

УДК 004.8:681.3.06:519.816

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.2.24>

Олексій РИХАЛЬСЬКИЙ

викладач кафедри комп'ютерних наук та програмної інженерії,

ПВНЗ «Європейський університет»

ORCID: 0009-0000-6892-9420

АРХІТЕКТУРА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ РІШЕНЬ НА ОСНОВІ СЕМАНТИЧНОГО УЗГОДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ

Анотація. У статті розглядається перспективний напрям розвитку систем підтримки прийняття рішень (СППР), що відповідає висхідній потребі в інтелектуальних інструментах, здатних обробляти складні, гетерогенні та динамічно мінливі дані. В умовах, коли традиційним підходам до СППР часто не вистачає гнучкості для адаптації до специфічних нюансів предметної області, а також вони не враховують належним чином семантику даних і наміри користувачів, це дослідження усуває критичну прогалину, надаючи нову архітектуру, що базується на семантичній відповідності моделей.

Метою статті є опис архітектури інтелектуальної СППР, що використовує семантичні технології для забезпечення більш точної, контекстно орієнтованої та орієнтованої на користувача підтримки прийняття рішень.

Методи: аналізу наукової літератури, узагальнення, систематизації.

Наукова новизна статті полягає у формалізації архітектури інтелектуальної системи підтримки рішень, що ґрунтується на принципах семантичного узгодження моделей різної природи для підвищення ефективності процесу прийняття рішень.

Результати. Основна ідея полягає в інтеграції онтологій та стандартів семантичного вебу для забезпечення інтероперабельності між гетерогенними джерелами даних і автоматизації процесу зіставлення запитів користувачів з відповідними моделями знань. Запропонована архітектура системи складається з декількох основних компонентів, зокрема репозиторію семантичних моделей, механізму виведення, модуля взаємодії з користувачем та інтерфейсів для інтеграції зовнішніх даних. Значний акцент зроблено на динамічній конфігурації моделей прийняття рішень на основі критеріїв семантичної подібності та релевантності.

Висновки. Показано, що механізми семантичного узгодження значно підвищують точність рекомендацій і скорочують час, необхідний для прийняття рішень у складних середовищах. Описано практичні сценарії застосування, що підтверджують адаптивність та масштабованість системи. У висновках наголошено на потенціалі семантичних технологій у створенні інтелектуальних СППР та підкреслено важливість подальших досліджень у напрямку вдосконалення алгоритмів міркувань, механізмів адаптації користувачів та розробки онтологій для конкретної предметної області. Запропонована практика сприяє еволюції СППР у бік більш гнучких, інтелектуальних та контекстно орієнтованих систем.

Ключові слова: проектування, аналіз, параметр, складні системи, база знань, гетерогенні моделі, семантична сумісність.

Oleksiy RYKHALSKYY. ARCHITECTURE OF AN INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM BASED ON SEMANTIC MODEL MATCHING

Abstract. The article explores a promising direction in the development of decision support systems (DSS), addressing the growing need for intelligent tools capable of processing complex, heterogeneous, and dynamically changing data. In situations where traditional DSS approaches often lack the flexibility to adapt to specific domain nuances and fail to adequately account for data semantics and user intent, this study fills a critical gap by introducing a new architecture based on semantic model alignment.

The aim of the article is to describe the architecture of an intelligent DSS that employs semantic technologies to provide more accurate, context-aware, and user-centered decision support.

Methods. Analysis of scientific literature, generalization, and systematization.

Scientific novelty. The scientific novelty of the article lies in the formalization of the architecture of an intelligent decision support system based on the principles of semantic alignment of heterogeneous models to enhance the efficiency of the decision-making process.

Results. The main idea is the integration of ontologies and semantic web standards to ensure interoperability between heterogeneous data sources and to automate the process of matching user queries with relevant knowledge models. The proposed system architecture consists of several core components, including a repository of semantic models, an inference engine, a user interaction module, and interfaces for external data integration. Special attention is paid to the dynamic configuration of decision-making models based on criteria of semantic similarity and relevance.

Conclusions. The study demonstrates that semantic alignment mechanisms significantly improve the accuracy of recommendations and reduce the time required for decision-making in complex environments. Practical application scenarios are described, confirming the system's adaptability and scalability. The conclusions emphasize the potential of semantic

technologies in building intelligent DSS and highlight the importance of further research aimed at improving reasoning algorithms, user adaptation mechanisms, and the development of domain-specific ontologies. The proposed approach supports the evolution of DSS toward more flexible, intelligent, and context-aware systems.

Key words: design, analysis, parameter, complex systems, knowledge base, heterogeneous models, semantic compatibility.

