

КАРІТЕЛ 2 / CHAPTER 2²

SYNERGY OF SYSTEMS - SOCIO-CYBER-PHYSICAL SYSTEMS (SCPS)

DOI: 10.30890/2709-2313.2024-33-00-021

Вступ. Історичні аспекти еволюції комп'ютерних систем. Зміна парадигм комп'ютеризації.

Нині ми маємо змогу спостерігати еволюцію комп'ютерних систем, що відбивається у зміні парадигм комп'ютеризації. Ці процеси описувались у роботах [5,6]. Зміна відзначалась зміною вимог користувачів до комп'ютерних систем. Виокремлюють три основні характеристики, які впливали на ці процеси, показано на рисунку¹. Це швидкодія, інтерфейс систем і вимоги до розміщення та доступу до даних.

У перших комп'ютерах основною вимогою було підвищення обчислювальних можливостей, тому ці системи називали обчислювальними системами (ОС).

На наступному етапі, який пов'язаний із розвитком мережових технологій, на перше місце виходять вимоги дистанційного доступу до даних **"тут і зараз"**. На цьому етапі комп'ютерні системи (КС) починають називати інформаційними системами (ІС).

Наступний етап пов'язаний з інтелектуалізацією (стандартизацією) інтерфейсів систем, які стали називати інтелектуальними інформаційними системами (ІІС).

Подальший крок, який передував СКФС, був визначений як соціо-технологічні (технічні) системи (СТС), в яких передбачалась активна участь ресурсів користувачів у соціальних мережах Інтернет, і яку називали **"система систем"**. СТС зумовили появу сучасних СКФС за рахунок розширення структурно-функціональних можливостей, стисло наведених в таблиці на рисунку¹.

Можна говорити про кілька **основних технічних передумов**, які зробили

²*Authors: Kosolapov Anatolii, Yehorov Oleh, Parpalita Alexander*



СКФ можливими:

Перша - зростання кількості пристроїв із вбудованими процесорами і засобами зберігання даних: сенсорні мережі, що працюють у всіх протяжних технічних інфраструктурах: медичне обладнання; «розумні» будинки тощо.

Друга - інтеграція, що дає змогу досягти найбільшого ефекту шляхом об'єднання окремих компонентів у великі системи: Інтернет речей (IoT), World Wide Sensor Net, «розумні» середовища проживання (Smart Building Environment), оборонні системи майбутнього.

Третя - обмеження когнітивних здібностей людини, які еволюціонують повільніше, ніж машини. У зв'язку з цим неодмінно настає момент, коли люди вже не в змозі впоратися з обсягом інформації, необхідної для ухвалення рішень і якусь частину дій потрібно передати CPS, вивівши людину з контуру управління (human out of loop). Водночас у низці випадків CPS можуть посилити аналітичні здібності людини, тому є потреба у створенні інтерактивних систем нового рівня, що зберігають людину в контурі управління (human in the loop), тобто СКФС – Соціо-Кібер-Фізичні Системи.

ЕТАПИ РОЗВИТКУ ПАРАДИГМ КОМП'ЮТЕРИЗАЦІЇ				
Обчислювальні системи (ОС)	Інформаційні системи (ІС)	Інтелектуальні системи (ІПС)	Соціо-технічні системи (СТС)	Соціо-кібер-фізичні системи (СКФС)
Швидкодія	Доступ до даних («тут і зараз»)	Інтелектуальний інтерфейс	Інтелектуальний інтерфейс	Смарт-системи (підприємство, дім, будівля)
Інтерфейс	Інтерфейс	Доступ до даних («тут і зараз»)	Доступ до даних в соц.мережах	Інтернет-людей, Інтернет-речей, Інтернет-сервісів
Доступ до даних	Швидкодія	Швидкодія	Швидкодія	СИСТЕМИ-СИСТЕМ («підключайся і працюй»)

Рисунок 1 – Еволюція парадигм комп'ютеризації



2.1. Визначення соціо-кібер-фізичних систем та їх склад

Що таке соціо-кібер-фізична система (СКФС, SCPS)?

Дати повне закінчене визначення соціо-кібер-фізичної системи не так просто з огляду на те, що її структури або склад компонентів постійно уточнюються.

Зустрічаються різні визначення від тривіальних типу "це смарт лопата" на Ютубі до різних визначень у національних Вікіпедіях.

В українській Вікі [1] КФС зветься **механізмом**, що контролюється або відстежується комп'ютерними алгоритмами і тісно пов'язаний з Інтернетом та його користувачами (?).

Примітка (?); є ознакою, на думку авторів, сумнівності використання певного терміну.

Кібер-фізична система в СНД [2] визначається як інформаційно-технологічна **концепція**, що передбачає інтеграцію обчислювальних ресурсів у фізичні сутності... будь-якого виду, включно з біологічними та рукотворними (?) об'єктами. КФС обчислювальна компонента (?) розподілена по всій фізичній системі, яка є її носієм (?), і синергетично пов'язана з її складовими елементами. Тут з'являється важливе поняття «синергія».

В англomовній Вікі [3] кібер-фізичні системи (CPS) - **це системи керування (!), які інтегрують обчислювальні та фізичні процеси (синергія !), з вбудованими комп'ютерами та мережами (?), що здійснюють моніторинг та керування фізичними системами в режимі реального часу (особливості роботи !).** У кібер-фізичних системах фізичні та програмні компоненти тісно переплетені, здатні працювати в **різних просторових та часових масштабах (розподілені структури в часі і просторі !)**, демонструвати множинні та відмінні поведінкові модальності та взаємодіяти один з одним способами, що **змінюються залежно від контексту (адаптованість !).** КФС включає в себе транс дисциплінарні підходи, **об'єднуючи теорію кібернетики, механотроніки, дизайну та науки про процеси (в цьому визначенні з'являється важлива компонента, яка є найважливішою характеристикою кібер-фізичних систем –**



кібернетика (!).

