

УДК 004.457

О.Є. КОВАЛЕНКО*

СИТУАЦІЙНІ МОДЕЛІ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ В СИСТЕМАХ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

*Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Анотація. Інтенсивне зростання підключених об'єктів у системах IoT привело до зростаючого попиту на інтелектуальні системи для автоматичного та спрощеного керування повсякденним життям. Ці системи спрямовані на спрощення керування такими функціями, як освітлення, опалення, безпека та робота приладів, що сприяє комфорту та енергоефективності. З цієї точки зору, ситуаційний контекст, який охоплює інформацію про фізичне середовище, уподобання користувачів, поточну діяльність та інші відповідні змінні, може значно підвищити здатність систем IoT передбачати та реагувати на потреби мешканців. Однак інтеграція ситуаційного контексту в системи IoT представляє значні технічні та концептуальні проблеми. Однією з ключових проблем є розробка точних і динамічних ситуаційних моделей, які можуть враховувати різноманітні та змінні параметри. Крім того, потреба в обробці великих обсягів даних із кількох пристроїв IoT у режимі реального часу вимагає надійної та масштабованої архітектури. У сфері інтернету речей, де новітні технології перетворюють наше середовище існування на динамічні та адаптивні екосистеми, здатність ситуаційного моделювання та умовиводу стає важливою опорою для забезпечення інтелектуальної та персоналізованої взаємодії між користувачами та їхнім середовищем. Агентно-орієнтований підхід є природним шляхом до побудови різних природних і штучних систем, що відрізняються відповідною складністю, динамічністю, ситуацією та автономією. Зокрема, сильний концептуальний зв'язок існує між агентами та інтелектуальними компонентами IoT, а також між мультиагентними системами та IoT. Отже, враховуючи весь набір вимог і проблем, пов'язаних із розробкою систем Інтернету речей, агентно-орієнтований підхід можна використовувати для моделювання, програмування та імітації застосунків і систем інтернету речей і систематично просувати та прискорювати їх розвиток. Розглянуті у статті аспекти ситуаційного моделювання та умовиводу дозволяють сформулювати технологічний базис інтелектуальної підтримки процесів функціонування у системах інтернету речей.

Ключові слова: інтернет речей, ситуаційний агент, онтологія, інтелектуальні обчислення.

Abstract. The rapid growth of connected objects in IoT systems has led to a growing demand for intelligent systems for automated and simplified management of everyday life. These systems aim to simplify the management of functions such as lighting, heating, security, and appliance operation, contributing to comfort and energy efficiency. From this perspective, situational context, which encompasses information about the physical environment, user preferences, current activities, and other relevant variables, can significantly enhance the ability of IoT systems to forecast and respond to the needs of residents. However, integrating situational context into IoT systems presents significant technical and conceptual challenges. One of the key challenges is the development of accurate and dynamic situational models that can take into account diverse and changing parameters. In addition, the need to process large amounts of data from multiple IoT devices in real time requires a reliable and scalable architecture. In the field of the Internet of Things, where new technologies transform our living environment into dynamic and adaptive ecosystems, the ability of situational modeling and inference becomes an important support for ensuring intelligent and personalized interaction between users and their environment. The agent-oriented approach is a natural way to build various natural and artificial systems that differ in their respective complexity, dynamism, situation, and autonomy. In particular, a strong conceptual connection exists between

agents and intelligent IoT components, as well as between multi-agent systems and IoT. Thus, taking into account the entire set of requirements and problems associated with the development of Internet of Things systems, the agent-oriented approach can be used to model, program, and simulate Internet of Things applications and systems and systematically promote and accelerate their development. The aspects of situational modeling and inference considered in the article allow for forming a technological basis for intelligent support of the processes of functioning in Internet of Things systems.

Keywords: Internet of Things, situational agent, ontology, intelligent computing.

DOI: 10.34121/1028-9763-2025-2-15-23

1. Вступ

Системи інтернету речей (Internet of Things, IoT) застосовуються в різних сферах діяльності і є одним із ключових механізмів сталого розвитку суспільства.

