УДК 004.67

Васьківський Вадим Олександрович
аспірант кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки,
Національний університет біоресурсів і природокористування України
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-8969-7781
E-mail: v.vaskivskyi@nubip.edu.ua

Горовий Ярослав Миколайович
аспірант кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки,
Національний університет біоресурсів і природокористування України
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7494-2538
E-mail: iar.gorovyi@nubip.edu.ua

Смолій Віктор Вікторович
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки,
Національний університет біоресурсів і природокористування України
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2834-6989
E-mail: v-smolii@nubip.edu.ua

ТЕХНОЛОГІЇ DIGITAL TWINS У СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ АГРАРНИМИ ПРОЕКТАМИ

Анотація. *Протягом останніх кількох десятиліть глобальний ринок та життєві процеси показали, що багато різних аспектів людської діяльності тісно пов'язані. Це призводить до Стратегії сталого розвитку, спрямованої на збалансований взаємозв'язок довкілля (землі, атмосфера, екосистеми), суспільства (культура, освіта та охорона здоров'я) та економіки, в цілому. Такий комплексний підхід потребує нових інструментів для розробки та оцінки проектів у всіх сферах діяльності. Поточна робота присвячена потенційним напрямкам розвитку таких інструментів. У роботі розглянуто та проаналізовано можливі принципи побудови систем розробки проектів для сільськогосподарських підприємств на основі сучасних технологій цифрових двійн¬иків (Digital Twins), механізму онтологій та мережевих сервісів в умовах підвищення вимог Сталого Розвитку і загальних тенденцій раціонального та ощадливого використання ресурсів планети. У аналізі відзначено потенційно високу ефективність та універсальність запропонованого підходу не тільки для вирішення питань зі створення проектів, але й подальшого керування ними та моніторингу відповідності цільовим функціям. На умовному прикладі використання певної земельної ділянки розглянуто особливості та загальні підходи формування структури інформаційної моделі предметної області та суміжних інформаційних ресурсів. Визначено, також, два основні напрямки подальшого руху – створення бази для уніфікованої реалізації цифрових двійників та систем з автоматизованого аналізу онтологій представлених у форматах OWL та генерації на їх основі нових складних моделей-фреймворків. Робота є попереднім обґрунтуванням концепції створення нових систем управління життєвим циклом економічних та господарських проектів у аграрній сфері.*

Ключові слова: *аграрний проект, Digital Twins, онтологія, OWL, сталий розвиток.*

Актуальність. Актуальним напрямком у світовому суспільстві стало завдання сталого розвитку [1] як наслідок швидкої індустріалізації та неконтрольованого впливу на оточуюче середовище. Зростання енергоємного виробництва з використанням викопних вуглеводнів призвело до ефекту глобального потепління зі зміною кліматичних умов у напряму їх погіршення. Аналіз цих процесів показав необхідність найскорішого прийняття системи відповідних мір у всіх напрямках життєдіяльності людини та, як наслідок, прийняття стратегії сталого розвитку. Основними напрямками цієї стратегії [2] стали "…економічне зростання, соціальна справедливість та захист оточуючого середовища…", які ґрунтуються на п'яти принципах:

1) відповідальності та відданості країн виконанню цієї стратегії;
2) інтеграції економічної, соціальної та природозахисної політик у всіх сферах, на всіх територіях та на всіх етапах розвитку;

ISSN 3083-7502

3) широкій залученості та ефективному партнерству;
4) розвитку відповідного потенціалу та сприятливого середовища;
5) зосередженість на результатах та засобах з їх реалізації.

Отже, навіть поверхневий аналіз цих принципів вказує на основну мету, яку можна сформулювати як застосування всебічно зважених та передбачуваних шляхів розвитку у всіх напрямках діяльності на основі розробки та застосуванні відповідних інструментів системного аналізу та прогнозування процесів на всіх етапах їх життєвого циклу.

Така постановка загальної задачі, відповідно, вказує на необхідність розробки нових принципів та моделей наскрізного керування суспільно-соціальними об'єктами та процесами, об'єктами та процесами у промисловості, аграрництві та такою новою компонентою як оточуюче середовище. Одним з перспективних інструментів, здатних допомогти вирішити значну кількість з проблем, які при цьому виникають, є технологія Digital Twins (DT) – “Циврових Двійників”.

