

МЕТОД РЕЗОНАНСНИХ ЗАПИТІВ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ КОНФЛІКТІВ У МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМАХ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ

Анотація. У статті запропоновано метод резонансних запитів для вирішення конфліктів у мультиагентних системах цифрових двійників. Метод резонансних запитів базується на принципах самоорганізації, використовує модель частотної та параметричної синхронізації між агентом-ініціатором запиту й агентами-виконавцями, що дозволяє замінити ресурсомісткі переговори на миттєву селективну реакцію. Результати дослідження свідчать, що застосування розробленого методу дозволяє знизити комунікаційне навантаження порівняно з класичними методами та забезпечує стабільну роботу системи в умовах пікового завантаження, скорочуючи час прийняття рішень.

Ключові слова: інженерія програмного забезпечення, мультиагентні системи, цифрові двійники, вирішення конфліктів, метод резонансних запитів.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку інформаційних технологій характеризується глибинною трансформацією підходів до управління складними системами різного роду діяльності. Парадигма Індустрії 4.0, а також її подальша еволюція в концепцію Індустрії 5.0, підвищує актуальність питання створення високоадаптивних, самокерованих виробничих та логістичних середовищ. Ключовим інструментом реалізації таких середовищ стає технологія цифрових двійників (Digital Twins, DT) – віртуальних аналогів фізичних об'єктів, процесів або систем, які перебувають у постійній інформаційній взаємодії з оригіналом [1-2]. Варто наголосити, що ізольоване існування цифрових двійників не дозволяє реалізувати повний потенціал технології. Справжня цінність цифровізації виникає при їх об'єднанні у складні екосистеми, де двійники складових (верстатів, транспортних роботів, деталей, персоналу, енергетичних мереж тощо) взаємодіють між собою для досягнення спільних виробничих цілей. За умови достатнього рівня незалежності між об'єктами у системі, архітектуру її цифрового двійника доцільно описувати за допомогою мультиагентних систем (Multi-Agent Systems, MAS), де кожна сутність наділяється властивостями інтелектуального агента: автономністю, соціальністю, реактивністю та проактивністю.

Для подібних складних систем надзвичайно важливим є питання комунікації та вирішення конфліктів, які неминуче виникають у єдиному інформаційному та фізичному просторі зі зростанням кількості агентів, їх деталізації та щільності. Конфлікти можуть мати різну природу: від конкуренції за спільні неподільні ресурси (наприклад, до-

ступ до єдиного зарядного терміналу для групи мобільних роботів) до просторових колізій (перетин траєкторій руху) та інформаційних розбіжностей (суперечливі дані про стан середовища). Ефективність функціонування всієї системи безпосередньо залежить від швидкості та якості вирішення цих конфліктів у мережі цифрового двійника.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження [4] показує, що традиційні підходи до координації в мультиагентній системі, такі як централізоване планування, стають «вузьким місцем» через високу обчислювальну складність та вразливість до відмов центрального вузла. Аналіз [5] світчить про те, що децентралізовані методи, зокрема класичний протокол контрактної мережі (Contract Net Protocol, CNP) та різноманітні аукціонні алгоритми, забезпечують гнучкість та стійкість. Проте дослідження [4,6] показують, що ці методи часто страждають від проблеми «комунікаційного вибуху», що відбувається при лавиноподібному зростанні трафіку всередині цифрового двійника при збільшенні кількості агентів, що призводить до неприпустимих затримок.

Проаналізуємо детальніше найбільш розповсюджені та ефективні методи координації у мультиагентних системах для кращого розуміння їхніх переваг та недоліків. Протокол контрактної мережі (CNP) та його модифікації розглядаються як стандарт для мультиагентних систем цифрових двійників [7]. В його основі лежить імітація процедури тендеру: менеджер оголошує завдання, агенти надсилають пропозиції, менеджер обирає найкращу. Незважаючи на свою універсальність, CNP має суттєві недоліки. По-перше, у великих системах широкомовна розсилка запитів (Task Announcement) створює надмірний трафік [8]. Якщо в мережі 1000 агентів і кожен надсилає пропозицію, менеджер повинен обробити 1000 повідомлень за короткий час. Варто також згадати і про якість рішень методу: класичний CNP є «жадібним» алгоритмом і не гарантує глобальної оптимальності. Найбільший недолік для застосування методу при проєктуванні цифрових двійників складних систем полягає у тому, що через велику кількість повідомлень, які потрібно обробити, поки триває процедура тендеру, стан середовища може змінитися, роблячи обране рішення неактуальним [9], що вкрай негативно впливає на оптимальність подальших дій. Сучасні дослідження пропонують модифікації, наприклад, введення соціальних норм або використання мурашиних алгоритмів для оптимізації маршрутизації повідомлень, проте ці надбудови часто збільшують обчислювальну складність самого агента [10].

