

Аспірант Атаманюк О.В., д.т.н., доцент Сулема Є.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИРІШЕННЯ КОНФЛІКТІВ У МУЛЬТИАГЕНТНІЙ МОДЕЛІ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА СКЛАДНОЇ СИСТЕМИ

Abstract

Oleksii Atamaniuk, PhD student; Yevgeniya Sulema, DSc, Assoc. Prof

Analysis of the conflict resolution methods in the multiagent model of the digital twin of the complex system.

This paper concerns the task of analyzing the classical conflict resolution methods used for the internal coordination of multi-agent models of complex system Digital Twins. A critical analysis of the performance of existing protocols resolution mechanisms (e.g., negotiation, centralized control) was investigated, with a focus on their scalability and real-time synchronization limitations. It is shown that the use of these traditional methods is fundamentally unsuitable, as it creates critical communication bottlenecks, loss of state consistency, and synchronization failures, preventing the Digital Twin from accurately reflecting its physical counterpart.

Вступ

Технологія цифрових двійників набуває все більшого значення, у тому числі, для розв'язання складних задач на виробничих підприємствах. Попри всю потужність технології та велику кількість переваг вона не завжди може бути застосована через ряд різноманітних причин. Наприклад, коли мова заходить про дійсно складні, великі системи, такі, як ціле місто, гігантська логістична мережа чи енергосистема країни, традиційний підхід до проектування цифрових двійників не дає потрібного результату. Монолітна, єдина модель такої системи не може впоратися зі складністю та обсягом даних [1]. Саме тому майбутнє технології – за більш децентралізованими двійниками. За такого підходу, сам цифровий двійник стає мультиагентною системою, де кожен агент відповідає за окремий актив, процес чи потік даних. Мультиагентні моделі вирішують деякі проблеми проектування складних систем, проте і мають ряд недоліків. Головна проблема такого підходу полягає у тому, що складність роботи системи переноситься на рівень нижче, до рівня самих агентів. Основним питанням, який потрібно

вирішити, є розв'язання неминучих конфліктів за ресурси чи пріоритети. Звичайно, для цього намагаються пристосувати класичні методи вирішення конфліктів (наприклад, механізм переговорів). Такі методи є ефективними у більшості випадків, але вони створювалися для інших, значно повільніших завдань. У швидкісному та комплексному середовищі цифрового двійника складної системи вони миттєво створюють «затор» з повідомлень та обчислень, що блокує найголовнішу функцію для Індустрії 4.0 – синхронізацію з реальним світом.

Постановка задачі

Метою цього дослідження є критичний аналіз методів вирішення конфліктів мультиагентної системи та виявлення основних проблем їх застосування при проектуванні цифрового двійника складної системи.

Аналіз методів вирішення конфліктів у мультиагентній системі

Розглянемо найпопулярніші методи комунікації у мультиагентній системі, проаналізуємо їх основну ідею та виділимо недоліки для роботи цифрового двійника складної системи.

Централізоване управління – спосіб організації взаємодії у мультиагентній моделі, при якому усі комунікації здійснюються через головний (центральний) агент [2]. За такої архітектури моделі комунікація між агентами легко реалізуються, не виникає конфліктів, проте сам координатор стає вразливим місцем (bottleneck) системи. Особливо це помітно для складної системи із великою кількістю агентів та ресурсів, адже весь потік даних від тисяч фізичних датчиків та всі комунікації між тисячами агентів цифрового двійника мають проходити через одну точку. Це створює неприйнятні затримки та унеможлиблює синхронізацію в реальному часі, що нівелює саму ідею технології цифрових двійників. Отже, можемо зробити висновок, що будь-яка життєздатна мультиагентна модель цифрового двійника має бути децентралізованою [2-4].

Переговори (Negotiation) – децентралізований механізм вирішення конфліктів, при якому два або більше агентів вступають у пряму комунікацію для досягнення взаємно прийнятної угоди [3]. Це ітеративний процес, в ході якого агенти обмінюються пропозиціями та контрпропозиціями, намагаючись знайти компроміс, який максимізує (або принаймні задовольняє) їхні індивідуальні функції корисності. Конфлікт, як правило, стосується розподілу ресурсів, узгодження планів або вибору спільних дій. Попри простоту та очевидність роботи механізму, він має ряд недоліків для застосування у складних системах. У першу чергу, це складність багатосторонніх переговорів. Якщо в конфлікті задіяно більше двох агентів, складність протоколу та пошуку рішення може зростати

експоненціально. Відповідно ситуація із взаємодією багатьох агентів для вирішення конфліктів у цифровому двійнику може бути не одна, що породжує тисячі повідомлень для комунікації. У більшості випадків переговори – це дуже повільно, адже вони вимагають багатьох обмінів повідомленнями (пропозиція → оцінка → контрпропозиція), обробка яких займає достатньо багато часу та вимагає достатньої кількості обчислювальних ресурсів. Поки агенти «домовляться», реальна ситуація у фізичному світі, яку вони моделюють, може сильно змінитися і відповідно цифровий двійник буде значно відставати від реальності [5].