У базовому тлумаченні DT – це [3,4] “... Віртуальна модель фізичного об'єкта чи системи для точного відображення властивостей. Він охоплює життєвий цикл об'єкта…”. У більш широкому тлумаченні, під цифровим двійником можуть розуміти [5] не тільки фізичні обєкти, а також технологічні, природні або соціальні процеси. Важливим фактором є акцентуація на повному життєвому циклі, тобто від “народження ідеї” до закінчення фізичного існування матеріального об’єкту або переведення інформаційного (програмного) об’єкту у стан “архівації”.

Другим важливим фактором є тісний та постійний зв’язок інформаційної моделі об’єкту з інформаційною моделлю всесвіту, майже у прямому сенсі – її місце та зв’язки з моделями інших об’єктів, які мають безпосередній або непрямий вплив на об’єкт спостереження або від нього – наприклад, для DT поля це можуть бути DTs сільськогосподарської техніки, оточуючих екосистем, спільноти що використовує це поле, атмосфера та інші об’єкти всесвіту. Крім цього, процес взаємодії між інформаційними моделями відповідних об’єктів повинен відбуватися на всіх стадіях життєвого циклу також. Ще на стадії проектування, таким чином, здійснюється моделювання можливої поведінки об’єктів при взаємних впливах та вибір таких значень відповідних проектних параметрів, які не тільки мають позитивний вплив на створюваний об’єкт, а ще й за можливістю покращують стан оточуючого середовища або, що найменше, не шкодять йому.

У поєднанні з концепцією Сталого Розвитку, створення нового об’єкту або використання об’єкту повинні задовольняти вже не одній цільовій функції оптимізації процесу існування, а комплексу з функцій взаємодії усіх пов’язаних об’єктів не тільки з об’єктом спостереження, але й між собою, що зі структурної точки зору призводить до створення повно-графової інформаційної моделі, яка на сьогодні залишається найбільш складною для застосування у процесах не тільки моделювання, але й звичайного моніторингу. Слід, також, відзначити можливість виникнення інформаційних систем з наперед не визначеною або динамічною гнучкою топологією внутрішніх зв'язків. Практично, кожен об’єкт із навколишнього середовища може стати компонентою, включеною у процес аналізу та застосування. Такий підхід робить неможливим використання “класичних” підходів як з контролю та керування поточними процесами, так і процесів проектування та аналізу, оскільки не існує таких узагальнених моделей. Недостатньо досліджено, наприклад, процеси у екологічних системах та їх реалізація у рамках однієї системи проблематична за наявними обчислювальними ресурсами. У такій парадигмі створюваний об’єкт чи процес, таким чином, може перестати бути найбільш значущим фактором у визначенні кінцевої цільової функції при проектуванні або моніторингу.

Наявність таких особливостей, крім усього, буде обмежувати й використовувані методи проектування, оскільки з точки зору системного підходу на первинному етапі виникає завдання розробка підходів для створення системи гетерогенних моделей з динамічною змінною структурою внутрішньої топології та довільним рівнем масштабування ресурсів. Відповідно, методи проектування системи “зверху вниз” стають мало прийнятними за

наявності великої кількості невизначеностей. При використанні методів проектування знизу-вверх, спочатку визначаються принципи та вимоги функціонування компонентів низького рівня, а потім вже методи їх інтеграції. Тобто, система буде деталізуватися за ходом появи нових об'єктів у "моделі всесвіту" створюваного об'єкту. На наш погляд, в умовах сьогодення, проектування знизу вверх відносно глобальної вирішуваної задачі має більше переваг з наступних причин:

- окремі об'єкти та системи досить ретельно вивчені, описані та автоматизовані;
- для проектування та прогнозування роботи таких об'єктів накопичено багато знань та розроблено відповідні моделі;
- як за правило, наявні технічні засоби моніторингу, які у DT-моделі створюють потік початкових даних для аналізу поведінки об'єктів та оперативного коригування характеристик і параметрів моделі у реальному часі.