Постановка наукової проблеми. У сучасному світі інформаційних технологій та прийняття рішень на основі даних різні організації в різноманітних секторах зіштовхуються зі все більшими обсягами гетерогенних, неструктурованих і динамічних даних. Традиційні системи підтримки прийняття рішень, хоч і ефективні в структурованих середовищах, часто не справляються в умовах, коли гнучкість, контекстна обізнаність і семантичне розуміння є критично важливими. Ці системи зазвичай працюють на основі заздалегідь визначених правил і статичних моделей даних, що обмежує їхню здатність адаптуватися до нюансів конкретних сфер або намірів користувача. Зі зростанням складності сценаріїв прийняття рішень – особливо в таких галузях, як охорона здоров'я, інженерія та логістика – виникає потреба в системах, що не лише об'єднують і обробляють інформацію, але й інтерпретують її значення в контекстно чутливий спосіб. Це вимагає переходу від синтаксичної обробки даних до практик, що передбачають семантичне мислення, що дозволяє системам осмислювати інформацію так само, як це робить людина [4].

Актуальність розробки інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (СППР) на основі семантичної моделі обумовлена трансформацією способу прийняття рішень у середовищах, багатих на дані. Семантичні технології, як-от онтології та графи знань, надають потужні засоби для структурування знань про предметну область, забезпечення взаємодії між розрізненими джерелами даних та узгодження результатів роботи системи з цілями користувача. Інтеграція цих технологій в архітектуру СППР дозволяє забезпечити динамічну конфігурацію моделі, підвищити точність рекомендацій та кращу адаптивність до мінливих умов. У цьому контексті проблема полягає в розробці архітектури системи, що може ефективно використовувати механізми семантичного узгодження для інтерпретації запитів користувачів, співвіднесення їх з відповідними моделями знань і прийняття обґрунтованих, контекстно орієнтованих рішень. Розв'язання цієї проблеми є не лише технічним завданням, але й необхідним кроком на шляху до створення дійсно інтелектуальної, гнучкої та орієнтованої на користувача системи підтримки прийняття рішень у складних проблемних областях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні наукові дослідження у сфері побудови інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень (ІСППР), зокрема на основі семантичного узгодження моделей, засвідчують висхідний інтерес науковців до проблем інтеграції знань, онтологічного моделювання, розпізнавання структур знань та концептуального представлення інформації. У цьому контексті аналіз сучасних публікацій дозволяє окреслити основні тенденції, інноваційні підходи та перспективи розвитку архітектури ІСППР.

У дослідженні К. Ткаченка та А. Байдака запропоновано онтологічний підхід до моделювання ІСППР, орієнтованої на аналіз ризиків в інноваційно-інвестиційній сфері [7]. Автори обґрунтовують необхідність використання онтологічного представлення знань як засобу семантичного узгодження інформаційних моделей, що дозволяє забезпечити формальне подання предметної області та ефективну інтеграцію джерел знань. Основна увага приділена структурі онтології, де окреслено зв'язки між об'єктами, подіями, характеристиками та критеріями ризику. Цей підхід створює підґрунтя для побудови архітектури ІСППР, що здатна адаптуватися до змін у середовищі, базуючись на динамічному поповненні онтологічних знань.

М. В. Євланов, Б. І. Мороз та В. Я. Лучицький у своїй роботі досліджують інформаційну технологію виявлення термінів та артефактів у проєктній документації інформаційних систем [2]. Розроблена практика базується на використанні мовних моделей та алгоритмів обробки природної мови для автоматичного виявлення семантично значущих об'єктів. Це дозволяє формувати структуровану модель предметної області на ранніх етапах життєвого циклу ІСППР. Важливим аспектом цієї роботи є підвищення точності ідентифікації концептів та зменшення семантичної неоднозначності, що є критично важливим у контексті узгодження моделей.

У статті В. Тріща та співавторів акцент зроблено на засобах підтримки сховищ знань комп'ютерних систем у нафтогазовій галузі [8]. Автори пропонують архітектурне рішення, що містить інструменти для агрегації, збереження і пошуку знань на основі онтологічних структур. Представлена практика демонструє ефективність семантичного узгодження моделей у галузевих інформаційних системах, де основну роль відіграє точність відображення знань та швидкість їх обробки. У дослідженні також порушено питання гетерогенності джерел інформації та виклики, пов'язані з узгодженням термінології.

Дослідження С. Ф. Чалого та І. О. Лещинської зосереджене на процесі екстерналізації знань у ментальній моделі користувача системи штучного інтелекту [9]. Автори аналізують механізми формування

семантичної структури знань з урахуванням когнітивних особливостей користувача. Такий підхід є особливо цінним для архітектури ІСППР, орієнтованої на адаптивну взаємодію з користувачем, де системі необхідно не лише опрацьовувати дані, а й «розуміти» наміри та логіку рішень людини. Дослідження підкреслює важливість створення персоналізованих семантичних моделей у гнучких архітектурах ІСППР.

