

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-8>

УДК 004.8:004.912:006.3:003.64

ВЕРЕМЕСНКО АНДРІЙ

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0000-1916-3254>

email: andriiwerem@gmail.com

КУНАНЕЦЬ НАТАЛІЯ

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-3007-2462>

e-mail: nek.lviv@gmail.com

ТЕМПОРАЛЬНІ ОНТОЛОГІЇ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ З СИТУАЦІЙНОЮ ОБІЗНАНІСТЮ

У статті розглянуто проблему формалізації знань у сучасних системах з ситуаційною обізнаністю. Розглянуто використання темпоральних онтологій, зокрема OWL-Time, SOSA та CNTRO, як ефективного засобу формального представлення часових характеристик подій, їх послідовності, тривалості та взаємозв'язків. Проведено аналіз сучасних підходів до моделювання часу в онтологіях, включаючи логіку Аллена, темпоральне розширення RDF та мову запитів SPARQL із часовими обмеженнями. Багаторівнева архітектура СО-системи включає шари збору подій, семантичного опрацювання, онтологічного представлення, логічного виведення та візуалізації, з прив'язкою до конкретних технологій реалізації засобами платформи .NET та бібліотек для роботи з RDF/OWL. У статті також розглянуто практичні приклади реалізації темпоральних онтологій у сферах кібербезпеки, управління надзвичайними ситуаціями, екологічного моніторингу та IoT. Проведено порівняльний аналіз наукових публікацій, що підтверджує актуальність та ефективність темпорального моделювання для підвищення точності ситуаційного аналізу. Обґрунтовано можливість адаптації існуючих онтологій до задач із неповною або нечіткою часовою інформацією. Результати роботи можуть бути використані при створенні інтелектуальних безпекових, моніторингових та когнітивних інформаційних систем, що функціонують у режимі реального часу. Подальші дослідження доцільно спрямувати на інтеграцію темпоральних онтологій із нейромережевими моделями для автоматичного виявлення часових закономірностей, а також на розширення формальних засобів для опрацювання нечітких інтервалів часу. Запропонований підхід створює основу для побудови гнучких та адаптивних систем ситуаційної обізнаності.

Ключові слова: ситуаційна обізнаність, інтелектуальні системи, темпоральні онтології, OWL-Time, логіка Аллена.

VEREMEENKO ANDRII, KUNANETS NATALIA

Lviv Polytechnic National University

TEMPORAL ONTOLOGIES IN INTELLIGENT SITUATION AWARENESS SYSTEMS

This article addresses the problem of formal knowledge representation in modern situation awareness (SA) systems. Special attention is given to the use of temporal ontologies, particularly OWL-Time, SOSA, and CNTRO, as effective tools for modeling the temporal characteristics of events, including their sequence, duration, and interrelations. The paper provides a comprehensive analysis of contemporary approaches to temporal modeling in ontologies, such as Allen's interval algebra, temporal extensions of RDF, and the SPARQL query language with temporal constraints. Architecture for SA systems is proposed, which incorporates data acquisition, semantic annotation, ontological representation, temporal reasoning, and presentation layers, with a strong focus on implementation using .NET technologies and libraries for RDF/OWL processing. Furthermore, the paper examines practical examples of how temporal ontologies are applied in various domains, including cybersecurity, emergency management, environmental monitoring, and the Internet of Things. A comparative review of recent academic publications confirms the relevance and effectiveness of temporal modeling in enhancing the accuracy and reliability of situation assessment. The potential for adapting existing ontologies to address challenges involving incomplete or fuzzy temporal information is also substantiated. The results of this study can be applied to the development of intelligent security, monitoring, and cognitive systems operating in real-time environments. Future research directions include the integration of temporal ontologies with neural network models for automated discovery of temporal patterns, and the advancement of formal tools for handling uncertain or imprecise time intervals. The proposed approach lays the groundwork for the development of flexible, adaptive, and semantically rich situation awareness systems.

Keywords: situation awareness, intelligent systems, temporal ontologies, OWL-Time, Allen's interval logic.

Стаття надійшла до редакції / Received 08.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 12.06.2025

Постановка проблеми

У сучасних інформаційних безпекових системах зростає потреба в автоматичному розпізнаванні, інтерпретації та прогнозуванні динамічних ситуацій у реальному часі. Особливо це актуально для інтелектуальних систем з ситуаційною обізнаністю (СО), що функціонують у сферах безпеки, охорони здоров'я, кіберзахисту та моніторингу середовища. Однак більшість традиційних онтологічних моделей обмежено підтримують темпоральні зв'язки, не забезпечуючи достатнього представлення послідовності, тривалості та взаємозв'язку подій у часі. Це ускладнює реалізацію механізмів, що враховують часову динаміку, особливо у комплексних багатофакторних середовищах. Існуючі стандарти, частково вирішують цю проблему, однак їх практичне застосування вимагає чіткої архітектурної інтеграції та адаптації до конкретних прикладних задач. Наприклад, OWL-Time забезпечує формалізоване представлення часових моментів та інтервалів, але потребує розширення для підтримки нечітких інтервалів та невизначеності, що характерні для реальних сценаріїв. Актуальною є задача розроблення формальних та інженерних рішень для

ефективного представлення і використання темпоральних та спатіо-темпоральних онтологій у системах ситуаційної обізнаності, що забезпечать часову когерентність інформації.

Аналіз досліджень та публікацій

Останні роки характеризуються зростанням інтересу до використання темпоральних онтологій у системах з ситуаційною обізнаністю, що пов'язано з потребою у формалізованому представленні подій у часі, їх зв'язків та динамічного опрацювання знань у режимі реального часу. В роботі Carmen Sánchez-Zas та співавторів запропоновано онтологічний підхід до управління ризиками у сфері кібербезпеки та реалізації системи ситуаційної обізнаності в реальному часі, де знання моделюються за допомогою OWL-онтологій, а висновок ґрунтується на темпоральних залежностях і логіці [1].