Механізми аукціонів та переговорів є ефективним інструментом для задач розподілу ресурсів, оскільки дозволяють максимізувати корисність системи. Однак, як зазначається в дослідженнях [11-12], аукціони вразливі до маніпуляцій і вимагають складних стратегій поведінки агентів. У контексті цифрових двійників промислового обладнання, де агенти часто є кооперативними (спільна власність підприємства), конкурентна природа аукціонів може бути надлишковою та неефективною. Крім того, ітеративні аукціони створюють значні затримки, що неприпустимо для аварійних ситуацій.

Мета дослідження. Основною метою цієї роботи є розроблення методу вирішення конфліктів у мультиагентній системі цифрових двійників складних систем, який забезпечуватиме децентралізацію, масштабованість та низьке комунікаційне навантаження. Окрім того, необхідною частиною роботи є дослідження розробленого методу та його порівняння з відомими підходами.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для забезпечення децентралізації під час вирішення конфліктів та комунікації у цій роботі пропонується перейти від «торгів» між агентами до «узгодження» між ними на основі подібності станів. Отже, кожен агент матиме реалізований комунікаційний рівень, що відповідатиме за створення, керування та реакцію на задачі чи конфлікти у системі.

Створення нового методу ґрунтується на використанні поняття «резонансу» – вибіркового підсилення реакції при збігу параметрів початкового впливу. Якщо розглядати це поняття у фізиці, то резонанс дозволяє передавати енергію з максимальною ефективністю. В інформаційних системах аналогом енергії є інформація та обчислювальний ресурс. Відповідно агент-ініціатор посилає початковий запит (хвилю) у мережу, а потім обробляє лише ті запити, які «резонують» (збігаються) з його поточним станом. Цей підхід перегукується з концепціями шаблону «Publish/Subscribe» та семантичної маршрутизації, але додає динамічний компонент: ступінь відповідності (амплітуда резонансу) змінюється в часі залежно від стану агента-двійника.

Розглянемо детальніше реалізацію механізмів комунікації в методі резонансних запитів. Нехай у системі цифрового двійника складної системи існує множина агентів $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$. Кожен агент a_i у момент часу t описується вектором стану $S_i(t)$ у багатовимірному просторі ознак \mathbb{S} :

$$S_i(t) = \langle p_i(t), c_i(t), g_i(t) \rangle, \quad (1)$$

де $p_i(t) \in R^{n_p}$ – вектор фізичних параметрів (координати, швидкість, рівень енергії, температура, вібрація), що отримується з сенсорів фізичного об'єкта;

$c_i(t) \in R^{n_c}$ – вектор компетенцій та ресурсів (тип обладнання, доступні інструменти, ліцензії, вільна пам'ять);

$g_i(t) \in R^{n_g}$ – вектор цілей та зобов'язань (поточне завдання, черга, пріоритет).

Стан кожного агента може бути розширений більшим набором ознак, що може частково вплинути на час обчислень, проте завжди залишається на розгляд проєктувальника системи. Також кожен агент має індивідуальний набір характеристик, що може повністю або частково сходиться чи не сходиться із набором характеристик інших агентів.

Відповідно у певний момент, коли агент-ініціатор потребує комунікації з іншими агентами для вирішення конфлікту чи певної задачі, він створює резонансний запит Q_j , що задається наступним вектором:

$$Q_j = \langle Y_j, \rho, \tau, \varepsilon \rangle, \quad (2)$$

де $Y_j \in \mathcal{S}$ – вектор вимог до виконавця, описується вектором стану агента;

ρ_j – пріоритет запиту;

τ_j – час життя запиту (Time to live, TTL);

ε_j – поріг активації резонансу, мінімальне оцінка відповідності вектору вимог.

