

Є. Г. Міюшкович, Я. С. Парамуд
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронних обчислювальних машин

ОСОБЛИВОСТІ КЛАСИФІКАЦІЇ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ У КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМАХ

© Міюшкович Є. Г., Парамуд Я. С., 2015

Досліджено особливості застосування стандартизованих інтерфейсів обміну інформацією у кіберфізичних системах (КФС). Запропоновано використовувати для телекомунікаційних інтерфейсів дві класифікаційні ознаки – інтенсивність інформаційного обміну та відстань між компонентами КФС. Виділено дев'ять класів телекомунікаційних інтерфейсів. Рекомендовано максимально застосувати стандартні інтерфейси промислових мереж, зокрема промислову версію Ethernet. Також досліджені особливості застосування безкабельних оптичних та радіочастотних технологій та запропоновані критерії вибору кабельних чи безкабельних технологій для побудови КФС.

Ключові слова: телекомунікаційний інтерфейс, кіберфізична система, класифікаційна ознака, промислові мережі, безкабельна технологія.

FEATURES OF CLASSIFICATION AND USE OF TELECOMMUNICATION INTERFACES IN CYBERPHYSICAL SYSTEMS

© Miyushkovych Ye. Paramud Ya., 2015

This paper describes the features of the use of standard interfaces for information exchange in cyber-physical systems (CFS). Two classification criterias for telecommunication interfaces was proposed – the intensity of information exchange and the distance between the components of CFS. Based on these criterias 9 classes of telecommunication interfaces were identified. It is recommended to use standard fieldbus technologies, especially industrial Ethernet. Also, this paper describes the features of wireless optical and RF technologies and criterias for choosing of wired or wireless interface in CFS.

Key words: telecommunication interface, cyberphysical system, classifications, fieldbus network, wireless technology.

Вступ

Тепер ведуться інтенсивні дослідження стосовно пошуку ефективних технологій створення нового класу комп'ютерних систем – кіберфізичних систем (КФС). Одними із основних компонентів таких систем є комунікаційні середовища, які переважно будуються на телекомунікаційних інтерфейсах. Пошук ефективних концепцій та технологій застосування телекомунікаційних інтерфейсів у кіберфізичних системах є обґрунтованою та актуальною задачею.

Стан проблеми

Аналітичний огляд літературних джерел показує, що однією із найефективніших концепцій створення КФС є їх поділ на незалежні ієрархічні рівні та розроблення принципів взаємодії між

рівнями, що дасть змогу спростити структурні, функціональні та схемотехнічні рішення [1]. Узагальнена структура КФС подається як мережа інтелектуальних автономних вимірювально-обчислювальних вузлів (АВОВ), що безпосередньо взаємодіють із фізичним світом, об'єднаних комутувальним середовищем, підтриманих високопродуктивними обчислювальними засобами та засобами захисту інформації, підключених до центрів збору та опрацювання інформації [1].

Вибираючи варіант реалізації компонентів КФС, необхідно враховувати такі фактори [1, 2]:

- відстань між компонентами, можлива в широкому діапазоні;
- швидкість обміну даними між компонентами, що може змінюватися в широкому діапазоні, наприклад, від одиниць байтів за годину під час вимірювання температури до десятків мегабіт за секунду в разі передавання відеопотоку;
- масштаб реального часу для конкретної КФС, що може суттєво відрізнятися для різних режимів функціонування та для різних типів КФС;
- необхідність легкого масштабування та зміни конфігурації сенсорної та виконавчої систем автономного вимірювально-обчислювального вузла;
- забезпечити захист обміну інформацією від зловмисників із різними показниками надійності та ефективності;
- забезпечити стійкість до дії дестабілізуювальних факторів навколишнього середовища, враховувати особливості виконання (комерційне, індустріальне, аерокосмічне тощо).

Багатогранність та широкий діапазон зміни перелічених факторів вказують на відсутність одного універсального рішення для реалізації комутаційних середовищ КФС. Логічним та ефективним видається підхід вже розроблених стандартизованих рішень у царині комп'ютерних телекомунікаційних систем. У літературних джерелах телекомунікаційні інтерфейси розглянуто узагальнено. Дослідження особливостей класифікації та застосування телекомунікаційних інтерфейсів забезпечать можливість прийняття узгоджених рішень у практичній реалізації КФС.