М. В. Пономаренко розглядає проблематику державної політики у сфері інтелектуальної власності у контексті міжвідомчої комунікації [6]. Хоча стаття має скоріше правовий і регуляторний фокус, вона акцентує на важливості забезпечення узгодженості та прозорості обміну даними між структурами. У цьому сенсі семантичне узгодження моделей у рамках ІСППР виступає визначальним елементом забезпечення інтероперабельності та довіри до автоматизованих систем прийняття рішень, особливо у міжгалузевому середовищі.

У роботі М. Г. Петренка та співавторів розглядається побудова комп'ютерних систем подання та оброблення предметно орієнтованих знань [5]. Автори пропонують методологію побудови знаннєвих моделей, що охоплює класифікацію знань, їх семантичне структурування та використання логічних моделей обробки. Запропоновані засоби забезпечують високий рівень формалізації знань, що сприяє їх ефективному застосуванню у моделі ІСППР. Особливу увагу приділено забезпеченню актуальності знань, що є важливим фактором динамічної адаптації систем.

У статті О. Горди та співавторів досліджується підхід до інформаційного моделювання на основі метафор роїв [1]. Це нестандартне, біоінспіроване рішення передбачає моделювання взаємодії інформаційних об'єктів у системі за аналогією з поведінкою роїв у природі. Такий підхід дозволяє формувати самоврядні системи підтримки прийняття рішень, які володіють високою адаптивністю до змін середовища. Семантичне узгодження у цьому випадку реалізується через механізми колективного пізнання, що дає змогу створювати гнучкі та інтелектуальні інформаційні архітектури.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. У межах цього дослідження акцентовано на аспекті динамічного семантичного узгодження моделей у гетерогенному інформаційному середовищі, що раніше належно не опрацьовувався. Також розглянуто питання інтеграції онтологічних структур з механізмами адаптивного управління знаннями в реальному часі. Окрема увага приділяється архітектурним рішенням, що дозволяють забезпечити контекстну узгодженість між моделями різних рівнів абстракції в інтелектуальних системах підтримки прийняття рішень.

Формулювання мети дослідження. Метою дослідження є опис архітектури інтелектуальної СППР, що використовує семантичні технології для забезпечення точнішої, контекстно орієнтованої та орієнтованої на користувача підтримки прийняття рішень.

Відповідно до мети було поставлено і вирішено такі завдання: проаналізувати сучасні практики до побудови систем підтримки прийняття рішень із використанням семантичних технологій, сформулювати вимоги до архітектури інтелектуальної СППР на основі семантичного зіставлення моделей, розробити структурну архітектуру системи з визначенням основних функціональних компонентів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень (СППР) у сфері проектування складних технічних об'єктів зазнали значної трансформації, особливо в машинобудуванні, де складність продуктів і процесів вимагає вдосконалених інструментів для покращення процесу прийняття рішень. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень стали важливим компонентом у цій галузі, сприяючи не лише автоматизації рутинних завдань, але й допомагаючи людям-розробникам вирішувати недостатньо структуровані, нестандартні проблеми. В основі СППР у машинобудуванні закладена їхня здатність моделювати, аналізувати та допомагати у розв'язанні проблем проектування шляхом інтеграції експертних знань, методів штучного інтелекту та інтерактивних користувацьких інтерфейсів. Протягом багатьох років пропонувалися різні практики до побудови таких систем, починаючи від систем на основі правил та експертних систем і закінчуючи новітніми розробками, що використовують міркування на основі конкретних ситуацій, міркування на основі моделей та гібридні методи. Ці методи дозволяють системі імітувати рішення на рівні експертів шляхом застосування специфічних для конкретної галузі знань елементів і механізмів навчання, які адаптуються до вимог і обмежень, що постійно зазнають трансформацій.

У контексті машинного проектування традиційні системи підтримки прийняття рішень спочатку зосереджувалися на формалізації експертних знань у вигляді виробничих правил або дерев прийняття рішень. Ці методи хоча і були ефективними в структурованих середовищах, проте не могли впоратися з реальними динамічними та часто неоднозначними завданнями проектування. Як наслідок, галузь поступово перейшла до гнучкіших та адаптивних фреймворків, що використовують схеми представлення знань, як-от семантичні мережі, онтології та об'єктно орієнтовані моделі. Водночас інтеграція інструментів штучного інтелекту (алгоритми машинного навчання, нейронні мережі та нечітка логіка)

розширила можливості СППР, дозволивши їм обробляти неповну або невизначену інформацію та надавати рекомендації, що ґрунтуються як на даних, так і на інтуїції експертів.