До основних труднощів реалізації слід віднести наступні фактори:

- сучасні моделі об'єктів мають бути розширені для врахування впливу та взаємодії з зовнішніми об'єктами та системами;
- відсутні підходи та технології для створення моделей "екосистем всесвіту" в які повинні інтегруватися об'єкти призначення;
- відсутні технології та технічні/програмні системи для реалізації наскрізного життєвого циклу як окремих об'єктів так і її "екосистем" в цілому.

Але, на наш погляд, той самий принцип будови "знизу вверх" можливо ефективно застосувати для вирішення цих питань та інтеграції наявних інструментальних та алгоритмічних засобів. Для висвітлення можливих шляхів вирішення цих актуальних завдань, їх певні особливості та перспективні для застосування наявні технології будуть розглянуті нижче.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Класичні системи управління проектами [6-10] мають за більшістю своїх особливостей та можливостей багато спільного. Основні можливості складаються з реалізації наступних функціональних задач:

- створення проекту – опис завдання у економічних показниках з розподілом ресурсів у часі;
- планування робіт по виконавцях/ресурсах;
- створення календарів працівників;
- поточний контроль стану проекту у часі та коригування (за потребою);
- розрахунок економічних показників.

Додаткові функціональні можливості полягають у реалізації колективного доступу до проекту з різними привілеями та цілями, певні функціональні особливості для проектів у сфері створення програмного продукту (відслідковування помилок та моніторинг їх статусу, розподіл обов'язків), можливості взаємодії у паралельних проектах для співвиконавців.

Окремо слід відзначити можливості пропрієтарної системи Microsoft Project [11] яка містить, наприклад, такі додаткові інструменти з аналізу стійкості проекту та інших економічних харакетристик проекту.

Але до недоліків подібних систем слід віднести їх "жорстку прив'язку" до параметрів вирішуваної задачі – так, наприклад, у процессі створення проекту та аналізу його характеристик немає можливості завдання "альтернатив" з реалізації тієї або іншої гілки проекту за використовуваними ресурсами або альтернатив для купи гілок з метою пошуку найбільш ефективних рішень в умовах наявності певних обмежень, що найбільш характерно для систем прийняття рішень. Тобто, при зміні одного параметру, практично необхідно створювати окремий проект для того щоб порівняти їх результати та характеристики.

Загальним недоліком таких систем, з огляду сучасних тенденцій з орієнтацією на Сталий Розвиток, є повна відсутність відповідних компонентів для аналізу впливу проекту на основні напрямки сталості – соціальні фактори, екологію, здоров'я та інші.

Функція підбору параметрів або налаштувань характерна, як було вказано, для систем прийняття рішень, але є найпоширенішою у системах автоматизованого/автоматичного керування (САК) процесами, які також базуються на моделях, але мають процедури коригування поведінки у залежності від поточного стану з реалізацією механізмів підтримання цільового значення контрольних параметрів. Інколи, для аналізу стану та реалізації керуючого впливу використовують не тільки поточне значення параметру, а його динаміку за сукупністю даних у "часовій серії". Але для підтримки таких можливостей у САК включають пристрої зв'язку з обєктами - систему сенсорів та виконавчих пристроїв.

Слід зазначити, що моделі використовувані у економічному проектуванні та САК є, найчастіше, взагалі різними, що також ускладнює реалізацію та контроль "сумісності" інформаційних моделей при реалізації різних задач. На цих етапах роботи використовують математичні формалізовані моделі, що пов'язують значення вихідного цільового параметру з набором похідних параметрів – у одному випадку економічні характеристики, у другому – оцифровані дані що отримані з об'єкту.

Подібна функція передбачена тільки у Microsoft Project. Але, вона передбачає ручне введення контрольних параметрів для визначення їх відхилення від проектних значень у відповідні контрольні часові точки, або зміну часових параметрів похідного проекту для оцінки відмінності очікуванних результатів від тих, що передбачалися початково. Тобто, контроль відповідності до цільової функції не здійснюється у автоматичному режимі та за виникненням відповідної події, або зміни її характеристик, що не відповідає контролю у реальному часі. Слід відзначити, що для вирішення більшості задач аграрної сфери не має такої необхідності. Але певні задачі потребують досить оперативного контролю та втручання при виникненні відхилень від планових показників, наприклад, поточних витрат пального при проведенні механізованої обробки сільськогосподарських угідь у напрямку їх збільшення.