Наступне визначення [3] . Cyber-Physical System, CPS) - це системи, які складаються з різноманітних природних об'єктів, штучних підсистем і керівних контролерів, що дають змогу уявити таке утворення як єдине ціле. Тобто це **СИСТЕМА СИСТЕМ**.

В даному випадку йдеться про гармонійне співіснування двох типів моделей. З одного боку - це традиційні інженерні моделі (механічні, будівельні, електричні, біологічні, хімічні, економічні та інші), а з іншого - моделі комп'ютерні.

Попередниками CPS можна вважати вбудовані системи реального часу, розподілені обчислювальні системи, автоматизовані системи управління технологічними процесами та об'єктами, бездротові сенсорні мережі.

Деякі зауваження. З технічного погляду CPS мають багато спільного зі структурами типу Grid, які реалізують за допомогою Інтернету речей (Internet of Things, IoT), Індустрії 4.0, промислового Інтернету речей (Industrial Internet), між машинної взаємодії (Machine-to-Machine, M2M), туманного та хмарного комп'ютингу (fog і cloud computing) [4,10,11].

Але цими технічними засобами в жодному разі не можна обмежувати уявлення про СКФС. Для цих складних систем потрібні нові кібернетичні підходи до моделювання, оскільки саме **моделі є центральним моментом у науці та інженерії** [4,14].

Німецька академія Acatech говорить про перспективи національних кібер-фізичних платформ, які складаються з трьох типів мереж: - Інтернет людей - Інтернет речей - Інтернет сервісів [4].

Перспективи появи кібер-фізичних систем і формування на їхній основі Індустрії 4.0 зачіпають інтереси суспільства загалом, тому їх слід розглядати не тільки в технічному, а й у ширшому соціо-культурному аспекті, з урахуванням демографічних та інших змін, що відбуваються.

Сфера застосування CPS поширюється практично на **всі види людської діяльності**, включно з усім різноманіттям промислових систем, транспортних,



енергетичних та військових систем, усіма видами систем життєзабезпечення від медицини до «розумних» будинків і міст, а також багатьма економічними системами. Тобто, на нашу думку, необхідно говорити про соціо-кібер-фізичні системи – SCPS (СКФС) [8].

Створення повноцінних соціо-кібер-фізичних систем у перспективі призведе приблизно до таких самих змін у взаємодії з фізичним світом, як ті, до яких призвела свого часу Всесвітня мережа Інтернет.

І це дуже важливо. Національний науковий фонд США (NSF) визначив кібер-фізичні системи як ключову сферу досліджень [13]. Починаючи з кінця 2006 року, NSF та інші федеральні агентства США спонсорували кілька семінарів з кібер-фізичних систем.

Склад СКФС як системи систем зображено на рисунку 2.

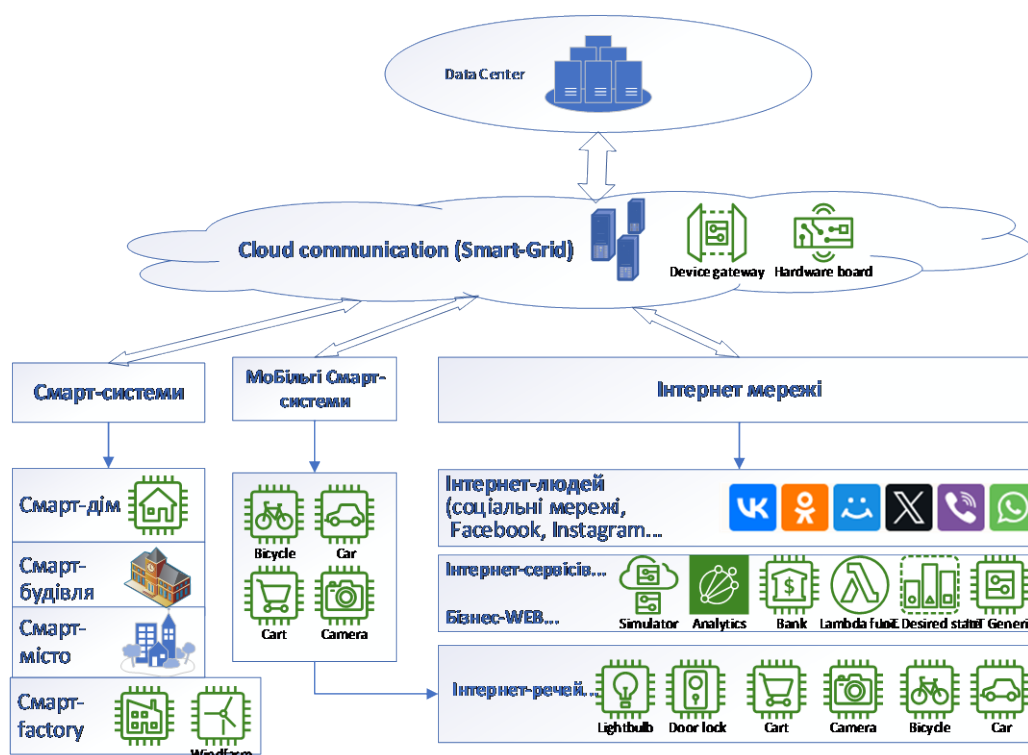


Рисунок 2 - СКФС як система систем

2.2. Загальна специфікація індустріальних СКФІС. Залізнична сортувальна станція як приклад об'єкту для впровадження СКФІС

СКФІС визначаються як "системи взаємодіючих обчислювальних об'єктів,



які знаходяться в інтенсивному зв'язку з навколишнім фізичним світом і процесами, що в ньому відбуваються, надаючи і використовуючи при цьому послуги доступу до даних і обробки даних, доступні в Інтернеті" [13] .

