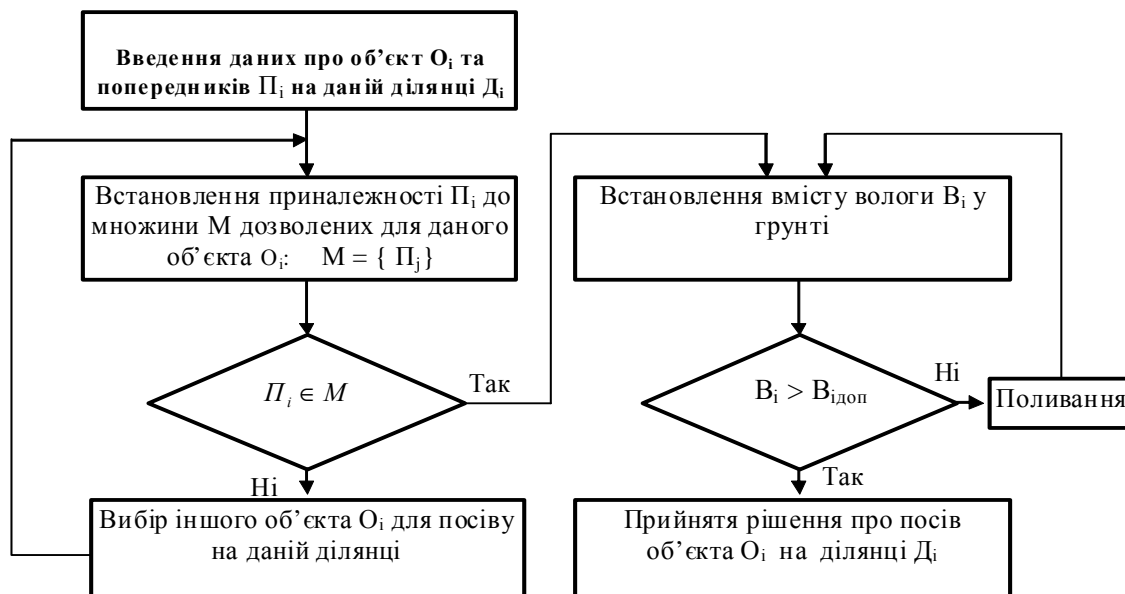


Рис. 3. Алгоритм прийняття рішення на етапі А (рис. 2) технології вирощування зернових культур

На етапі Б (рис. 2), а саме обробітку ґрунту, рішення про порядок проведення цього процесу залежатимуть від таких показників: типу ґрунтової зони, виду попередників, типу забур'янення, вмісту вологи, часу збирання попередника (табл. 2).

Таблиця 2

## Структурування типу інформації для роботи КФС на етапі Б

Назва показника	Тип інформації
номенклатура попередників	довідкова інформація
тип ґрунтової зони	довідкова інформація
тип забур'янення	відеоінформація

На етапі В (рис. 2), а саме внесення добрив, важливим є здійснення аналізу ґрунту на вміст таких важливих показників, як азот, фосфор та калій (табл. 3). На цьому етапі потрібно правильно брати проби для адекватної оцінки розподілу добрив по ділянці. З цією метою пропонується метод керованого відбору проб ґрунту, який оснований на використанні адмітансного зондування ґрунту (встановлення залежності адмітансу від фізико-хімічних показників ґрунту), під час якого з'являється можливість за показниками адмітансу (комплексної провідності) ще й відслідковувати територіальний розподіл мінеральних солей (рис. 4). Виконано дослідження чутливості реактивної складової адмітансу В для різних типів ґрунтів до тієї самої кількості внесеного пестициду, за результатами якого визначено, що чутливість для суглинкового ґрунту становить 39 мкСм, для піщаного ґрунту – 42 мкСм, для чорнозему – 30 мкСм (рис. 5). Зроблено висновок про те, що за реактивною складовою провідності можна оцінювати тип електролітів (якими є пестициди), що визначаються.

