

ДУДА ОЛЕКСИЙ

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0000-0003-2007-1271>e-mail: oleksij.duda@gmail.com

СТАНЬКО АНДРІЙ

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0000-0002-5526-2599>e-mail: stanko.andrii@gmail.com

АРХІТЕКТУРА МЕРЕЖЕВОЇ ПЛАТФОРМИ МОНІТОРИНГУ ОБ'ЄКТІВ У КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМАХ «РОЗУМНИХ МІСТ»

На даний час активно запроваджуються системи підтримки інфраструктури «розумних міст», сформовані на основі обширного переліку інформаційних та комунікаційних технологій. Практично будь який міський об'єкт може бути збирачем, розповсюджувачем та споживачем інформації. Для забезпечення процесів формування інформаційних потоків активно використовуються кіберфізичні або «розумні» системи. В перспективі ці системи стануть основою критично важливої міської інфраструктури. Проте широкомасштабне запровадження міських кіберфізичних систем супроводжується обширним переліком невирішених задач, а активний розвиток технологій формує потребу розроблення уніфікованих інформаційно-технологічних моделей та архітектур. У роботі розглянуто головні напрямки розвитку «розумних міст». Створена класифікація кіберфізичних систем «розумних міст» і виокремлені причини ускладнення процесів створення унікальних інформаційно-технологічних структур для керування цими системами. Проведено аналіз розповсюджених підходів до формування інформаційно-технологічних архітектур для реалізації кіберфізичних систем «розумних міст». Запропоновано інформаційно-технологічну архітектуру мережевої платформи моніторингу кіберфізичних об'єктів «розумних міст», яка базується на трьох рівнях інфраструктури (кіберфізичний, мережевий та хмарний) для ефективною інтеграції сучасних парадигм обчислень (крайові, туманні та хмарні). Застосування запропонованої архітектури дозволить забезпечити розширюваність, сумісність, самоузгодженість та відтворюваність при впровадженні інноваційних «розумних» міських послуг та сервісів на базі кіберфізичних систем.

Ключові слова: інформаційно-технологічна архітектура; озера даних; розподілена система кіберфізичних пристроїв; розумні міські послуги; хмарні, туманні та крайові обчислення.

DUDA OLEKSII, STANKO ANDRII

Ternopil Ivan Pulyu National Technical University

THE NETWORK PLATFORM ARCHITECTURE FOR MONITORING OBJECTS IN CYBERPHYSICAL SYSTEMS OF SMART CITIES

Currently, systems supporting the infrastructure of "smart cities", formed on the basis of an extensive list of information and communication technologies, are being actively implemented around the world. Almost any urban object can be a collector, distributor and consumer of information. Cyber-physical or "smart" systems are actively used to ensure the processes of formation of information flows. In the future, these systems will become the basis of critically important urban infrastructure. However, at present, the large-scale implementation of urban cyber-physical systems is accompanied by an extensive list of unsolved problems, and the active development of technologies forms the part of the development of unified information technology models and architectures. The main directions of development of "smart cities" are considered in the work. A "smart cities" cyber-physical systems classification has been created and the reasons for complicating the creating unique information-technological structures processes for managing these systems have been identified. An analysis of widespread approaches to the information and technological architectures formation for the "smart cities" cyber-physical systems implementation was carried out. The network platform information technology architecture for monitoring "smart cities" cyber-physical objects is proposed, which is based on three infrastructure levels (cyber-physical, network and cloud) for the modern computing paradigms effective integration (edge, fog and cloud). Application of the proposed architecture will ensure extensibility, compatibility, self-consistency and reproducibility when implementing innovative "smart" city services and services based on cyber-physical systems.

Keywords: information technology architecture; data lakes; cyber-physical devices distributed system; smart city services; cloud, fog and edge computing.

Вступ

«Розумне місто» є функціональним та структурним прообразом міст майбутнього. При реалізації проєктів «Розумне місто» використовується велику множину інформаційних та комунікаційних технологій (ІКТ) для вдосконалення сучасних міст, забезпечення їх сталого розвитку, розширення переліку та покращення якості муніципальних послуг [1]. Водночас використовуються інформаційні технології, спрямовані на покращення стану здоров'я і якості життя громадян. Сучасні міста – це складні системи, яким притаманні взаємопов'язані різнотипові сутності, з якими щодня взаємодіють громадяни. При цьому відбувається безперервний моніторинг стану міських систем та процесів за допомогою датчиків, інтегрованих на основі значного переліку ІКТ.