У свою чергу агенти-виконавці отримують резонансні запити та обчислюють силу резонансу, ступінь відповідності запиту. Функція резонансу $R(S_i, Y_j)$ визначає ступінь відповідності агента a_i запиту Q_j . Ця функція є визначальним фактором для коректної роботи методу та може визначатись індивідуально проектувальником системи з огляду на наявні фактори. Для прикладу, функція резонансу може бути визначена як зважена косинусна подібність з урахуванням обмежувальних факторів, якщо вектори станів мають однакову розмірність:

$$R_i(S_i, Y_j) = \rho_j \cdot \cos(S_i, Y_j) \cdot \prod_k H(c_{i,k} - c_{j,k}), \quad (3)$$

де $H(x)$ – функція Хевісайда, що забезпечує виконання жорстких обмежень запиту, наприклад, наявність конкретного інструменту.

У свою чергу обчислення значення косинусної подібності забезпечуватиме пошук найбільш підходящого агента (з найбільшою кількістю потрібних ресурсів) серед всіх тих, що пройшли задані обмеження. Значення пріоритету буде пропорційно масштабувати обчислене значення для пришвидшення обробки високопріоритетних запитів.

Після обчислення значення резонансу формується відповідь агента-виконавця. На відміну від бінарної логіки (годиться / не годиться), метод резонансних запитів вводить імовірнісну та часову залежність реакції від сили резонансу. Час затримки відповіді t_{resp} для агента a_i визначається обернено пропорційно до величини резонансу:

$$t_{resp}(i) = T_{base} \cdot e^{-\lambda(R_i - \varepsilon_j)}, \quad (4)$$

де T_{base} – базовий часовий інтервал, а λ – коефіцієнт чутливості, за допомогою якого можна регулювати, наскільки сильно зменшується час відповіді при збільшенні значення резонансу R_i . Така залежність гарантує, що агент з найвищим рівнем відповідності («найсильнішим резонансом») відповідь першим. Це дозволяє ініціатору прийняти першу ж валідну відповідь (First-come, Best-fit), значно скорочуючи час очікування порівняно зі збором усіх пропозицій у CNP. Також можливим є варіант, коли агенту-ініціатору у певному проміжку часу потрібно зібрати усі відповіді від агентів-виконавців та оцінити їх, що частково збільшить шанс обрання найоптимальнішого варіанта серед можливих.

Окремо варто уточнити процес обробки складних конфліктів у системі. Якщо відбулась ситуація, за якої два агенти конкурують за певний ресурс, наприклад, дві машини зустрілися у вузькому коридорі, то пріоритет отримає той, хто виконує завдання (запит) із вищим пріоритетом. Агент з нижчим пріоритетом отримує «наказ» поступитися

та очікує своєї черги. Якщо пріоритети рівні, використовуються внутрішні механізми пріоритетів системи або випадкові значення для перерахунку значень резонансу.

Отже, процес комунікації задля вирішення конфлікту чи розподілу завдань проходить наступні фази.

1. *Надсилання (Emission)*. Агент-ініціатор виявляє конфлікт (наприклад, прогнозується вихід з ладу підшипника). Далі агент формує вектор вимог (потрібен ремонтний робот з інструментом X) та надсилає відповідний запит у мережу агентів.

2. *Поглинання та резонанс (Absorption & Resonance)*. Потенційні агенти-виконавці отримують повідомлення та обчислюють значення резонансу (відповідності запиту). Якщо агент не відповідає умовам або відповідність нижча за мінімальне значення, то подальша обробка зупиняється, що дозволяє знизити трафік.

3. *Тимчасова модуляція (Temporal Modulation)*. Агенти, що відповідають умовам запиту, обчислюють значення затримки та встановлюють таймер для надсилання відповіді. Якщо поточний агент отримує повідомлення, що інший агент уже обробляє запит до закінчення таймера, він скасовує свою відправку (відбувається пригнічення відгуку).