Інтернет речей (IoT) швидко розвивається в напрямі, коли забезпечуються активний моніторинг, виявлення сигналів, ініціювання подій та прогнозне моделювання. Інтернет речей розвинувся зі створення датчиків і включення їх якостей до екосистем пристроїв через усвідомлення контексту. Розпізнавання контексту системи [1] відіграє важливу роль в архітектурі програмного забезпечення, дозволяючи налаштовувати послуги відповідно до поточної ситуації з мінімальним втручанням людини. Контекстна ситуаційна обізнаність усуває розрив між реальними речами та віртуальним світом в IoT шляхом отримання, аналізу та інтерпретації відповідної контекстної інформації [2]. Контекстна інформація в цю нову еру вимірюється не лише як набір обставин або фактів, які оточують конкретну подію чи ситуацію, але як інформація про навколишнє середовище користувачів, яка може вплинути на їхнє розуміння контексту.

Обробка контекстної інформації з середовища вимагає ідентифікації відповідного контексту. Середовище IoT має величезну кількість джерел контексту, і їхня кількість зростає щодня. На фактори, що впливають на зміну контекстів, впливає не лише різноманітне середовище з різними обчислювальними та некомп'ютерними пристроями, але й динамічність поведінки користувачів, а адаптивне та реконфігуроване проміжне програмне забезпечення з урахуванням контексту IoT є багатообіцяючим рішенням.

Контекст системи — це частина системного середовища, яка є релевантною для визначення та розуміння функціонування системи. Контекст для системи IoT — це будь-які знання, якими можна поділитися, для представлення ситуацій або умов із різних частин системи [3]. Діапазон контекстів може містити, але не обмежуватися ними, контекст пристрою, контексти мережі, контексти системи та контексти середовища [4]. Безперечно, комунікаційні об'єкти (об'єкти чи речі) у контексті інтернету речей (IoT) відіграють активну роль у людській діяльності, системах і процесах. Інтернет речей (у перспективі Web of Things) змінює моделі взаємодії з граничними пристроями [5]. Можливості та нові послуги, які вони надають, дозволяють користувачам виконувати автоматичні операції та відстежувати цікаві дані. Незважаючи на те, що багато операцій виконуються пристроями автономно, користувач повинен розуміти надані дані та налаштовувати власні служби відповідно до них.

Метою статті є аналіз підходів і засобів обробки ситуаційної інформації в системах IoT.

2. Представлення ситуаційної інформації в системах IoT

Інтенсивне зростання підключених об'єктів у системах IoT привело до зростаючого попиту на інтелектуальні системи для автоматичного та спрощеного керування повсякденним життям. Ці системи спрямовані на спрощення керування такими функціями, як освітлення, опалення, безпека та робота приладів, що сприяє комфорту та енергоефективності домогосподарства. З цієї точки зору, ситуаційний контекст, який охоплює інформацію про фізич-

не середовище, уподобання користувачів, поточну діяльність та інші відповідні змінні, може значно підвищити здатність систем IoT передбачати та реагувати на потреби мешканців. Однак інтеграція ситуаційного контексту в системи IoT представляє значні технічні та концептуальні проблеми. Однією з ключових проблем є розробка точних і динамічних ситуаційних моделей, які можуть враховувати різноманітні та змінні параметри. Крім того, потреба в обробці великих обсягів даних із кількох пристроїв IoT у режимі реального часу вимагає надійної та масштабованої архітектури [6].

Будь-який підхід до контекстного моделювання повинен враховувати специфічні вимоги, як-от об'єм та якість інформації, рівень формальності, розподілену конвергенцію [7], часткову перевірку, неповноту та неоднозначність зібраної інформації. В дослідженні контекстного моделювання різні підходи класифікуються на основі схеми структур даних, які використовуються для обміну контекстною інформацією у відповідній системі [3].

Моделі «ключ-значення». Пари «ключ-значення» — це прості структури даних, які широко використовуються в системах IoT для представлення контексту компонентів та керування ними. Як приклад ми можемо представити поточний стан приладу IoT, де ключ є «стан», а значення — «увімкнено» або «вимкнено». Так само для кліматичної підсистеми IoT ключем може бути «режим», а значенням може бути «охолодження» або «нагрів».