З точки зору створення систем, що відповідають задачам сталого розвитку, подібні та інші зміни параметрів можуть мати значний вплив на суміжні процеси та сфери – вплив на екологічний стан (викиди забрудників чи зміна хімічного складу грунту, зміна структури насаджень), економічний – перерозподіл ресурсів підприємства, соціальний – залучення додаткових співробітників та інше.

Отже, основним недоліком майже усіх систем економічного проектування є їх орієнтованість на методи та алгоритми економічної оцінки, а не на проблемний об'єкт та оцінку його поведінки.

Метою статті є аналіз можливостей застосування технологій Digital Twins у системах управління аграрними проєктами та обґрунтування підходів до побудови інтегрованих інформаційних моделей на основі онтологій і мережевих сервісів в умовах сталого розвитку.

Матеріали і методи дослідження. Для того, щоб можна було здійснити більш-менш універсальний та формалізований опис предметної області на сьогодні реалізовано спеціалізований інструмент – технологію "онтологій", за допомогою якої здійснюється висвітлення як структури самого об'єкту так і його системне представлення з інформаційними та технологічними зв'язками. Для фіксації та збереження опису моделі використовують xml-подібну структуру мови OWL [12].

Основними особливостями формування онтології є її деревовидна структура [13] у вузлах якої знаходяться сутності (об'єкти) які характеризують певні властивості основної сутності, а зв'язки між ними – дію, яка характеризує особливість включення об'єкту нижнього рівня, наприклад: "АТМОСФЕРА" – характеризується – "СКЛАД" – містить – "КИСЕНЬ" – і далі "...".

До інших особливостей слід віднести, що деревоподібний граф є ациклічним та направленим. Цей фактор є й позитивним фактором з точки зору складності інтерпретації можливого руху у напрямку досягнення цільового показника, але потребує додаткових операцій з представлення певних особливостей, наприклад, опис агротехніки вирощування певного виду рослин, з кількома одноманітними циклами, що складаються з послідовності різних операцій. У такому разі, ці цикли потрібно розгортати у довгий ланцюг.

Актуальний стан у цьому напрямку є таким, що на сьогодні створено доволі велику сукупність спеціалізованих онтологій та сервісів для їх зберігання та організації доступу до них. Велика кількість з них спрямована тако ж на аграрні задачі, у тому числі на рослинництво. Так, наприклад, [14] містить велику кількість посилань на онтології, пов'язані з основними сферами аграрництва, або Planteome [15] – спеціалізований на рослинництві ресурс, який містить як свою базу онтологій так і посилання на зовнішні ресурси подібного призначення, або Crop ontology tool [16] також спрямованого на описи онтологій рослинницьких культур.

Слід зазначити, що зараз онтології «як-такі» окрім накопичення знань у спеціалізованих предметних областях ще виконують важливу роль у створенні Semantic WEB, що дозволяє проводити автоматичну структуризацію інформації у мережі Інтернет та орієнтований, у першу чергу, на автоматичну машинну обробку даних пошуковими системами та роботу зі штучним інтелектом.

Але однією з найбільших проблем є створення повної сукупності онтологій суттєвостей, що мають формувати повну систему об'єктів та зв'язків, що формують модель за вимогами сталого розвитку – «онтології всесвіту». Ця проблема значною мірою обумовлена тим, що більшість зв'язків об'єктів із зовнішнім середовищем і ще більше із певними соціальними процесами на сьогодні є ще не визначеними. Так наприклад, ми не можемо точно вказати як та чи інша агротехніка впливає на навколишнє середовище – стан та якість ґрунтів не тільки за хімічним складом, а й за станом ґрунтових вод, ерозії, зміни клімату та мікроклімату, хімічного складу та якості атмосфери, структурний склад рослинності на прилеглих територіях, та інші подібні питання. А окрім цього є неявний соціо-культурний вплив та багато інших напрямків.