Постановка задачі

Необхідно дослідити особливості класифікації та застосування телекомунікаційних інтерфейсів з метою забезпечення можливості прийняття узгоджених рішень під час практичної реалізації кіберфізичних систем.

Виклад основного матеріалу

Концептуальне застосування у КФС телекомунікаційних інтерфейсів може ґрунтуватися на дротових та бездротових засобах передавання інформації. Дротові технології є традиційними для комп'ютерних систем, використовувалися тривалий час, мають досконалі схемотехнічні та алгоритмічні рішення. Недоліком є використання дорогих ліній зв'язку та деякі обмеження продуктивності. Впровадження бездротових технологій почалося порівняно недавно. Вони є доволі ефективними, особливо для мобільних застосувань, однак схемотехнічні та алгоритмічні рішення ще не оптимізовані. Тому під час вибору телекомунікаційних інтерфейсів для конкретної КФС чи певного класу КФС потрібно знаходити ефективні рішення, враховуючи переваги та недоліки дротової чи бездротової технологій, а також переваги та недоліки конкретних типів інтерфейсів у межах кожної із цих технологій. Класифікація телекомунікаційних засобів є одним із інструментів, що здатний полегшити вибір та забезпечити його ефективність.

У випадку простих КФС, якщо АВОВ компактно розташований у приміщенні з нормальними кліматичними умовами, цілком можливе використання сенсорів та актуаторів лабораторного типу, оснащених такими інтерфейсами, як USB, RS-232, RS-485, I2C, SPI, CAN чи побутовою версією Ethernet [3]. Прикладом можуть бути системи збору даних DAS (Data Acquisition System), системи на основі генераторів сигналів та сенсорів виробництва компанії National Instruments. У разі збільшення масштабу КФС, необхідності розміщення обладнання у відкритому просторі виникає необхідність переходу від комерційного до індустріального виконання як компонентів КФС, так і телекомунікаційних інтерфейсів.

Аналіз особливостей комунікаційних середовищ КФС показує, що для побудови більшості таких систем базовою технологією може бути технологія промислової мережі (англ. *fieldbus*). Промислова мережа – це цифрова, двонаправлена, багатоточкова послідовна телекомунікаційна мережа, що зв'язує територіально розподілені сенсори, виконавчі механізми, промислові контролери і використовується у промисловій автоматизації для побудови єдиного інформаційного і керівного середовища, котре об'єднує інтелектуальні технологічні пристрої та контролери фізичного рівня. Основним стандартом, що регламентує організацію промислових мереж, є ІЕС 61158 [4]. У першій версії стандарту визначено вісім різних протоколів (типів) з такими назвами: Type 1 Foundation Fieldbus H1; Type 2 ControlNet; Type 3 PROFIBUS; Type 4 P-Net; Type 5 Foundation Fieldbus HSE (High Speed Ethernet); Type 6 SwiftNet (протокол, розвинений для фірми Boeing); Type 7 WorldFIP; Type 8 Interbus.

Порівняно з підключенням периферійного обладнання до системи вищого рівня окремим спеціалізованим каналом зв'язку промислова мережа має такі переваги: у декілька разів знижуються витрати на кабель та його прокладання; збільшується допустима відстань до сенсорів та виконавчих механізмів; спрощується керування мережею сенсорів та виконавчих механізмів; спрощується модифікація системи у разі зміни виду сенсорів, протоколу взаємодії чи додавання нових пристроїв вводу/виводу; можливість дистанційного налаштування та діагностики сенсорів та актуаторів. Серед недоліків: у разі обриву кабеля втрачається зв'язок не з одним, а з декількома пристроями (залежно від місця обриву та топології мережі залишається можливість автономного функціонування сегмента мережі та схеми управління); для підвищення надійності доводиться резервувати канали зв'язку або використовувати кільцеву топологію мережі [2–4].

Особливості та характеристики основних різновидів промислових мереж наведено у табл. 1–3 [2–4].