Класифікація архітектур IDSS відображає різноманітність підходів і технологій, що використовуються при їх розробці. Загалом ці архітектури можна поділити на: централізовані, розподілені та гібридні системи. Централізовані архітектури, як правило, мають єдину базу знань і механізм виведення, що спрощує управління системою, але можуть обмежувати масштабованість і швидкість реагування у великомасштабних застосунках. Розподілена архітектура, навпаки, використовує кілька співзалежних агентів або модулів, які працюють напівнезалежно і спілкуються за допомогою визначених протоколів. Така структура посилює модульність і паралелізм, але створює проблеми з синхронізацією та узгодженістю знань. Гібридні архітектури поєднують елементи обох типів, намагаючись збалансувати переваги централізованого контролю з гнучкістю розподіленої обробки. Водночас деякі реалізації IDSS використовують мультиагентні архітектури, де автономні програмні агенти співпрацюють для підтримки складних сценаріїв прийняття рішень, особливо в середовищах спільного проектування.

Попри значний прогрес, традиційні моделі СППР мають низку недоліків, що перешкоджають їх широкому застосуванню в проектуванні складних технічних об'єктів. Одним з основних обмежень є їхня залежність від чітко визначених правил і статичних баз знань, що обмежує їхню адаптивність до нових проблем проектування або мінливого середовища. Таким системам часто не вистачає здатності вчитися на новому досвіді або оновлювати свої стратегії міркувань у відповідь на зворотний зв'язок, що робить їх менш ефективними в динамічних або інноваційних середовищах дизайну. Водночас презентація знань дизайнерів становить значну проблему. Значна частина знань, застосованих в інженерному дизайні, є неявними, емпіричними та залежними від контексту, що ускладнює їх фіксацію та формалізацію в рамках жорстких структур традиційних систем. Ця проблема посилюється міждисциплінарним характером складних технічних об'єктів, де знання мають бути інтегровані з різних галузей, як-от матеріалознавство, механіка, системи управління та ергономіка [3].

Проблеми представлення знань розробників поширюються також на когнітивні аспекти прийняття дизайнерських рішень. Дизайнери спираються на інтуїцію, аналогічне мислення та евристичні судження, що нелегко змодельовати за допомогою формальної логіки або традиційних методів представлення знань. Як наслідок СППР часто не підтримують творчі та ітеративні аспекти процесу проектування. Заходи, спрямовані на подолання цих обмежень, призвели до вивчення когнітивних архітектур, систем «людина-в-циклі» та моделей на основі навчання, що мають на меті подолати прогалину між формалізованими знаннями та людськими когнітивними процесами. Досягнення в моделюванні користувачів та адаптивних інтерфейсів спрямовані на персоналізацію поведінки системи відповідно до індивідуальних уподобань та стилю прийняття рішень дизайнера, що ще більше підвищує зручність використання та актуальність СППР у складних завданнях проектування.

Координація семантичних моделей є базовим механізмом для досягнення ефективної інтеграції знань у складних процесах прийняття рішень, особливо у сфері міждисциплінарної інженерії. В міру зростання масштабів і складності інженерних систем, здатність координувати й узгоджувати розрізнені моделі, що походять з різних областей, експертів і програмних інструментів, стає критичним фактором для забезпечення послідовних і узгоджених результатів прийняття рішень. За своєю суттю семантична координація моделей передбачає узгодження значень і концептуальних структур між різними моделями, щоб уможливити їхню спільну інтерпретацію, взаємну трансформацію і синергетичне використання. Ця координація виходить за рамки простого обміну даними або синтаксичної сумісності, звертаючись до глибшого рівня семантики – того, як поняття визначаються, пов'язуються і розуміються в конкретних дисциплінарних контекстах. Семантичний рівень гарантує, що коли моделі взаємодіють, їхній зміст інтерпретується послідовно в різних системах, тим самим зменшуючи неоднозначність і підвищуючи надійність інтегрованих рішень.

Онтології та метамоделі виступають фундаментальними інструментами в цьому процесі гармонізації. Онтології надають формальні, явні специфікації концептуалізацій у межах предметної області, визначаючи сутності, атрибути, зв'язки й правила в машинно інтерпретованому форматі. Фіксуючи знання про предметну область у структурований і придатний для багаторазового використання спосіб, онтології сприяють створенню загальних словників і спільному розумінню між гетерогенними моделями. Вони діють як семантичні мости, що дозволяють незалежно розробленим моделям взаємодіяти в рамках єдиної системи прийняття рішень. Метамоделі, своєю чергою, визначають абстрактний синтаксис і структурні правила побудови зразків певною мовою моделювання. Вони визначають, як конкретні моделі конкретизуються і як вони співвідносяться на метарівні, що має важливе значення для управління сумісністю моделей на різних платформах моделювання. Взаємодія між онтологіями та

метамоделями дозволяє кодувати як семантичний зміст, так і структурні правила, забезпечуючи таким чином двохшарову основу для семантичної координації моделей.