Подібні завдання сьогодні почали вирішуватися створенням «статистичних» моделей на основі накопичуваних даних та їх кореляційного аналізу відносно визначеного процесу або з використанням розпізнавання на основі штучного інтелекту (ШІ). У останньому випадку, на відміну від кореляційної моделі, результати можна описати певною математичною залежністю, але досить швидко можна використовувати для прогнозування очікуваних результатів.

Використання ШІ є, також, невід'ємною складовою у DT-моделях, оскільки за визначенням, така модель повинна постійно само-вдосконалюватися у поведінці та підвищенні точності прогнозованих результатів, що відповідає завданням навчання на попередніх результатах та коригування параметрів моделі на неперервному потоці нових вхідних даних. За цей потік даних відповідає сенсорна мережа відповідного об'єкту, бо у разі вирішення аграрних задач ми маємо справу з розгалуженими у просторі об'єктами, навіть якщо мова йде про засоби обробки, наприклад, сівалки або обприскувачі з індивідуально керованими форсунками, які формують ланку обробки з можливістю коригування поточного стану.

У подібному трактуванні, певний економічний проект має у своїй основі містити набір електронних аналогів DT-моделей усіх реальних компонентів, що охоплює проект. Але, самі DT-моделі за своїм визначенням вже є електронними моделями. З цієї точки зору, додавши режим та можливість «умовної дії», який полягатиме у здійсненні «фіктивної» зміни стану досліджуваного об'єкту при отриманні фіктивних, точніше модельних, даних або дій, ми можемо отримати систему моделювання для оцінки проекту. Крім того, великою перевагою отриманих результатів може бути цільна сукупність часової розгортки поведінки та характеристик усіх об'єктів, що входять до моделі.

Сам процес моделювання полягатиме в тім, щоб сформувати (на початку у інтерактивному режимі) розклад виконання певних операцій та подій, або налаштувати певний «шаблон» який вже є сформований. У останньому випадку, це може бути об'єкт, що описує технологічну послідовність (алгоритм, агротехніка вирощування і т.д.) що передбачається для реалізації. Система, що керує процесом моделювання, повинна у такому разі виконувати функції координації та синхронізації обміну даними між визначеними за моделлю об'єктами. Та ж сама система може виконувати і функції автоматизованої системи

ISSN 3083-7502

керування але вже з використанням режиму «реального часу», раніше підготовленого у процесі моделювання розкладу подій (операцій, впливів) та реальних отримуваних сенсорною мережею даних.

До потенційних переваг подібного підходу відразу можна віднести високий рівень автоматизації процесів моделювання і керування, оскільки похідні дані можуть бути отримані безпосередньо від конкретної DT-моделі, вони враховують її індивідуальні особливості а не «узагальнені» як у звичайних моделях, та у процесі моделювання також враховують особливості індивідуальної «поведінки» об'єктів.

Основним обмеженням чи первинною вимогою для такої системи є, на наш погляд, основний використовуваний ресурс. Розглянемо потенційні особливості на прикладі земельних ресурсів при виробництві рослинної (наприклад овочевої) продукції.

Великі поля мають, у першу чергу, свої індивідуальні характеристики по конфігурації, просторовому розташуванні, ґрунтам, наявності водних ресурсів та інших параметрів. Слід відразу зазначити, що за рахунок великої просторової розподіленості поля не однорідні за своїми властивостями на всій своїй площі. Це, з огляду і раціональності використання і задач сталого розвитку вимагає його розбивки на ділянки з більш-менш сталими характеристиками та використання технологій точкового землеробства та моніторингу. Виходячи з цього, кожна складова ділянка буде мати свої індивідуальні характеристики (по усіх групах можливих параметрів), що є обов'язковим.

До більш загальних та незалежних характеристик слід віднести кліматичні та метеорологічні умови – загальні та добові коливання температури та вологості повітря, напрямки та швидкості вітру, соляризація та таке інше, у тому числі хімічний, фізичний та біологічний склад атмосфери.