Пари «ключ-значення» є простими та ефективними методами представлення й керування контекстом. Однак такий підхід має певні обмеження. Ця модель дає змогу відобразити стан компонента IoT, але не може визначити зв'язок між станом компонента та іншими параметрами середовища. Крім того, підхід «ключ-значення» не дає можливості керувати невизначеністю в контексті. Наприклад, якщо датчик температури повідомляє про температуру 24⁰ C, модель не може визначити, чи є це бажаною температурою, оскільки вона не враховує цільове призначення системи.

Підхід «ключ-значення» не враховує часові чи просторові аспекти контексту. Наприклад, він далеко не відповідає тому факту, що змінилось розташування об'єктів із часом. Нарешті, підхід «ключ-значення» може бути не в змозі впоратися з динамічними або мінливими контекстами. Наприклад, якщо контекст швидко змінюється або існують кілька джерел контекстної інформації, важко оновити пари «ключ-значення» в реальному часі або вирішити конфлікти між різними джерелами інформації.

Об'єктно-орієнтовані моделі. Цей підхід використовує принципи об'єктно-орієнтованого програмування для контекстного моделювання. Дійсно, складні системи розбиваються на невеликі об'єкти, якими легко керувати. Наприклад, клас може бути використаний для представлення пристрою IoT, а атрибути можуть бути пов'язані з ним для представлення стану, режиму, параметрів тощо. Крім того, завдяки успадкуванню цей клас можна розширити шляхом визначення підкласів. представляти конкретні типи пристроїв, пов'язуючи їх із певними атрибутами та методами.

Однією з сильних сторін об'єктно-орієнтованого підходу до контекстного моделювання є його здатність керувати неоднозначністю та невизначеністю за допомогою обмежень і правил [8]. Наприклад, можна встановити обмеження, щоб гарантувати, що стан пристрою відповідає встановленому діапазону. Крім того, діаграми переходів станів можна використовувати для представлення динамічної поведінки ідентифікованих об'єктів і асоційованих умов і правил, які обмежують переходи та перехід від одного стану до іншого.

Об'єктно-орієнтований підхід має кілька переваг, як-от модульність, можливість повторного використання та інкапсуляція даних. Однак він також має певні недоліки, які важливо враховувати для розробки масштабованої та легкої в обслуговуванні системи. Дійсно, сильний зв'язок через сильну залежність між класами моделі робить систему жорсткою та менш гнучкою для змін. Крім того, керування зв'язками між об'єктами, класами та успадкуванням може ускладнити розуміння коду.

Моделі на основі онтології. Онтології відіграють важливу роль у контекстному моделюванні завдяки їх структурованому та формальному представленню знань про предметну область [9, 10]. Дійсно, онтології забезпечують загальний і спільний словник предметної області. Цей словник гарантує взаємодію, дозволяючи кільком системам використовувати ту саму онтологію для інтерпретації та обміну контекстною інформацією. Крім того, вони підтримують автоматизовані механізми міркувань і висновків через визначення аксіом і логічних правил. Останнє також дає змогу отримувати нове імпліцитне знання та робити висновки на основі контексту, представленого в онтології [11].

З точки зору масштабованості та гнучкості, онтології дозволяють додавати нові концепції, властивості та зв'язки в міру розвитку домену, полегшуючи адаптацію контекстної моделі до мінливих вимог.

Незважаючи на те, що онтології забезпечують потужне вираження концепцій і зв'язків у контекстному моделюванні, їх складність, вимоги до ресурсів і обмеження в представленні динамічних взаємодій можуть бути недоліками в деяких випадках використання, особливо в середовищах IoT із обмеженнями ресурсів і потребами в контролі в реальному часі.

3. Інтелектуалізація ситуаційної обробки інформації в системах IoT

Розробка систем IoT (інтернету речей) пов'язана з вирішенням проблем, обумовлених конвергентним та ситуаційним характером таких систем, що визначають їх складність. Врахування ситуаційної природи систем IoT на всіх етапах життєвого циклу має важливе значення для розробки повної та точної специфікації цільової системи.