Хоча сфери застосування **СКФІС** варіюються від медицини до "розумних" будівель, ми зосередимося на індустриальних застосуваннях **СКФІС**, які відносяться до сфери Індустрії 4.0. На рисунках 2 і 5 зображено концепцію того, як **СКФІС** об'єднує різні компоненти в одну систему, що базується на концепціях Індустрії 4.0. Концепція на рисунках 2 і 6 - це спрощений погляд на **СКФІС**, що фокусується на ключових компонентах і технологічних аспектах. Як така, вона, наскільки нам відомо, є репрезентативним спрощенням - або узагальненням - різних існуючих визначень і еталонних архітектур.

На рисунку 4 показано, що **СКФІС** складається з таких ключових компонентів:

- а) фізичні об'єкти (також позначені як фізичні активи),
- б) цифровий двійник фізичного об'єкта відчепа (групи вагонів) і промислові застосування (функціональні програмні блоки - ФПБ), а також ключові технологічні аспекти [15];
- с) зв'язок між усіма цими компонентами;
- д) кібербезпека в межах і між цими компонентами.

Для простоти наведено лише прості взаємозв'язки між цими компонентами, щоб показати, що між ними існують більш складні взаємозв'язки в **СКФІС**, як по горизонталі, так і по вертикалі. Горизонтальні зв'язки можуть існувати між усіма ключовими компонентами. Між кількома фізичними об'єктами в межах **СКФІС** такі горизонтальні зв'язки можуть бути, наприклад [9], механічними або електричними. Структура зв'язків між цифровими двійниками логічно повторює структуру фізичних зв'язків між фізичними відчепами на коліях сортувальної гіркі (рисунки 3,4). Крім того, цифрові двійники можуть включати додаткові зв'язки, наприклад, з організаційними структурами, наприклад, з диспетчерськими центрами ДЦ . Нарешті, гіркові додатки горизонтально обмінюються даними відповідно до конкретних сценаріїв використання.



Вертикальний зв'язок в рамках СКФІС може включати міжшарові зв'язки між рівнями ієрархії системи управління сортувальною станцією [15], між ФПБ і фізичним активом, а також додаткові джерела інформації для цифрових двійників, наприклад, з баз даних сортувальної станції.

Очевидно, що можуть бути й інші варіанти взаємозв'язків в рамках СКФІС, такі як складені цифрові двійники або варіанти розгортання для розміщення цифрового двійника на фізичному об'єкті або віддалено.

Додатковим аспектом може бути з'єднання декількох СКФІС в загальну транспортну соціо-кібер-фізичну систему або **систему систем**.

Для цифрових двійників існує безліч визначень. Наприклад, визначають цифровий двійник як систему, що містить як фізичний, так і віртуальний продукт або цифровий двійник є "мультифізична, муьтимасштабна, імовірнісна, надточна симуляція" [14]. Цифрові двійники також розглядаються як віртуальне представлення фізичного активу. За визначенням Промислового інтернет-консорціуму (ІІС) і платформи Індустрія 4.0, цифровий двійник визначається як "цифрове представлення, достатнє для задоволення вимог набору варіантів використання", де цифрове представлення визначається як "інформація, яка представляє атрибути і поведінку об'єкта", а об'єкт визначається як "предмет, який має чітко визначене існування, наприклад, людина, організація, пристрій, вагон, відчеп, верстат, виробнича лінія, підсистема або група таких предметів". Іншими словами, цифровий двійник об'єкта (пристрою, підсистеми, заводу) є сполучною ланкою між кібернетичним і фізичним світом. Цифровий двійник забезпечує доступ до даних життєвого циклу об'єкта, які можуть бути даними операційних технологій (ОТ) та ІТ-даними. Дані повинні бути отримані та/або доступні з відповідних джерел. Наприклад, «розумні» датчики можуть бути прикріплені до пристроїв (відчепів), щоб отримувати і надавати дані ОТ. Необхідно встановити відповідний зв'язок з існуючими базами даних ДЦ для отримання даних про експлуатаційні та ІТ-параметри.

Цифровий двійник пропонує інтерфейс прикладного програмування (API) для промислових додатків для доступу до даних, а отже, пропонує нові цифрові



послуги. Такі послуги можуть виконуватися на пристрої, локальному сервері ("периферійному комп'ютері") або як послуга хмарних обчислень. Ці послуги зосереджені на наданні додаткової цінності для промислового користувача і розробляються на основі підходу, орієнтованого на клієнтів системи.