4. *Відгук та фіксація (Response & Commitment)*. Таймер агента з найвищим резонансом спрацьовує першим і він надсилає повідомлення агенту-ініціатору з пропозицією виконати запит. Ініціатор, отримавши першу (або перші K) пропозицій, оцінює їх і надсилає підтвердження та сигнал відміни для інших.

Відповідно отримуємо наступну діаграму послідовностей (рис. 1) для виконання резонансного запиту для двох агентів для випадку, коли один із них відповідає вимогам, а інший – ні.

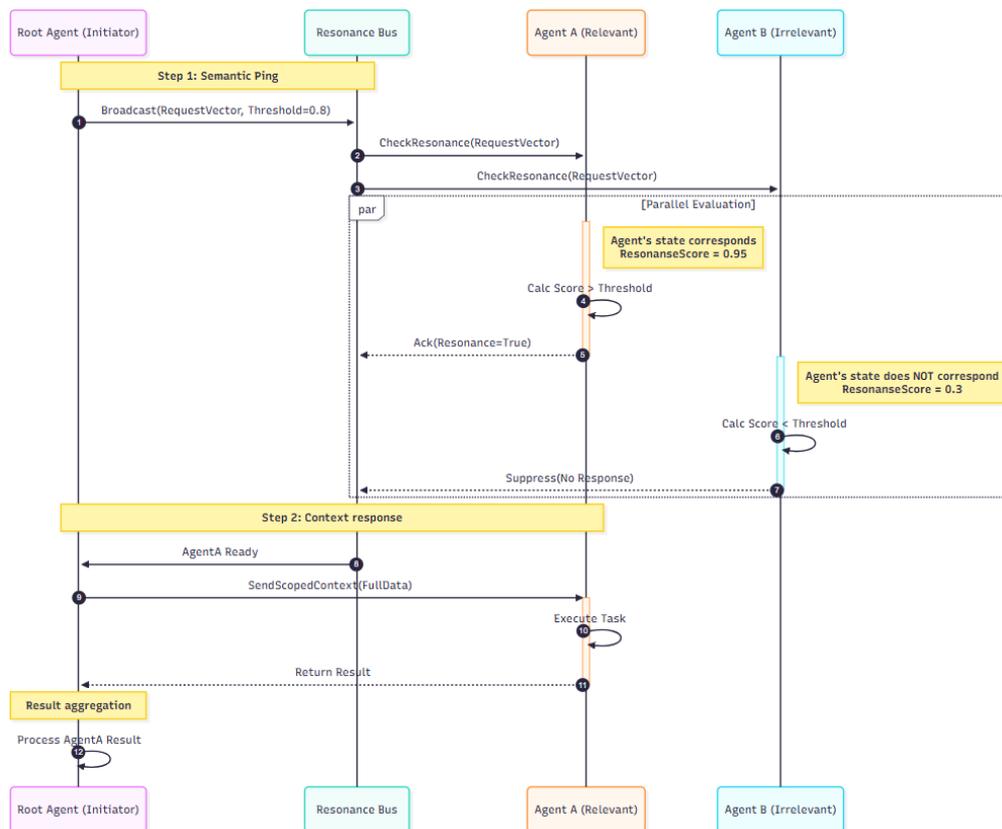


Рисунок 1 - Діаграма послідовностей для прикладу виконання резонансного запиту
 ISSN 1562-9945 (Print)
 ISSN 2707-7977 (Online)

Для реалізації методу структура агента у системі цифрового двійника має бути розширена спеціалізованими модулями. Стандартна BDI-архітектура (Belief-Desire-Intention) доповнюється «Резонансним шаром» (Resonance Layer), який працює на нижчому рівні абстракції, ближче до мережевого інтерфейсу. Компонент, що відповідає за резонансні запити, включає наступні модулі.

1. *Модуль сприйняття (Perception Module)*, який отримує дані від IoT-сенсорів фізичного двійника.

2. *Генератор профілю (Profile Generator)*, що динамічно оновлює вектор стану агента.