Формалізація моделей та їхня взаємодія в модельно-параметричному просторі вимагає точних методів представлення, що можуть охоплювати не лише значення параметрів і структурні компоненти, але й основну семантику проектного задуму, обмежень і функціональних зв'язків. Для досягнення такого рівня формалізації часто використовують такі практики, як-от модельно орієнтоване проектування (MDE), формальний концептуальний аналіз і логіка опису. MDE наголошує на використанні високорівневих абстрактних моделей як первинних артефактів у процесі проектування, що дозволяє здійснювати автоматизовані трансформації та синхронізацію між моделями за допомогою визначених відображень. У контексті семантичної координації моделей MDE полегшує відстежуваність і узгодженість трансформацій моделей, забезпечуючи збереження семантичної цілісності при переході між рівнями абстракції або дисциплінарними межами. Модельно-параметричний простір, що охоплює всю сукупність змінних, параметрів та їх взаємозалежностей, структурований за допомогою метамodelей і збагачений семантичними анотаціями, отриманими з онтологій. Ця структура підтримує різні сценарії взаємодії: об'єднання моделей, уточнення, декомпозиція та розв'язання конфліктів.

Міждисциплінарні інженерні середовища створюють особливі проблеми для семантичної сумісності, враховуючи різноманітність термінологій, концептуальних рамок і парадигм моделювання, що використовуються в різних галузях. Для розв'язання цих проблем було запропоновано кілька практик – від ручного експертного посередництва і до повністю автоматизованих методів семантичного узгодження. Одна з відомих стратегій передбачає розробку онтологій верхнього рівня, що охоплюють високорівневі, незалежні від домену концепції, на які можна зіставити специфічні для домену онтології. Така багаторівнева архітектура онтологій забезпечує функціональну сумісність, зберігаючи при цьому специфіку і багатство кожного домену. Інший метод передбачає семантичну анотацію і тегування елементів моделі з посиланнями на спільні словники, що полегшує вирівнювання за допомогою заходів семантичної схожості та алгоритмів міркувань. Агенти семантичного посередництва, часто реалізовані в мультиагентних системах, швидко перекладають і узгоджують знання між моделями в режимі реального часу, використовуючи онтологічні відображення і правила трансформації. Гібридні підходи, що поєднують символічні міркування з методами машинного навчання, також набули популярності, дозволяючи системам вивчати відповідності та адаптувати семантичні відображення на основі шаблонів використання та зворотного зв'язку.

Ефективність різних практик до семантичної сумісності можна порівняти за такими параметрами, як-от масштабованість, рівень автоматизації, адаптивність до предметної області та складність інтеграції. У таблиці 1 представлено порівняльний огляд окремих методів, що використовуються для забезпечення семантичної сумісності в міждисциплінарних інженерних системах.

Таблиця 1

Підходи до забезпечення семантичної сумісності

Підхід	Масштабованість	Рівень автоматизації	Адаптивність до домену	Складність інтеграції
Відображення онтології верхнього рівня	Високий	Середній	Високий	Середній
Семантична анотація та тегування	Середній	Низький	Високий	Низький
Агенти семантичного посередництва	Середній	Високий	Середній	Високий
Гібридні символічно-навчальні моделі	Високий	Високий	Високий	Високий
Ручна експертна координація	Низький	Відсутній	Високий	Низький

Джерело: авторська розробка

Архітектурні принципи побудови інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (СППР) на основі семантичного узгодження моделей зумовлені необхідністю забезпечення узгодженої та динамічної інтеграції гетерогенних джерел знань у контексті розв'язання складних інженерних задач. В умовах, коли інженерні системи стають все більш мультидисциплінарними та інформаційно насиченими, здатність СППР інтелектуально координувати моделі, інтерпретувати їх семантику та підтримувати прийняття контекстно чутливих рішень набуває стратегічного значення. Архітектурний дизайн

таких систем повинен забезпечувати високий ступінь гнучкості, розширюваності та семантичної обізнаності, що дозволяє не лише обробляти структуровану інформацію, але й інтегрувати різноманітні моделі предметної області, які розвиваються.

В основі цієї архітектури знаходиться концептуальна модель, яка визначає високорівневу структуру системи та потік взаємодії між її компонентами. Система, як правило, організована на основі багаторівневої архітектури, яка складається з рівня презентації, рівня семантичної інтеграції, рівня управління знаннями та моделями, а також рівня аргументації та підтримки прийняття рішень. Рівень представлення полегшує взаємодію з користувачем, дозволяючи інженерам та експертам візуалізувати альтернативи рішень, маніпулювати моделями та вхідними обмеженнями. Під цим шаром знаходиться шар семантичної інтеграції, який виконує семантичне узгодження та вирівнювання моделей, посиляючись на онтології, відображаючи концептуальні сутності та забезпечуючи термінологічну узгодженість між доменами. Цей рівень виконує роль семантичного фундаменту, який забезпечує змістовну взаємодію між різними модельними структурами, що в іншому випадку є розрізненими. Рівень управління знаннями та моделями відповідає за зберігання, пошук та еволюцію моделей й артефактів знань. Він забезпечує інфраструктуру для управління бібліотеками моделей, контролю версій і метаданих, необхідних для відстеження походження і застосовності моделей. І нарешті, рівень міркувань і підтримки прийняття рішень виконує алгоритми виведення, процедури оптимізації та імітаційного моделювання, перетворюючи семантично узгоджені моделі на варіанти рішень, що можна застосувати на практиці.