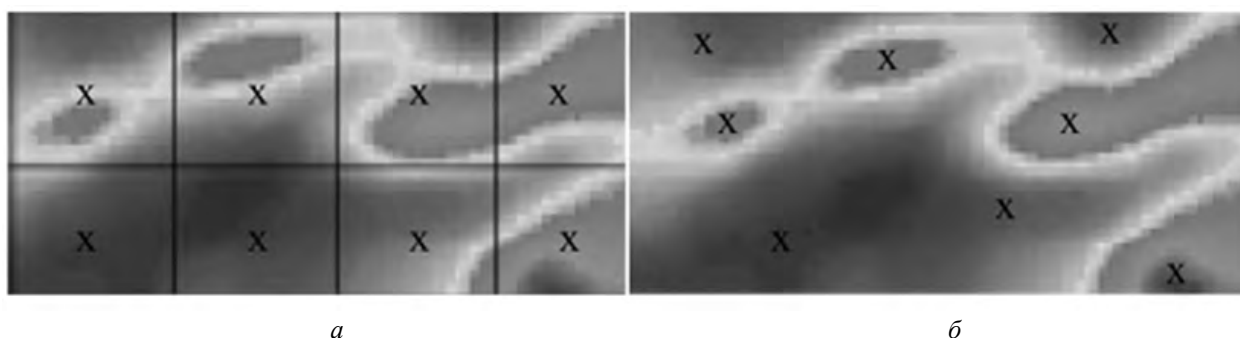


Рис. 4. Карта адмітансу ґрунтів: а – традиційний метод відбору проб та внесення добрив; б – керований метод відбору проб та внесення добрив з урахуванням територіального розподілу мінеральних солей, встановленого на основі адмітансного картографування ґрунтів

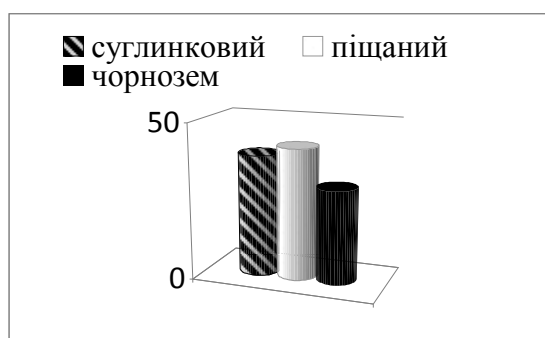


Рис. 5. Чутливість адмітансу (реактивної складової В) для різних типів ґрунтів до тієї самої кількості пестициду

Далі розраховується норма внесення добрив для запланованої врожайності, яка обчислюється за формулою [6] і потребує низки довідково-нормативної та вимірювальної інформації, яку повинні забезпечити інші рівні КФС:

$$D = \frac{Y_{пл} \cdot v - ГЗ \cdot КГЗ - D_o \cdot C_o \cdot K_o}{K_m}, \quad (1)$$

де  $D$  – норма азоту, фосфору або калію, кг/га;  $Y_{пл}$  – планована урожайність, ц/га;  $v$  – винос елемента живлення на 1 ц зерна з відповідною кількістю соломи, кг/га;  $ГЗ$  – ґрунтові запаси доступної форми елемента живлення, які розраховують за формулою:  $ГЗ = h \cdot n \cdot A$ , де  $h$  – глибина розрахункового шару ґрунту, 20 см;  $n$  – вміст, мг на 100 г ґрунту елемента в ґрунті за картограмою або щойно зробленими аналізами;  $A$  – об'ємна маса ґрунту, г/см<sup>3</sup>;  $КГЗ$  – коефіцієнт засвоювання елемента живлення з ґрунтових запасів;  $D_o$  – доза внесення органічних добрив, т/га;  $C_o$  – вміст елемента живлення в 1 т органічних добрив, кг/т;  $K_o$  – коефіцієнт використання елемента живлення з органічних добрив;  $K_m$  – коефіцієнт використання елемента живлення з мінеральних добрив.