Будь який міський об'єкт може бути збирачем, розповсюджувачем та споживачем інформації, наприклад, щодо енергоспоживання, мобільності, постачання ресурсів, виробничих процесів, характеристик життєвого чи навколишнього середовища тощо. Кіберфізичні системи (англ. Cyber-Physical System, CPS)

або «розумні» системи – це мережі фізичних обчислювальних пристроїв, що взаємодіють між собою. В перспективі ці системи стануть основою критично важливої міської інфраструктури, дозволять розширити перелік інноваційних «розумних» муніципальних послуг, покращать якість міського середовища та життя. За потреби, на основі кіберфізичних систем можна оперативно сформулювати та розгорнути нові муніципальні послуги, налаштувати процедури та алгоритми оцінювання стану міських систем, задіяти програмно-алгоритмічні засоби підтримки процесів прийняття рішень [2]. В «розумних містах» кіберфізичні системи використовуються для:

- створення інтерактивного та адаптивного «розумного» міського середовища;
- розширення переліку та покращення якості муніципальних послуг;
- підвищення ефективності процесів прийняття рішень;
- формування «розумної» міської інфраструктури;
- покращення характеристик процесів керування цифровими, кібернетичними та фізичними

ресурсами;

- комплексного вирішення складних міських задач та проблем;
- управління транспортом;
- підвищення енергоефективності;
- покращення здоров'я населення;
- зменшення забруднення навколишнього середовища;
- запровадження інноваційних тактильних застосунків для покращення якості життя міських жителів;
- оптимізації процесів запровадження та використання інноваційних засобів зв'язку, зокрема, 5G

тощо.

Однак, на даний час, широкомасштабне запровадження кіберфізичних систем супроводжується обширним переліком невирішених задач [3], зокрема:

- не сформований стек мережевих протоколів;
- відсутність уніфікованих підходів до формування розлогої інформаційно-технологічної архітектури;

- експоненційне зростання обсягів даних та відсутність загальноприйнятих підходів до формування засобів їх зберігання та аналітичного опрацювання;

- підвищені вимоги до безпекових характеристик та засобів.

В [4] проаналізовано інноваційні підходи до формування обчислювальної архітектури міських кіберфізичних систем, які дозволяють на різних рівнях абстракції узгодити інтеграцію процесів відбору та передавання даних, розгортання обчислювальної інфраструктури, супроводження процесів керування та підтримки прийняття рішень. Однак більшість публікацій зосереджені лише на одному окремому аспекті функціонування кіберфізичних систем і лише деякі дослідження спрямовані на формування уніфікованої архітектури для конкретного класу «розумних» міських систем. Активний розвиток нових інформаційних та комунікаційних технологій спричиняє виникнення обширного переліку нових задач, формує потребу розроблення уніфікованих інформаційно-технологічних моделей та архітектур моніторингу об'єктів у кіберфізичних системах «розумних міст».

Об'єкт дослідження – розподілені системи управління кіберфізичними пристроями, які використовуються у «розумних містах».

Предмет дослідження – методи та засоби створення розподілених систем управління кіберфізичними пристроями, результати яких будуть використані для покращення процесів формування «розумних» міських сервісів та міжсистемних взаємодій між компонентами кіберфізичних систем.

Мета роботи – розробити архітектуру мережевої інформаційно-технологічної платформи для оперативного моніторингу об'єктів у кіберфізичних системах «розумних міст», використання якої буде забезпечувати можливість оперативно масштабувати системні характеристики, здійснювати їх удосконалення та функціональне розширення. Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження: розробити спосіб організації міських мережевих інформаційно-технологічних платформ з використанням стеку сучасних інформаційних та комунікаційних технологій і інноваційних підходів до зберігання та аналітичного опрацювання даних.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – вперше розроблено архітектуру міських розподілених систем управління кіберфізичними пристроями з використанням хмарних, туманних, крайових обчислювальних засобів та озер даних, що дало змогу оптимізувати процеси проектування при розгортанні кіберфізичних систем «розумних міст».

Практична значущість результатів дослідження – розроблено спосіб організації багаторівневих інформаційно-технологічних архітектур різнотипових кіберфізичних систем «розумних міст», які дають змогу здійснити формування «розумних» міських послуг.

Напрямки розвитку «розумних міст»

Досі не існує універсального визначення «розумного міста». У різних локаціях та регіонах громадяни та урядові установи по-різному трактують значення цього терміну. Країни формують власні переліки вимог до міст завдяки різному ступеню готовності до запровадження реформ. Внаслідок стрімкого зростання процесів міграції населення до міських агломерацій урядові установи стикаються з широким

переліком складнощів [5]. Завдяки інформаційно-технологічному прогресу практично всі галузі людської діяльності піддаються цифровій трансформації та практично в кожній сфері використовується термін «розумний». Відповідно зростає роль цифровізації для покращення інфраструктурної підтримки процесів надання інституційних, соціальних та фізичних послуг.

Дослідники [6] розглядають цифрову трансформацію як перспективне вирішення множини поточних та перспективних міських задач, оскільки вона спрямована на «розумне» урядування, «розумні» інформаційні та комунікаційні технології, «розумне» міське середовище, «розумні» будівлі, «розумний» транспорт тощо. Автори [7] вважають ІКТ основою будь-якої «розумної» міської ініціативи. Активно запроваджуються системи підтримки інфраструктури «розумного міста», зокрема, сенсорні мережі, IoT, бездротові пристрої та давачі, муніципальні центри аналітичного опрацювання даних тощо. Вони є критично важливими інфраструктурними елементами при формуванні ключових послуг «розумних міст» – прототипу комфортного середовища проживання громадян. Інноваційні проекти «розумних міст» є новою сферою можливостей для обширного кола зацікавлених сторін, муніципалітетів, інфраструктурних компаній та забудовників [8]. Проекти «розумних міст» залучатимуть значні інвестиції та обширний перелік ІКТ для формування довготривалих, надійних та безпечних рішень, забезпечення стабільного розвитку та кращих зручностей для міських жителів та громадян.