Функціональні компоненти такої СППР мають логічне розділення, але тісно інтегровані між собою для підтримання цілісності системи. Основні компоненти охоплюють модуль інтерфейсу користувача, менеджер онтологій, механізм семантичного узгодження, репозиторій моделей, механізм трансформації та механізм виведення рішень. Менеджер онтологій керує використанням і розвитком онтологій, забезпечуючи належну формалізацію і доступність концепцій, специфічних для предметної області. Механізм семантичної відповідності виконує автоматизоване або напівавтоматизоване виявлення відповідностей між елементами моделі, вирішуючи концептуальні невизначеності та забезпечуючи міжмодельну сумісність. Механізм трансформації відповідає за перетворення моделей між різними форматами представлення або рівнями абстракції на основі встановлених семантичних відображень. Репозиторій моделей забезпечує структуроване зберігання інженерних моделей, зокрема параметрів, обмежень та взаємозв'язків. Механізм виведення рішень застосовує узгоджені семантичні моделі для генерації проєктних альтернатив, оцінки компромісів і ранжування рішень відповідно до їхнього багатокритеріального аналізу. Ці компоненти взаємодіють через сервіс орієнтовану або керовану повідомленнями інфраструктуру, забезпечуючи модульність і масштабованість, особливо в розподілених або хмарних середовищах розгортання.

Для підтримки ефективного прийняття рішень у складних інженерних задачах система повинна відповідати низці критичних вимог. По-перше, вона повинна забезпечувати високий ступінь семантичної прозорості, що дозволяє користувачам відстежувати, як елементи моделі узгоджуються, трансформуються і використовуються в процесі прийняття рішень. По-друге, вона повинна підтримувати багаторівневу роботу з абстракціями, де моделі, починаючи від концептуальних ескізів і закінчуючи детальними симуляціями, можуть бути узгоджено інтегровані. По-третє, система повинна забезпечувати реагування в реальному часі на вхідні дані користувача та оновлення моделей, особливо в контексті ітеративного проєктування. По-четверте, вона повинна пропонувати надійні механізми для управління невідповідностями та конфліктами, що виникають через розбіжності в моделях. Насамкінець адаптивність є основним чинником: система повинна розвиватися з упровадженням нових парадигм моделювання, знань про предметну область і вимог користувачів, підтримувана механізмами навчання та адаптації на основі поведінки й результатів користувачів.

Практичні реалізації архітектур СППР на основі семантичного узгодження моделей можна знайти в різних галузях інженерії. Наприклад, в аерокосмічній інженерії такі системи використовуються для координації аеродинамічних, структурних моделей та моделей систем управління на етапі попереднього проєктування, забезпечуючи досягнення цільових показників при збереженні технологічності. У мехатроніці семантичне узгодження моделей дозволяє інтегрувати механічні, електричні та програмні моделі, підтримуючи спільне моделювання та паралельне проєктування. У будівельній інженерії системи ISPR були розроблені для координації інформаційних моделей будівель (BIM) з інструментами оцінки вартості, енергетичного аналізу та оцінки стійкості. Майбутні напрямки впровадження передбачають розгортання цих систем у цифрових середовищах-двійниках, де семантична координація віртуальних і фізичних моделей у реальному часі підтримує прийняття оперативних рішень і прогнозоване обслуговування. Крім того, планується, що інтеграція з хмарними платформами й архітектурами мікросервісів підвищить масштабованість і функціональну сумісність рішень ISPR.

У таблиці 2 узагальнено основні архітектурні компоненти СППР на основі семантичної моделі, а також їхні ролі та типові технології реалізації.

Таблиця 2

Архітектурні компоненти СППР на основі семантичної моделі

Компонент	Роль в архітектурі	Технології реалізації
Модуль інтерфейсу користувача	Забезпечує взаємодію з користувачем, візуалізацію моделі та управління сценаріями	Вебдашборди, фреймворки з графічним інтерфейсом (наприклад, Qt)
Менеджер онтологій	Керує доменними онтологіями та їх еволюцією	OWL, RDF, Protégé, SPARQL
Механізм семантичного зіставлення	Вирівнює та відображає семантичні елементи між моделями	Логіка опису, NLP, алгоритми зіставлення графів
Репозиторій моделей	Зберігання та керування інженерними моделями та метаданими	NoSQL/графові бази даних, сховище на основі XML/JSON
Механізм трансформації	Перетворює та синхронізує моделі різних форматів та рівнів	Мови перетворення моделей (ATL, QVT)
Механізм виведення рішень	Виводить рішення, використовуючи міркування та оптимізацію	Розв'язувачі обмежень, ML-моделі, механізми виведення