3. *Компаратор резонансу (Resonance Comparator)*, який виконує швидке обчислення функції R . Це модуль є математичним ядром методу та має бути оптимізованим для векторних операцій.

4. *Контролер комунікації (Communication Controller)*, що керує відправкою повідомлень з урахуванням розрахованої затримки.

Відповідно отримуємо наступну діаграму компонентів агента (рис. 2).

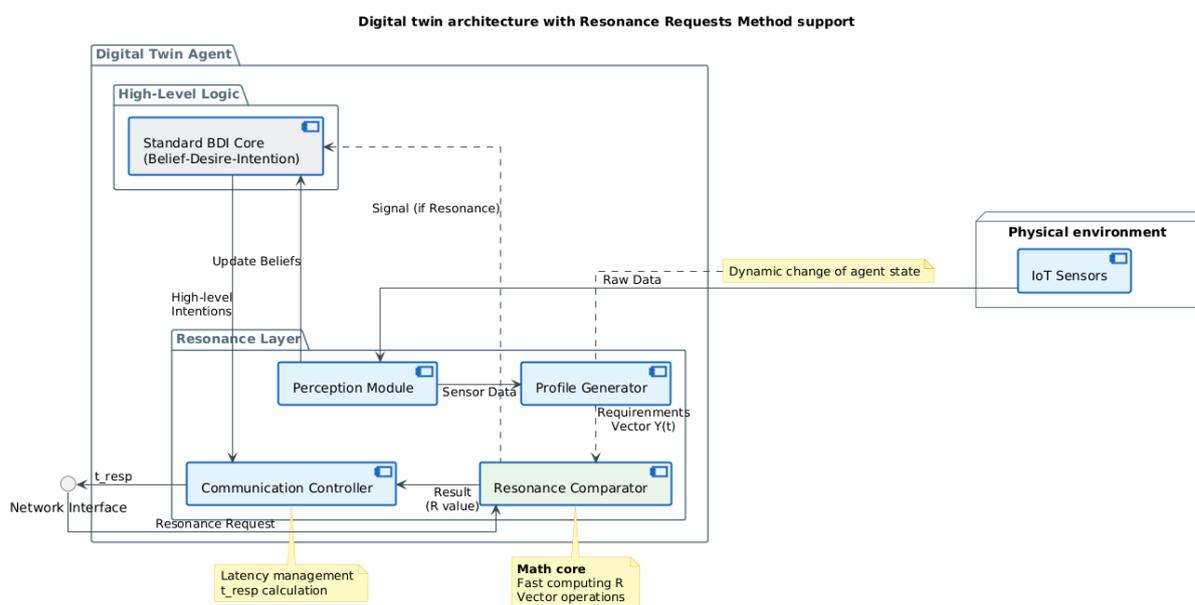


Рисунок 2 - Діаграма компонентів агента цифрового двійника з підтримкою резонансних запитів

Аналіз отриманих результатів. Для дослідження розробленого методу було реалізоване програмне забезпечення для імітаційного моделювання за допомогою мови програмування Python. Для виконання дискретно-подієвого моделювання була використана бібліотека SimPy. З огляду на пришвидшення роботи методу для математичних обчислень були застосовані чисельні методи бібліотеки NumPy.

Для моделювання було обрано сценарій переміщення роботів по складу розміром 50 на 50. Перед агентами стояло завдання виконати випадкові заявки на переміщення, враховуючи наступні обмеження: вузькі проходи (можливість блокування), обмежений заряд батарей, обмежена кількість зарядних станцій (5 одиниць). Для кращої демон-

страції на великих системах кількість агентів змінювалась від 20 до 200, а також змінювалась кількість завдань на переміщення. Для кожного набору агентів моделювання відбувалось у системах, де застосовано різні методи комунікації (вирішення конфліктів): розроблений метод резонансних запитів, механізм переговорів, де відбувається пошук глобального оптимального рішення, та протокол контрактної мережі (CNP), при якому запит-відповідь йде від кожного агента.

Для порівняння були обрані наступні показники (метрики) ефективності:

1. T_{res} – середній час узгодження(від появи запиту до укладання контракту);
2. N_{msg} – сумарна кількість повідомлень у мережі на одне завдання;
3. R_{succ} – відсоток успішно виконаних завдань (тайм-аутів);
4. O_{gap} – відхилення(у %) знайденого рішення від теоретично оптимального.