Дослідження К. Janowicz та колег присвячено розробці онтології SOSA, яка стала базовим стандартом для опису сенсорних подій, учасників подій та спостережень у контексті IoT-систем; онтологія інтегрується з OWL-Time і дозволяє репрезентувати часові інтервали та моменти для подій у середовищах з високою інтенсивністю даних [4].

У роботі Black, J. та Cherrington, J. представлено концептуальний підхід до розвитку екологічної обізнаності через темпоральну онтологію, де ключовою ідеєю є аналіз взаємозв'язків між минулим і теперішнім через філософську модель «паралаксу минуле–теперішнє». Автори показують, що онтологічне представлення часу не лише сприяє когнітивній інтерпретації природних явищ, а й виступає як основа для побудови інтелектуальних систем, здатних інтегрувати часові аспекти в екологічні моделі прийняття рішень [5].

З іншого боку, дослідження Pai, F. P., Yang, L. J. та Chung, Y. C зробило значний внесок у технічний аспект реалізації СО-систем на основі онтологій. Автори запропонували багаторівневу онтологічну структуру для злиття інформації, що дозволяє опрацьовувати дані з різних джерел — від сенсорних пристроїв до логічних висновків — із врахуванням темпоральних зв'язків між подіями. Результатом є підвищення точності ситуаційного аналізу, а також формалізація моделей опрацювання даних у режимі реального часу з урахуванням часових залежностей [2].

У контексті прикладних рішень Baumgartner та інші в роботі BeAware! представили фреймворк, що використовує онтологічну модель просторово-часових подій для підвищення ситуаційної обізнаності операторів. Запропонована архітектура включає логіку Аллена для аналізу відношень між інтервалами, що є критичним у системах моніторингу подій [7].

Аналіз публікацій демонструє наявність потужної наукової бази для реалізації темпорально орієнтованих систем із ситуаційною обізнаністю в різних прикладних доменах. Усі згадані дослідження підтримують необхідність формального опису подій у часі, логічного виведення на основі темпоральних відношень і побудови багаторівневих архітектур, що інтегрують сенсорні дані, онтологічне ядро та інтерфейси аналізу ситуацій.

Формулювання цілей статті

Метою статті є огляд та формалізація підходів до використання темпоральних онтологій у системах з ситуаційною обізнаністю шляхом аналізу існуючих моделей, визначення їхніх обмежень і дослідження можливостей розроблення архітектурного рішення для інтеграції часових елементів у процес прийняття рішень.

Виклад основного матеріалу

Суть онтологічних моделей, їхні переваги та недоліки. Онтологічні моделі – це формалізовані представлення знань, які описують сутності, їх властивості та взаємозв'язки в певній предметній області. У контексті ситуаційної обізнаності онтологічні моделі забезпечують структурування та інтеграцію різноманітних даних, що є особливо важливим для автоматичного розуміння, аналізу та прогнозування ситуацій у динамічних середовищах [7].

Суть онтологічних моделей полягає в їх здатності формалізувати інформацію в чітко визначених класах, атрибутах та відношеннях, що робить можливим використання логічного виведення для отримання нових знань. Важливим елементом таких моделей є використання стандартів, таких як Web Ontology Language (OWL), які дозволяють забезпечити інтероперабельність між системами та полегшують обмін знаннями [8].

Переваги онтологічних моделей:

- Семантична ясність представлення знань знижує двозначність та покращує точність розуміння інформації [7].
- Інтероперабельність досягається завдяки використанню стандартних мов та форматів (наприклад, OWL, RDF), онтології сприяють інтеграції та сумісності різних інформаційних систем [11].
- Автоматичне виведення знань передбачає використання логічного виведення дозволяє автоматизувати процес прийняття рішень та підтримує оперативний аналіз ситуаційних даних [9].
- Гнучкість та розширюваність онтологічних моделей забезпечується можливістю модифікуванням та розширюваністю, що робить їх ефективними для адаптації до нових завдань і умов [10].

Недоліки онтологічних моделей:

- Складність розроблення обумовлюється тим, що побудова онтологій вимагає значних часових і трудових ресурсів, особливо для великих та комплексних предметних областей [8].
- Обчислювальна складність процесу логічного виведення в онтологіях може бути обчислювально складним, що може призводити до затримок в аналізі даних у реальному часі [11].

- Обмеженість у виражальних можливостях стандартних мови онтологій (наприклад, OWL) особливо характерна для темпоральних і просторових аспектів.

Таким чином, онтологічні моделі є потужним інструментом для подання та аналізу знань у системах з ситуаційною обізнаністю, проте їх використання потребує уважного підходу до вибору методів розроблення та оцінки обчислювальних ресурсів.

Огляд онтологій із врахуванням темпоральних сутностей. Темпоральні онтології — це формальні моделі, які забезпечують подання знань із врахуванням часових характеристик моментів, інтервалів, тривалості подій, причинно-часових зв'язків тощо. У системах із ситуаційною обізнаністю використання таких онтологій є критично важливим для коректної інтерпретації подій, що змінюються в часі, синхронізації даних з різних джерел та прогнозування динаміки загроз.

OWL-Time — це одна з найвідоміших темпоральних онтологій, розроблена консорціумом W3C. OWL-Time забезпечує опис моментів часу (time:Instant), інтервалів (time:Interval) та відношень між ними (наприклад, before, after, during). Онтологія дозволяє будувати темпоральні моделі, які інтегруються в системи аналізу подій, прогнозування, синхронізації даних із різних джерел [6].

CHRONOS — це рушій для опрацювання якісної темпоральної інформації в OWL-онтологіях. Його особливість полягає в можливості представлення не тільки абсолютного, а й відносного часу. CHRONOS дозволяє будувати складні темпоральні сценарії між подіями (наприклад, "подія А сталася до події В"), що є надзвичайно важливим у безпекових застосунках для реконструкції хронології інцидентів та виявлення причинно-наслідкових зв'язків [2].