Речі, що утворюють систему IoT, мають спільні цілі й повинні взаємодіяти та співпрацювати, щоб виконувати функції розумної системи. Необхідність спілкуватися з фізичними пристроями та керувати ними надає таким системам нові характеристики. Багато аспектів IoT — програмне забезпечення, апаратне забезпечення, мережа та середовище — необхідно враховувати при визначенні взаємодії системи. Крім того, ситуаційний характер систем інтернету речей створює складності та виклики в процесі складних взаємодій між різними учасниками або суб'єктами такої системи, що має вирішальне значення для успішного функціонування системи. Тому необхідно визначити потенційні ситуації та дослідити можливу ситуаційну поведінку.

Техніки ситуаційного умовиводу дозволяють вивести нове знання з уже наявного контексту ситуації. Ситуаційний умовивід є важливим у парадигмі IoT, оскільки дані, зібрані з датчиків, та іншу інформацію можна аналізувати для прийняття рішень або прогнозів.

Для умовиводу застосовуються різні методи міркувань щодо ситуаційного контексту, включаючи дерева рішень, наївний Байєсів класифікатор, приховані марковські моделі, опорні векторні машини, k-найближчих сусідів, штучні нейронні мережі, на основі теорії Демпстера-Шейфера, онтологічні, на основі правил, нечіткого умовиводу та багато інших [12].

Однак у випадку систем IoT, де датчики виробляють велику кількість контекстної інформації, міркування в цьому контексті вимагає врахування кількох визначальних факторів, як-от ємність пам'яті, час обробки та обчислювальна потужність. З цієї точки зору, у дослідженні [1] методи моделювання класифіковано на п'ять основних категорій: контрольоване навчання, неконтрольоване навчання, на основі правил, онтологічний та ймовірнісний умовивід. Оскільки системи IoT віддають перевагу полегшеним технологіям обробки для забезпечення їх ефективності та швидкодії, розглянемо деякі моделі.

Контрольоване навчання. Контрольоване навчання, як-от дерева рішень, машини опорних векторів або нейронні мережі, можна використовувати для навчання алгоритмів на наборах даних користувача. Дані, зібрані з показань датчиків, дій користувачів і даних

про навколишнє середовище, використовуються для навчання моделі для вивчення зв'язків між вхідними контекстними даними та результатами. Коли модель навчена, її можна використовувати для висновків або прогнозів або для надання рекомендацій на основі опису ситуації. Для підвищення точності та ефективності моделі у ситуаційних задачах продуктивність моделі постійно оцінюється на основі її прогнозів і відгуків користувачів.

Однак проблемою підходу на основі контрольованого навчання є потреба у великих обсягах позначених навчальних даних, отримання яких може зайняти багато часу та значно коштувати, особливо в реальних програмах, де потрібні набори даних для конкретного користувача. Крім того, ефективність методів навчання в ситуаційних міркуваннях може бути обмежена такими проблемами, як якість даних і нерелевантні атрибути в навчальному наборі даних. Ці фактори можуть вплинути на здатність моделі адаптуватися до ситуації та взаємодії з користувачем.

Неконтрольоване навчання. Неконтрольоване навчання не потребує позначених даних, що робить його ідеальним для вивчення та виявлення шаблонів в інформації. Це може стосуватися даних взаємодії датчиків із користувачами або факторів навколишнього середовища. У випадку додатків з усвідомленням контексту алгоритми неконтрольованого навчання в основному використовуються для пропозицій кластеризації. Дійсно, такі алгоритми, як кластеризація k-середніх, ієрархічна кластеризація та DBSCAN, використовуються для класифікації пов'язаних точок даних за їхніми характеристиками. Це групування допомагає розпізнавати закономірності та зв'язки в даних, що може бути цінним для аналізу. Крім того, такі методи, як ізоляційний ліс, однокласові SVM і автоматичні кодери, використовуються для виявлення аномалій шляхом ідентифікації викидів або нерегулярних шаблонів у наборі даних. Ці методи відіграють певну роль у визначенні сценаріїв, які вимагають особливої уваги та ретельного вивчення. У рамках зменшення розмірності такі методи, як аналіз головних компонентів (PCA) і t-розподілене стохастичне вбудовування сусідів (t-SNE), можуть бути використані для зменшення кількості ознак, зберігаючи важливу інформацію. Мета полягає в тому, щоб спростити представлення даних для кращого розуміння ситуації.