З технологічної точки зору та агрономії, важливим є історія раніше вирощуваних агрокультур, що значною мірою буде впливати на наступні агротехнічні та біозахисні заходи.

Результати дослідження та їх обговорення. Враховуючи вище зазначене, можна запропонувати базову структуру онтології для полів, що представлено на рис. 1.

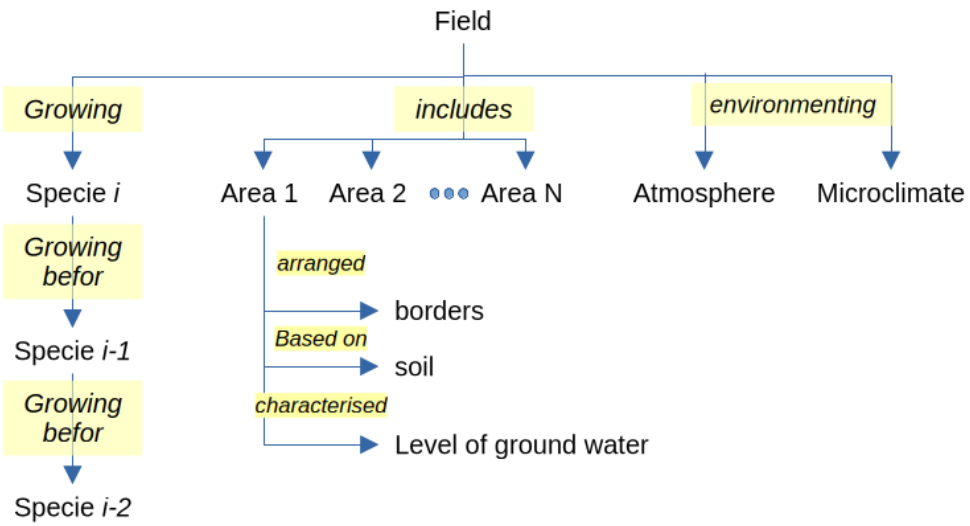

Рисунок 1 – Приклад базової онтології "Поле"

Чому саме інформаційна одиниця «Поле» обрана похідною у створенні проекту? Тому що її основні властивості впливатимуть на кейс можливих подальших рішень. Так основним чинником є ґрунт з його поточною структурою, хімічним та біологічним складом. Саме ці чинники впливають на те, що можна вирощувати на саме цьому ґрунті. Додатковими чинниками будуть рівень ґрунтових вод, мікроклімат та метеорологічні фактори які можуть коригувати впливові на технологію вирощування фактори упродовж сезону. Крім того при виборі агрокультури важливим є сівообіг, який дозволяє не тільки підвищити ефективність

рослинництва, але ще й зберегти чи відновити певні екологічні характеристики відповідних ділянок та поля цілком.

На наступному кроці, після підбору агрокультури, відповідно до особливостей онтології обраного виду рослин для системи моделювання з'явиться розклад агротехнічних операцій, що є невід'ємною характеристикою для певного виду рослин та відповідною компонентою обраної онтології. Подальший процес моделювання (з урахуванням на цьому етапі типової метеорологічної моделі) буде полягати у зчитуванні чергового кроку з типового розкладу, ідентифікації потрібних ресурсів та розподіленні (передачі) інформації по відповідних DT-моделях, що задіяні на поточному етапі. Після цього у моделі відбуваються певні зміни станів компонентів та, при необхідності та наявності зв'язків між цільовими компонентами — фіксація та обмін контрольними даними з певним кроком у часі до досягнення часу чергової події, після чого процес повторюється до завершення розкладу.

Для додаткового контролю необхідно (бажано) у DT-моделі агрокультури мати також, хоча б статистичну модель її поведінки, що відповідає типовим кліматичній та мікрокліматичній моделям. Це дозволятиме коригувати та попередньо синхронізувати «узагальнений» розклад до місцевих умов.

Отже, наведений підхід дозволяє попередньо сформувати інформаційно-структурну схему системи моделювання, яку представлено на рис. 2.