Відповідно до [9] «розумне місто» потрібно розглядати як складну екосистему послуг та інфраструктур, формуючи при цьому цілісне уявлення, що поєднує різнотипові та різнорідні послуги, ІКТ для забезпечення глобального вирішення міських проблем. Зазвичай концепт «розумного міста» містить підсистеми, оснащені «розумними» ІКТ, зокрема, «розумний» транспорт, «розумну» енергетику, «розумну» освіту, «розумну» охорону здоров'я, «розумне» управління та урядування, «розумні» довкілля та утилізацію відходів тощо [10]. Традиційно [11] «розумне місто» формується на основі набору ключових напрямків діяльності (див. рис. 1).

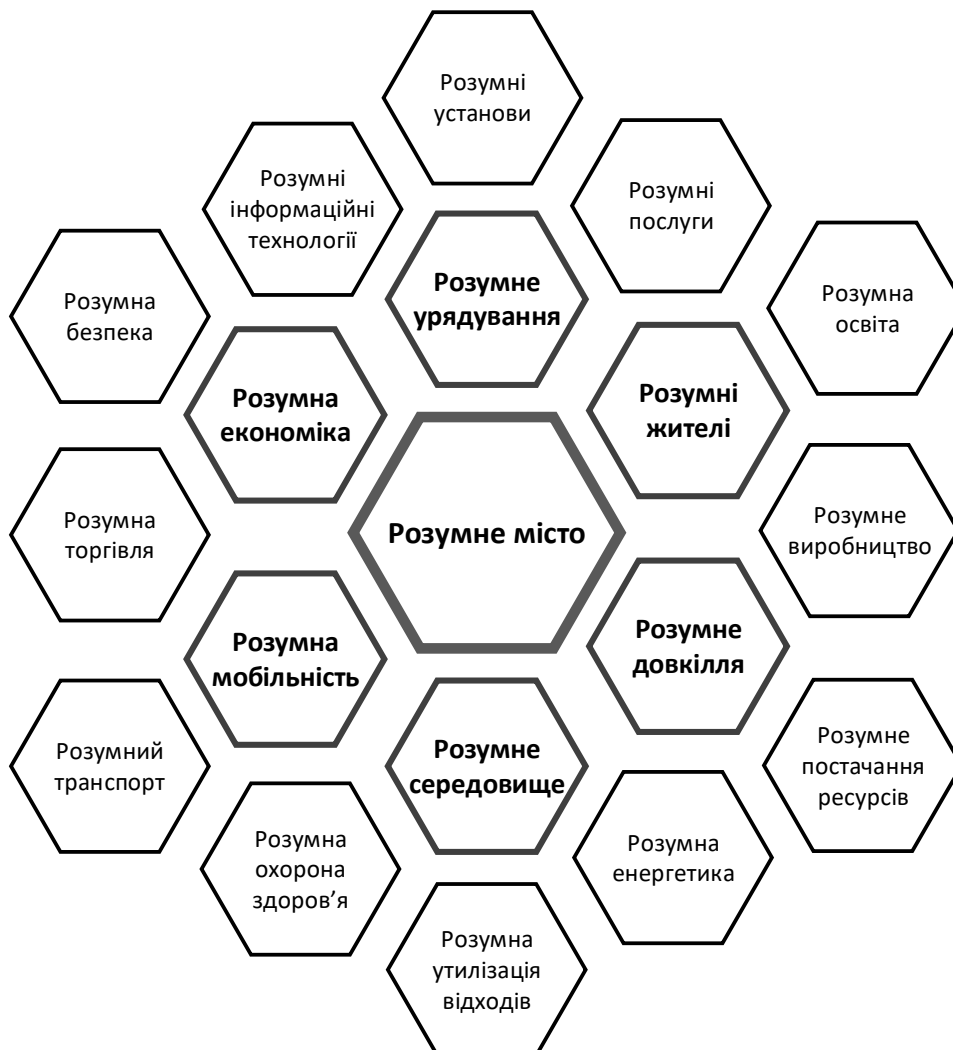


Рис. 1. Ключові напрямки діяльності «розумного міста»

«Розумне» урядування передбачає використання муніципальними та державними установами та службами інноваційних цифрових платформ та онлайн-послуг на основі ІКТ. Для забезпечення прозорості процесів, ефективного відстеження та високого рівня безпеки всі міські політики та проекти

запроваджуються, супроводжуються та підтримуються за допомогою ІКТ. «Розумне» урядування забезпечує гнучкість динамічного оновлення муніципальної політики та оперативність формування нормативних актів на основі даних, отриманих та опрацьованих у режимі реального часу з дотриманням моделі «громадяни на першому місці» та активнішого залучення громадян [12].