Event Ontology with Temporal Context (EOTC) — це темпоральна онтологія, що фокусується на моделюванні подій у контексті часового впорядкування. Її особливістю є підтримка різних моделей часу (лінійної, розгалуженої), що дозволяє використовувати її в складних системах прогнозування подій та конфліктів. Застосовується у безпекових інформаційних системах із високим рівнем динаміки [12].

Онтологія **CNTRIO**, хоча спочатку була орієнтована на опрацювання клінічних наративів, стала прикладом загального підходу до темпорального моделювання. Її логіка дозволяє формалізувати відношення типу "до", "після", "під час", що є релевантним для безпекових ситуацій, де важливе відстеження послідовності інцидентів [13].

Практичне застосування темпоральних онтологій у домені безпеки вимагає підтримки часових обмежень, дедлайнів, порогових подій, періодичних спостережень. Існує потреба інтеграції темпоральної логіки в системи доступу до знань, що базуються на онтологіях. Це дозволить реалізувати семантичний пошук із урахуванням зміни стану об'єкта в часі.

Типи та характеристики хроноїдів. Хроноїди (від грец. χρόνος – «час») – це спеціальні онтологічні елементи, які використовуються для моделювання часових характеристик об'єктів або подій у формальних моделях, зокрема, в системах із ситуаційною обізнаністю (CO). Хроноїди дають змогу описати часові інтервали, моменти часу, послідовності подій та взаємозв'язки між ними, забезпечуючи необхідну основу для динамічного аналізу ситуацій [1, 2].

Згідно з OWL-Time (онтологія часу в OWL), хроноїди можуть бути представлені такими основними категоріями [4]:

- Момент часу (Instant) - точка на часовій шкалі, яка формалізується як момент без тривалості.
- Часовий інтервал (Interval) - період часу, що має визначений початок та кінець.
- Тривалість (Duration) - кількісна міра інтервалу часу, яка визначається безвідносно до конкретних точок на шкалі.

Для формалізації моментів та інтервалів часу широко використовується математична структура, відома як лінійний порядок часових точок:

$$T = (T, \leq). \quad (1)$$

де T – множина часових точок, а $\leq$ – бінарне відношення, що відповідає порядку на множині T .

Інтервал часу I формалізується парою моментів часу t_s і t_e , де $t_s \leq t_e$, що позначається як:

$$I = [t_s, t_e] = \{t \in T \mid t_s \leq t \leq t_e\}, \quad (2)$$

де t_s – початкова точка інтервалу, t_e – кінцева точка інтервалу.

Для моделювання послідовності подій часто застосовується поняття часової послідовності, яка математично записується як:

$$S = \{e_1, e_2, \dots, e_n\} \mid \forall e_i, e_j \in S, \quad i < j \Rightarrow t(e_i) \leq t(e_j), \quad (3)$$

де e_i – подія, а $t(e_i)$ – часова точка, пов'язана з цією подією.

Характеристики хроноїдів:

- Абсолютні або відносні визначення моментів часу та інтервалів може бути прив'язане до абсолютної часової шкали або виражене через відносні проміжки між подіями.
- Явні або неявні часові характеристики можуть бути безпосередньо представлені у вигляді точних часових міток або неявно задані через порядок та зв'язки подій.
- Дискретні або неперервні часові шкали можуть мати дискретну або неперервну природу, що визначає спосіб формалізації хроноїдів у конкретних онтологіях [5, 6].

Таким чином, хроноїди виступають критичним компонентом темпоральних онтологій, які забезпечують ефективне моделювання і аналіз динамічних процесів у системах із ситуаційною обізнаністю.

Сучасні підходи до інтеграції часу в онтології. Онтології, такі як OWL-Time [7] та CNTRO [13], описують темпоральні аспекти за допомогою двох базових типів об'єктів:

- `time:Instant` – момент часу, що не має тривалості;
- `time:Interval` – часовий інтервал, який має визначений початок та кінець.

Інтервал формалізується як: $I = [t_s, t_e]$, $t_s, t_e \in T$, $t_s \leq t_e$, де T — множина допустимих часових точок.

Математично OWL-Time базується на формалізації інтервалів часу:

$$Interval = \{hasBeginning(Instant), hasEnd(Instant)\}, \quad (4)$$

де `Instant` — це часовий момент, що має точне значення на шкалі часу.

Часова вісь моделюється як частково впорядкована множина: $T = (T, \leq)$, де T — множина моментів часу,

для будь-якого інтервалу $I \in T$ існують такі функції:

$$begin(I) = t_s, \quad end(I) = t_e, \quad duration(I) = t_e - t_s \quad (5)$$

OWL-Time визначає також темпоральні відношення $R: T \times T \rightarrow \{true, false\}$, такі як:

$$before(t_1, t_2) \Leftrightarrow t_1 < t_2. \quad (6)$$

Ці відношення формують підмножину повної алгебри Аллена, що дозволяє будувати базову логіку подій для ситуаційної обізнаності.

Time Ontology in OWL, також відома як OGC Time Ontology, є спеціалізованою онтологією, призначеною для опису геопросторових та часових аспектів. Ця онтологія акцентує увагу на представлення складних часових структур, таких як періодичні події, часові рамки та часові координати [7]. Time Ontology дозволяє точно описувати події, що повторюються, із зазначенням частоти та періодичності:

$$PeriodicInterval = \{hasDuration(Duration), hasFrequency(Frequency)\}, \quad (7)$$

де `Duration` — це тривалість інтервалу, а `Frequency` — частота повторення події.

Temporal RDF — це підхід, що дозволяє інтегрувати часовий контекст безпосередньо в RDF-графи, додаючи часові позначки до тверджень. Temporal RDF дозволяє створювати RDF-графи, що змінюються з часом, через доповнення часових індексів або міток до RDF-трийок, наприклад:

$$(subject, predicate, object, timestamp). \quad (8)$$

Це дозволяє ефективно проводити темпоральні запити та відстежувати зміни знань у часі [3].