Сьогодні ці сервіси використовують машинне навчання, оптимізацію, а також фізичні моделі, специфічні для конкретної галузі, для аналізу даних. Застосування штучного інтелекту є багатообіцяючим прикладом промислового застосування, яке використовує дані цифрових двійників для вивчення історії об'єктів та отримання нових висновків і пропозицій на основі цих даних. Ці висновки і пропозиції корисні в багатьох відношеннях, наприклад, для управління роботою гіркового локомотиву шляхом автоматичного регулювання заданих значень швидкості насуву потягу на гірку. У фізичній частині **СКФІС** об'єкти з'єднані або взаємодіють один з одним. Наприклад, привід, двигун, трансформатор і насос з'єднані один з одним, щоб сформувати приводний силовий агрегат. Силовий агрегат також з'єднаний з іншими елементами установки. Такі зв'язки і відносини також повинні бути відображені в кібернетичній частині **СКФІС**, серед відповідних цифрових двійників. Вимога відображення зв'язку між фізичними об'єктами в цифрових двійниках призводить до формулювання ієрархії цифрових двійників, від атомарних до складених. Це призводить до горизонтальних взаємодій між цифровими двійниками. Подібно до фізичних пристроїв, відповідні цифрові двійники можуть також надаватися різними постачальниками, тому необхідна інтероперабельність між цифровими двійниками.

Компоненти **СКФІС** об'єднуються завдяки фізичному зв'язку, який може бути дротовим або бездротовим, від Bluetooth до 5G, а також обміну інформацією, наприклад, за допомогою стандартизованих інформаційних моделей і технологій, таких як OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture [14]). Крім того, необхідно чітко підкреслити, що фізичні датчики важливі для збору даних, які будуть використовуватися в **СКФІС** з цифровими двійниками і промисловими додатками. Нарешті, безпека за замовчуванням



повинна бути невід'ємною частиною всіх міркувань щодо СКФІС, щоб досягти довіри до стабільності і функціонування цифрової трансформації та цифрових рішень, що з'являються в результаті, в промисловості і на транспорті. Наприклад, з Індустрією 4.0 на зміну класичним ізольованим виробничим ланцюжкам з переважно ієрархічною структурою придуть гнучкі міжфірмові мережі. Еволюція до таких міжфірмових мереж значно розширить поле для атак, збільшуючи потребу в рішеннях для забезпечення безпеки на всіх рівнях КС. В Індустрії 4.0 підкреслюється необхідність наявності рішень для забезпечення безпеки на всіх рівнях, наприклад, шляхом визначення безпеки як ключового аспекту в еталонній моделі архітектури, що виступає "як скелет, який несе і утримує разом всі структурні елементи". Важливо зазначити, що вимоги та пріоритети безпеки в ОТ можуть суттєво відрізнятися від вимог та пріоритетів безпеки в ІТ, навіть якщо основні технологічні будівельні блоки можуть бути досить схожими. Наприклад, в ОТ доступність є найбільш пріоритетною метою захисту, наприклад, з міркувань безпеки, а також з міркувань продуктивності та вартості. В ІТ-безпеці, як правило, першочерговим завданням захисту є конфіденційність, за якою слідують цілісність і доступність (CIA).

Розглянемо приклад об'єкта, для автоматизації якого необхідно використовувати соціо-кібер-фізичну систему. Це залізнична сортувальна станція N, призначена для розформування і формування залізничних составів на сортувальній гірці. Сортувальна станція складається з трьох основних технологічних підсистем:

- a) парк прибуття (ПП) потягів на розформування;
- b) сортувальна гірка (СГ);
- c) сортувальний парк (СП);
- d) парк відправлення (ПВ) сформованих нових потягів.

Усі технологічні підсистеми розбиваються на технологічні зони, в яких встановлюють датчики, сенсори й активатори відповідно до прийнятих алгоритмів керування відчепами, що скочуються з гірки (малюнки 3,4).

Кожен відчіп складається фізично з групи вагонів, що направляються на



певну колію в сортувальному парку. Кожному вагону у відчепі ставиться у відповідність його цифровий двійник, позначений на схемі як функціональний програмний блок (ФПБ), що описує параметри ланцюга і всі зміни, які відбуваються з ним у процесі руху гіркою.

При цьому передбачається моніторинг значень температури довкілля, швидкості та напрямку вітру. Цифрові двійники відчепів рухаються віртуальними маршрутами відповідно до програми розпуску поточного составу.

Інформацію про стан системи фіксують у фіксовані моменти часу і заносять у базу даних процесу. Для кожного відчепа формується фі-транзакція з послідовності технологічних зон, які має пройти даний відчеп [...]. У кожній технологічній зоні та загалом за маршрутом руху встановлюються граничні значення допустимого часу обробки цифрового двійника. Тобто встановлюється множина дедлайнів, тобто система повинна працювати в реальному масштабі часу і режимі поділу часу мікроконтролерів у технологічних зонах.

Для оперативного персоналу (диспетчерам) на гірці видається інформація з планом сортувальної гірки і сортувальної станції загалом із зазначенням оперативної обстановки в підсистемах станції. Система управління гіркою повинна керувати фізичними об'єктами за допомогою активаторів (наприклад, стрілочними електро-приводами і сповільнювачами відчепів, а також сигнальними покажчиками). Допускається можливість керування активаторами оператором, який перебуває у відповідному диспетчерському центрі. У системі виконується оперативне протоколювання всіх процесів із формуванням для кожного потяга підсумкового документа.

Це дещо спрощений варіант опису технології роботи системи для ілюстрації об'єкту для можливого впровадження соціо-кібер-фізичної системи.

