

УДК 602.1:519.85:53.082.9:616-07

Марценюк В.П.¹, Сверстюк А.С.², Багрій-Заяць О.А.², Горкуненко А.Б.², Остафійчук Д.І.³

¹ Університет в Бельсько Бяла

² Тернопільський національний медичний університет імені І.Я. Горбачевського

³ ВДНЗ України "Буковинський державний медичний університет"

ОГЛЯД КІБЕР-ФІЗИЧНИХ СИСТЕМ

Марценюк В.П., Сверстюк А.С., Багрій-Заяць О.А., Горкуненко А.Б., Остафійчук Д.І. **Огляд кібер-фізичних систем.** В роботі проведено огляд кібер-фізичних систем. У зв'язку з посиленням розвитком кібер-фізичних систем істотна увага у світі приділяється різним аспектам їх формування й експлуатації, зокрема визначенню та формуванню їх основних характеристик для керівництва розробленням та впровадженням «інтелектуальних» програм у різних сферах, включаючи розумні виробництво, транспортування, енергетику та охорону здоров'я.

Ключові слова: кібер-фізична система, біосенсор, імуносенсор, математична модель, статична математична модель, диференціальні рівняння.

Марценюк В.П.¹, Сверстюк А.С.², Багрій-Заяць О.А.², Горкуненко А.Б.², Остафійчук Д.І.³ **Обзор кибер-физических систем.** В работе проведен обзор кибер-физических систем. В связи с усиленным развитием кибер-физических систем существенное внимание в мире уделяется различным аспектам их формирования и эксплуатации, в частности определению и формированию их основных характеристик для руководства разработкой и внедрением «интеллектуальных» программ в различных сферах, включая разумные производство, транспортировку, энергетику и здравоохранение.

Ключевые слова: кибер-физическая система, биосенсор, иммуносенсор, математическая модель, статическая математическая модель, дифференциальные уравнения.

Martsenyuk V.P.¹, Sverstiuk A.S.², Bagriy-Zayats O.A.², Horkunenko A.B.², Ostafiychuk D.I.³ **Cyber-physical systems review.** The paper reviews the cyber-physical systems. Taking into account the enhanced development of cyber-physical systems, the world is focused on various aspects of their formation and exploitation, in particular the definition and formation of their main characteristics for the management of the development and implementation of "intellectual" programs in various fields, including intelligent production, transportation, energy and health care.

Keywords: cyber-physical system, biosensor, immunosensor, mathematical model, static mathematical model, differential equations.

Вступ. Вирішенням багатьох завдань, що постають перед людством в третьому тисячолітті, є невідпинний науковий прогрес в найбільш важливих напрямках розвитку та збереження земної цивілізації. Людство повсякчас відкриває для себе нові можливості, але також зустрічається і з новими викликами, серед яких вирізняються проблеми в боротьбі з новими видами захворювань, в збереженні довкілля та в протистоянні терористичним загрозам. В цьому розумінні значний науковий та практичний інтерес становлять дослідження кібер-фізичних систем.

Кібер-фізична система (КФС) – фізична система, яка реалізує інтеграцію обчислень та фізичних процесів. Вони відбуваються найчастіше у вигляді вбудованих систем та мереж для моніторингу та контролю фізичних процесів в системах зі зворотним зв'язком. У таких системах динаміка фізичних процесів є джерелом інформації досліджуваного явища з можливістю контролю та розрахунку сигналів керування об'єктом [1].

КФС ототожнюються з проявом четвертої промислової революції, яка відбувається в сучасному світі [2], і яка пов'язується з розвитком технологій "Internet of Things" (Інтернет речей), де необхідно використовувати сигнали від давачів і вимірювальних приладів. Системні дослідження КФС ґрунтуються на використанні математичного та комп'ютерного моделювання. У роботі [3] із застосуванням математичного моделювання представлено огляд КФС в різних галузях і застосуваннях – мережеве керування, гібридні системи, обчислення в реальному часі, мережі реального часу, безпроводні сенсорні мережі, системи захисту і розробки, керовані моделями. З метою математичного та комп'ютерного моделювання КФС А.Платцер запропонував підхід на основі "динамічної логіки" [4, 5]. При цьому використовують гібридні програми (ГП) на простій мові програмування з простою семантикою, де програміст може звертатись безпосередньо до значень змінних, які представляють реальні величини і визначають їх динаміку.

Постановка проблеми. Біосенсори є альтернативою відомим методам вимірювання, які використовують в конструкції біологічний матеріал, що забезпечує дуже високу селективність та дає змогу швидко і просто проводити вимірювання [6-8]. Дослідження КФС на основі біосенсорів та імуносенсорів зокрема є особливо актуальними в зв'язку з необхідністю більш точних методів моніторингу та аналізу різних параметрів медико-біологічних процесів. Важливим етапом проектування кібер-фізичних імуносенсорних систем (КФІСС) є розробка та дослідження їх математичних моделей, які б адекватно відображали процеси, що лежать в основі їх функціонування.

Мета дослідження. Провести огляд кібер-фізичних систем, що використовують у різних сферах, включаючи розумне виробництво, транспортування, енергетику та охорону здоров'я.