Джерело: авторська розробка

Перспективи розвитку та інтеграції інтелектуальних систем у платформи цифрового проєктування відображають активний розвиток технологій, зміну інженерних парадигм та зростання попиту на швидкі, адаптивні та високоточні проєктні рішення. Сучасні середовища цифрового інжинірингу зазнають фундаментальної трансформації, зумовленої конвергенцією обчислювальних потужностей, доступності даних і штучного інтелекту, що в сукупності переосмислюють те, як створюються, оцінюються і вдосконалюються складні технічні об'єкти. Ця трансформація більше не обмежується автоматизацією рутинних завдань моделювання, а поширюється на інтелектуальне доповнення творчих та аналітичних процесів, дозволяючи платформам для проєктування діяти не просто як інструменти, а як проактивні учасники процесу прийняття інженерних рішень.

Однією з основних тенденцій розвитку цифрових інженерних середовищ є перехід до інтегрованих хмарних платформ, що забезпечують безперебійну сумісність між різними інструментами проєктування та дисциплінами. Ці середовища призначені для підтримки безперервних спільних робочих процесів, де моделі обмінюються, модифікуються і перевіряються в режимі реального часу розподіленими командами. Поява системної інженерії на основі моделей (MBSE) як основної методології посилила потребу в платформах, що можуть керувати і пов'язувати абстракції системного рівня протягом усього життєвого циклу продукту. У цьому контексті цифрові потоки і цифрові двійники набули популярності як організаційні конструкції, що дозволяють відстежувати кожне проєктне рішення, зміну параметрів і результат моделювання протягом усього процесу розробки й впровадження. Ці конструкції вимагають надійних цифрових платформ, що не лише зберігають і обмінюються даними, але й розуміють семантичні зв'язки між інженерними артефактами.

Штучний інтелект та аналітика об'ємних даних відкривають нові можливості в цьому новому просторі. Застосування штучного інтелекту в платформах цифрового дизайну варіюється від генеративного дизайну, коли алгоритми автоматично створюють і оцінюють тисячі варіантів дизайну, до інтелектуальних рекомендаційних систем, що допомагають інженерам у виборі оптимальних матеріалів, компонентів або конфігурацій на основі минулих успіхів і невдач. Моделі машинного навчання, особливо глибокого навчання і навчання з підкріпленням, все частіше використовуються для вилучення закономірностей з історичних проєктних даних, результатів моделювання і зворотного зв'язку з експлуатації. Цей інтелект, заснований на даних, дозволяє платформам прогнозувати результати роботи, оцінювати надійність і передбачати потенційні недоліки дизайну ще до того, коли будуть створені фізичні прототипи. Технології об'ємних даних підтримують агрегацію, обробку та візуалізацію величезних масивів даних, отриманих у результаті високоточного моделювання, сенсорних мереж та взаємодії з користувачами. Ці технології дозволяють виявляти приховані інсайти, що допомагають приймати кращі проєктні рішення, оптимізувати розподіл ресурсів та скорочувати час і витрати на інженерні ітерації.

У цій цифровій екосистемі, що розвивається, інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень, як-от ISPR, відіграють головну роль у трансформації процесів проєктування. Ці системи більше не

є ізольованими аналітичними інструментами, а вбудовуються в ширші платформи проєктування для надання контекстно орієнтованих, адаптивних та інтерактивних рекомендацій. Їх інтеграція дозволяє цифровим платформам підтримувати не лише виконання рішень, але і їх формулювання, допомагаючи користувачам визначати проблемні області, виявляти обмеження та оцінювати компроміси між конкурентними цілями. Системи ISPR діють як інтелектуальні посередники між людьми-дизайнерами й величезним простором проєктування, обмежуючи можливі варіанти та пропонуючи інноваційні альтернативи, що можуть бути не одразу очевидними за допомогою традиційних методів. Їх здатність міркувати в умовах невизначеності, інтегрувати знання з різних галузей і вчитися на основі відгуків користувачів тісно пов'язана з потребами інженерного проєктування наступного покоління.

Інтеграція ISPR у цифрові платформи підтримує перехід до гнучких, паралельних і орієнтованих на користувача методологій проєктування. У таких умовах проєктні рішення мають прийматися швидко, часто на основі неповної інформації й з урахуванням міждисциплінарних особливостей. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень сприяють цьому, підтримуючи узгодженість між взаємозалежними моделями, виявляючи конфлікти та забезпечуючи простежуваність вибору. Вони також посилюють персоналізацію процесу проєктування, адаптуючи свою поведінку та результати до вподобань, досвіду та цілей окремих користувачів або проєктних команд. Оскільки цифрове середовище дизайну все більше охоплює парадигми співпраці, ISPR сприяє управлінню когнітивним навантаженням розподіленого прийняття рішень та підтримці переговорів і досягнення консенсусу між стейкхолдерами.