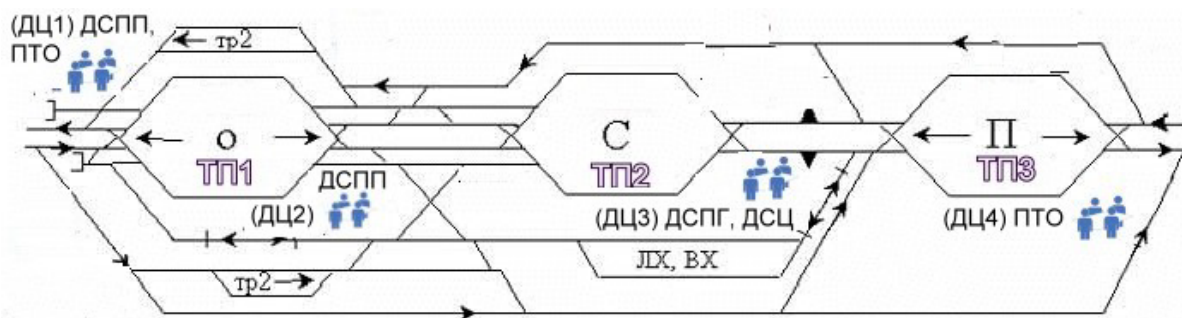


Рисунок 3 - Сортивальна станція як об'єкт впровадження соціо-кібер-фізичної системи керування

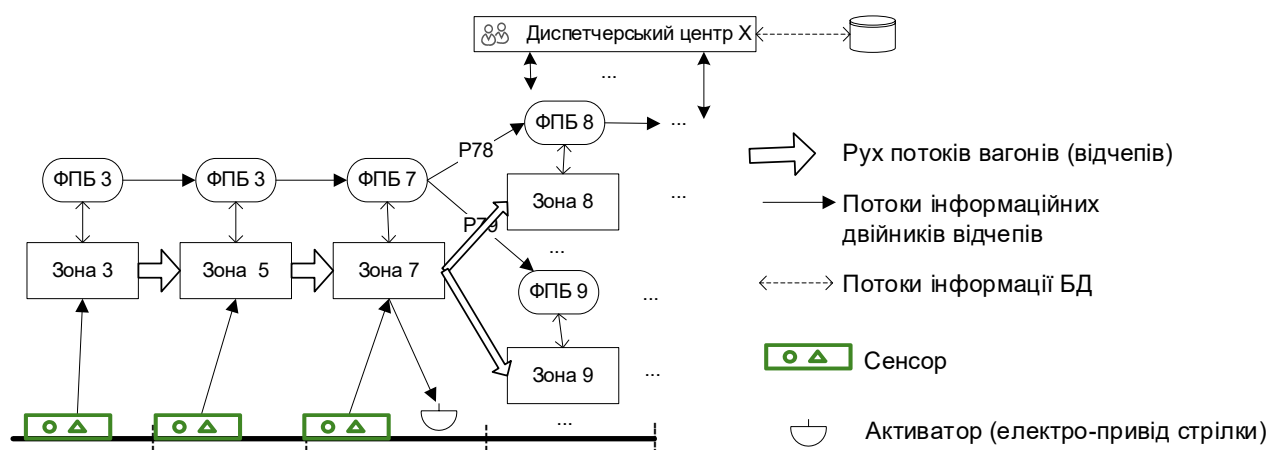


Рисунок 4 - Колія сортувальної гірки, поділена на технологічні зони зі встановленими сенсорами і активаторами

2.3. Розширене поняття архітектури соціо-кібер-фізичних систем.

Перехід автоматизованих систем керування технологічними процесами на підприємствах до нового класу – соціо-кібер-фізичних систем, пов'язаний зі збільшенням їхньої складності та супутнім цьому переходу проблемам. А саме, виникає збільшення використовуваних компонентів і актуальним стає завдання оптимізації мультиструктур (технічних, інформаційних, програмних). Виникає безліч інтерпретацій і тлумачень поняття архітектура соціо-кібер-фізичної системи.

Приклади реалізації її підсистем наведені на рисунку 2. Але це потребує зміни ієрархії систем керування, моделей і методів управління процесами, що склалися. Для сортувальної станції вона наведена на рисунку 5.