Таблиця 1

Промислові мережі з фізичним рівнем на базі асинхронного інтерфейсу

№	Назва	Опис
1	Modbus	Поширений відкритий стандарт промислових мереж
2	P-NET	Електрична специфікація P-NET основана на стандарті RS-485
3	LIN	Інтерфейс для автомобільних систем
4	HART	Стандарт передачі даних через струмову петлю 4–20 мА

Інтерфейси цієї групи є дещо застарілими і їх використання у складі КФС доцільне лише для забезпечення сумісності з наявним обладнанням.

Високими функціональними можливостями характеризуються промислові мережі з фізичним рівнем на базі промислового Ethernet (табл. 2). Промисловий Ethernet (англ. Industrial Ethernet) – це стандартизований варіант мережевого протоколу Ethernet, адаптований з метою застосування у промислових умовах для автоматизації та керування технологічними процесами. У цьому стандарті використано низку модифікацій з метою адаптації базового Ethernet-протоколу для потреб виробничих процесів, щоб забезпечити керування процесами у реальному часі. Останнім часом є одним з найпопулярніших протоколів, на базі якого будуються промислові мережі.

Існує група протоколів, що різною мірою модифікують стандартний стек TCP/IP, додаючи до нього також:

- функції синхронізації;
- нові алгоритми мережевого обміну;
- діагностичні функції;
- алгоритми самокорекції.

Канальний і фізичний рівні моделі OSI від Ethernet при цьому залишаються незмінними, що дає змогу застосовувати протоколи реального часу в наявних мережах Ethernet з використанням стандартного мережевого обладнання.

З використанням цього протоколу можуть бути сполучені й забезпечувати інформаційну взаємодію засоби автоматизації для різних етапів технологічного процесу та від різних виробників. Промисловий Ethernet зазвичай використовується для обміну даними між програмованими контролерами та системами людино-машинного інтерфейсу, рідше для обміну даними між контролерами, а також для під'єднання до контролерів віддаленого обладнання (сенсорів чи виконавчих механізмів).

Таблиця 2

Промислові мережі з фізичним рівнем на базі промислового Ethernet

№	Назва	Опис
1	Profinet	Стандарт промислового Ethernet, що визначається стандартами IEC 61158 та IEC 61784, розроблений і опублікований організацією PROFIBUS International. Розвивається компанією Siemens AG і Profibus User Organization.
2	Foundation Fieldbus HSE (FF H2)	Foundation Fieldbus High Speed Ethernet – це варіант промислового Ethernet, розроблений Foundation Fieldbus (FF)
3	EtherCAT	Протокол забезпечує обмін інформацією у режимі реального часу в мережі на основі витієї пари чи волоконно-оптичних. Підтримується EtherCAT Technology Group.
4	Ethernet Powerlink	Поєднує в собі концепцію CANopen з Ethernet-технологіями. Підтримується Ethernet Powerlink Standardization Group (EPSG)
5	Ethernet/IP	Цей протокол підтримують ControlNet International (CI), Industrial Ethernet Association (IEA) і Open DeviceNet Vendor Association (ODVA)
6	SERCOS III	SERCOS (SErial Real-time COmmunication System) – це цифровий інтерфейс, оптимізований для зв'язку між контролером і перетворювачами частоти, що використовує волоконно-оптичне кільце. SERCOS III є останньою версією цього інтерфейсу і базується на Ethernet.
7	MODBUS TCP	Різновид стандарту MODBUS для TCP/IP мереж. Підтримується Schneider Automation.
8	LAN eXtensions for Instrumentation	Заміна GPIB для вимірювальних приладів.

Таблиця 3

Спеціалізовані промислові мережі

№	Назва	Опис
1	FF H1	Промисловий протокол, аналог ProfiBus PA, розроблений Foundation Filedbus (FF)
2	AS-Interface	Низьковартісна та заводозахисна мережа для дискретних сенсорів малої продуктивності
3	CC-Link	Сім'я промислових мереж (CC-Link, CC-Link LT, CC-Link IE), створених за участі корпорації Mitsubishi Electric. Тепер розвитком цього сімейства мереж займається міжнародний консорціум CLPA
4	CAN	Специфікація фізичного та транспортного рівнів промислової мережі для автоматизації транспорту і машинобудування. Є велика кількість доповнень, що уточнюють та доповнюють стандарт для певних задач: CANbus, CANopen, DeviceNet, SDS, J1939
5	ProfiBus	Промислова мережа, міжнародний стандарт, створений за активної участі фірми Siemens AG, що містить ряд профілів, наприклад: ProfiBus DP, ProfiBus FMS, ProfiBus PA
6	LonWorks, BACnet, EIB	Промислові мережі для автоматизації будівель