Таблиця 3

### Структурування типу інформації для роботи КФС на етапі В

Назва показника	Тип інформації
вміст азоту, фосфору, калію у ґрунті, мг/100 г	вимірювальна інформація
кислотність ґрунту	вимірювальна інформація
норма внесення добрив $D$ , кг/га	розрахункова, довідкова, вимірювальна
територіальний розподіл мінеральних солей	вимірювальна інформація

На етапі Г (рис. 2) підготовки посівного матеріалу завданням КФС повинно стати прийняття рішення про готовність цього матеріалу до висівання, яка визначається нормативними показниками лабораторної схожості, чистоти, сили росту, маси 1000 зерен (табл. 4). Важливим на цьому етапі є

контроль процесу розсортування на фракції за величиною. Окрім цього, насіння обробляють пестицидами. Методи їхнього внесення також регламентовані й потребують моніторингу з боку КФС, оскільки здійснюються автоматично.

Таблиця 4

#### Структурування типу інформації для роботи КФС на етапі Г

Назва показника	Тип інформації
лабораторна схожість	розрахункова інформація
чистота	розрахункова інформація
маса 1000 зерен	вимірювальна інформація

Етап Д (рис. 2) висівання потребує контролю та прийняття рішення КФС щодо показників: термінів та глибини висівання, яка залежить від вмісту вологи, температури та щільності ґрунту, а також масової норми висіву (табл. 5), яка обчислюється згідно з виразом [6]:

$$M = \frac{h \cdot a \cdot 100}{c \cdot \gamma}, \quad (2)$$

де  $h$  – кількість мільйонів чистих насінин, що висіваються на 1 га в цій зоні, млн/га;  $a$  – маса 1000 насінин, г;  $\gamma$  – чистота насіння, %;  $c$  – лабораторна схожість, %.

Таблиця 5

#### Структурування типу інформації для роботи КФС на етапі Д

Назва показника	Тип інформації
вміст вологи у ґрунті, %	вимірювальна інформація
щільність ґрунту	вимірювальна
температура	вимірювальна
норма висіву	розрахункова, довідкова, вимірювальна

Догляд за посівами на етапі Е (рис. 2) полягає у моніторингу вологості ґрунту з метою прийняття рішення про поливання; контролю стану рослин (відеоспостереження, експертні вимірювання або використання сенсорів для визначення рівня флуоресценції хлорофілу в рослинах) для захисту їх від хвороб та шкідників обробленням відповідними пестицидами, кількість та типи яких нормовані (табл. 6).

Таблиця 6

#### Структурування типу інформації для роботи КФС на етапі Е

Назва показника	Тип інформації
вміст вологи у ґрунті, %	вимірювальна інформація
стан рослин	відеоінформація, вимірювальна інформація
вид та норма пестицидів, кг/га	розрахункова інформація

Збирання врожаю на етапі Є (рис. 2) вимагатиме від КФС рішення щодо встановлення термінів збирання врожаю, які залежать від показника вологості зернин, та висоти зрізу посівів, що зумовлена таким параметром, як висота стеблостою. Параметри, необхідні для функціонування КФС на цьому етапі, визначають за допомогою комплексу вимірювань (табл. 7).

Таблиця 7

#### Структурування типу інформації для роботи КФС на етапі Є

Назва показника	Тип інформації
вміст вологи у зерні, %	вимірювальна інформація
висота стеблостою, м	вимірювальна інформація
комплекс показників готового зерна	вимірювальна, розрахункова інформація

На завершальному етапі Ж здійснюється контроль нормованих показників якості вирощених зернових, завдяки якому зерно зараховується до відповідної групи – кормової чи харчової.

Для елемента № 4 (рис. 1) структури КФС передбачене опрацювання масивів даних (ОМД), порівняння отриманої вимірювальної інформації з гранично допустимими значеннями П, моделювання М, кореляційний аналіз КА, кодування КД, передавання даних ПД тощо) та маркерна ідентифікація типів даних, наприклад,  $ОД = \{ОМД, П, М, КА, КД, ПД, \dots\}$  (табл. 8).