Приклади реалізації темпоральних онтологій. Практичне застосування темпоральних онтологій відіграє ключову роль у забезпеченні ситуаційної обізнаності в різних сферах, включаючи моніторинг навколишнього середовища, кібербезпеку та управління великими даними. Нижче наведено конкретні приклади реалізації таких онтологій.

Онтологія SOSA (Sensor, Observation, Sample, and Actuator) є легкою онтологією, розробленою для моделювання взаємодії між сутностями, залученими в процеси спостереження, актуалізації та відбору проб. Вона забезпечує формальну специфікацію для опису сенсорів, спостережень та відповідних дій, що дозволяє інтегрувати та аналізувати дані з різних сенсорних мереж. SOSA підтримує моделювання часових аспектів спостережень, включаючи часові мітки та тривалість подій, що є критично важливим для аналізу динамічних процесів у реальному часі [5].

У сфері кібербезпеки важливою є можливість оперативного виявлення та реагування на загрози. Carmen Sánchez-Zas та ін. запропонували онтологічний підхід до управління ризиками в реальному часі та кібернетичної ситуаційної обізнаності. Запропонована онтологія описує різні типи аномалій та інтегрує моделі для кібернетичної розвідки загроз. Використання темпоральних аспектів дозволяє відстежувати розвиток подій у часі, що сприяє більш ефективному управлінню ризиками та прийняттю рішень [1].

SOWL є фреймворком, розробленим для представлення та опрацювання просторово-часової інформації в онтологіях OWL 2.0. Він базується на розширенні стандартних можливостей OWL для підтримки темпоральних та просторових аспектів, що дозволяє моделювати складні відношення між подіями та об'єктами у часі та просторі. SOWL застосовується для створення онтологій, які потребують інтеграції просторово-часових даних, наприклад, у геоінформаційних системах та системах моніторингу навколишнього середовища [3].

Формалізація темпоральних сутностей. У контексті темпоральних онтологій термін "темпоральна сутність" використовується для позначення об'єктів, подій або процесів, що мають явну часову компоненту. Такі сутності є ключовими в онтологіях, орієнтованих на ситуаційну обізнаність, оскільки дозволяють точно описувати динамічні події, їх порядок, тривалість та зв'язки у часі.

Типи темпоральних сутностей:

1. Періодичні – події або процеси, що повторюються з певною частотою. Формально: $E_p = \{I_i \in T \mid I_i = [t_i, t_i + d], t_{i+1} - t_i = \delta\}$
2. Ієрархічні – вкладені інтервали (наприклад, година $\subseteq$ день $\subseteq$ тиждень), що моделюються як підкласи або підвластивості у багаторівневих структурах часу.
3. Відносні – описуються не абсолютними мітками часу, а відношеннями між подіями (наприклад, «подія А сталася до події В»), як у логіці Аллена [14].
4. Невизначені – описуються із нечіткими або частковими часовими характеристиками, наприклад, "у середині квітня". Такі сутності частково підтримуються в онтологіях на кшталт CNTRO [13].

Характеристики темпоральних сутностей:

- Тривалість: час між початком і кінцем події або процесу.
- Гранулярність: точність часових міток (день, година, секунда).
- Темпоральні відношення: реляції між сутностями (до, після, одночасно, під час тощо).

Для моделювання відношень між інтервалами часто використовується алгебра Аллена [14], яка визначає 13 базових відношень:

Before, After, Meets, Overlaps, During, Starts, Finishes, Equals, ...

Ця логіка є основою для багатьох темпоральних онтологій та використовується для аналізу сценаріїв, де порядок подій має ключове значення (наприклад, безпекові інциденти).

Time Ontology додає можливість опису календарного часу, повторюваних подій, циклічних процесів. Додатково вводиться опис тривалості у вигляді об'єктів типу `time:DurationDescription`, які можна формалізувати як:

$$\text{duration}(E) = (n, u), \quad \text{де } n \in \mathbb{N}, u \in \{\text{second}, \text{minute}, \text{hour}, \text{day}, \dots\}. \quad (9)$$

Також задаються періодичні шаблони подій за допомогою правил:

$$\text{occursEvery}(E, \delta) \Rightarrow \forall i \in \mathbb{Z}, \exists t_i: E(t_i) \wedge E(t_{i+1}) \wedge t_{i+1} - t_i = \delta. \quad (10)$$

Це дозволяє описувати періодичні спостереження, типові для сенсорних систем та моніторингу.

Temporal RDF вводить часову змінну в структуру RDF-графів, що дозволяє будувати залежні від часу висловлювання. Класичний RDF-трійковий формат: (s, p, o) розширюється до квадруплету: (s, p, o, t), де $t \in \mathbb{T}$ — часовий індекс або інтервал.

У таких графах можливі запити на фільтрацію знань за часовими рамками:

$$\text{SELECT ?s WHERE } (s, p, o, t) \wedge (t \in [t_1, t_2]). \quad (11)$$

Це робить Temporal RDF придатним для стрімінгових сценаріїв, де дані постійно змінюються, зокрема для обробки сенсорних потоків, історичних подій та логів безпеки.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика

Підхід	Логічна строгість	Обробка потоку	Підтримка тривалості	Запити за часом
OWL-Time	Висока +	Обмежена -	Базова +	Часткова -
Time Ontology in OWL	Розширена +	Обмежена -	Періодичність +	Часткова -
Temporal RDF	Обмежена -	Хороша +	(опціонально) +	Повна +

Можливості використання темпоральних онтологій у системах із ситуаційною обізнаністю. Системи ситуаційної обізнаності (CO) — це інтелектуальні системи, що збирають, опрацьовують та інтерпретують інформацію з різних джерел для підтримки прийняття рішень у динамічних середовищах. Використання темпоральних онтологій у таких системах відкриває нові горизонти як для формального представлення знань, так і для розширеного причинно-часового аналізу [7].