Проаналізуємо результати по кожній з метрик. Отримані результати, а саме, середній час узгодження T_{res} (табл. 1) демонструють, що механізм переговорів є найповільнішим через складні ітеративні процедури торгів для досягнення глобального оптимуму, що стає критичним при $N = 200$.

Таблиця 1

Середній час узгодження T_{res} , мс

Кількість агентів (N)	CNP (Contract Net Protocol)	Механізм переговорів (Negotiation)	RRM (Resonance Request Method)
20	125	214	38
50	293	547	45
100	648	1152	58
200	1451	3813	82

CNP показує лінійне зростання затримок $O(n)$, оскільки менеджер змушений обробляти пропозиції від усіх вільних агентів. Натомість метод резонансних запитів демонструє найвищу стабільність. Час реакції зростає незначно (з 38 до 82 мс) навіть при збільшенні кількості агентів у 10 разів. Така поведінка легко пояснюється тим, що агент-ініціатор не чекає відповідей від усіх, а лише від першого агента-виконавця, що зрезонував (відповідав усім вимогам) та мав найкращу оцінку відповідності. Отже, запропонований метод має складність $O(k)$, при чому $k \ll n$.

Таблиця 2

Сумарна кількість повідомлень N_{msg}

Кількість агентів (N)	CNP (Contract Net Protocol)	Механізм переговорів (Negotiation)	RRM (Resonance Request Method)
20	42	68	5.4
50	107	165	6.2
100	239	341	7.1
200	416	725	8.5

Отримані значення сумарної кількості повідомлень N_{msg} (табл. 2) демонструють, що метод резонансних запитів справді забезпечує зниження трафіку на понад 90% порівняно з CNP, оскільки повідомлення пропозиції надсилають лише агенти з високим рівнем, тоді як у CNP відповідають майже всі вільні агенти.

Під час очислення відсотка успішно виконаних завдань R_{succ} , завдання вважалось проваленим, якщо агент-виконавець не був знайдений за допустимий час (виник тайм-аут).

Таблиця 3

Відсоток успішно виконаних завдань R_{succ}

Кількість агентів (N)	CNP (Contract Net Protocol)	Механізм переговорів (Negotiation)	RRM (Resonance Request Method)
20	99.5%	99.9%	99.2%
50	98.2%	99.5%	98.9%
100	91.3%	88.5%	97.4%
200	76.5%	62.9%	94.8%

Отримані дані (табл. 3) показують, що при малому навантаженні механізм переговорів є найбільш ефективним. Однак при $N=200$ ефективність класичних методів різко падає. CNP страждає від перевантаження черги повідомлень, а механізм переговорів все більше натикається на тайм-аути, оскільки агенти витрачають надто багато часу на узгодження, поки ситуація у системі змінюється. Метод резонансних запитів зберігає високу результативність (>94%) завдяки швидкості: краще прийняти субоптимальне рішення миттєво, ніж шукати ідеальне надто довго. До таких висновків спонукає аналіз значень (табл. 4) відхилення від теоретичного оптимуму O_{gap} , що визначався перед запуском кожного прогону моделювання.

Таблиця 4

Відхилення від теоретично оптимуму O_{gap}

Кількість агентів (N)	CNP (Contract Net Protocol)	Механізм переговорів (Negotiation)	RRM (Resonance Request Method)
20	12.4%	1.5%	5.8%
50	14.8%	2.2%	6.5%
100	18.2%	3.8%	7.9%
200	24.5%	5.1%	9.2%

Як бачимо, метод резонансних запитів поступається механізму переговорів на 4-5%, що пояснюється швидким вибором агента-виконавця для підвищення швидкодії та зменшення трафіку. Метод може спонукати до обрання не найближчого робота, а того, хто першим «зрезонував» (наприклад, через кращий заряд батареї, навіть якщо він тро-

хи далі). Проте запропонований метод стабільно перевершує CNP, оскільки функція резонансу враховує комплексний стан агента при менших затратах на комунікацію.