Аналіз досліджень. КФС – це інтелектуальні системи, в яких взаємодіють мережі фізичних та обчислювальних компонентів. Вони проникають у всі сфери життєдіяльності людини: виробництво, будівництво, транспорт, енергетику, медицину тощо, де забезпечують нові функціональні можливості для покращення якості життя, досягнення технічного прогресу в різних сферах і тому істотно впливають на світову економіку. Основою розробки моделей КФС є наявність засобів вимірювання та їх програмного забезпечення. Технічні засоби необхідні для контролю параметрів технологічних процесів та навколишнього середовища [9].

В роботі [10] розглянуто суть «інтелектуальних» програм, яка полягає в тому, що, використовуючи дані сенсорів, які якнайшвидше і якнайточніше сигналізують про зміну параметрів середовища, спеціальні алгоритми задіюють автоматику вищого рівня для виконання адекватних дій. КФС виходять за межі звичайних пристроїв, систем та архітектур прикладних програм. Зазвичай КФС охоплюють всі відомі аспекти роботи інформаційно-вимірювальних систем, ускладнених унаслідок взаємодії їхніх окремих компонентів через мережі. Вони об'єднують традиційні інформаційні технології: від надходження даних від сенсорів з їх опрацюванням із використанням вбудованих обчислювальних потужностей або з використанням хмарних технологій, до традиційних операційних технологій контролю та управління. Інакше кажучи, особливістю КФС є поєднання інформаційних та операційних технологій, на що накладаються часо-просторові обмеження, оскільки КФС часто розпорошені у просторі та розділені у часі.

Питання впровадження «інтелектуальних» програм у різних сферах настільки актуальне, що NIST розробила класифікацію КФС, яка охоплює розумні: виробництво, конструкції, транспорт, енергетику, безпеку життя та охорону здоров'я. Щоб забезпечити впровадження «інтелектуальних» програм, необхідно створити прикладну модель системи, мати відповідне метрологічне та програмне забезпечення. Крім того, треба забезпечити сумісність між різнорідними компонентами та системами, тому потрібні розробки у сфері метрології КФС, верифікація математичних моделей (калібрування, оцінювання якості комплексних продуктів, діагностика на основі моделі), у сфері розробки основного та допоміжного програмного забезпечення. Програмне забезпечення формує адекватну прогнозовану поведінку системи – відповідь системи на зміну вищенаведених параметрів.

1. **КФС «Розумне виробництво»** – багатофункціональні смарт-машини, що характеризуються малими розмірами, адаптивністю до потреб користувачів (реалізуються необхідною функціональністю). Отримавши інформацію про змінені вимоги, КФС сама вносить корективи в технологічний процес. Прикладом розумного виробництва є виготовлення металу з використанням точних ваг. Їх нормальне функціонування забезпечується калібруванням, яке виконується на місці, без демонтажу конструкції КФС. Завдяки технології «map-in-loop» здійснюється дистанційна атестація точних ваг, що сприяє підвищенню їхньої продуктивності в певних операційних діапазонах до відповідності значенням робочих еталонів. Переважно для таких КФС віддалений доступ до вагопроцесорів компонентів КФС безпосередньо на робочих місцях забезпечують завдяки використанню промислового мережевого протоколу Ethernet, як стандартизованого варіанту, який адаптований для промислових умов, з метою автоматизації та керування технологічними процесами.

2. **КФС «Розумні будівлі»** – інтелектуальні будівлі (з мінімальним чи нульовим споживанням ресурсів), що потребують постійного моніторингу. Вони повинні бути підключені до мереж інтелектуальних сенсорів і контролюватися засобами КФС. Основною вимогою є досягнення мінімального споживання енергії. Для цього вивчають теплові умови за допомогою інтелектуальних сенсорів температури локальної мережі та забезпечують адекватну ізоляцію за неперервного багатоточкового контролю температури. Велика увага приділяється попередній оцінці теплових умов на етапі будівництва, усуненню містків холоду, тощо. Для контролю тепла використовують методи інфрачервоної діагностики за допомогою тепловізора, методи дискретно-точкового вивчення температурних режимів обмежувальних площин, моніторинг температур у реального часу за допомогою чипів із вбудованими сенсорами температури, прикріпленими до внутрішньої та зовнішньої поверхонь досліджуваних площин. Так виявляють та усувають містки холоду, досліджують енергетичні відбивні покриття з невідомим коефіцієнтом поглинання теплового випромінювання і керують роботою енергетичних підсистем для електропостачання, опалення та вентиляції. У переважній більшості таких КФС застосовують програмне забезпечення StructureWare Building Operation.

Щоб поведінка програмного забезпечення КФС відповідала його специфікації під час використання в певному середовищі, проводять функціональну перевірку. Специфікація виражає стан безпеки, яку потрібно досягти за всіх можливих виконань програмного забезпечення (для детермінованих систем) або з необхідною мінімальною ймовірністю (для стохастичних систем).