Алгоритми неконтрольованого навчання також мають кілька недоліків для додатків ситуаційного умовиводу. Дійсно, відсутність позначених даних означає, що немає відповідей для вимірювання результатів, що ускладнює оцінку ефективності та точності моделі в ситуаційних задачах. Крім того, оцінка продуктивності алгоритмів неконтрольованого навчання в додатках з обґрунтуванням контексту може бути суб'єктивною та залежати від вибраних показників оцінювання. Для визначення ефективності методів кластеризації, виявлення аномалій або зменшення розмірності можуть знадобитися критерії, що стосуються конкретної області.

Умовивід на основі правил. Умовивід на основі правил зазвичай встановлюється в структурі IF-THEN, де певні умови запускають дії. Коли йдеться про ситуаційні міркування, ці правила можна використовувати для встановлення зв'язків між ситуаційними елементами (діями, ситуаціями, флюєнтами) або подіями [13]. Крім того, правила можуть допомогти у виділенні загальної ситуаційної інформації з даних. Пов'язуючи фактори або ознаки разом, система може отримати уявлення або зробити висновки щодо ситуації. Наприклад, високий пульс у поєднанні з бігом може свідчити про те, що людина займається спортом. Однак використання правил для ситуаційного умовиводу може спричинити проблеми, пов'язані зі складністю підтримки та керування великою базою правил.

Також взаємодія між визначеними правилами може призвести до таких проблем, як конфлікти, надмірності або неоднозначності, які нелегко передбачити або виправити. Вирішення конфліктів і забезпечення узгодженості правил можуть бути складними завданнями. Подібним чином у сценаріях, коли кілька правил застосовуються одночасно, вибір ме-

ханізмів для визначення пріоритету в ситуаціях, пов'язаних із контекстом, може бути не-тривіальним завданням.

Проблема масштабування ситуаційних систем, заснованих на правилах, для управління все більшою кількістю ситуаційних елементів є гостро необхідною, оскільки продуктивність цих систем може значно погіршитися головним чином через збільшення обчислювального навантаження та часу відповіді в процесі розширення бази правил.

Щоб подолати ці труднощі, використання таких стратегій, як перевірка правил, механізми вирішення конфліктів, підходи до навчання на основі правил і методи оптимізації правил значно покращують продуктивність систем ситуаційного умовиводу на основі правил.

Онтологічний умовивід. Онтології забезпечують формальне та структуроване представлення знань, дозволяючи системам зрозуміти семантику даних, з якими вони працюють [14]. Онтології дозволяють фіксувати залежності та взаємодії між різними елементами контексту. Визначаючи контекстуальні правила й аксіоми в онтології, система може міркувати про конкретні ситуації, беручи до уваги контекст, у якому вони відбуваються.

Завдяки таким мовам, як OWL, онтології полегшують дедуктивне міркування, дозволяючи виводити нову інформацію з існуючих знань. Використовуючи логічні правила й аксіоми, визначені в онтології, система може виводити додаткові факти чи зв'язки щодо ситуації, яка дозволяє приймати більш складні рішення. Однак використання онтологій для ситуаційного умовиводу також представляє певні обмеження та проблеми. Ми посиляємося, зокрема, на складність міркувань у випадку великих онтологій, що вимагає значних обчислювальних ресурсів, які можуть бути дорогими з точки зору часу та розрахунків. Також виникає проблема оновлення онтології для відображення змін у контексті. З цією метою оновлення бази знань вимагатиме значних зусиль і ретельного перегляду.

4. Ситуаційні агенти в системах IoT

Агентно-орієнтований підхід є природним шляхом до побудови різних природних і штучних систем, що відрізняються відповідною складністю, динамічністю, ситуацією та автономією. Зокрема, сильний концептуальний зв'язок існує між агентами та інтелектуальними компонентами (ІнтК) IoT, а також між мультиагентними системами (MAS) та IoT. Отже, враховуючи весь набір вимог і проблем, пов'язаних із розробкою систем інтернету речей, агентно-орієнтований підхід можна використовувати для моделювання, програмування та імітації застосунків і систем інтернету речей і систематично просувати та прискорювати їх розвиток [15].