«Розумні» жителі активно, безпечно і конфіденційно приймають участь у процесах розвитку нації на різних ініціативних рівнях. При цьому не повинно бути жодних упереджень чи нерівностей. Кіберфізичні системи можна використовувати для формування «розумних» спільнот, а зібрані таким способом дані можуть використовуватись для глибшого розуміння реальних потреб міських жителів [13].

«Розумне» довкілля – це середовище з вбудованими давачами, які безперервно збирають та передають дані для забезпечення кращого розуміння змін параметрів навколишнього середовища в режимі реального часу, зокрема, температуру, тиск, вологість, наявність домішок в повітрі, воді та ґрунті тощо. «Розумне» середовище є невід’ємною частиною будь-якого «розумного міста». При цьому використовуються ІКТ для автоматизації заходів оперативного коригування різних викидів при перевищенні порогових меж будь-якого параметра. Оперативний моніторинг навколишнього середовища відбувається за допомогою спеціалізованих кіберфізичних систем [14].

Концепція «розумного» життєвого середовища базується на створенні умов для підтримання здоров’я громадян, екологічного та якісного середовища. На даний час кіберфізичні системи активно використовуються при розробці автоматизованих «розумних» житлових приміщень. «Розумні» будівлі та життєві простори можуть масштабуватися за потреби для розміщення більшої кількості жителів. Вони функціонують та адаптуються за допомогою алгоритмів, що працюють на основі штучного інтелекту та машинного навчання [15].

«Розумна» мобільність спрямована на автоматизацію процесів управління міськими транспортними потоками за допомогою вбудованих у транспортну інфраструктуру давачів та виконавчих кіберфізичних пристроїв. Концепція «розумної» мобільності забезпечує ефективне керування дорожнім рухом та оперативне інформування про затори, забезпечуючи оперативний, безпечний та безперешкодний проїзд транспортних засобів екстрених служб. Оптимальні маршрути формуються та оперативно передаються «розумній» інфраструктурі для підвищення ефективності управління, забезпечення мобільності обширної спільноти міських жителів та підвищення екологічності транспорту [16].

«Розумна» економіка стимулює інновації та технологічний розвиток на основі наукових досліджень для досягнення економічних переваг, добробуту та формування «розумного» міського середовища. Це забезпечує рівні економічні можливості для всіх зацікавлених сторін, зокрема, міських мешканців, урядових установ, постачальників послуг тощо [17].

Крім розглянутих, є значний перелік актуальних для «розумних міст» напрямків розвитку, зокрема, «розумна» енергетика, «розумне» виробництво, «розумне» постачання ресурсів, «розумна» охорона здоров’я, «розумний» транспорт тощо.

Кіберфізичні системи «розумних міст»

Невпинно відбувається поширення кіберфізичних систем у виробничих та наукових колах. Кіберфізичні системи – це складні, гетерогенні, розподілені системи, завдяки яким відбувається взаємодія між кібернетичними компонентами, наприклад, давачами, виконавчими механізмами, центрами керування, і фізичними процесами, наприклад, контроль параметрів житлових приміщень, керування транспортним трафіком, виявлення надзвичайних ситуацій чи пожеж тощо. У статті [18] кіберфізичну систему означено як інформаційну систему, в якій інтегровано обчислювальні та комунікаційні засоби і фізичні процеси для оперативного моніторингу та контролю фізичного середовища. Поширення кіберфізичних систем пов’язане з появою Інтернету речей (англ. Internet of Things, IoT) – обширної множини пристроїв з обмеженими обчислювальними можливостями, які передають інформацію та надають послуги завдяки Інтернету та стеку протоколів TCP/IP.

Активний розвиток кіберфізичних систем охопив різнотипові домени і спричинив створення програмно-алгоритмічних застосунків у різних господарських галузях. На даний час сформовано велику множину різнотипових кіберфізичних систем «розумних міст» (див. рис. 2). У «розумних містах» кіберфізичні системи використовуються для реалізації процесів збору та обміну даними в режимі реального часу. Це передбачає складну інтеграцію обширної множини різнотипових пристроїв, зокрема, давачів, приводів, мікроконтролерів, засобів мобільного зв’язку, серверного обладнання, мережевої та хмарної інфраструктури.

Кіберфізичні системи передають дані до центральних систем для опрацювання, співставлення та прийняття рішень щодо активації виконавчих механізмів чи інформування громадян, муніципальних установ та організацій. Вони зазвичай працюють поруч із багатьма іншими кіберфізичними системами, наприклад, «розумними» системами вентиляції та кондиціонування, «розумними» транспортними засобами, «розумними» виробничими лініями, «розумними» будівлями, «розумною» інфраструктурою тощо.

Це ускладнює або навіть унеможливує створення унікальних інформаційно-технологічних структур для керування кіберфізичними системами через ряд причин, зокрема:

- Обладнання та фізичні середовища належать певній групі приватних, муніципальних чи державних власників, які можуть вільно робити власний вибір відповідно до різних факторів, зокрема, фінансових, законодавчих, бюрократичних обмежень тощо.
- Реалізовані у різний час кіберфізичні системи, використовують різні стеки інформаційних та комунікаційних технологій.