3. КФС «Біосенсиори»

Імуносенсиори [11] є підгрупою біосенсорів, в яких відбувається імунохімічна реакція пов'язана з перетворювачем. Принцип роботи усіх імуносенсорів полягає в специфічному молекулярному розпізнаванні антигенів антитілами для утворення стабільного комплексу. В імуносенсорних пристроях використовуються чотири основні види детектування: електрохімічний (потенціометричний), амперометричний або кондуктометричний (ємнісний), оптичний і термометричний. Усі типи сенсорів можуть використовуватися, як прямі (немарковані) або як непрямі (марковані) імуносенсиори. Прямі сенсори здатні виявляти фізичні зміни під час утворення імунного комплексу, в той час як непрямі, використовують різні рівні генерованого сигналу, які дають змогу більш чутливо та універсально проводити детектування у вимірювальних системах [10].

Клітинні біосенсиори можуть застосовуватися для кількісної оцінки інфікування організму за допомогою певних електрохімічних чи оптичних явищ. В роботі [12] описано клітинний біосенсор, який використовує електрохімічну імпедансну спектроскопію. Даний біосенсор призначений для підрахунку клітин людини CD4⁺. Область зондування цього біосенсора включає в себе електродні пікселі, розмір кожного з яких порівнюється з розміром клітин CD4⁺, які захоплюються пікселями електроду. Клітини виявляються шляхом спостереження за інформативними змінами на пікселі. Стан електродного пікселя "Увімкнено" або "Вимкнено" вказує на виявлення однієї клітини CD4⁺. Таким чином, щоб підрахувати кількість клітин CD4⁺, підсумовують електродні пікселі в стані "Увімкнено". Цей загальний підхід до кількісного виявлення клітин використано для моделювання імуносенсорної системи, яка ґрунтується на явищі флуоресценції, в даній роботі.

Пікселі робочих електродів були модифіковані антитілами CD4⁺ через три стадії хімічних перехресних зв'язувань. Робочі електроди були перевірені під мікроскопом представлені на рисунку 1 (А).

Зображення було зареєстровано в режимі темного поля, показано електроди, які захоплені однією клітиною на поверхні (яскраві плями), а також електроди без захоплених клітин (темні плями). Увімкнений та вимкнений стан робочих електродів представлений бінарним статусом заповнення клітин. На рисунку 1(В) зображено робочі електроди після нанесення покриття клітинами Farage (CD19⁺). Оскільки спеціальних прив'язок не було між CD19⁺ клітинами та антитілами CD4⁺, клітини CD19⁺ не були захоплені на модифікованих CD4⁺ антиген-антитіло-модифікованих електродів. На рисунку 1(С) відображено профіль поперечного перерізу, що сканується на порожньому робочому піксельному електроді, який показує 2-мікрометрову високу структуру сітки PECVD Si3N4 між сусідніми електродними пікселями. Через цю сіткову структуру всі захоплені клітини були сконцентровані на робочих електродах.

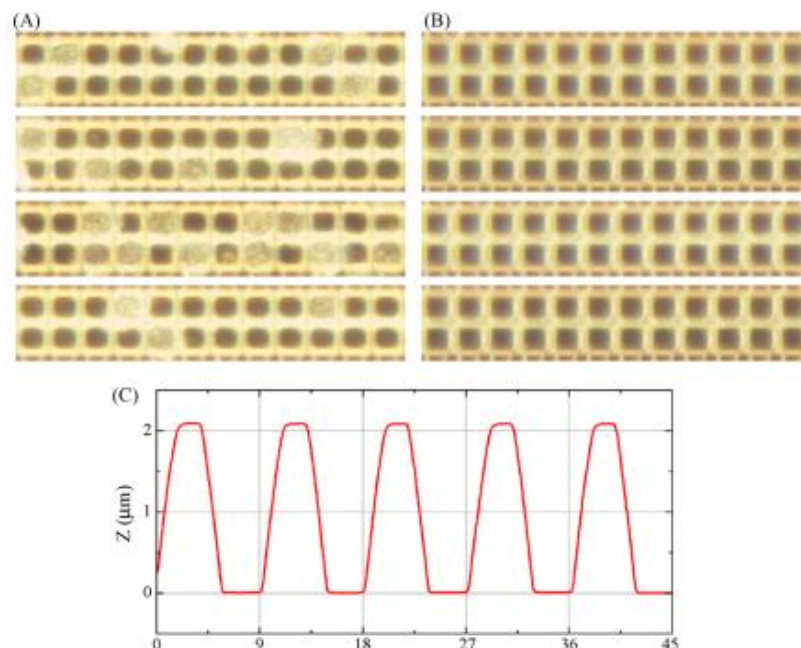


Рис 1. Захоплення клітин на CD4⁺ клітинному біосенсорі.