Онтології, що включають темпоральні концепти, дозволяють формалізувати часові залежності між подіями, станами та діями. Це особливо важливо для задач виявлення загроз, прогнозування подій, аналізу інцидентів у кібербезпеці, моніторингу критичної інфраструктури та ін.

Типові сценарії:

- Визначення послідовності подій через логіку Аллена можна виявити, що подія А передувала події В.
- Виявлення шаблонів поведінки у часі, наприклад, щотижневе перевантаження серверу або аномалії у графіку руху.
- Прогнозування ситуацій, якщо певна комбінація подій виникала в минулому перед атакою, система може попередити про загрозу.

Базові принципи реалізації темпоральних онтологій у CO

1. Моделювання подій і станів: кожна подія моделюється як інстанція з атрибутами `hasTime`, `hasLocation`, `hasAgent` тощо.

2. Використання OWL-Time або її розширень для представлення часу:

$$\text{Event} \sqsubseteq \exists \text{hasTime.Interval}. \quad (12)$$

3. Зберігання даних у формі RDF або у темпоральних триплетах (quadruples), де кожен факт має часову мітку.

4. Логічне виведення з використанням правил, які враховують темпоральні відношення:

$$\text{before}(A, B) \wedge \text{threat}(B) \Rightarrow \text{precursor}(A). \quad (13)$$

Переваги інтеграції темпоральних онтологій у CO:

- Формальність і прозорість завдяки чіткому визначенню концептів, що дозволяє пояснювати причини рішень.
- Аналіз змін у часі надає можливість відстежувати еволюцію ситуацій.
- Можливість автоматичного виведення завдяки застосуванню логіки для генерації нових знань.
- Інтеоперабельність, оскільки OWL та RDF є стандартами, які легко інтегруються з іншими платформами.

Недоліки і обмеження:

- Висока складність моделювання, оскільки побудова якісної темпоральної онтології потребує ретельних досліджень та глибоких знань.
- Обчислювальні витрати пов'язані із складним логічним виведенням, що може впливати на продуктивність у реальному масштабі часу.
- Обмеження у підтримці нечіткого часу обумовлене тим, що не всі онтології дозволяють моделювати невизначеність (наприклад, "після обіду").

Інтеграція темпоральних онтологій у системи з ситуаційною обізнаністю передбачає багаторівневу архітектуру (рис. 1), у якій кожен рівень відіграє ключову роль у формуванні повноцінного циклу обробки даних. На першому етапі, який відповідає за збір інформації, здійснюється безперервний моніторинг середовища за допомогою сенсорів, мережних журналів, камер спостереження, систем доступу або інших джерел структурованих та неструктурованих подій. Ці події, як правило, мають часову прив'язку або потребують її формалізації.

На наступному етапі здійснюється семантична обробка подій, під час якої зібрані дані перетворюються у формат, придатний для онтологічної інтерпретації. Зазвичай для цього використовуються RDF-трійки або RDF-квадруплеті з часовими атрибутами. Кожен факт, що представляє подію чи стан системи, доповнюється відповідними метаданими про час виникнення або тривалість, що забезпечує семантичну повноту.

Третім рівнем є безпосередньо рівень онтологічного представлення, де темпоральні онтології на кшталт OWL-Time або її розширень використовуються для формалізації подій у вигляді класів і відношень. Важливо, що цей рівень забезпечує не лише опис об'єктів у часі, але й відображає міжчасові зв'язки: послідовність, одночасність, накладання або завершення. Онтологія таким чином стає центральним компонентом, що дозволяє системі не просто зберігати події, а й інтерпретувати їх у часовому контексті.

Четвертий рівень передбачає використання механізмів логічного виведення. Тут застосовуються правила, побудовані на основі темпоральної логіки — наприклад, логіки Аллена або темпоральних описових логік, що дозволяють виявляти причинно-часові залежності. Цей рівень відповідає за генерацію нового знання, формування ситуаційних висновків, виявлення патернів і прогнозування подальших сценаріїв розвитку ситуації.

Завершальним рівнем є рівень візуалізації та прийняття рішень, де користувач або автономний агент отримує уявлення про поточну ситуацію у вигляді графіків, часових шкал, карт подій або інтерфейсів сповіщення. Завдяки інтеграції з темпоральною онтологією, такі інтерфейси здатні не лише відображати факт події, а й забезпечувати її інтерпретацію у часовому контексті, вказуючи на попередні події, які призвели до поточної ситуації, та можливі наслідки.