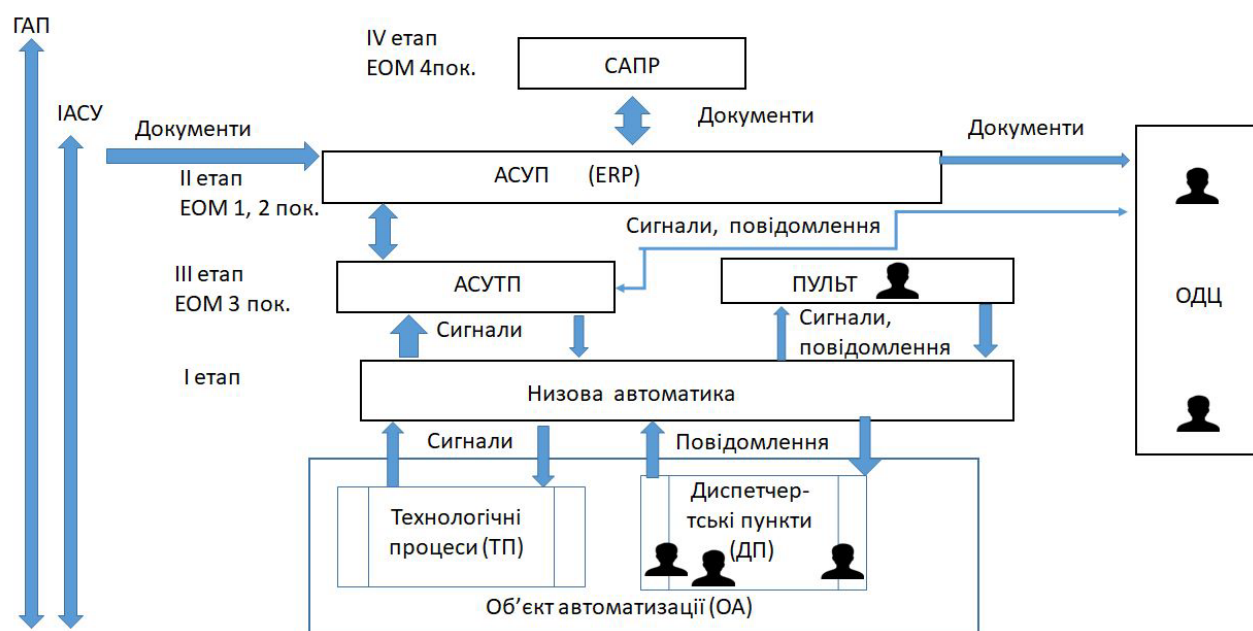


Рисунок 5 – Приклад існуючої ієрархії АСУ сортувальної станції

На рисунку позначення:

1. Старі системи управління (СУ)

$SU = OA + HA + Пульт.$

2. Перше покоління. АСУ підприємством (АСУП)

$АСУП + СУ.$

3. Друге покоління - Інтегрована АСУ (ІАСУ)

$ІАСУ = СУ + АСУП + АСУТП.$

АСУТП - АСУ технологічними процесами;

4 Третє покоління - Гнучке автоматизоване підприємство (ГАП)

$ГАП = ІАСУ + САПР,$

САПР - система автоматизованого проектування.

СКФС суттєво змінює структури всієї системи, яка стає «розумною» сіткою (Smart Grid). Але її підсистеми (контролери, обчислювальні модулі, різноманітні сервери) базуються на «8 кітах», що можна описати простою формулою:

**Архітектура КС = Цілі $\cap$ (8 видів забезпечення) =
Цілі $\cap$ (Тех, Мат, Прог, Інфо, Лінгво, Орг(соціо), Мето, Метролог)**

1. Тут [5,6]:



Тех – комплекс технічних засобів для вводу, обробки, зберігання, відображення, виводу і передачі, комутації і маршрутизації даних.

Мат – математичне забезпечення: набір математичних моделей, методів і алгоритмів розв'язку задач.

Прог – програмне забезпечення: комплекс системних та прикладних програм (операційних систем, компіляторів та інтерпретаторів мов програмування, редакторів програм, бібліотек підпрограм і функцій, пакетів прикладних програм тощо).

Інфо – інформаційне забезпечення; це сукупність єдиної системи класифікації та кодування інформації, уніфікованих систем документації, схем інформаційних потоків, циркулюючих на підприємстві, бази даних і знань.

Лінгво – лінгвістичне забезпечення: – сукупність мовних засобів, забезпечуючих адекватне функціонування мови КС в тій або іншій сфері.

Орг(соціо) – організаційне забезпечення: сукупність методів та засобів, які регламентують взаємодію людей (працівників) з технічними засобами та між собою в процесі розробки і експлуатації СКФС (організаційна структура).

Мето – методичне забезпечення.

Метролог – метрологічне забезпечення.

При цьому відсутня структуризація понять на рівні системної інтеграції в умовах, на наш погляд, різноманітних тлумачень понять архітектура соціо-кібер-фізичної системи. Хоча, розвиток поколінь комп'ютерних систем, зберіг основу системної архітектури, її ДНК, яка розвивається і наповнюється новими поняттями «генами» зі збереженням її класичної формули, що сформульована в роботі [15].

В основі будь-якої комп'ютерної системи лежить наведена вище архітектурна формула.

В соціо-кібер-фізичній системі з'являються нові семантичні зв'язки між компонентами системи і видами забезпечення окремих обчислювальних підсистем. Ці зв'язки показані на рисунку 6.