На зображенні кожного темного квадрату був єдиним робочим електродом у "вимкненому" стані (без прикріпленої клітини), тоді як кожна яскрава пляма була електродом "увімкненого" стану (прикріплена одна одиниця J45.01 клітини на поверхні). Використання такого щільно упакованого електродного пікселя мало дві великі переваги: по-перше, оскільки розмір пікселів був співрозмірний з одною CD4⁺ клітиною, кожен піксель електроду може захоплювати або одну клітину, або жодну, отже, досягати роздільної здатності виявлення однієї клітини. Виявлення похибки кожним пікселем електроду була мінімізована високим співвідношенням сигнал/шум в цьому бінарному режимі виявлення. По-друге, ціла зона сканування складається з окремих електродних пікселів. Кожна клітина у зоні сканування була просканована локальним пікселем індивідуально. Тому загальна точність підрахунку була в принципі незалежна від концентрації клітин та рівномірності розподілу. Це зробило цей метод підрахунку надійним для широкого кола знаходження вибірок клітини та характеристик захоплення. Селективність захоплення була доведена контрольним експериментом, в якому клітини CD19⁺ були нанесені на електроди, модифіковані за допомогою антитіл CD4⁺. Оскільки не було конкретних прив'язок між клітинами CD19⁺ та антитілами CD4⁺, клітини не були захоплені на електроди, як показано на рисунку 3 (В). Згідно даного рисунку, всі захоплені клітини були добре розташовані в центрі робочого електроду. Успіх цього точно вирівнювання відбувся в першу чергу через облягаючий Si3N4 шар. Si3N4 сітка між сусідніми електродами служила як 2 μm високі обмежувальні стінки, це було вирішальним для центрування клітин на електродах, коли клітини приземлились на поверхню. Це вирівняне вкладення було важливим для досягнення бінарного стану заповнення клітин. Рисунок 3 (С) - це профіль поверхні через декілька порожніх робочих електродів, які скануються.

Визначення терміну КФСС, наведене в [13], передбачає для сенсорної системи "більш високий ступінь поєднання, розподілення системи, можливість використовувати вбудовані системи в області автоматизації та дотримання діючих стандартів". Таке трактування використано і для побудови функціональної схеми КФСС, її математичного та комп'ютерного моделювання.

КФСС відносяться до високоінтелектуалізованих інформаційних систем. Вони використовують доступний набір інтерфейсів, які дають змогу отримувати швидко та достовірну інформацію про стан та внутрішні дані системи, які повинні бути доступні для інших КФС. Згідно [13] КФСС, як самоорганізуюча система, що потребує всебічних знань про власну динамічну структуру та інфраструктуру загальної системи. Для цього визначають типи сенсорних пристроїв, враховуючи їх функціональне застосування. Для прикладу, імуносенсиори можуть використовуватися для оцінки критичних станів при серцево-судинних захворюваннях, величини інсуліну при вимірюванні величини глюкози в крові, виявлення кількісних показників у деяких фармацевтичних сполуках і ін.

У роботі [13] запропоновано загальну структуру КФСС. При застосуванні цього підходу у випадку імуносенсорів можна виокремити три види завдань: отримати загальну інформацію про імуносенсор; виміряти імунологічні показники з перетворенням одиниць та калібруванням; взаємодіяти з іншими імуносенсорами.

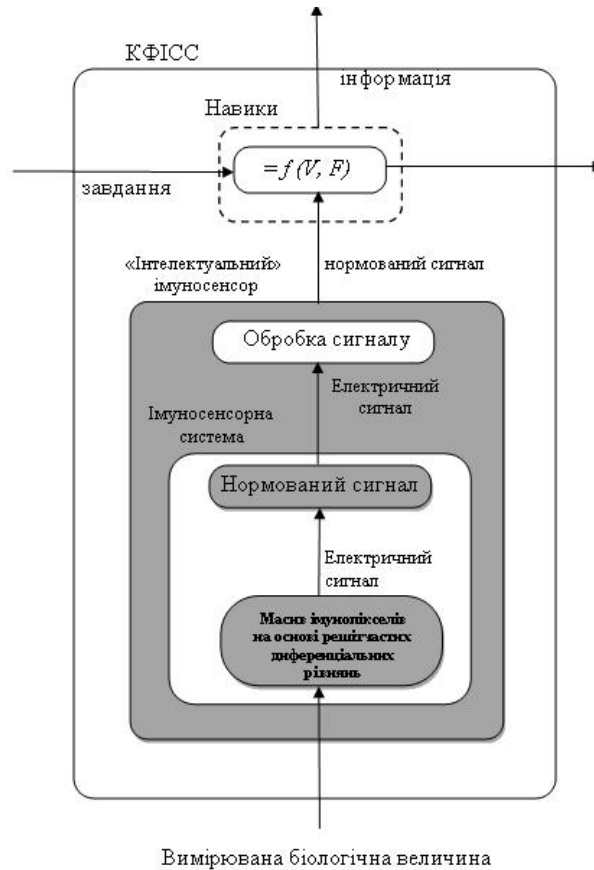


Рис.2. Функціональна схема КФІСС

В основі функціональної схеми КФІСС (зовнішній прямокутник на рис. 2) покладено концепцію КФСС з врахуванням особливостей інтелектуальних імуносенсорів. З додатковими навиками (пунктирна лінія на рис. 2) імуносенсор розширюється до КФІСС.



Рис. 3. Узагальнена структура Smart-кіберфізичної системи моніторингу стану кардіологічних пацієнтів

Одним із варіантів кіберфізичних систем моніторингу є мобільні кіберфізичні системи моніторингу (mobile cyber physical system), у яких компоненти системи мають змогу динамічного переміщення на просторі, як правило в межах деякої визначеної території. Так, у роботі [14] розроблено архітектуру кіберфізичних систем моніторингу стану кардіологічних пацієнтів (рис.3).