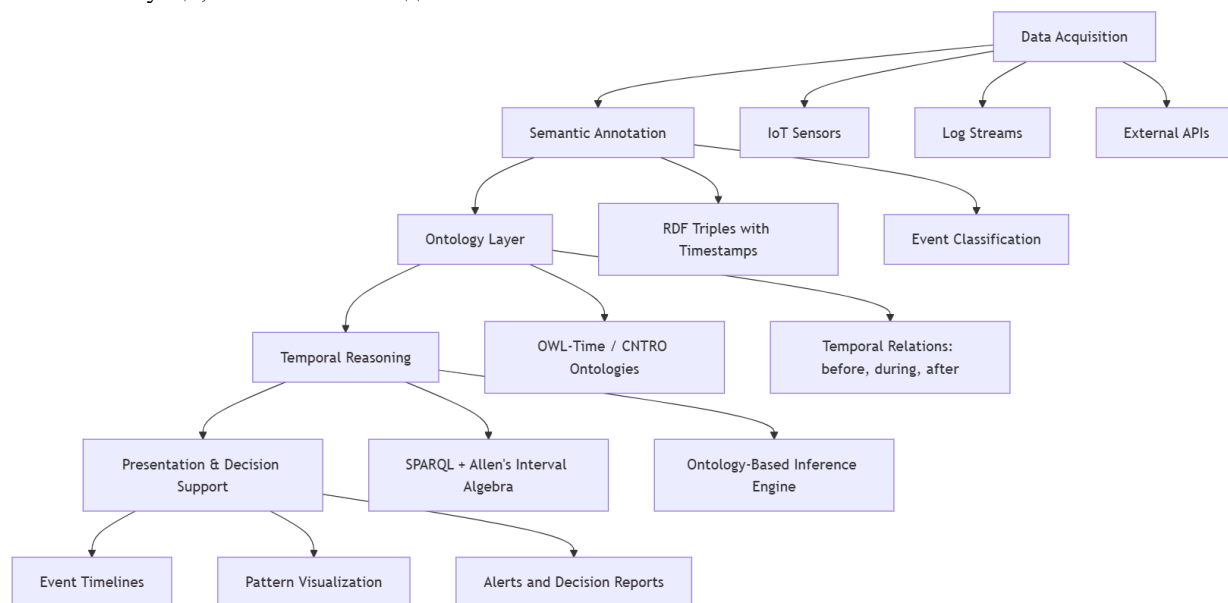


Рис.1 Багаторівнева архітектура СО з темпоральною онтологією

Запропонована п'ятирівнева архітектура інтеграції темпоральних онтологій у системи ситуаційної обізнаності ґрунтується на узагальненні типових структур семантичних систем, моделей опрацювання знань та принципів контекстно-орієнтованого аналізу, які представлені в науковій літературі. Зокрема, рівні збору даних, семантичного опрацювання, онтологічного представлення, логічного виведення та презентації результатів відповідають функціональним блокам, описаним у роботах [7] та [9], а також у концепції Semantic Sensor Network Ontology (SSN) [8] та CNTRIO [13]. Така архітектура забезпечує модульність, чітке розмежування обов'язків між компонентами системи та дозволяє ефективно реалізувати підтримку

ситуаційної обізнаності на основі темпорального знання. Окремі її елементи також корелюють зі структурою моделей багатоетапного опрацювання інформації в системах розвідки й моніторингу, таких як JDL Model, адаптованої до семантичного контексту.

Технологічні можливості реалізації ситуаційно обізнаних систем із темпоральними онтологіями засобами .NET та OWL.

Реалізація систем ситуаційної обізнаності (CO), що ґрунтуються на темпоральних онтологіях, можлива із застосуванням сучасного стеку технологій платформи .NET у поєднанні з мовами онтологічного моделювання OWL. Такий підхід забезпечує модульність, масштабованість, інтеграцію з корпоративними системами та формальне представлення знань у часовому вимірі (рис. 2).

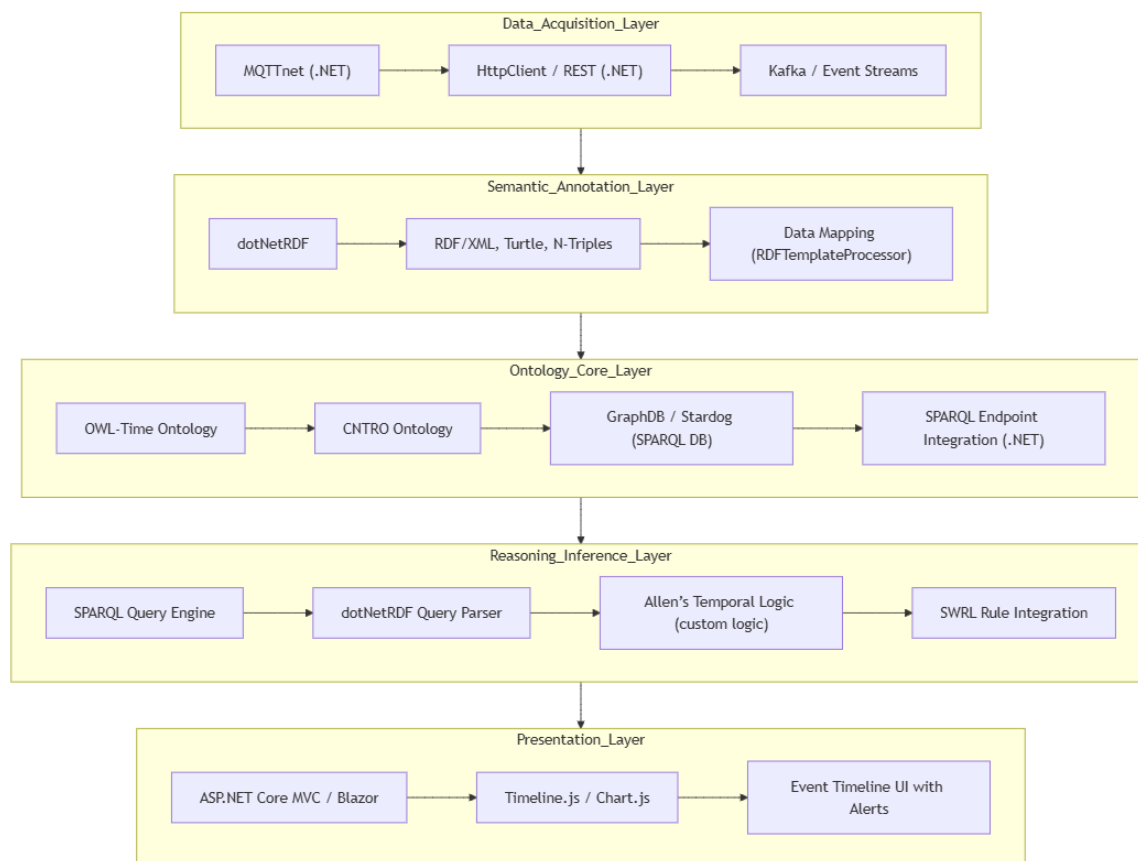


Рис. 2 Архітектура системи з CO з темпоральними онтологіями на основі .Net-технологій та OWL

Типова архітектурна модель реалізації може складатись з наступних компонентів:

- шар збору подій (сенсори, API, логи сервісів);
- семантичний інтерпретатор (наприклад, SOSA/SSN, CNTRO);
- темпоральна онтологія (OWL-Time або її розширення);
- логічний рушій (SWRL, SPARQL з часовими правилами);
- інтерфейс представлення ситуації (часові лінії, сповіщення, графіки).