Аукціони – централізований або напів централізований ринковий механізм вирішення конфліктів за обмежені ресурси [3-4]. Основна ідея механізму полягає у тому, що агенти («покупці») змагаються за право володіння або використання ресурсу, надсилаючи свої «ставки» (bids) спеціальному агенту – аукціоністу. Ресурс отримує агент, який запропонував «найвищу ціну». «Ціна» є абстрактним поняттям і може виражати пріоритет, готовність чекати, необхідну енергію, або інший вимір корисності. Якщо порівнювати механізми *переговорів* і *аукціонів*, то останній є значно швидшим, адже у ньому, хто запропонував «найвищу ціну» (у будь-якому вимірі), той і виграв. Проте це добре працює, коли проблема одновимірна (наприклад, просто ціна). Варто враховувати, що конфлікти у складних системах рідко бувають простими – вони стосуються пріоритету, часу, енергоспоживання одночасно. Зводячи складний конфлікт до простого аукціону, система втрачає загальну ефективність і знаходить не найкраще, а рішення, що найбільше виділяється серед конкурентів. Також варто згадати, що існує проблема оцінки ставки, адже зазвичай вона залежить від багатьох умов і її значення може змінюватись від моменту часу, коли вона була обрахована. Відповідно з'являється різниця між цінами старіших і новіших ставок. Також, аукціон пробігає через єдиний сервіс «аукціонера», що також створює вразливе місце системи [4, 5].

Результати аналізу

Для проведення дослідження обрано наступні показники для порівняння методів вирішення конфліктів: швидкість, обчислювальна складність, гнучкість (здатність до підлаштування під поточні умови системи), та здатність до виграшу обох конфліктних агентів («Win-Win»). Результати порівняльного аналізу наведено у табл.1.

Відповідно до результатів аналізу, можна зробити висновок, що наявні методи вирішення конфліктів повільні або зовсім не гнучкі, що робить їх застосування недоцільним для складних систем. Також варто відмітити, що централізовані рішення створюють вразливе місце системи

(«bottleneck»). Усі ці проблеми призводять до затримок та втрати узгодженості даних між реальним об'єктом та цифровим двійником.

Таблиця 1

Порівняння методів вирішення конфліктів

Механізм	Швидкість	Обчислювальна складність	Здатність до «Win-Win»	Гнучкість
Центральне управління	Висока	Низька	Відсутня	Дуже низька
Переговори	Низька	Висока	Висока	Висока
Аукціони	Висока	Середня	Низька	Низька

Проведене дослідження визначає актуальність науково-технічної задачі розроблення нових механізмів для вирішення конфліктів між агентами у складних системах. Вони мають бути легковагими, надзвичайно масштабованими, істинно децентралізованими і, що є найважливішим, розробленими для роботи в умовах, коли кожен агент має лише локальну, часткову та не завжди повну інформацію, що надходить у реальному часі.

Висновки

У результаті дослідження виявлено, що традиційні методи, як-от переговори, є ефективними для досягнення гнучких «win-win» рішень у некритичних до часу задачах, тоді як аукціони придатні для швидкого розподілу ресурсів у простих, одновимірних конфліктах. Відповідно до рівня вимог до продуктивності у цифрових двійниках визначено, що централізовані підходи є неефективними через наявність єдиної точки відмови. Подальші дослідження будуть спрямовані на розроблення нового класу масштабованих та децентралізованих механізмів координації. Також доцільно приділити увагу аналізу методів комунікації та синхронізації дій у мультиагентній моделі цифрового двійника складної системи.

Література

1. Wang, Y. Distributed Optimal Control for Large-Scale Networked Systems / Y. Wang, et al. // ArXiv. – 2024. – arXiv:2409.14499v1. – P. 1-15.
2. Lee, J. Decentralized Goal Assignment in Multi-Agent Grid-World Environments / J. Lee, K. Park // ArXiv. – 2025. – arXiv:2510.23824v1. – P. 1-12.

3. Gao, R. Digital Twins in IT Systems: Applications and Challenges in Real-time System Monitoring / R. Gao, et al. // ResearchGate. – 2025. – P. 1-8.
4. Aheleroff, S. Multi-Agent Systems in Support of Digital Twins: A Survey / S. Aheleroff, et al. // ResearchGate. – 2022. – P. 1-18.
5. Challenges in Monitoring Multi-Agent Systems at Scale and Their Solutions // Galileo.ai Blog. – 2025.