Аналіз основних характеристик промислових мереж показує, що різні стандарти промислових мереж пропонують різні набори функцій і мають різну продуктивність. Важко виконати загальне порівняння за продуктивністю промислових мереж через принципову відмінність у методології передавання даних. Тому у порівняльній таблиці нижче просто зазначено, що мережа має тривалість циклу оновлення даних мілісекунду або меншу від мілісекунди. Основні характеристики найпоширеніших промислових мереж зведено у табл. 4 [2–4].

Основні характеристики найпоширеніших промислових мереж

Промислова мережа	Забезпечення живлення	Надлишковість кабелів	Макс. кількість пристроїв	Синхронізація	Трив. циклу менше за 1 мс
AS-Interface	Так	Ні	62	Ні	Ні
CANOpen	Ні	Ні	127	Так	Ні
ControlNet	Ні	Так	99	Ні	Ні
CC-Link	Ні	Ні	64	Ні	Ні
DeviceNet	Так	Ні	64	Ні	Ні
EtherCAT	Ні	Так	65536	Так	Так
Ethernet Powerlink	Ні	Опційно	240	Так	Так
EtherNet/IP	Ні	Опційно	Без обмежень	У розробці	Ні
Interbus	Ні	Ні	511	Ні	Ні
LonWorks	Ні	Ні	32000	Ні	Ні
Modbus	Ні	Ні	246	Ні	Ні
Profibus DP	Ні	Так	126	Так	Так
Profibus PA	Так	Ні	126	Ні	Ні
PROFINET IO	Ні	Опційно	Без обмежень	Ні	Ні
PROFINET IRT	Ні	Опційно	Без обмежень	Так	Так
SERCOS III	Ні	Так	511	Так	Так
SERCOS interface	Ні	Ні	254	Так	Так

Найпоширеніші різновиди промислового Ethernet мають такі особливості та характеристики [2–4].

EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) є відкритою Ethernet-мережею розробки фірми Beckhoff. Протокол забезпечує обмін інформацією в режимі реального часу у мережі на основі витої пари чи волоконно-оптичних засобів та підтримує різноманітні топології. Цей стандарт підтримується EtherCAT Technology Group, що має 168 компаній-членів. Специфікація протоколу EtherCAT доступна лише членам організації.

Profinet – стандарт промислового Ethernet, що визначається стандартами IEC 61158 та IEC 61784, розроблений і опублікований організацією PROFIBUS International і розвивається компанією Siemens AG і Profibus User Organization. Він регламентує вимоги до устаткування і побудови мережі для передавання даних зі швидкістю 100 Мбіт/с в умовах підвищених температурних, механічних і електромагнітних впливів. Ця специфікація дає змогу працювати з такими системами промислових комунікацій: Profibus, Interbus, Devicenet. Взаємодію цих мереж з Profinet забезпечують спеціальні пристрої шлюзування (проху). Для конфігурування і діагностики в Profinet використовують протоколи TCP/IP та UDP. Стандарт Profinet визначає топологію мережі, вимоги до з'єднувачів і прокладання кабелю. Виробникам устаткування забезпечено єдині вимоги для інтерфейсів, а кінцевим користувачам – простий монтаж мережі.

Modbus TCP – підтримується Schneider Automation, на основі Modbus-протоколу, що добре зарекомендував себе і будується поверх протоколу TCP/IP стандартних мереж Ethernet. Протокол Modbus розробила фірма Modicon (сьогодні належить компанії Schneider Electric) для використання в її контролерах з програмованою логікою. Вперше специфікація протоколу опублікована в 1979 р. Це був відкритий стандарт, що описує формат повідомлень і способи їх передавання в мережі, котра складається з різних електронних пристроїв. Спочатку контролери Modicon використовували послідовний інтерфейс RS-232, пізніше почали застосовувати інтерфейс RS-485, оскільки він забезпечував вищу надійність і давав змогу використовувати довші лінії зв'язку та підключати до однієї лінії декілька пристроїв. Останньою модифікацією протоколу для передавання даних по мережах Ethernet поверх TCP/IP став Modbus TCP.