Запропонована система має можливість здійснювати «розумну» аналітику, багатовимірний аналіз даних та прогнозування розвитку стану каріопациєнта. Взаємодія між обчислювальними центрами в системі моніторингу показана на рисунку 4.

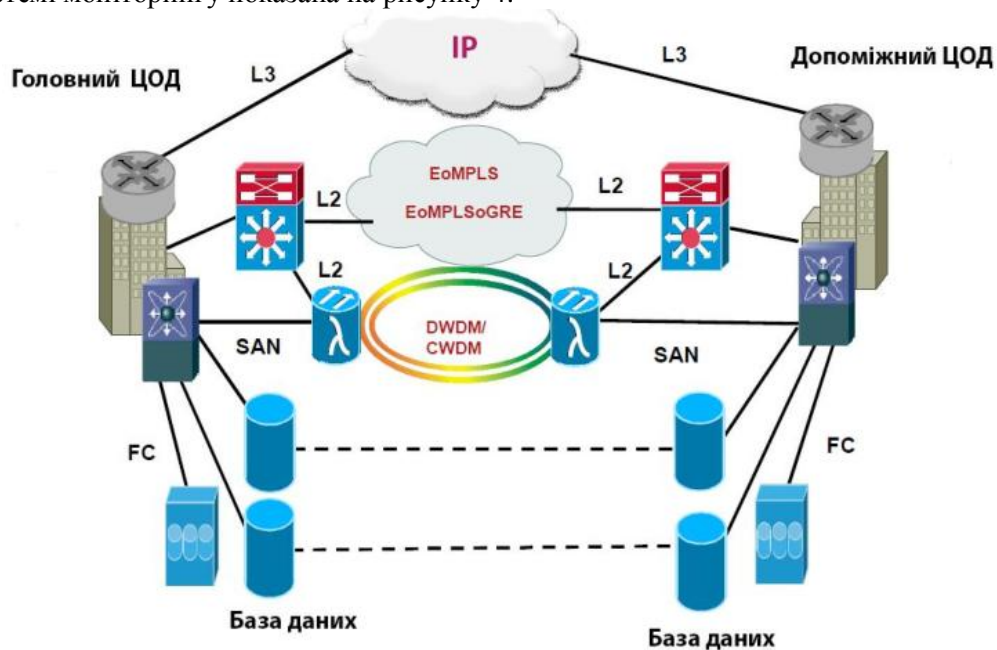


Рис. 4. Взаємодія між обчислювальними центрами в системі моніторингу

У роботі [15] розроблено інтелектуальну мобільну експертну систему для автоматичного знаходження туберкульозу в реальному часі. Перевагою даної системи є те, що після зчитування картинки проводиться кластеризація та пошук об'єкта дослідження. На відміну від інших систем є повністю автоматизованою та не потребує додаткових введень зі сторони дослідника, а також те що система здатна одночасно зчитувати багато вибірок та класифікувати їх як позитивні чи негативні в реальному часі. Зразки відмічаються з допомогою кольорів та в ряді досліджень отримані результати з точністю у 98,9%.

У роботі [16] представлено КФС, що складаються з обчислювальних компонентів, з'єднаних між собою комп'ютерними мережами, які моніторять і контролюють скеровані фізичними об'єктами, з'єднаними фізичними інфраструктурами. Основний виклик у розробці та аналізі КФС - це відсутність загальної семантики між компонентами. Запропоновано новий підхід, який компоує правильність різних компонентів замість їх функціональності за допомогою кон'юнктури логічних безперешкодних інваріантів. Представлено розподілений алгоритм, який використовує цей підхід до адаптивного планування передачі енергії між вузлами в розумній енергетичній мережі таким чином, щоб стабільність обох комп'ютерної мережі та фізичної система підтримуються. Результати моделювання демонструють необхідність та корисність нашого підходу до підтримки загальної стабільності системи при наявності невизначеностей в комп'ютерній мережі і з обмеженою інформацією про глобальний стан системи.

Фізична система повинна відповідати одному з декількох критеріїв щоб бути стабільною. Критерії впливають з аналізів постійної динаміки системи, які моделюються як

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{V_1 V_2}{J\omega X} \sin(\theta - \theta_0) - \frac{D}{J}(\omega - \omega_0) + \frac{P_{imb}}{J\omega} - \frac{kP^2}{J\omega} \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (2)$$

де ω - частота, θ - фазовий кут генератора напруги, ω_0 та θ_0 - їхні номінальні значення, P_{imb} - це мережевий дисбаланс потужності через вийняткові повідомлення та інші терміни що є різні фізичними параметрами.

Похибка енергії, задана як

$$V(\omega, \theta) = \frac{J}{2}(\omega - \omega_0)^2 + \frac{V_1 V_2}{\omega X} (1 - \cos(\theta - \theta_0))$$

(3)

функція Ляпунова (тобто позитивно-означена функція з неперервною похідною від часу), якщо система задовольняє I_{P1} , то вона задана

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{P1} : (\omega - \omega_0)^2 (D\omega + m) \\ + (\omega - \omega_0)(kP^2) > \delta K(\omega - \omega_0) \end{array} \right\} \quad (4)$$

З іншими факторами, I_{P1} , зрештою накладає обмеження на $\delta \cdot K$, де δ - квант енергії, що мігрований з кожним повідомленням та K - кількість видатних повідомлень.