Для засобів збирання та доставки інформації № 3 (рис. 1) КФС характерним є вибір множини характеристичних параметрів фізичних об'єктів чи процесів з відповідних вимірювальних масивів та баз даних, основні з яких ми характеризували під час аналізу технології вирощування зернових культур (у статті відзначені підкресленням). В межах роботи КФС їх можна структурувати за ознакою змісту, наприклад, температура ґрунту Т, вологість В, показники еколого-токсикологічного стану ґрунту ЕТ, агрохімічні показники АХ, а також за кількісною ознакою, наприклад, обсяг даних ОД та частота їх надходження ЧД тощо:  $В = \{[Т, В, ЕТ, АХ, \dots], [ОД, ЧД, \dots]\}$ . Важливим на цьому етапі є також встановлення гранично допустимих, контрольних значень параметрів об'єкта чи процесу, похибок та непевності вимірювань та обчислень, які є визначальними для вибору методів вимірювань та синтезу алгоритмів опрацювання інформації.

Таблиця 8

**Структурування типів опрацювання інформації для роботи КФС**

Задача	Тип опрацювання інформації
контроль виробництва, сертифікаційна процедура	<ul style="list-style-type: none"> <li>– опрацювання масивів даних ОМД;</li> <li>– порівняння отриманої вимірювальної та розрахункової інформації з гранично допустимими значеннями показників П;</li> <li>– кодування КД;</li> <li>– передавання даних ПД тощо;</li> <li>– ідентифікація типів даних Д, наприклад, <math>Д = \{ОМД, П, КД, ПД, \dots\}</math></li> </ul>
прогнозування врожайності	<ul style="list-style-type: none"> <li>– опрацювання масивів даних ОМД;</li> <li>– моделювання М;</li> <li>– регресійний та кореляційний аналіз РКА;</li> <li>– кодування КД;</li> <li>– передавання даних ПД тощо;</li> <li>– ідентифікація типів даних Д, наприклад, <math>Д = \{ОМД, М, РКА, КД, ПД, \dots\}</math></li> </ul>

Засоби взаємодії № 2 з фізичним світом № 1 (рис. 1) являють собою мережу сенсорів різного призначення та рівня (smart-sensor), вимірювальна інформація яких є важливим джерелом для функціонування інших рівнів КФС. Перспективними системами взаємодії та збирання інформації сьогодні можна вважати бездротові сенсорні мережі (БСМ), основною перевагою яких є здатність контролювати в реальному часі стан рослин чи параметрів навколишнього середовища на великих територіях. На основі аналізу архітектури вузлів БСМ зроблено висновок про те, що для моніторингу та управління агровиробництвом зернових культур доцільно використовувати у КФС БСМ з зірковою та кластерною архітектурою (рис. 6).

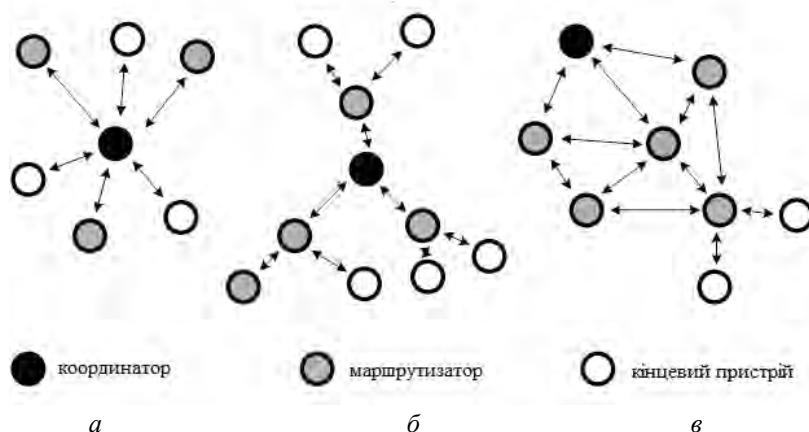


Рис. 6. Архітектура вузлів бездротової сенсорної мережі:  
а – тип зірка; б – кластерне дерево; в – коміркова структура

Для забезпечення єдності, а отже, сумісності у функціонуванні сенсорних мереж у складі КФС необхідно керуватись стандартними вимогами. Так, зокрема, для сенсорних мереж вже розроблено міжнародні стандарти, які стосуються вимог до їх побудови, обслуговування та підтримки [15–18]. В Україні не існує національних стандартів у цьому секторі. Отже, предметом досліджень у межах створення КФС повинно стати розроблення національних та гармонізування міжнародних та вітчизняних вимог щодо БСМ та КФС.