Висновки. Під час цього дослідження було розроблено метод резонансних запитів (RRM), що забезпечує механізми координації та вирішення конфліктів у мультиагентних системах цифрових двійників. За умови динамічної невизначеності та обмежених ресурсів отримано математичні залежності функції резонансу та часу відгуку. Було описано та проаналізовано вхідні та вихідні параметри методу, зокрема вектори станів агентів та порогові значення резонансу, способи їх отримання.

На основі проведеного аналізу встановлено, що ефективність розподілу завдань суттєво залежить від спеціального налаштування адаптивного порогу відповідності агента-виконавця до запиту. При його оптимальних параметрах комунікаційне навантаження системи набуває стабільного мінімуму з майже константною складністю взаємодії $O(k)$ незалежно від кількості агентів, що вказує на ефективну фільтрацію запитів між агентом-ініціатором і виконавцями. Також були виконані дослідження методу за допомогою програмної реалізації імітаційної моделі «розумного складу» на мові Python з використанням бібліотеки SimPy. Проведені експерименти показали високу ефективність функціонування такої системи з оптимально налаштованими параметрами, що дозволило знизити трафік на понад 90% порівняно з класичним протоколом контрактної мережі (CNP). Порівняльний аналіз показав високу ефективність функціонування запропонованої мультиагентної архітектури з оптимально налаштованими параметрами резонансної взаємодії.

Подальші дослідження будуть спрямовані на оцінку точності знаходження оптимальних рішень (зменшення відхилення від глобального оптимуму) та оцінку швидкості його роботи в гетерогенних середовищах. Окрім того, будуть проаналізовані інші варіанти побудови функції резонансу, зокрема із застосуванням методів машинного навчання (Reinforcement Learning), та відповідно умови й можливість їх застосування для створення адаптивних цифрових двійників складних кіберфізичних систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. X. Xu, Y. Lu, B. Vogel-Heuser, and L. Wang, "Industry 4.0 and Industry 5.0-Inception, Conception and Perception," *Journal of Manufacturing Systems* 61 (2021): P.P. 530–53
2. Grieves M. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems / M. Grieves, J. Vickers // *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. - Springer, 2017. - P. 85–113.
3. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems / M. Wooldridge. - 2nd ed. - Chichester : Wiley, 2009. - 484 p.
4. О.В.Атаманюк, Є.С.Сулема. Аналіз методів вирішення конфліктів у мультиагентній моделі цифрового двійника складної системи // Доповідь на 18 науковій конференції ПМК-2025, КПІ, «Політехніка», 2025, С. 114 - 118.
5. Chikoti, Santosh. Conflict Resolution Techniques in Multi-Agent Systems: Technical Review. *European Modern Studies Journal*. 9., 2025, P.P. 831-840
6. Pretel E., Navarro E., López-Jaquero V., Moya A., González P. Multi-Agent Systems in Support of DigitalTwins: A Survey // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2022. – Vol. 13259. – P. 524–533

7. Smith R. G. The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver / R. G. Smith // IEEE Transactions on Computers. - 1980. - Vol. C-29, No. 12. - P. 1104–1113.
8. Boella G. Norm-Based Contract Net Protocol for Coordination in Multi-Agent Systems / G. Boella, L. van der Torre // IEEE International Conference on Intelligent Agent Technology. - 2008.
9. Resmerita S. Conflict Resolution in Multi-Agent Systems / S. Resmerita, M. Heymann // Proceedings of the 2004 American Control Conference. - 2004.
10. Gao S. An Improved Contract Net Protocol for Task Allocation in Multi-Agent Systems / S. Gao, H. Lei, D. Wang // Algorithms. — 2019. — Vol. 12, No. 4. — P. 70.
11. Ferreira P. Auction and Contract Net Protocols in Multi-Agent Systems / P. Ferreira, N. Baloian // Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research. - 2013.
12. Aheleroff, S. Multi-Agent Systems in Support of Digital Twins: A Survey / S. Aheleroff, et al. // ResearchGate. – 2022. – P. 1-18.