На етапі збору та агрегації даних у середовищі .NET доцільно використовувати бібліотеки, що забезпечують роботу з потоковими або запитними джерелами даних. Наприклад, бібліотека MQTTnet надає можливості підключення до сенсорних пристроїв або брокерів повідомлень за протоколом MQTT, що дозволяє реалізувати передачу подій із часовою міткою в реальному часі. Крім того, засоби HttpClient або gRPC у .NET Core можуть бути використані для отримання структурованих подій через REST або RPC API, що поширене у системах кіберспостереження або моніторингу інфраструктури.

Семантичне опрацювання подій може бути реалізована із застосуванням бібліотеки dotNetRDF, яка підтримує формати RDF/XML, Turtle та N-Triples, а також забезпечує повноцінний API для побудови та запиту RDF-графів. За допомогою цієї бібліотеки можна автоматично перетворювати отримані події у формалізовані RDF-трійки з використанням онтологічних предикатів на кшталт *hasTime*, *hasAgent*, *hasLocation*. Формування онтологічних інстанцій подій може здійснюватися як вручну, так і через шаблони з використанням *RDFTemplateProcessor* або інтерфейсів з зовнішніми базами знань.

Ядро онтологічного рівня складається з OWL-онтологій, таких як OWL-Time або CNTRO, що можуть бути завантажені й опрацьовані у .NET середовищі через dotNetRDF або шляхом інтеграції з онтологічним сервером (наприклад, GraphDB, Stardog, Ontotext) за допомогою HTTP-запитів до SPARQL endpoint. OWL-онтології дозволяють формально визначати часові інтервали (*time:Interval*), події (*event:Event*) та відношення

між ними (time:before, time:after, time:inside), що дає змогу будувати причинно-часові ланцюги подій у системах обізнаності.

Інференція та логічне виведення можливо реалізувати шляхом формування SPARQL-запитів, які надсилаються до сховища знань. У .NET це можливо за допомогою модуля SparqlQueryParser бібліотеки dotNetRDF, що дозволяє виконувати складні запити з фільтрацією за часом, порівнянням інтервалів і обчисленням динамічних залежностей. Крім того, можлива інтеграція з зовнішніми інференс-рушіями (Reasoners), які підтримують SWRL або OWL DL, через HTTP-запити або за допомогою SDK, що дозволяє реалізовувати логіку типу: "подія А відбулася до події В — отже, подія А є передвісником В".

На рівні візуалізації результати виведення можуть бути інтегровані у користувацькі інтерфейси, реалізовані засобами ASP.NET Core MVC або Blazor Server, з використанням бібліотек візуалізації, таких як Chart.js, Timeline.js або Syncfusion для побудови часових шкал, інфографіки подій та аналітичних панелей. Такі інтерфейси можуть динамічно реагувати на зміни в онтології та відображати еволюцію ситуації у часі.

Висновки

Визначено, що темпоральні онтології є ключовим інструментом для формального представлення динамічних подій у системах з ситуаційною обізнаністю. Аналіз існуючих моделей (OWL-Time, SOSA, CNTRO) продемонстрував їх придатність до інтеграції в багаторівневу архітектуру з підтримкою логічного виведення. Запропонована архітектура дозволяє реалізувати часову когерентність знань, підвищуючи точність ситуаційного аналізу в реальному часі. Результати можуть бути використані для побудови інтелектуальних безпекових або моніторингових систем. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення темпоральних онтологій для роботи з невизначеними або нечіткими інтервалами часу та інтеграцію їх з методами машинного навчання для покращення адаптивності систем ситуаційної обізнаності.