- Несумісність з раніше розгорнутими інформаційними технологіями.



Рис. 2. Киберфізичні системи «розумних міст»

Об'єднання кіберфізичних систем – це новий напрямок сучасних наукових досліджень, який дозволяє керувати, координувати та організовувати інтегровані кіберфізичні системи, давачі, виконавчі механізми та ресурси для створення високоякісних «розумних» міських послуг [9]. Складні кіберфізичні системи «розумних міст» формуються з множини менших систем, що належать до різних адміністративних чи територіальних доменів, наприклад, різним приватним власникам або конгломерації приватних і державних власників на основі федеративного кооперативного підходу [19]. В процесі об'єднання залучені домени повинні узгодити рівні доступу та обслуговування, що використовуються для співпраці. Комплекс кіберфізичних систем (див. рис.3) є новим етапом розвитку «розумних міст», який можна розширити до більших територіальних та галузевих формацій. Для прикладу, він може представляти «розумний» соціополіс, «розумний» регіон або «розумну» країну тощо.

Федеративна взаємодія між кіберфізичними системами забезпечує ряд переваг, зокрема:

- дозволяє розширити та збільшити набори даних для узагальнення та аналітичного опрацювання;
- забезпечує спільне використання обчислювальних ресурсів між кіберфізичними системами;
- створює обчислювальну інфраструктуру з використанням крайових (англ. Edge), туманних (англ. Fog) та хмарних (англ. Cloud) обчислень без збільшення фінансових витрат для власників кіберфізичних систем.

Переваги співпраці між кіберфізичними системами «розумних міст» формують інноваційні можливості реалізації мережевих інформаційно-технологічних платформ і застосунків, які покращують умови проживання громадян. Це сформувало потребу у проектуванні інформаційно-технологічної архітектури мережевої платформи моніторингу об'єктів у складних кіберфізичних системах «розумних міст» на основі множини сучасних інформаційних та комунікаційних технологій.

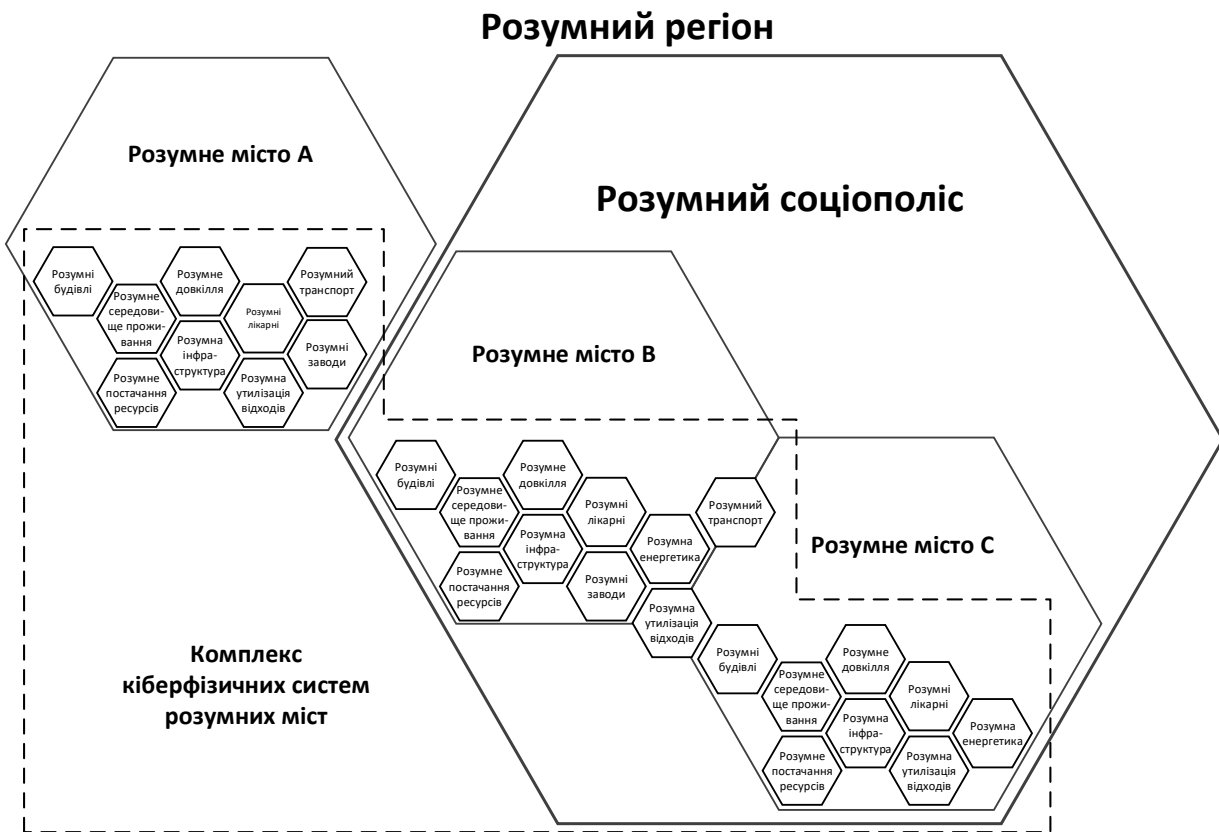


Рис. 3. Комплекс кіберфізичних систем «розумних міст»