Агентне моделювання дозволяє фіксувати ключові характеристики ІнтК та систем IoT з різним ступенем деталізації та незалежно від технологій. Дійсно, автономія ІнтК, проактивність і ситуація неявно вбудовані в модель агента, тоді як інші важливі функції ІнтК можуть бути явно описані через концепції, пов'язані з агентом. При описі поведінки «розумних» агентів слід також враховувати їх обмежену раціональність, пов'язану з проблемою вибору, обмеженнями знань, доступними ресурсами тощо. Обмежена раціональність, яка є основою математичного моделювання при прийнятті рішень, використовується як певна оптимізація, коли прийняття рішень розглядається як цілком раціональний процес пошуку оптимального вибору з урахуванням наявної інформації та ситуації.

Ситуаційним агентом є цілеспрямований суб'єкт предметної області, якому притаманна модель раціональної поведінки на основі усвідомлення, аналізу та прогнозування наслідків поточної ситуації. Отже, метою ситуаційного агента є вплив на процеси ситуаційного середовища для зміни його стану у відповідності з уявленнями (знаннями, переконаннями) агента [16].

Отже, функціональні спроможності ІнтК описуються в термінах цілей, робочий план ІнтК у термінах поведінки та компоненти, пов'язані з розширенням ІнтК (наприклад,

бази знань, датчики та виконавчі механізми) в термінах ресурсів агента, які динамічно зв'язуються. Для опису ситуаційних агентів, що представляють окремі ІнтК, використовуються моделі на основі:

- ролей, що визначають поведінку, цілі та комунікації;
- шаблонів, що містять плани та цілі і відображають функціональні можливості;
- автоматної самомоделі, що керує своїми діями відповідно до стимулів (змодельованих, як повідомлення) від інших агентів або середовища;
- реакцій, керованих вхідними (внутрішніми/зовнішніми) подіями та цілями розробки (інкапсульованими в завданнях на основі стану).

Агентно-орієнтовані методології можуть бути адаптовані відповідно до контексту існуючих IoT або розроблені з нуля. Однак, окрім дисципліни використання агентного набору моделей, методів програмування та інструментів моделювання, необхідно враховувати специфічні вимоги IoT при застосуванні агентного підходу [6]. Для розробки системи IoT на основі агентів потрібно:

- ретельно розглядати кіберфізичну природу залучених об'єктів і середовищ, передбачаючи за проектом рішення для сумісності, безпеки та масштабованості;
- підкреслювати ідентифікацію користувачів IoT та зацікавлених сторін, зображуючи важливі випадки використання через текстові описи та технічні позначення, як-от UML (Unified Modeling Language) або BPMN (Business Process Model Notation), для відповідності різним знанням і перспективам;
- визначати належне управління, координацію та механізми віртуалізації, зазвичай розташовуючи їх на рівні проміжного програмного забезпечення, для склеювання апаратних і програмних компонентів;
- аналізувати інфраструктурні особливості та обмеження відповідно до конкретних системних вимог IoT, оскільки ці фактори не можна розглядати незалежно;
- надавати вказівки та найкращі практики для звільнення розробників від певної технології чи протоколу, стимулювання та сприяння інтеграції різних обчислювальних парадигм і прикладних контекстів.

Використовуючи такі ключові характеристики агентів, як автономію, проактивність, інтелект і комунікабельність, агентно-орієнтований підхід можна ефективно використовувати як парадигму моделювання, програмування та симуляції для розробки екосистем інтернету речей. Агентно-орієнтований підхід дозволяє моделювати системи IoT із різним ступенем деталізації, полегшуючи (технічну, синтаксичну та семантичну) сумісність, автономність і розподілений інтелект, а також перевіряючи кілька варіантів дизайну перед їх фактичним розгортанням. Методології на основі агентів можна масштабувати для систематичного управління повним процесом розробки, підтримуючи інтеграцію з іншими парадигмами (хмарні обчислення, управління бізнес-процесами). Однак перш ніж застосовувати агентно-орієнтований підхід в IoT, необхідно розглянути основні прагматичні аспекти, інакше накладні витрати на роботу з агентами можуть переважити будь-які переваги рішення на основі агентів.