Література

1. Sánchez-Zas C., Villagrà V. A., Vega-Barbas M., Larriva-Novo X., Moreno J. I., Berrocal J. Ontology-based approach to real-time risk management and cyber-situational awareness // *Future Generation Computer Systems*. 2023. Vol. 141. P. 462–472. <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.12.006>.
2. Pai F. P., Yang L. J., Chung Y. C. Multi-layer ontology based information fusion for situation awareness // *Applied Intelligence*. 2017. Vol. 46. P. 285–307. <https://doi.org/10.1007/s10489-016-0834-7>.
3. Batsakis S., Petrakis E. SOWL: A framework for handling spatio-temporal information in OWL 2.0 // *RuleML Europe*. 2011. P. 242–249. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-22546-8_19.
4. Janowicz K., Haller A., Cox S. J. D., Le Phuoc D., Lefrançois M. SOSA: A lightweight ontology for sensors, observations, samples, and actuators // *Journal of Web Semantics*. 2019. Vol. 56. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.websem.2018.06.003>.
5. Black J., Cherrington J. Temporal ontology in ecology: developing an ecological awareness through time, temporality and the past-present parallax // *Environmental Philosophy*. 2021. Vol. 18, No. 1. P. 41–63. <https://doi.org/10.5840/envirophil202135102>.
6. Time Ontology in OWL [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.ogc.org/standards/time-ontology>.
7. Baumgartner N., Gottesheim W., Mitsch S., Retschitzegger W., Schwinger W. BeAware! – Situation awareness, the ontology-driven way // *Data & Knowledge Engineering*. 2010. Vol. 69. P. 1181–1193. <https://doi.org/10.1016/j.datak.2010.07.008>.
8. Compton M., Barnaghi P., Bermudez L., García-Castro R., Corcho O., Cox S., Graybeal J., Hauswirth M., Henson C., Herzog A., Huang V., Janowicz K., Kelsey W. D., Le Phuoc D., Lefort L., Leggieri M., Neuhaus H., Nikolov A., Page K., Passant A., Sheth A., Taylor K. The SSN ontology of the W3C semantic sensor network incubator group // *Journal of Web Semantics*. 2012. Vol. 17. P. 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.websem.2012.05.003>.
9. Valiente M.-C., Machín R., Barriocanal E., Sicilia M.-Á. An ontology-based integrated approach to situation awareness for high-level information fusion in C4ISR // *Lecture Notes in Business Information Processing*. 2011. Vol. 83. P. 513–527. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22056-2_53.
10. Mitsch S., Gottesheim W., Pommer F. H., Pröll B., Retschitzegger W., Schwinger W., Hutter R., Rossi G., Baumgartner N. Making workflows situation aware: an ontology-driven framework for dynamic spatial systems // *Proceedings of the 13th International Conference on Information Integration and Web-based Applications and Services (iiWAS '11)*. New York : ACM, 2011. P. 182–188. <https://doi.org/10.1145/2095536.2095568>.
11. Baader F., Borgwardt S., Lippmann M. Temporalizing ontology-based data access // *Lecture Notes in Computer Science*. 2013. Vol. 8071. P. 330–344. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38574-2_23.
12. Anagnostopoulos E., Batsakis S., Petrakis E. G. M. CHRONOS: A reasoning engine for qualitative temporal information in OWL // *Procedia Computer Science*. 2013. Vol. 22. P. 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.09.082>.
13. Tao C., Wei W. Q., Solbrig H. R., Savova G., Chute C. G. CNTRO: A semantic web ontology for temporal relation inferencing in clinical narratives // *AMIA Annual Symposium Proceedings*. 2010. P. 787–791.

14. Allen J. F. Maintaining knowledge about temporal intervals // *Communications of the ACM*. 1983. Vol. 26, No. 11. P. 832–843. <https://doi.org/10.1145/182.358434>.

References

1. Sánchez-Zas C., Villagrà V. A., Vega-Barbas M., Larriva-Novo X., Moreno J. I., Berrocal J. Ontology-based approach to real-time risk management and cyber-situational awareness // *Future Generation Computer Systems*. 2023. Vol. 141. P. 462–472. <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.12.006>.
2. Pai F. P., Yang L. J., Chung Y. C. Multi-layer ontology based information fusion for situation awareness // *Applied Intelligence*. 2017. Vol. 46. P. 285–307. <https://doi.org/10.1007/s10489-016-0834-7>.
3. Batsakis S., Petrakis E. SOWL: A framework for handling spatio-temporal information in OWL 2.0 // *RuleML Europe*. 2011. P. 242–249. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-22546-8_19.
4. Janowicz K., Haller A., Cox S. J. D., Le Phuoc D., Lefrançois M. SOSA: A lightweight ontology for sensors, observations, samples, and actuators // *Journal of Web Semantics*. 2019. Vol. 56. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.websem.2018.06.003>.
5. Black J., Cherrington J. Temporal ontology in ecology: developing an ecological awareness through time, temporality and the past-present parallax // *Environmental Philosophy*. 2021. Vol. 18, No. 1. P. 41–63. <https://doi.org/10.5840/envirophil202135102>.
6. Time Ontology in OWL [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.ogc.org/standards/time-ontology>.
7. Baumgartner N., Gottesheim W., Mitsch S., Retschitzegger W., Schwinger W. BeAware! – Situation awareness, the ontology-driven way // *Data & Knowledge Engineering*. 2010. Vol. 69. P. 1181–1193. <https://doi.org/10.1016/j.datak.2010.07.008>.
8. Compton M., Barnaghi P., Bermudez L., García-Castro R., Corcho O., Cox S., Graybeal J., Hauswirth M., Henson C., Herzog A., Huang V., Janowicz K., Kelsey W. D., Le Phuoc D., Lefort L., Leggieri M., Neuhaus H., Nikolov A., Page K., Passant A., Sheth A., Taylor K. The SSN ontology of the W3C semantic sensor network incubator group // *Journal of Web Semantics*. 2012. Vol. 17. P. 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.websem.2012.05.003>.
9. Valiente M.-C., Machín R., Barriocanal E., Sicilia M.-Á. An ontology-based integrated approach to situation awareness for high-level information fusion in C4ISR // *Lecture Notes in Business Information Processing*. 2011. Vol. 83. P. 513–527. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22056-2_53.
10. Mitsch S., Gottesheim W., Pommer F. H., Pröll B., Retschitzegger W., Schwinger W., Hutter R., Rossi G., Baumgartner N. Making workflows situation aware: an ontology-driven framework for dynamic spatial systems // *Proceedings of the 13th International Conference on Information Integration and Web-based Applications and Services (iiWAS '11)*. New York : ACM, 2011. P. 182–188. <https://doi.org/10.1145/2095536.2095568>.
11. Baader F., Borgwardt S., Lippmann M. Temporalizing ontology-based data access // *Lecture Notes in Computer Science*. 2013. Vol. 8071. P. 330–344. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38574-2_23.
12. Anagnostopoulos E., Batsakis S., Petrakis E. G. M. CHRONOS: A reasoning engine for qualitative temporal information in OWL // *Procedia Computer Science*. 2013. Vol. 22. P. 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.09.082>.
13. Tao C., Wei W. Q., Solbrig H. R., Savova G., Chute C. G. CNTR0: A semantic web ontology for temporal relation inferencing in clinical narratives // *AMIA Annual Symposium Proceedings*. 2010. P. 787–791.
14. Allen J. F. Maintaining knowledge about temporal intervals // *Communications of the ACM*. 1983. Vol. 26, No. 11. P. 832–843. <https://doi.org/10.1145/182.358434>.