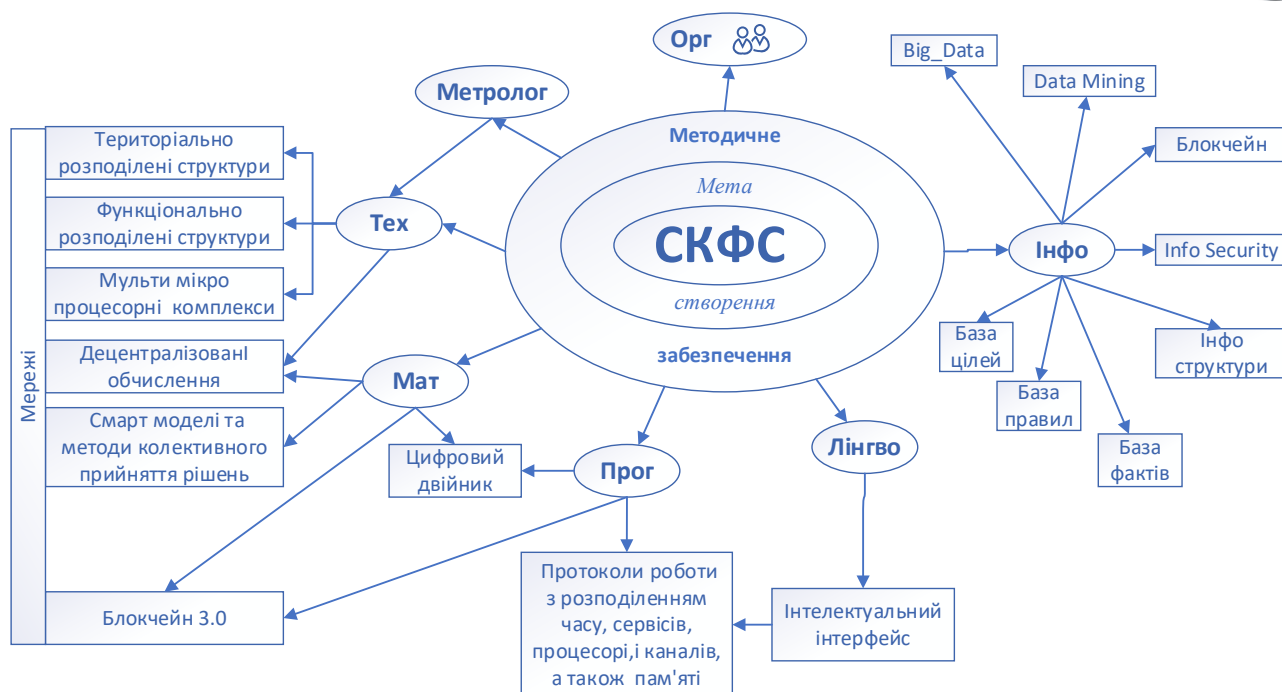


Рисунок 6 – Архітектурні особливості СКФС

Фактично на рисунках 2 і 6 в графічному вигляді представлено повне визначення соціо-кібер-фізичної індустріальної системи (СКФІС).

2.4. Зміни в підходах до проектування. СКФС як «системи систем»

Прогрес у дослідженнях у сфері SCPS можна прискорити, визначивши потреби, виклики і можливості в кількох промислових секторах і заохочуючи міждисциплінарні спільні дослідження між академічними і промисловими командами. Мета полягає в розробці нових методів системної науки та інженерії для побудови високонадійних систем, в яких кібернетичні і фізичні розробки є сумісними, синергетичними і інтегрованими на всіх рівнях.

Поточні і минулі галузеві інвестиції в дослідження технологій SCPS були значними, але зосереджувались на короткострокових, швидко окупних власних технологіях. Останнім часом уряди і деякі сектори промисловості інвестують у довгострокові, конкурентні технології та інноваційні випробувальні стенди. Наприклад, Європейський Союз ініціював велику спільну технологічну



ініціативу з державно-приватним фінансуванням європейських країн і промисловості під назвою "Передові дослідження і технології для вбудованих інтелектуальних систем" (ARTEMIS).

Аналогічно, на основі рекомендацій звіту Ради радників президента США з науки і технологій (PCAST), опублікованого в серпні 2007 року, Національний науковий фонд США фінансує фундаментальні дослідження і освіту в галузі SCPS [13]. Подібні ініціативи реалізуються і в інших країнах, включаючи Японію, Китай, Південну Корею та Німеччину [4].

Великі виклики, пов'язані з соціо-кібер-фізичними системами, формулюються в багатьох галузях промисловості. Національна інженерна академія США перерахувала 14 великих викликів, пов'язаних з охороною навколишнього середовища, здоров'я і соціальними проблемами; ці проблеми явно виграють від досягнень, досягнутих в області соціо-кібер-фізичних систем.

Дослідницьке співтовариство в галузі інженерії управління може відігравати провідну роль у розвитку соціо-кібер-фізичних систем. Деякі з цих можливостей описані нижче

Дослідницькі виклики в галузі медичних технологій та охорони здоров'я були розглянуті на низці семінарів, підсумки яких узагальнені у звіті Національного центру досліджень і розвитку інформаційних технологій США (NITRD) [14]. Звіт рекомендує дослідження в галузі нової системної науки та інженерії з наступними цілями:

- a. Інтероперабельні та відкриті медичні системи;
- b. Розподілений моніторинг, розподілене управління та бездротові мережі в реальному часі для лікарняних відділень інтенсивної терапії;
- c. Методи сертифікації програмного забезпечення і систем медичного обладнання та мережевого моніторингу і допомоги пацієнтам;
- d. Фреймворки на основі моделей, які підтримують компонентне моделювання, проектування, тестування і сертифікацію з використанням моделей, орієнтованих на конкретного пацієнта.**

Ще однією складною сферою для досліджень СКФС є пізнання і нейронаука



для розуміння фундаментальних принципів рухових функцій людини і використання цього розуміння в інженерних системах.

Приклади включають інтерфейси між мозком і машиною, терапевтичну і розважальну робототехніку, екзоскелети, а також протезування.

Люди і тварини безперешкодно інтегрують функції сприйняття, обчислення і керування рухами.

Ці високозв'язані системи не задовольняють простим принципам модульності, а складаються з багатофункціональних елементів, обчислень контурів зворотного зв'язку в різних масштабах часу і довжини зашумлених сигналів, паралельної обробки і надлишкових відмовостійких архітектур.

Нещодавні дослідження показали, що тварини використовують певні форми оптимальної фільтрації, стохастичні алгоритми керування та великомасштабні імовірнісні обчислювальні структури для боротьби з невизначеністю. Дослідники управління, які працюють з біологами, нейрофізіологами та комп'ютерними науковцями, можуть досягти подальшого прогресу.

Дослідження соціо-кібер-фізичних систем наступного покоління (NextGen), ймовірно, матимуть вплив на розробку майбутніх літаків і систем управління повітряним рухом, а також на безпеку польотів. Конкретні напрямки досліджень включають:

- a) нові функціональні можливості для досягнення більшої пропускної здатності, більшої безпеки і більшої ефективності, а також взаємодію і компроміси між цими цілями;
- b) інтегровані системи кабіни пілотів, перехід від дисплеїв і концепцій для пілотів до майбутніх (напіваавтономних) систем;
- c) моніторинг стану транспортних засобів і управління станом транспортних засобів;
- d) дослідження безпеки в системах управління повітряними суднами.