Загалом, як функція Ляпунова існує для конкретної фізичної системи, то така система є стабільною. Однак є інші умови, які також забезпечують стабільність для комутованої система, яка є безперервною системою, яка підлягає зовнішнім перемикаючим подіям. Функція типу Ляпунова [17-19] подібна до функції Ляпунова в тому, що вона повинна бути позитивно-скінченна, але за певних умов її значення може зрости. Якщо значення функції типу Ляпунова зменшується на кожній перемикаючій події, то система стабільна. Остаточний варіант полягає в тому, що похибка може не спасти до нуля, але вона є обмеженою.

Поєднуючи три умови можна знайти звичайний інваріант.

$$\{I_P : I_{P1} \vee (V(\omega, \theta) < V_{bound}) \vee (V(t) \leq V(t_x))\} \quad (5)$$

де V_{bound} є максимально допустиме значення V , $V(t)$ - це значення $V(\omega, \theta)$ в даний час і $V(t_x)$ - є його значення на самому останньому попередньому протиріччі I_{P1} завдяки великому значенні K . У попередній роботі [20-21] продемонстровано, що система, є стабільною для певних комбінацій стаціонарного розбалансування потужності та падіння константів в SST контролерах. Йдеться про те, чи забезпечує протокол комунікації, та щоб дисбаланс потужності не перевищував допустиму межу.

4. Розумні системи транспортування. Кібер-фізичні системи забезпечують шляхи покращення систем транспортного контролю. Дорожні системи контролю руху створюють середовище яке існує в природньому географічному середовищі і в середовищі створеному людиною такому як мости через моря та річки, довгі та величезні тунелі, надземні мости, небезпечні похилі нахили та ін. Розумні системи транспортування можуть створювати контроль руху через додавання та встановлення великої кількості електронних прогресивних пристроїв та інформаційних систем до дорожніх систем руху, покращуючи операційну ефективність та рівень безпеки для дорожніх систем контролю руху, кібер-фізичні системи інтегрують цю інформацію в транспортний процес та працюють через їх координування роблячи транспортування більш безпечним та ефективним [22].

У роботі [23] представлена нова архітектура розумного хмарного світлофора, яка характеризується використанням логічних операцій і часом простою зеленого сигналу, що дає можливість істотно збільшити пропускну здатність транспортних потоків на перехресті доріг. Пропонується структура кіберфізичної системи, орієнтована на якісні інновації в моніторингу і управлінні транспортом, що усувають забруднення планети, численні аварії та колізії на дорогах шляхом поступового переміщення дорожніх знаків у кіберпростір, делегування координат кожного автомобіля і хмарного online надання інформації про маршрут руху. Хмарний сервіс призначений для моніторингу та управління дорожнім рухом в реальному масштабі часу на основі використання глобальних систем позиціонування, навігації (GPS, GPRS), інтелектуальних дорожніх контролерів, засобів радіочастотної ідентифікації автомобілів з метою підвищення якості та безпеки пересування транспортних засобів, а також мінімізації часових і матеріальних витрат при русі автомобілів за заданими маршрутами. Розроблені моделі та методи інтегруються в КФС online взаємодії хмари моніторингу та управління з транспортними засобами та інфраструктурою дорожнього руху. Кожен автомобіль має особистий кабінет у кіберпросторі, інваріантний по відношенню до водіїв, які обслуговують транспортний засіб. Запропонована кіберфізична система – дорожня інфраструктура і фізичний транспорт з цифровими сенсорами, а також хмарні сервіси моніторингу та управління дорожнім рухом відрізняється від існуючих структурною інтеграцією online взаємодіючих інтерактивних компонентів: 1) Суперпозиція сервісів електронної картографії, радіолокації, радіонавігації і online вибору маршруту руху. 2) Хмарний сервіс сенсорного моніторингу автомобіля і управління дорожнім рухом на основі поступового перетворення реальних знаків дорожнього руху у віртуальні. 3) Створення повного рефлексорного відображення фізичних транспортних процесів і

© Марценюк В.П., Сверстюк А.С., Багрій-Заяць О.А., Горкуненко А.Б., Остафійчук Д.І.

явищ в хмарних сервісах, що включають кабінети автомобілів з їх дорожньою просторово-часовою історією. В рамках системної інтеграції захищених від несанкціонованого доступу хмарних компонентів (рис. 5): хмар моніторингу, управління і збереження історії, блоків радіочастотної ідентифікації транспорту, а також інтелектуальних сенсорів дорожньої інфраструктури, створюються мікросервіси квазіоптимального управління транспортом і дорожнім рухом в режимі реального часу для вирішення соціальних, гуманітарних, економічних та екологічних проблем.