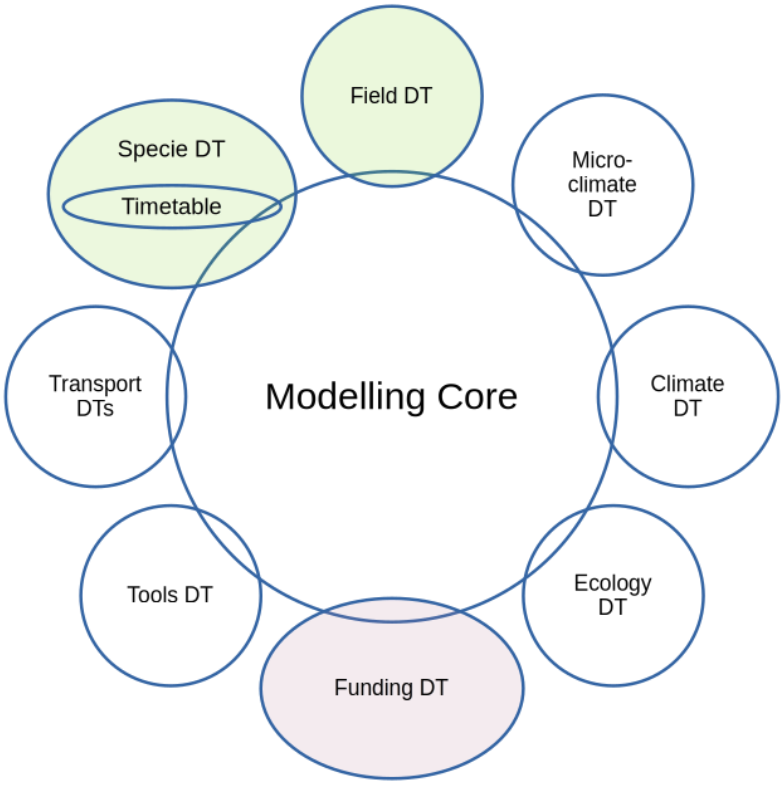

Рисунок 2 – Структурна системи моделювання аграрного проекту

Відповідно до описаної схеми взаємодії, обмін даними відбувається у двох напрямках — від системи моделювання до DT компонентів і, як відповідна реакція, у зворотному напрямі. Враховуючи особливості об'єктів які мають бути задіяні у процесі моделювання та подальшого моніторингу, можна стверджувати, що за своєю реалізацією система буде розгалуженою, а відповідні цифрові двійники можуть бути реалізовані на зовнішніх ресурсах інших організацій, наприклад у виробника відповідного технічного засобу, або місцевій метеорологічній службі. Такий характер, крім того, проявляється не тільки на цьому інформаційному рівні, а тако ж на рівні окремих двійників, оскільки дані про поточний стан

поля створюватиметься за рахунок сенсорних мереж окремих ділянок та зберіганням даних на спеціалізованих серверах баз даних.

Висновки та перспективи. Враховуючи наведені міркування, доцільною є реалізація окремих двійників у формі мережевих сервісів з відповідними двоспрямованими інтерфейсами. Такий підхід дозволятиме легко масштабувати модель та модифікувати її компоненти без втрати загальної функціональності та «властивостей».

Великою перевагою у створенні автоматизованої системи з розробки аграрних проектів на основі онтологій та DT- моделей є чітка та жорстка структурованість інформації у форматі xml, що дозволяє використовувати методи лінгвістичного аналізу при будові інформаційної структури проекту за прикладом компіляторів та конфігураційних систем спеціалізованих фреймворків. Головною проблемою, яка на сьогодні існує, є відсутність стандартів на структуру DT-моделей, інструментальних засобів з їх реалізації та сервісів для їх розгортання.

Отже, основними перспективними напрямками для подальшого розвитку систем автоматизованого проектування за вказаними вище підходами можна вказати наступні два напрямку: розробка підходів та інтерфейсів, алгоритмічного, програмного та технічного забезпечення для розгортання сервісів DT-моделей; розробка автоматизованих засобів з побудови інформаційних моделей на основі онтологій.