По-перше, слід враховувати рівень зрілості агентної технології (технологічний рівень) та доступність комерційних платформ на основі агентів, враховуючи аспекти стандартизації та семантичної сумісності, що є важливим для систем IoT.

По-друге, слід забезпечити інвестиції (з точки зору часу та ресурсів), необхідні для впровадження агентних рішень для IoT, які зазвичай є дорожчими, ніж централізовані та орієнтовані на послуги.

По-третє, слід позбуватись оманливих уявлень, як-от:

- Агенти є універсальними рішеннями — не всі класи додатків IoT підходять для технік на основі агентів.

- Все може бути вигідно агентизовано — агенти за своєю суттю є автономними багатопоточними розв’язувачами проблем, тому рішення на основі агентів може бути невідповідним для систем, що потребують лише одного потоку керування (наприклад, прості програми моніторингу інтернету речей), або нестабільним у випадку обмежених ресурсів і пристроїв інтернету речей (наприклад, неможливість реалізувати механізми автоматичної обробки конфліктів між політиками, синхронізації доступу до спільних ресурсів, розробка розподіленого інтелекту).

5. Ситуаційне числення в агентних системах IoT

Ситуаційне числення — це інструмент планування, який запитує ситуацію, в якій мета відповідає дійсності. Ця ситуація може являти собою серію дій, які повинен виконати агент. Ситуаційне числення — це логічний формалізм, який використовується для представлення та міркування про динамічні домени. Передбачуване використання ситуаційного числення полягає в тому, що експерт предметної області аксіоматизує відповідні аспекти функціонування агента, включаючи його динаміку, а потім використовує деякий автоматичний механізм міркувань, щоб дійти обґрунтованих висновків про предметну область, зокрема, про те, що відбудеться після виконання ряду дій. Крім усього іншого, потрібні аксіоми, які описують наслідки дій, їх передумови та те, що є істинним спочатку.

Опис предметної області (домени) являє собою кортеж, що містить:

- аксіоми передумови дії, по одній для кожної дії;
- аксіоми наступних станів, по одній для кожного флюента;
- аксіоми, які описують світ у різноманітних контекстах;
- основні аксіоми ситуаційного числення.

Ситуаційне числення визначається в термінах ситуацій.

Ситуація є:

- або *init*, початкова ситуація;
- або $do(A, S)$, ситуація, що виникає в результаті виконання дії A в ситуації S , якщо можливо виконати дію A в ситуації S .

Ситуацію можна асоціювати зі станом. Є дві основні відмінності між ситуаціями та станами:

1. Кілька ситуацій можуть стосуватися одного стану, якщо декілька послідовностей дій приводять до того самого стану. Тобто еквівалентність ситуацій не означає еквівалентності між станами.

2. Не в усіх станах є відповідні ситуації. Стан досяжний, якщо існує послідовність дій, які можуть досягти заданого стану з початкового стану. Недоступні стани не мають відповідної ситуації.

Деякі терми $do(A, S)$ не відповідають жодному стану. Однак іноді агент повинен робити умовивід про потенційну ситуацію, не знаючи, чи можливий A у стані S , чи можливий S .

6. Висновки

У сфері інтернету речей, де новітні технології перетворюють наше середовище існування на динамічні та адаптивні екосистеми, здатність ситуаційного моделювання та умовиводу стає важливою опорою для забезпечення інтелектуальної та персоналізованої взаємодії між користувачами та їхнім середовищем.

На основі аналізу особливостей ситуаційного моделювання в системах інтернету речей визначено найбільш прийнятні моделі представлення ситуаційної інформації. Для інтелектуалізації обробки ситуаційної інформації слід використовувати алгоритми, що відповідають області системи інтернету речей з урахуванням їх переваг та недоліків. При ви-

борі технології програмної обробки ситуаційної інформації слід враховувати обмеження агентного підходу при вирішенні певних типів завдань.