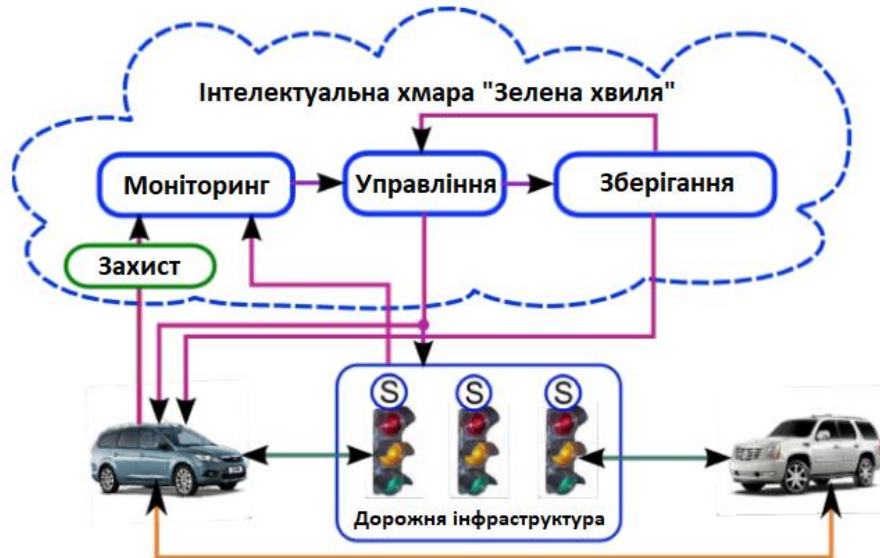


Рис. 5. Інтелектуальна хмара «Зелена хвиля»

Деталізується масштабована КФС цифрового моніторингу і хмарного управління дорожнім рухом в реальному масштабі часу на основі використання глобальних систем позиціонування і навігації, автомобільних комп'ютерів, навігаторів або мобільних гаджетів, розумних світлофорів, технологій Big Data і Internet of Things з метою підвищення якості і безпеки експлуатації транспортних засобів, а також мінімізації часових і матеріальних витрат при русі автомобілів за заданими маршрутами.

5. Повітряно-навігаційні системи. КФС використовуються у повітряно-навігаційних системах, таких як інструментарій тестового злету, зв'язку з командою пілотів, структура контролю здоров'я, у злітних тестах, у безпілотних кабінах та при посадці літаків.

6. Розумні середовища навчання. КФС можуть використовуватись в розумних середовищах навчання, а саме для отримання компетентної інформації про фізичні середовища, конвертуючи дані в інформацію та знання, і забезпечувати корисні та швидкі сервіси для студентів, працівників та університету. Розумні середовища навчання однозначно змінять принцип навчання та роботи в університетах [24].

7. Розумні гріди системи. Розумні гріди системи є екосистемами як базуються на оцінювання збору інформації та прийнятті рішень як у менеджменті. В розумних гріди системах багато традиційних частин використовують кібер-фізичні системиони використовуються у генерації, передачі та поширенні та часто на стороні користувача. В генерації вони також контролюють з'єднання мережі так як і операційні аспекти в генерації електрики. Кібер-фізичні системи моніторингу умов та турботи про стабільність передачі та поширення мережі, що з'єднує кінцевих користувачів з розумними гріди [25]. Вони забезпечуть подвійну комунікацію та контроль між потужними гріди та користувачами.

8. Моніторинг громадської інфраструктури. Сьогодні багато громадських інженерів зіткнулись з проблемою контролю старіння інфраструктур, таких як греблі, мости, будинки та ін. Волоконно-оптичні сенсори, мікроелектричні та механічні сенсори, безпроводні комунікаційні технології пропонують ефективні засоби для забезпечення точності та безперервного моніторингу інфраструктури [26].

Висновки та перспективи подальшого дослідження. В роботі проведено огляд КФС та показана їх ефективність у різних сферах застосування. Розглянуто КФС розумного виробництва на прикладі виготовлення металу з використанням дистанційного контролю точних ваг. Представлено КФС розумних будівель з мінімальним споживанням ресурсів, що потребують постійного

моніторингу, тому вони підключені до мереж інтелектуальних сенсорів і контролюватися засобами КФС. Проаналізовано КФІСС, що можуть застосовуватися для кількісної оцінки інфікування організму за допомогою електрохімічних або оптичних явищ. Розглянуто КФС передачі енергії між вузлами в розумній енергетичній мережі таким чином, щоб стабільність комп'ютерної мережі та фізичної системи підтримувалися. Розумні системи транспортування створюють контроль руху через встановлення електронних пристроїв та інформаційних систем до дорожніх систем руху, покращуючи операційну ефективність та рівень безпеки для дорожніх систем контролю руху, зокрема КФС інтегрують цю інформацію в транспортний процес та забезпечують координування ефективності та безпеки руху. Зроблено висновок, що застосування КФС у різних сферах науки, промисловості та життєдіяльності людини забезпечує інтеграцію інформаційної автоматизації та фізичних процесів.