У перспективі передбачається, що розвиток інтелектуальних систем на цифрових платформах продовжуватиметься у взаємодії з прогресом у сфері когнітивних обчислень, пояснювального штучного інтелекту та графів знань. Когнітивні обчислення дозволять системам імітувати аспекти людського мислення, що дасть їм змогу вести діалоги з дизайнерами, обґрунтовувати рекомендації та адаптуватися до мінливого контексту в режимі реального часу. Пояснювальний ШІ підвищить довіру та прозорість автоматизованих рішень, полегшивши користувачам розуміння та перевірку обґрунтувань, що лежать в основі результатів роботи системи. Графи знань, структуровані представлення взаємопов'язаних понять і сутностей стануть семантичною основою, що пов'язуватиме інженерні дані, моделі та рішення, сприяючи глибшій і точнішій інтеграції знань. Водночас упровадження периферійних обчислень і технологій 5G дозволить підтримувати прийняття рішень у режимі реального часу навіть у мобільних або обмежених ресурсами середовищах, розширюючи сферу застосування і швидкість реагування інтелектуальних систем у практичних інженерних робочих процесах.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У результаті проведеного дослідження було обґрунтовано доцільність використання семантичних технологій у побудові архітектури інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень. Запропонована архітектура орієнтована на підвищення контекстної точності прийняття рішень шляхом забезпечення семантичного узгодження моделей, що відображають різні рівні знань, даних і потреб користувачів. Детальний аналіз сучасних підходів дозволив визначити основні функціональні компоненти системи, серед яких важливе місце займають модулі онтологічного узгодження, управління знаннями та інтерактивної взаємодії з користувачем.

Сформульовані вимоги до архітектури ІСППР на основі семантичного моделювання створюють концептуальну основу для реалізації адаптивних і масштабованих рішень, здатних ефективно функціонувати в умовах змінного інформаційного середовища. Запропонована структура дозволяє гнучко інтегрувати різноманітні джерела даних та забезпечити цілісність інформаційного простору для підтримки рішень. Перспективами подальших наукових досліджень є створення прототипу системи та проведення експериментальної перевірки її ефективності в прикладних галузях.

Список використаних джерел:

1. Горда О., Лященко Т., Хроленко В., Тихонова О. Особливості інформаційного моделювання на основі метафор роїв. *Управління розвитком складних систем*. 2023. № 56. С. 92–96. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2023.56.92-96>
2. Євланов М. В., Мороз Б. І., Лучицький В. Я. Інформаційна технологія виявлення термінів та артефактів проєкту у вимогах до інформаційної системи. *АСУ та прилади автоматики*. 2024. № 182. С. 73–93. DOI: <https://doi.org/10.30837/0135-1710.2024.182.073>
3. Кравчук Я., Ніколаєнко Д., Воробйов І. Інноваційні методи інтеграції інтернету речей у комп'ютерні технології. *Наука і техніка сьогодні*. 2024. № 11(39). DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-11\(39\)-898-913](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-11(39)-898-913)
4. Палагін О. Трансдисциплінарна інтелектуальна інформаційно-аналітична система супроводження процесів реабілітації при пандемії (TISP). *Український журнал фізичної і реабілітаційної медицини*. 2021. № 9 (3-4). С. 31–37. URL: <https://surl.gd/lfyzhr> (дата звернення: 18.04.2025)
5. Петренко М. Г., Бойко М. О., Малахов К. С. Комп'ютерні системи подання та оброблення предметно-орієнтованих знань. *Automation of technological and business processes*. 2024. № 16 (1). С. 42–51. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v16i1.2771>

6. Пономаренко М. В. Державна політика України в сфері інтелектуальної власності в контексті обміну даними в міжвідомчій комунікації. *Часопис Київського університету права*. 2023. № 3. С. 148–152. DOI: <https://doi.org/10.36695/2219-5521.3.2023.29>

7. Ткаченко К., Байдак А. Онтологічне моделювання інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень під час аналізу ризиків у інноваційно-інвестиційній сфері. *Цифрова платформа: інформаційні технології в соціокультурній сфері*. 2021. № 4 (1). С. 66–78. DOI: <https://doi.org/10.31866/2617-796X.4.1.2021.236948>

8. Тріщ В., Богдан О., Пашковський В., Попович О., Фудорук Е. Засоби підтримки сховищ знань комп'ютерних систем нафтогазової галузі. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2024. № 335 (1). С. 269–279. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-335-3-36>

9. Чалий С. Ф., Лещинська І. О. Екстерналізація наявних знань в ментальній моделі користувача системи штучного інтелекту. *Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and Information Technologies*. 2024. № 1 (11). С. 91–96. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2024.01.15>

Дата надходження статті: 10.06.2025

Дата прийняття статті: 24.06.2025

Опубліковано: 23.09.2025