Ethernet Powerlink – це Ethernet-протокол, що працює у режимі реального часу, який поєднує концепцію CANopen з Ethernet-технологіями. Ethernet Powerlink Standardization Group (EPSG) є відкритою асоціацією промислових виробників, науково-дослідних інститутів та кінцевих користувачів у галузі розроблення технологій режиму реального часу для Ethernet.

EtherNet/IP є промисловим стандартом мереж, що використовує такі переваги комерційного Ethernet, як серійні апаратні засоби зв'язку та фізичні носії. IP розшифровується як "Industrial Protocol". Цей протокол підтримують ControlNet International (CI), Industrial Ethernet Association (IEA) і Open DeviceNet Vendor Association (ODVA).

Реалізації фізичного рівня Industrial Ethernet мають такі особливості [4]. Компоненти, що працюють за протоколом Industrial Ethernet, повинні бути адаптовані для роботи в суворих умовах екстремальних температур, вологості та вібрацій, які перевищують діапазони для IT-обладнання, призначеного для встановлення в контрольованих умовах. У разі використання систем автоматизації в неопалюваних приміщеннях чи поза приміщеннями необхідний ширший температурний діапазон роботи обладнання – від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тому офісне Ethernet обладнання не відповідає вимогам промислової автоматизації. І навіть більше, вимоги щодо сертифікації промислового обладнання найчастіше є унікальними і мають галузеві особливості. Устаткування для промислового Ethernet обов'язково повинно пройти випробування на електромагнітну сумісність відповідно до вимог IEC 61000-4, IEEE C37.90, випробування на вібрацію IEC 60255-21 і захист від попадання вологи чи сторонніх часток IEC 60529, NEMA 6 (IP67) тощо.

Серед галузевих стандартів та сертифікатів варто відзначити вимогу на відповідність стандарту IEC 61850-3 (Мережі і системи зв'язку на підстанціях IEC 61850-3), сертифікат Germanischer Lloyd (GL) або DNV, стандарти на вибухобезпечність UL1604 (ATEX) і багато інших.

Залежно від вимог, що ставляться до мережі Industrial Ethernet, для передавання даних можуть використовуватися різні види каналів зв'язку.

Канали зв'язку на основі витих пар для швидкого монтажу FC TP (Fast Connect twisted pair) – ідеальний варіант організації каналів зв'язку для офісних застосувань, розширюваний на застосування у промислових умовах. Підключення до мережевих версій сайта може здійснюватися через роз'єм 8p8c (RJ45). Завдяки спеціальному виконанню кабелю (FC) тривалість монтажу ліній зв'язку можна істотно зменшити. Але, на відміну від офісного застосування, використовуються роз'єми з класом захисту IP67.

Канали зв'язку на основі промислових витих пар ІТР (Industrial Twisted Pair) дають змогу створювати електричні канали зв'язку з підключенням через з'єднувачі D-типу (M12). Довжина лінії зв'язку може досягати 100 м.

Оптичні канали зв'язку є оптимальним рішенням для побудови резервованих кільцевих топологій мережі. Такі канали зв'язку виконуються оптоволоконним кабелем. Оптичні канали зв'язку не зазнають впливу електромагнітних полів і не вимагають використання додаткової ізоляції.

Бездротові канали зв'язку використовуються для побудови локальних обчислювальних мереж, що працюють у частотному діапазоні 2.4 ГГц. Компоненти бездротових мереж відповідають вимогам стандарту IEEE 802.11b і забезпечують можливість передавання даних зі швидкістю 1...11 Мбіт/с. Доступ через бездротові канали до локальної мережі Industrial Ethernet здійснюється через модулі RLM (Radio Link Module).

Комбіновані системи – за необхідності в межах однієї мережі Industrial Ethernet можуть використовуватися різні види каналів зв'язку. Узгодження різних видів каналів зв'язку, що працюють з різними швидкостями передачі (10/100), забезпечують Industrial Ethernet Switches та медіа-конвертери.

Бездротовий зв'язок, надаючи певні переваги користувачу, водночас має низку обмежень:

- порівняно мала пропускна здатність каналу зв'язку;
- можливість розриву зв'язку під дією зовнішніх завад;
- мала кількість каналів у фіксованому частотному діапазоні;
- відсутня сумісність засобів, реалізованих за різними стандартами.