Проектування інформаційно-технологічної архітектури мережевої платформи моніторингу об'єктів у кіберфізичних системах «розумних міст»

Процес проектування традиційно вважається найважливішим етапом при розгортанні кіберфізичних систем «розумних міст» завдяки безпосередньому впливу на їх продуктивність. На даний час не існує загальноприйнятого підходу формування різнотипових застосунків на основі кіберфізичних систем. У [9] було проаналізовано обширний перелік інформаційно-технологічних архітектур, зокрема:

- хмарна архітектура;
- архітектура на основі сервісно-орієнтованих систем (англ. Service-Oriented Architecture, SOA)
- багаторівнева архітектура тощо.

Зазначені інформаційно-технологічні архітектури здебільшого залежать від:

- системних вимог, наприклад, функціонування в режимі реального часу, стійкість, надійність, безпека, тощо;
- особливостей галузі застосування, наприклад, «розумні будівлі», «розумне» середовище проживання, «розумне» довкілля, «розумне» постачання ресурсів, «розумне» виробництво, тощо.

Багаторівневі та сервіс-орієнтовані інформаційно-технологічні архітектури практично найпоширеніші у всіх класах кіберфізичних систем «розумних міст». Здебільшого вони зосереджені на аналітичному опрацюванні великих даних і хмарних обчисленнях завдяки швидкому зростанню множини застосованих для кіберфізичних систем методів аналізу даних. Водночас, моделювання інформаційно-технологічної архітектури ускладнюється за рахунок неоднорідності даних та безпекових аспектів, спричинених внутрішньою неоднорідністю кіберфізичних систем «розумних міст», їх одночасністю та чутливістю до синхронізації. На основі [20] можемо зробити висновок, що переважна більшість моделей інформаційно-технологічної архітектури кіберфізичних систем «розумних міст» зосереджена лише на одному окремому їх аспекті і лише деякі спрямовані на формування уніфікованої архітектури для конкретного класу систем. Доцільно зазначити, що практично всі дослідження зосереджені на моделюванні кібернетичної частини інформаційно-технологічної архітектури, тому доцільно змоделювати узагальнену інформаційно-технологічну архітектуру мережевої платформи моніторингу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст».

Сформуємо інформаційно-технологічну архітектуру мережевої платформи моніторингу об'єктів з трьох інфраструктурних рівнів: кіберфізичного, мережевого та хмарного (див. рис.4). У лівій частині діаграми виокремлено обчислювальні рівні: крайовий, туманний та хмарний. В основі запропонованої інформаційно-технологічної архітектури знаходиться рівень кіберфізичної інфраструктури, де розташовані IoT-пристрої та IoT-давачі, що забезпечують взаємодію з фізичними компонентами та процесами.

Всі кіберфізичні системи «розумного міста» потребують формування надійної мережевої

інфраструктури для ефективного обміну повідомленнями між їх елементами систем. Для цього потрібно використовувати множини різноманітних мережевих та комунікаційних технологій, оскільки вони застосовуються для різних масштабів.