### Висновки

1. Обґрунтовано актуальність створення КФС в агросекторі України для контролю та управління виробництвом зернових культур.
2. Проаналізовано технологію виробництва зернових культур з позицій створення кіберфізичної системи, структуровано показники та тип інформації, яка необхідна для роботи КФС на кожному етапі, на основі опрацювання якої повинні прийматись управлінські рішення.
3. Запропоновано метод керованого відбору проб для аналізу стану ґрунту, що дає змогу оптимізувати управління вирощуванням зернових культур, яке полягає в підвищенні ефективності процесу відбирання проб ґрунту із застосуванням адмітансного картографування.
4. Здійснено аналітичне дослідження можливостей застосування бездротових сенсорних мереж як засобу взаємодії з фізичним світом, проаналізовано міжнародну та вітчизняну нормативну базу щодо їх розроблення та підтримання.

1. Lee, Jay; Bagheri, Behrad; Kao, Hung-An (January 2015). *A Cyber-physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing asystems* // *Manufacturing Letters* 3: 18–23.doi: 10.1016/j.mfglet.2014.12.01. 2. Hoang, Dat Duc, Hye-Young Paik, and Chae-Kyu Kim. *Service-oriented middleware architectures for cyber-physical systems* // *International Journal of Computer Science and Network Security* 12.1 (2012): 79–87. 3. Wu, Fang-Jing, Yu-Fen Kao, and Yu-Chee Tseng. *From wireless sensor networks towards cyber physical systems* // *Pervasive and Mobile Computing* 7.4 (2011): 397–413. 4. Sanislav Teodora and Liviu Miclea. *Cyber-Physical Systems-Concept, Challenges and Research Areas* // *Journal of Control Engineering and Applied Informatics* 14.2 (2012): 28–33. 5. Кіберфізичні системи: проблеми створення та напрями розвитку / А. О. Мельник // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. “Комп’ютерні системи та мережі”. – 2014. – № 806. – С. 154–161. 6. Мельничук Д. О. *Наукове забезпечення сталого розвитку сільського господарства*. Лісостеп. – Київ, 2004. – у 2-х т. 7. *Enabling Cyber Physical Systems with Wireless Sensor Networking Technologies* / *International Journal of Distributed Sensor Networks* / Volume 2012 (2012), 21 p. 8. Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y. et al. *Wireless sensor networks: a survey* // *Computer Networks*. – 2002. – № 38. – P. 393–422. 9. 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. 10. *Безпроводна сенсорна мережа для прецизійного землеробства та екологічного моніторингу* / Романов В. О., Палагін О. В., Галелюка І. Б., Вороненко О. В. // *Комп’ютерні засоби, мережі та системи*. – 2014. – № 13.15. 11. Lindsey S., Raghavendra C.S. *Pegasus: Power-efficient gathering in sensor information systems* // *Proc. of the IEEE*. – 2002. – P. 924–935. 12. Perkins C. E., Belding-Royer E. M., Das S. *Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing* // *IETF RFC*. – 2003. 13. 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. 14. Subramanian L., Katz R. H. *An architecture for building self-configurable systems* // *Proc. Mobile Ad Hoc Network Comput. Workshop*. – 2000. – P. 63–73. 15. *ISO/IEC 30101:2014 Information technology – Sensor networks: Sensor network and its interfaces for smart grid system*. 16. *ISO/IEC 20005:2013 Information technology – Sensor networks – Services and interfaces supporting collaborative information processing in intelligent sensor networks*. 17. *ISO/IEC 29182-1:2013 Information technology – Sensor networks: Sensor Network Reference Architecture (SNRA) – Part 1: General overview and requirements*. 18. *ISO/IEC 30128:2014 Information technology – Sensor networks – Generic Sensor Network Application Interface*.