Вже розроблено та впроваджено стандарти бездротового зв'язку. Основні характеристики для найпоширеніших стандартів наведено у порівняльній табл. 5 [5, 6].

Порівняльна таблиця стандартів бездротового зв'язку

Технологія	Стандарт	Застосування	Пропускна здатність	Радіус дії	Частоти
Wi-Fi	802.11a	WLAN	до 54 Мбіт/с	до 300 м	5,0 ГГц
Wi-Fi	802.11b	WLAN	до 11 Мбіт/с	до 300 м	2,4 ГГц
Wi-Fi	802.11g	WLAN	до 54 Мбіт/с	до 300 м	2,4 ГГц
Wi-Fi	802.11n	WLAN	до 300 Мбіт/с (в перспективі до 600 Мбіт/с)	до 300 м	2,4–2,5 або 5,0 ГГц
WiMax	802.16d	WMAN	до 75 Мбіт/с	25–80 км	1,5–11 ГГц
WiMax	802.16e	Mobile WMAN	до 40 Мбіт/с	1–5 км	2,3–13,6 ГГц
WiMax 2	802.16m	WMAN, Mobile WMAN	до 1 Гбіт/с (WMAN), до 100 Мбіт/с (Mobile WMAN)	120–150 км (стандарт у розробленні)	н/д (стандарт у розробленні)
Bluetooth v. 1.1	802.15.1	WPAN	до 1 Мбіт/с	до 10 м	2,4 ГГц
Bluetooth v. 2.0	802.15.3	WPAN	до 2,1 Мбіт/с	до 100 м	2,4 ГГц
Bluetooth v. 3.0	802.11	WPAN	от 3 Мбіт/с до 24 Мбіт/с	до 100 м	2,4 ГГц
UWB	802.15.3a	WPAN	110–480 Мбіт/с	до 10 м	7,5 ГГц
ZigBee	802.15.4	WPAN	від 20 до 250 кбіт/с	1–100 м	2,4 ГГц (16 каналів), 915 МГц (10 каналів), 868 МГц (один канал)
Інфрачервона лінія зв'язку	IrDA	WPAN	до 16 Мбіт/с	від 5 см до 50 см, симплексний зв'язок – до 10 м	Інфрачервоне випромінювання
Li-Fi	802.15.7	WPAN	до 10 Гбіт/с	до 5 м	Оптичний діапазон

Останнім часом відчувається зростання інтересу розробників радіоелектронної апаратури до стандартів та технологій бездротового зв'язку на коротких відстанях: Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi і радіомодулі з частотними діапазонами 434/868 МГц. Для зручності далі цю групу стандартів називатимемо стандартами WPAN/WLAN.

Для кожного стандарту цієї групи випускається велика кількість радіочастотних модулів різного рівня готовності, що відрізняються один від одного технічними параметрами і характеристиками. Актуальності набуває задача вибору конкретної технології WPAN/WLAN для застосування в КФС.

Всі стандарти і технології бездротового передавання даних класу WPAN/WLAN можна класифікувати за формальними параметрами. У табл. 6 наведена загальна класифікація найбільш актуальних тепер стандартів безкабельного передавання даних цієї групи [5, 6]. Для порівняння також наведені параметри актуальних стандартів стільникового зв'язку.

Стандарти стільникового зв'язку GSM / GPRS / EDGE та 3G потребують наявності розвинутої інфраструктури (мережа базових станцій) і тому безпосереднє порівняння їх зі стандартами класу WPAN/WLAN буде не зовсім коректним.

Технології ZigBee, Wi-Fi, Bluetooth та 434/868 МГц (ISM) можна класифікувати за найпоширенішими характеристиками. Найчастіше визначають сферу застосування того чи іншого стандарту групи WPAN/WLAN в конкретному випадку три характеристики: енергоспоживання (або

споживання струму), дальність зв'язку і швидкість передавання даних. За значенням цих параметрів можна умовно виділити лідерів:

- Wi-Fi володіє максимальною швидкістю передачі даних;
- у ZigBee і технології 434/868 МГц мінімальне енергоспоживання;
- у технології 434/868 МГц максимальна дальність дії за прямої видимості.