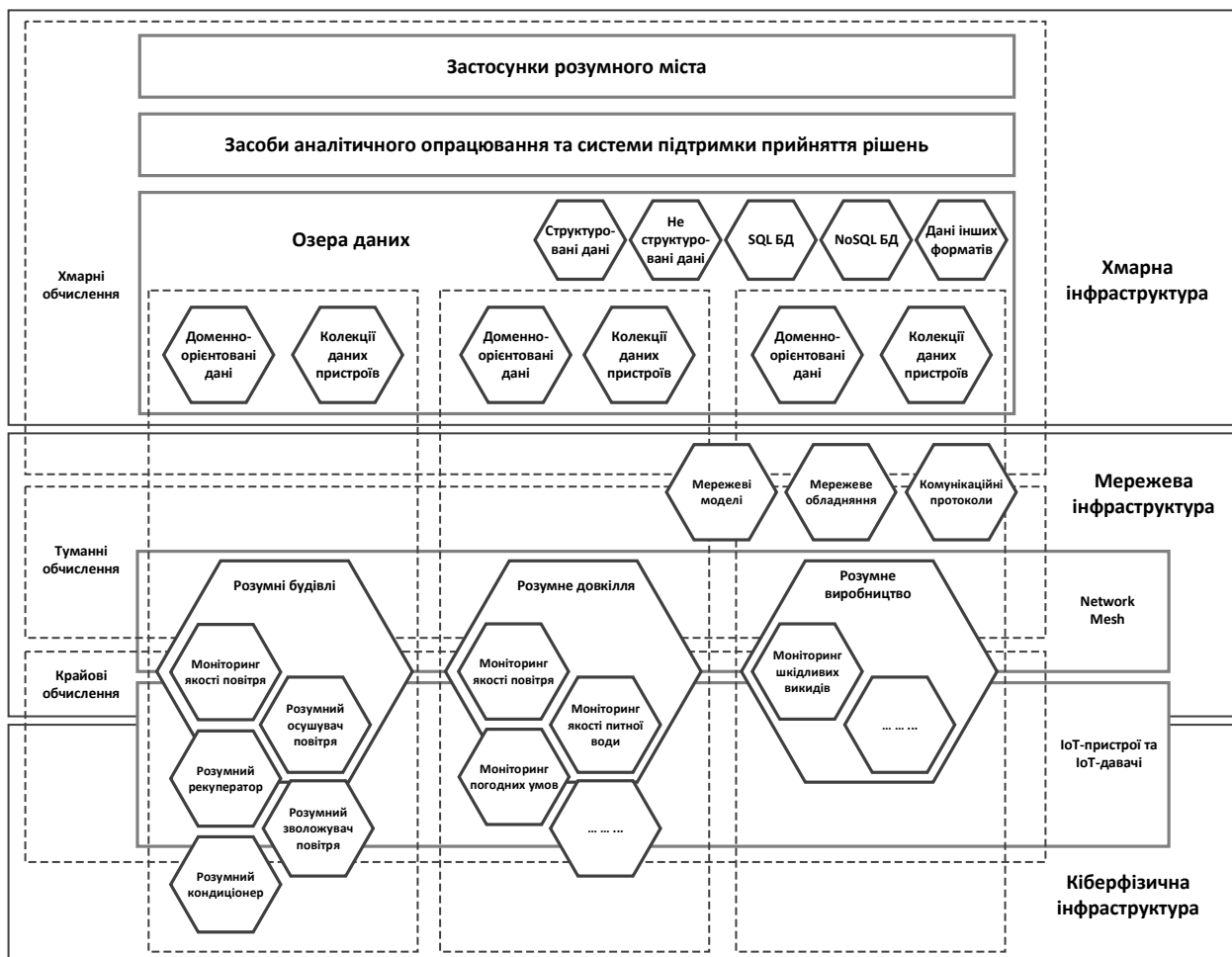


Рис. 4. Інформаційно-технологічна архітектура мережевої платформи моніторингу об'єктів у кіберфізичних системах «розумних міст»

Наприклад, послуги «розумних» будинків реалізуються на основі мережевих протоколів Zigbee, Wireless M-Bus або Bluetooth. Водночас, сервіси «розумного» довкілля здебільшого реалізуються з використанням мережевого протоколу WiMAX, а для «розумного» виробництва використовуються мережеві протоколи Modbus, PROFINET, OPC UA, EtherCAT, CAN, HART тощо. Послуги «розумного міста» можуть використовувати різні мережеві та комунікаційні моделі та рішення. Для формування інформаційно-технологічної архітектури мережевої платформи моніторингу об'єктів у кіберфізичних системах «розумних міст» можна використати «Network mesh». Для IoT-пристроїв та IoT-давачів з обмеженими можливостями, цей топологічний варіант побудови комп'ютерних мереж матиме ряд обмежень, проте він дозволить налаштувати мережеві засоби для контролю туманних та крайових обчислень, диференціюючи поведінку окремих кіберфізичних пристроїв відповідно до їх обчислювальних спроможностей. Отримані за допомогою IoT-пристроїв та IoT-давачів дані надсилаються на хмарний рівень та зберігаються у відкритих озерах даних, де вони проходять процеси формування метаданих та аналітичного опрацювання для потреб рекомендаційних систем та застосунків «розумного міста».

Реалізація інформаційно-технологічної архітектури мережевої платформи моніторингу об'єктів у кіберфізичних системах «розумних міст» є фундаментальним кроком до перетворення сучасних міст на «розумні міста майбутнього». Завдяки розширюваності, сумісності, самоузгодженості та відтворюваності, запропонована інформаційно-технологічна архітектура мережевої платформи дозволяє зменшити обсяги робіт щодо створення та керування кіберфізичними системами та підвищити ефективність процесів керування фізичними аспектами міського життя, наприклад, моніторинг параметрів «розумних» будівель та приміщень, моніторинг погоди, контроль «розумної» інфраструктури. На даний час кіберфізичні системи «розумних міст» є оптимальною інформаційно-технологічною інфраструктурою, для якої можна ефективно застосовувати принципи хмарного континууму [21] з використанням хмарних, туманних та крайових обчислювальних засобів.

Висновки

У роботі було досліджено ключові напрямки розвитку «розумних міст». При цьому підкреслено

значимість цифрової трансформації як перспективного вирішення множини сьогочасних та перспективних міських задач. Подано характеристичні описи ключових напрямків розвитку «розумних міст».