1. Meissner H. Implications of cyber-physical production systems on integrated process planning and scheduling [Text] / H. Meissner, J. Aurich // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – Vol. 28. – P. 167-173.
2. Lee J. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems [Text] / J. Lee, B. Bagheri, H.-A. Kao // *Manufacturing Letters*. – 2015. – Vol. 3. – P. 18–23.
3. Thiede S. Implementing cyber-physical production systems in learning factories [Text] / S. Thiede, M. Juraschek, C. Herrmann // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 54. – P. 7-12.
4. Platzer A. Differential dynamic logic for hybrid systems [Text] / A. Platzer // *Journal of Automated Reasoning*. – 2018. – Vol. 41, № 2. – P. 143–189.
5. Platzer A. Logical foundations of cyber-physical systems [Text] / A. Platzer. – Berlin: Springer, 2018. – 639 p.
6. Klos-Witkowska A. The phenomenon of fluorescence in immunosensors [Text] / A. Klos-Witkowska // *Acta Biochimica Polonica*. – 2016 – Vol. 63, № 2. – P. 215–221.
7. Martsenyuk V. P. Study of classification of immunosensors from viewpoint of medical tasks [Text] / V. P. Martsenyuk, A. Klos-Witkowska, A. S.Sverstiuk // *Medical informatics and engineering*. – 2018. – № 1(41). – P.13-19.
8. Martsenyuk V.P. On principles, methods and areas of medical and biological application of optical immunosensors [Text] / V. P. Martsenyuk, A. Klos-Witkowska, A. S. Sverstiuk, T. V. Bihunyak // *Medical informatics and engineering*. – 2018. – № 2 (42). – P. 28-36.
9. Микийчук М. М., Стадник Б. І., Яцишин С. П., Луцик Я. Т. (2017). Розумні вимірювальні засоби для кіберфізичних систем. Вимірювальна техніка та метрологія. – № 77. – С. 3–17.
10. Ван Чунжі Кіберфізичні системи та їх програмне забезпечення / Ван Чунжі, Яцишин С. П., Лиса О. В., Мідик А-В. В.// Вимірювальна техніка та метрологія. - № 79 (1).- 2018 р. - С.34-38.
11. Paper-based immunosensors: current trends in the types and applied detection techniques / G. Zhu, X. Yin, D. Jin, B. Zhang, Y. Gu, Y. An // *Trends in Analytical Chemistry*. – 2019. – Vol. 111. – P. 100-117.
12. Jiang X. Electrochemical impedance biosensor with electrode pixels for precise counting of CD4+ cells: A microchip for quantitative diagnosis of HIV infection status of AIDS patients [Text] / X. Jiang, M. Spencer // *Biosensors and Bioelectronics*. – 2010. – Vol. 25, Issue 7. – P. 1622-1628.
13. Characterization of Cyber-Physical Sensor Systems [Text] / [C. Berger, A. Hees, S. Braunreuther, G. Reinhart] // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 41. – P. 638-643.
14. Стрихалюк Б.М. Кіберфізичні технології моніторингу стану кардіологічних пацієнтів в системі телемедицини / Б.М. Стрихалюк, Р.С. Колодій, М.В. Секела // *Штучний інтелект*. – 2016. – С. 144-150.
15. Shabut Antesar M. An intelligent mobile-enabled expert system for tuberculosis disease diagnosis in real time / Antesar M. Shabut, Marzia Hoque Tania, Khin T. Lwin та ін.// *Expert Systems With Applications*. – 2018. – С. 65-77.
16. Ashish Choudhari, Harini Ramaprasad, Tamal Paul / Stability of a Cyber-Physical Smart Grid System using Cooperating Invariants
17. M. S. Branicky. Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 43(4):475–482, 1998.
18. H. Ye, A. N. Michel, and L. Hou. Stability analysis of systems with impulse effects. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 43(12):1719– 1723, 1998.
19. H. Ye, A. N. Michel, and L. Hou. Stability theory for hybrid dynamical systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 43(4):461–474, 1998.
20. T. Paul, J. Kimball, M. Zawodniok, T. Roth, and B. McMillin. Invariants as a unified knowledge model for cyber-physical systems. In *Service- Oriented Computing and Applications (SOCA)*, 2011 IEEE International Conference on, pages 1 –8, dec. 2011.
21. T. Paul. Unified Knowledge Model for Stability Analysis in Cyber Physical Systems. Missouri University of Science and Technology, 2012.
22. Shi Tianjin , Wu Xu, Guan Jizhen, Chen Yangzhou “The analysis of traffic control cyber physical systems” .” 13th COTA International Conference of Transportation Professionals (CITP-2013)” pgn0 2487- 2496.
23. Hahanov V. Cyber physical system – smart cloud traffic control [Text] / V. Hahanov, Wajeb Gharibi, L.S. Abramova, S. Chumachenko, E. Litvinova, A. Hahanova, V. Rustinov, V. Miz, A. Zhalilo, A. Ziarmand // *Proc. of the IEEE Design & Test Symposium*. – 2014. – Kiev, Ukraine. – P. 49-66. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, IEEE Xplore).
24. Chi-Un Lei, Kaiyu Wan, Ka Lok Man,” Developing a Smart Learning Environment in Universities Via Cyber-Physical Systems” *Information Technology and Quantitative Management (ITQM2013)*, vol 17 pgn0583-585.
25. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download>
26. Workshop on Cyber Physical Systems: Applications and Challenges <http://www.iith.ac.in/cpsworkshop/home> March 2013.