Таблиця 6

Загальні характеристики основних стандартів бездротового передавання даних

	ZigBee	Bluetooth	Wi-Fi	434/868 МГц	GSM/GPRS/EDGE	3G
Частотний діапазон, МГц	2400–2483	2400–2483	2412–2484	434/868	900/1800	1885–2025; 2110–2200
Швидкість передачі даних, кбіт/с	250	721	11000/54000	500	14,4/171/473	144/384/2048
Дальність зв'язку, м	200	клас 1 – 100; клас 2 – 10; клас 3 – 1	100	1000	у всій зоні покриття	у всій зоні покриття
Споживаний струм, active мА/sleep мкА	30/1	70/20	450	30/1	350/3500	350/3500
Модуляція, доступ до середовища	DSSS	FHSS	DSSS	FHSS	TDMA/ FDMA	TDMA/ FDMA/CDMA
Топологія системи	“точка–точка”, “зірка”, мережа (зокрема mesh-)	“точка–точка”, “зірка”, мережа	“точка–точка”, “зірка”	“точка–точка”, “зірка”, мережа	стілньикова мережа	стілньикова мережа

Наведена класифікація є доволі умовною та спрощеною. Стандарти WPAN/WLAN на практиці часто перетинаються один з одним, іноді об'єднуючись з метою завоювання нових ніш на ринку, іноді вступаючи в конкуренцію на вже освоєних його сегментах. Наприклад, ZigBee “намагається” збільшити швидкість передавання даних і підвищити дальність зв'язку, Wi-Fi “прагне” підвищити дальність зв'язку і знизити енергоспоживання тощо. Тому на практиці інколи доволі складно розмежувати різні стандарти WPAN/WLAN.

Серед оптичних телекомунікаційних засобів можна виділити технології IrDA та Li-Fi [6].

Infrared Data Association (IrDA) – група, керована промисловими інтересами, що заснували у 1993 р. провідні комп'ютерні компанії. IrDA надає специфікації для повного набору протоколів бездротового інфрачервоного зв'язку і назва “IrDA” також входить до набору цих протоколів. Основною метою створення IrDA була бездротова передача даних через “останній метр”, використовуючи принцип “вибрати й активувати”. Основними характеристиками цього виду оптичного зв'язку є безпечне передавання даних на фізичному рівні, лінії прямої видимості (LOS) і низький рівень бітових помилок (BER), що забезпечує високу достовірність передачі даних. Недоліком є обмежена дальність передавання, що знижує конкурентоспроможність цієї технології на ринку застосування.

Технологія Li-Fi – порівняно нова серед засобів бездротового зв'язку, використовує для передачі даних видиме світло. Вона також відома як Visible Light Communication (VLC). Фізичний та каналний рівні Li-Fi визначаються стандартом IEEE802.15.7 [6]. У жовтні 2011 р. декілька фірм з Німеччини, Норвегії, Ізраїлю і США об'єдналися в консорціум Li-Fi для просування перспективної технології на ринку. Перша офіційна демонстрація технології відбулася на виставці

побутової електроніки CES 2012. Найкращі реалізації цієї технології забезпечують максимальну швидкість передачі даних 800 Мбіт/с. Ведуться активні роботи щодо підготовки серійного випуску засобів цієї технології.

Телекомунікаційні інтерфейси для КФС доцільно класифікувати за двома основними ознаками: а) продуктивністю (інтенсивністю інформаційного обміну); б) найбільшою відстанню між компонентами КФС, які безпосередньо беруть участь в обміні даними. Пропонується кожен із класифікаційних ознак розділити на три групи. Стосовно інтенсивності інформаційного обміну виділимо низьку L (< 10 кбіт/с), середню М (>10 кбіт/с, < 1 Мбіт/с), високу Н (> 1 Мбіт/с). Стосовно відстані між компонентами виділимо системи типу PAN (< 10 м), LAN (> 10 м, < 1 км), MAN/WAN (> 1 км). Для кожного із класів рекомендуються стандартизовані інтерфейси за табл. 7.