Також було досліджено кіберфізичні системи «розумних міст» та сформовано їх класифікацію, подану в графічній формі. Виокремлено причини ускладнення процесів створення унікальних інформаційно-технологічних структур для керування кіберфізичними системами «розумних міст». Розглянуто переваги комплексної федералізації міських кіберфізичних систем.

Проаналізовано поширені підходи до формування інформаційно-технологічних архітектур при розгортанні кіберфізичних систем «розумних міст». На основі трьох інфраструктурних рівнів сформовано інформаційно-технологічну архітектуру мережевої платформи моніторингу кіберфізичних об'єктів «розумних міст». Для цього задіяно кіберфізичний, мережевий та хмарний рівні, які дозволять ефективно інтегрувати сучасні парадигми крайових, туманних та хмарних обчислень. Практична реалізація запропонованої інформаційно-технологічної архітектури мережевої платформи моніторингу об'єктів дозволить забезпечити розширюваність, сумісність, самоузгодженість та відтворюваність у процесі запровадження інноваційних «розумних» міських послуг та сервісів на основі кіберфізичних систем.

Література

1. Chen Z., Chan I. C. C. Smart cities and quality of life: a quantitative analysis of citizens' support for smart city development. *Information Technology & People*, 36(1). 2023. P. 263–285.
2. Tyagi A. K., Sreenath N. Cyber Physical Systems: Analyses, challenges and possible solutions. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 1. 2021. P. 22–33.
3. Ahmad M. O., Ahad M. A., Alam M. A., Siddiqui F., Casalino G. Cyber-physical systems and smart cities in India: Opportunities, issues, and challenges. *Sensors*, 21(22), 7714. 2021.
4. Ouchani S. Ensuring the Functional Correctness of IoT through Formal Modeling and Verification. *LNCS, Model and Data Engineering*. 2018. P. 401–417.
5. Jha P., Iqbal M. A perspective on migration and community engagement in Smart Cities. *Smart Cities—Opportunities and Challenges*; Springer: Singapore. 2020. P. 521–526.
6. Wu D., Xie Y., Lyu S. Disentangling the complex impacts of urban digital transformation and environmental pollution: Evidence from smart city pilots in China. *Sustainable Cities and Society*, 88, 104266. 2023.
7. Vedantham L.S., Zhou Y., Wu J. Information and communications technology (ICT) infrastructure supporting smart local energy systems: A review. *IET Energy Systems Integration*, 4(4). 2022. P. 460–472.
8. Aithal P.S. Ict and digital technology based solutions for smart city challenges and opportunities. *International Journal of Applied Engineering and Management Letters (IJAEML)*, 6(1). 2022. P. 1–21.
9. Puliafito A., Tricomi G., Zafeiropoulos A., Papavassiliou S. Smart cities of the future as cyber physical systems: Challenges and enabling technologies. *Sensors*, 21(10). 2021. P. 3349.
10. Ammara U., Rasheed K., Mansoor A., Al-Fuqaha A., Qadir J. Smart cities from the perspective of systems. *Systems*, 10(3), 77. 2022.
11. Ahmad M., Ahad M., Alam M., Siddiqui F., Casalino G. Cyber-physical systems and smart cities in India: Opportunities, issues, and challenges. *Sensors*, 21(22). 2021. P. 7714.
12. Razaghi M., Finger M. Smart governance for smart cities. *Proceedings of the IEEE*, 106(4). 2018. P. 680–689.
13. Do Q., Martini B., Choo K. Cyber-physical systems information gathering: A smart home case study. *Computer Networks*, 138. 2018. P. 1–12.
14. Kalluri B., Chronopoulos C., Kozine I. The concept of smartness in cyber-physical systems and connection to urban environment. *Annual Reviews in Control*, 51. 2021. P. 1–22.
15. Pinto G., Wang Z., Roy A., Hong T., Capozzoli A. Transfer learning for smart buildings: A critical review of algorithms, applications, and future perspectives. *Advances in Applied Energy*, 5, 100084. 2022.
16. Elshenawy M., Abdulhai B., El-Darieby M. Towards a service-oriented cyber-physical systems of systems for smart city mobility applications. *Future Generation Computer Systems*, 79. 2018. P. 575–587.
17. Qian Y., Liu J., Cheng Z., & Forrest J. Does the smart city policy promote the green growth of the urban economy? Evidence from China. *Environmental Science and Pollution Research*, 28. 2021. P. 66709–66723.
18. *Cyber Physical Systems Conceptual Map*, Berkeley. URL: <http://CyberPhysicalSystems.org>.
19. Tricomi G., Merlino G., Longo F., Salvatore D., Puliafito A. Software-defined city infrastructure: A control plane for rewirable smart cities. In *2019 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*. 2019. P. 180–185.
20. Aguida M., Ouchani S., Benmalek M. A review on cyber-physical systems: models and architectures. In *2020 IEEE 29th International Conference on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises (WETICE)*. 2020. P. 275–278.
21. Bittencourt L., Immich R., Sakellariou R., Fonseca N., Madeira E., Curado M., Rana O. The internet of things, fog and cloud continuum: Integration and challenges. *Internet of Things*, 3. 2018. P. 134–155.