REFERENCES

1. X. Xu, Y. Lu, B. Vogel-Heuser, and L. Wang, “Industry 4.0 and Industry 5.0 - Inception, Conception and Perception,” Journal of Manufacturing Systems 61 (2021): P.P. 530–53
2. Grieves M. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems / M. Grieves, J. Vickers // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. - Springer, 2017. - P. 85–113.
3. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems / M. Wooldridge. - 2nd ed. - Chichester : Wiley, 2009. - 484 p.
4. O. V. Atamaniuk, Ye.S.Sulema, Analysis of the conflict resolution methods in the multiagent model of the digital twin of the complex system // Report at the 18th scientific conference AMC-2025, KPI, 2025, P. 114 -118.
5. Chikoti, Santosh. Conflict Resolution Techniques in Multi-Agent Systems: Technical Review. European Modern Studies Journal. 9., 2025, P.P. 831-840
6. Pretel E., Navarro E., López-Jaquero V., Moya A., González P. Multi-Agent Systems in Support of DigitalTwins: A Survey // Lecture Notes in Computer Science. – 2022. – Vol. 13259. – P. 524–533
7. Smith R. G. The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver / R. G. Smith // IEEE Transactions on Computers. - 1980. - Vol. C-29, No. 12. - P. 1104–1113.
8. Boella G. Norm-Based Contract Net Protocol for Coordination in Multi-Agent Systems / G. Boella, L. van der Torre // IEEE International Conference on Intelligent Agent Technology. - 2008.
9. Resmerita S. Conflict Resolution in Multi-Agent Systems / S. Resmerita, M. Heymann // Proceedings of the 2004 American Control Conference. -2004.
10. Gao S. An Improved Contract Net Protocol for Task Allocation in Multi-Agent Systems / S. Gao, H. Lei, D. Wang // Algorithms. - 2019. - Vol. 12, No. 4. - P. 70.
11. Ferreira P. Auction and Contract Net Protocols in Multi-Agent Systems / P. Ferreira, N. Baloian // Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research. - 2013.
12. Aheleroff, S. Multi-Agent Systems in Support of Digital Twins: A Survey / S. Aheleroff, et al. // ResearchGate. – 2022. – P. 1-18.

Received 15.12.2025.
Accepted 19.12.2025.

Resonance request method for conflict resolution in the multiagent systems of the digital twins

Various approaches to organizing interaction and coordination in distributed systems are considered. The centralized approach has a big disadvantage due to scalability limits and single points of failure. The classic decentralized approach cannot be used in some cases due to the high communication overhead and latency. One of such cases is the conflict resolution in multi-agent digital twins, where the Resonance Request Method can be really useful.

The purpose of the research is to develop a method of creating a communication and conflict resolution mechanism, which will provide the possibility of determining the optimal task allocation based on state similarity.

The paper examines the interaction dynamics of the system "initiator - executor". Under the condition of dynamic environments, the mathematical model of the resonance function and selective query filtering was obtained. In view of the use in cyber-physical systems, the input and output parameters of the method were described and analyzed, as well as the methods of obtaining them.

As a result of the evaluation of the speed of the method using Python simulation, a modification of the search way for the optimal sensitivity threshold was proposed.

The comparative analysis showed the high efficiency of the proposed coordination system with optimally adjusted resonance parameters. The proposed method allows to reduce the communication traffic by approximately 90% compared to standard protocols. Also, the method made it possible to speed up the requests processing by an average of 3-10 times, reduce the load on the network and handle cases when real-time coordination is a rather difficult problem.

The input and output parameters of the method and ways of obtaining them were described and analyzed. A comparative numerical analysis showed the high efficiency of the functioning of such a conflict resolution system with optimally adjusted parameters of the resonance requests.

Атаманюк Олексій Віталійович – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ.

ORCID: 0000-0002-9038-9691

Сулема Євгенія Станіславівна – докт. техн. наук, доцент, завідувач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ.

ORCID: 0000-0001-7871-9806

Atamaniuk Oleksii – PhD student of Computer Systems Software Department, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv.

ORCID: 0000-0002-9038-9691

Sulema Yevgeniya – DSc, Ass. Professor, Head of Computer Systems Software Department. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv.

ORCID: 0000-0001-7871-9806