Одним з ключових технічних викликів для реалізації NextGen є перевірка і валідація складних систем, критично важливих для польотів, з акцентом на забезпеченні надійного, захищеного і безпечного використання для операцій NextGen.

Зі збільшенням складності систем витрати, пов'язані з верифікацією і валідацією, а також забезпеченням безпеки, **ймовірно, збільшать вартість проектування і створення літальних апаратів наступного покоління. Широка авіаційна спільнота визначила методології і концепції верифікації та валідації як критично важливу сферу досліджень [14].**

Цілі досліджень у сфері верифікації та валідації авіаційних систем, критично важливих для польотів, включають забезпечення методів суворої і систематичної перевірки на високому рівні властивостей і вимог безпеки системи, від початкового проектування до впровадження, обслуговування і модифікації, а також розуміння компромісів між складністю і методами верифікації для підтримки надійності і відмовостійкості.

Деякі з завдань інженерії управління включають в себе:

- 1) великомасштабні, детерміновані, робастні або стохастичні алгоритми оптимізації в режимі реального часу;
- 2) багатоцільові, багатосторонні структури оптимізації;
- 3) проектування автоматизації з режимами поступової деградації;
- 4) методи діагностики безпеки/моніторингу стану здоров'я;
- 5) **системні архітектури, що сприяють розподіленому прийняттю рішень;**
- 6) об'єднання даних з різномірних датчиків та оцінка цінності отриманої інформації.

Дослідження та розробки у сфері інтелектуальних мереж та відновлюваних джерел енергії перебувають у центрі уваги громадськості, а тому є пріоритетними для політиків. Метою є підвищення енергоефективності шляхом інвестування в модернізацію енергетичної інфраструктури. Геополітичними чинниками розвитку відновлюваної енергетики та "розумних"



мереж є те, що:

1. очікується, що попит на електроенергію зросте більш ніж на 75% до 2030 року;
2. виробництво електроенергії спричиняє понад 40% викидів парникових газів;
3. вартість виробництва 1 кВт-год в чотири рази перевищує вартість економії 1 кВт-год.

Урядові фінансові установи співпрацюють з промисловістю, комунальними підприємствами та місцевими органами влади у розробці технологій та демонстраційних проектах, пов'язаних з "розумними" електромережами.

Наприклад, "Energy Smart Florida" - це новаторський державно-приватний альянс міста Маямі, Florida Power and Light, General Electric, Silver Spring Networks і Cisco. Цей проект використовує федеральні фонди економічного стимулювання як частину інвестицій у розмірі 800 мільйонів доларів США в технології "розумних мереж" і відновлювану енергетику протягом наступних двох років. Приблизно 4,5 мільйона "розумних" лічильників будуть встановлені в будинках і на підприємствах США для розробки і демонстрації технологій управління попитом, автоматизації розподілу, інтелектуальних підстанцій, розподіленої генерації та інформаційних технологій. Мета - продемонструвати підвищення енергоефективності за рахунок оптимізації попиту та розподіленої автоматизації шляхом значного зниження пікового навантаження.

Досягнення в області гнучких пристроїв передачі змінного струму (FACTS) і фазометричних вимірювальних приладів (PMU) відкрили нові можливості для управління "розумними" мережами на великих територіях. Північноамериканська ініціатива з синхрофазометрії (NASPI), що фінансується Міністерством енергетики США, вкладає значні кошти в обладнання PMU. Майбутні зусилля необхідно буде зосередити на об'єднанні і аналізі даних для моніторингу динаміки в реальному часі, прогнозуванні і управлінні системою.

Зі збільшенням залежності від широкомасштабних комунікацій і контролю для поліпшення роботи системи необхідний тісний зв'язок між СКФС і компонентами фізичних систем в "розумних" електромережах. Критичні прогалини і спільні виклики пов'язані з досягненнями в галузі системних наук,



зокрема гібридних цифро-аналогових систем, складних емерджентних систем і передових програмних систем для великомасштабних, змінних у часі, географічно розподілених систем. Досягнення в оптимізації багатомасштабних стохастичних динамічних систем, а також в розподіленому управлінні необхідні для підвищення продуктивності "розумних" мереж з точки зору безпеки, ефективності, надійності та економічності. **Ці питання були визначені дослідницьким співтовариством на кількох семінарах, присвячених інформаційним технологіям та інтелектуальним мережам.**

Підсумки та висновки

Очікується, що соціо-кібер-фізичні системи відіграватимуть важливу роль у проектуванні та розробці майбутніх інженерних систем з новими можливостями, які значно перевищуватимуть сьогоднішні рівні автономності, функціональності, зручності використання, надійності та кібербезпеки.

Досягнення в дослідженнях СКФС можуть бути прискорені завдяки тісній співпраці між академічними дисциплінами в галузі обчислень, зв'язку, управління та іншими інженерними і комп'ютерними дисциплінами в поєднанні з прикладними програмами, що ставлять перед собою великі завдання.

Вибрані рекомендації для дослідження СКФС.

Нагальною потребою є стандартизовані абстракції та архітектури, що дозволяють модульне проектування та розробку СКФС.

Додатки СКФС включають компоненти, які взаємодіють через складне, пов'язане фізичне середовище. Надійність і безпека створюють особливі проблеми в цьому контексті - **потрібні нові фреймворки, алгоритми та інструменти** [6,7,15,16].

Майбутні соціо-кібер-фізичні системи потребуватимуть апаратних і програмних компонентів, які є високонадійними, реконфігурованими, а в багатьох додатках – сертифікованими, а надійність повинна поширюватися на системний рівень.