Таблиця 7

Телекомунікаційні інтерфейси для різних класів КФС

Радіус мережі	Інтенсивність інформаційного обміну		
	Низька L (< 10 кбіт/с)	Середня М (>10 кбіт/с, < 1 Мбіт/с)	Висока Н (> 1 Мбіт/с)
PAN (< 10 м)	RS-232, RS-485, MicroLAN (1-Wire), CAN, USB, SPI, I2C, Bluetooth, ZigBee, радіомодеми (2,4 ГГц)	CAN, RS-485, USB, Ethernet, Wi-Fi	CAN, RS-485, USB, Ethernet, Wi-Fi, UWB, Li-Fi
LAN (> 10 м, < 1 км)	CAN, RS-485, MicroLAN (1-Wire) Радіомодеми (433 МГц)	Промислові мережі, Industrial Ethernet WiMAX	Промислові мережі, Industrial Ethernet WiMAX
MAN/WAN (> 1 км)	Промислові мережі, Industrial Ethernet, GPRS/EDGE модеми	Промислові мережі, Industrial Ethernet, 3G модеми	Промислові мережі, Industrial Ethernet, 3G модеми, оптоволоконні мережі

Наведена таблиця є відкритою. Вона може змінюватися у ході подальших досліджень як у царині КФС, так і в царині телекомунікаційних інтерфейсів. Використовуючи такі класифікаційні ознаки, можна виділити дев'ять класів телекомунікаційних засобів – від L-PAN до H- MAN/WAN.

Висновки

1. Пропонується класифікація телекомунікаційних інтерфейсів із використанням двох основних ознак – інтенсивності інформаційного обміну та відстані між компонентами КФС. Запропоновано виділити дев'ять класів телекомунікаційних засобів та рекомендовано для них стандартизовані інтерфейси.

2. Вибираючи телекомунікаційні інтерфейси, у стаціонарних засобах взаємодії з фізичним світом перевагу варто надавати дротовим технологіям і використовувати бездротові рішення лише у разі необхідності. У мобільних засобах КФС перевагу варто надавати бездротовим технологіям.

3. У виборі телекомунікаційних інтерфейсів для засобів збору та доставки інформації максимально широкий спектр застосування мають стандартні промислові рішення (промислові мережі, зокрема Industrial Ethernet). Під час такого вибору потрібно враховувати вартість засобів.

4. У випадках, коли застосування у КФС кабельних промислових мереж є проблемним, для підключення сенсорів та виконавчих пристроїв рекомендується використання стандартних промислових радіомодулів ZigBee.

5. Застосування безкабельної технології Wi-Fi буде доцільним та ефективним за умови, що основна телекомунікаційна мережа КФС побудована за однією з технологій Industrial Ethernet.

6. Якщо застосування у КФС радіоканалу є проблемним, для безкабельного підключення сенсорів чи виконавчих механізмів рекомендується використання сучасних різновидів технології IrDA, а у разі підключення до Ethernet-базованих промислових мереж – технології Li-Fi (за умови появи на ринку відповідного сертифікованого обладнання).

7. Застосування результатів досліджень телекомунікаційних засобів забезпечить можливість прийняття узгоджених та ефективних рішень під час практичної реалізації КФС.

Наукові результати, подані у цій статті, отримано в межах дослідницького проекту ДБ/КІБЕР з реєстраційним номером 0115U000446, 01.01.2015–31.12.2017, фінансово підтриманого Міністерством науки і освіти України.

1. Мельник А. О. Кіберфізичні системи: проблеми створення та напрями розвитку / А. О. Мельник // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2014. – № 806 : Комп’ютерні системи та мережі. – С. 154–161. 2. Міюшкович Є. Г. Телекомунікаційні інтерфейси кіберфізичних систем: концепція застосування / Є. Г. Міюшкович, Я. С. Парамуд // Кіберфізичні системи: досягнення та виклики: матеріали Першого наукового семінару (25–26 червня 2015 р., м. Львів). – 2015. – С. 28–37. 3. Гук М. Интерфейсы ПК: справочник. – СПб.: Питер, 1999. – 416 с. 4. International Standard IEC 61158 Digital data communications for measurement and control. Fieldbus for use in industrial control systems. 5. Аникин А. Обзор современных технологий беспроводной передачи данных в частотных диапазонах ISM (Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi) и 434/868 МГц // Беспроводные технологии. – 2011. – № 4. – С. 6–12. 6. IEEE 802.15.7-2011 // IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-- Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light.