Розглянуті у статті аспекти ситуаційного моделювання та умовиводу дозволяють сформулювати технологічний базис інтелектуальної підтримки процесів функціонування у системах інтернету речей.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Perera C., Zaslavsky A., Christen P., Georgakopoulos D. Context Aware Computing for The Internet of Things: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2014. Vol. 16, N 1. P. 414–454. First Quarter. DOI: <https://doi.org/10.1109/SURV.2013.042313.00197>.
2. Martinez-Villasenor M.d.L., Gonzalez-Mendoza M. Sharing and Reusing Context Information in Ubiquitous Computing Environments. *Artificial Intelligence (MICAI): 13th Mexican International Conference on*, 2014. P. 227–230.
3. Mouhim S., Lachhab F. Towards a Context Awareness System Using IoT, AI, and Big Data Technologies. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. P. 40302–40315. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3546865>.
4. Liu Y., Seet B.-C., Al-Anbuky A. An Ontology-Based Context Model for Wireless Sensor Network (WSN) Management in the Internet of Things. *Journal of Sensor and Actuator Net-works*. 2013. N 2 (4). P. 653–674. DOI: <https://doi.org/10.3390/jsan2040653>.
5. Коваленко О.Є. Інтелектуалізація граничних обчислень інтернету речей. *Математичні машини і системи*. 2024. № 3–4. С. 50–68. DOI: <https://doi.org/10.34121/1028-9763-2024-3-4-50-68>.
6. Коваленко О.Є., Смолій В.М., Лі Л. Інженерія вимог систем інтернету речей. *Математичні машини і системи*. 2025. № 1. С. 64–75. DOI: <https://doi.org/10.34121/1028-9763-2025-1-64-75>.
7. Коваленко О.Є. Конвергенція інтернету речей та систем ситуаційного управління. *Математичні машини і системи*. 2023. № 3. С. 89–103. DOI: <https://doi.org/10.34121/1028-9763-2023-3-89-103>.
8. Brézillon P. From context modeling to implementation for individuals. *Research on Modeling and Using Context Over 25 Years*. 2023. P. 29–39. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-39338-9>.
9. Kovalenko O. Knowledge Driven Cyber-Convergent Systems Based on Situational Agents. *IEEE: 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. 2022. P. 243–246. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000762>.
10. Коваленко О.Є. Онтологічна модель архітектури кібернетичної організаційної системи. *Математичні машини і системи*. 2022. № 3. С. 137–147. DOI: <https://doi.org/10.34121/1028-9763-2020-3-93-104>.
11. Babli M., Onaindia E. A context-aware knowledge acquisition for planning applications using ontologies. arXiv:1904.09845. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1904.09845>. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.09845>.
12. Anderson C., Suarez I., Xu Y., David K. An Ontology-Based Reasoning Framework for Context-Aware Applications. *Modeling and Using Context. CONTEXT 2015: Lecture Notes in Computer Science()* / H. Christiansen, I. Stojanovic, G. Papadopoulos (eds.). 2015. Vol. 9405. Springer, Cham. P. 471–476. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-25591-0_34.
13. Kowalski R., Sadri F. Reconciling the event calculus with the situation calculus. *Journal of Logic Programming*. 1997. Vol. 31, Issues 1–3. P. 39–58. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0743-1066\(96\)00137-9](https://doi.org/10.1016/S0743-1066(96)00137-9).
14. Kovalenko, O. Information Taxonomy and Ontology for Situational Management. *IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT 2018: Proc.* 2018. Vol. 2, 7 November 2018, Article number 8526723. P. 94–97. DOI: <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2018.8526723>.
15. Savaglio C., Ganzha M., Paprzycki M., Bădică C., Ivanović M., Fortino G. Agent-based Internet of Things: State-of-the-art and research challenges. *Future Generation Computer Systems*. 2020. Vol. 102. P. 1038–1053. ISSN 0167-739X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.09.016>.
16. Коваленко О.Є. Онтологія та модель трансформації інформації в ситуаційних агентних системах. *Електронне моделювання*. 2020. Т. 42, № 5. С. 3–23. DOI: <https://doi.org/10.15407/emodel.42.05.005>.

Стаття надійшла до редакції 19.03.2025