Список використаних джерел

1. United Nations Development Programme. Sustainable development goals. Retrieved December 14, 2025, from https://www.undp.org/sustainable-development-goals.
2. United Nations Preparatory Committee for the World Summit on Sustainable Development (2nd sess. : 2002 : New York), & United Nations Department of Economic and Social Affairs, Division for Sustainable Development (Eds.). (2002). Guidance in preparing a national sustainable development strategy: Managing sustainable development in the new millennium. United Nations, Department of Economic and Social Affairs. https://digitallibrary.un.org/record/459670.
3. IBM. (2020). What is a digital twin? https://www.ibm.com/think/topics/digital-twin.
4. Amazon Web Services, Inc. What is digital twin technology? Retrieved March 10, 2024, from https://aws.amazon.com/what-is/digital-twin/.
5. McKinsey & Company. What is digital-twin technology? Retrieved December 14, 2025, from https://www.mckinsey.com/featured-insights/mckinsey-explainers/what-is-digital-twin-technology.
6. SourceForge. (2019). OpenProj – Project management. https://sourceforge.net/projects/openproj/.
7. GanttPRO. GanttPRO yak alternatyva Microsoft Project Online [GanttPRO as an alternative to Microsoft Project Online]. Retrieved September 29, 2025, from https://ganttpro.com/ru/microsoft-project-online-alternative/.
8. ProjectLibre. ProjectLibre AI. Retrieved September 29, 2025, from https://www.projectlibre.com/.
9. Wikipedia contributors. (2025). Redmine. In Wikipedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Redmine&oldid=1307913022.
10. BarD Software s.r.o. GanttProject: Free project management tool for Windows, macOS and Linux. GanttProject. Retrieved September 29, 2025, from https://www.ganttproject.biz.
11. Microsoft. Keruvannia proektamy z povnym kontrolem protsesiv [Project management with full process control]. Retrieved September 29, 2025, from https://www.microsoft.com/uk-ua/microsoft-365/project/project-management.
12. World Wide Web Consortium. OWL – Semantic web standards. Retrieved December 14, 2025, from https://www.w3.org/OWL/.
13. Motik, B., Patel-Schneider, P. F., & Parsia, B. (Eds.). (2012). OWL 2 web ontology language: Structural specification and functional-style syntax (2nd ed.). World Wide Web Consortium. http://www.w3.org/TR/2012/REC-owl2-syntax-20121211/.

14. Aubert, C., & Arnaud, E. (2021). Ontologies most used in agriculture: Make your data interpretable and interoperable with ontologies (Version 1). Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.6609666.
15. Planteome. Planteome: Welcome. Retrieved October 6, 2025, from https://browser.planteome.org/amigo.
16. Crop Ontology. Crop ontology curation tool. Retrieved October 6, 2025, from https://cropontology.org/.

Vaskivskyi Vadym
PhD student in Computer Science,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-8969-7781
E-mail: v.vaskivskyi@nubip.edu.ua

Gorovyi Iaroslav
PhD student in Computer Science,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7494-2538
E-mail: iar.gorovyi@nubip.edu.ua

Smolii Victor
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Systems, Networks, and Cybersecurity,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2834-6989
E-mail: v-smolii@nubip.edu.ua

DIGITAL TWINS TECHNOLOGIES IN AGRICULTURAL PROJECT MANAGEMENT SYSTEMS

Abstract. *In the last few decades, global market and life processes have shown that many different aspects of human activity are closely tied. This leads to the Sustainable Development Strategy targeted at the balanced interconnection of the environment (lands, atmosphere, ecosystems), society (cultural, educational and health) and economics, of course. Such complex approach needs a new tool for development and evaluation projects in all activity spheres. The current work is devoted to the potential directions for development such tools. The possible principles for developing project development systems in agriculture are considered and analysed in the research, which are based on modern technologies, including Digital Twins, Ontologies, and network services, in the context of increasing requirements for Sustainable Development and general trends towards rational and economical use of the planet's resources. The analysis demonstrates the potentially high efficiency and versatility of the proposed approach not only for solving issues of project creation, but also for their further management and monitoring of compliance with target functions. By examining the conditional example of a sowing field, the features and general approaches to forming the information model structure of the domain area and its connected environment are considered, based on determined and tied ontologies. Two main directions of further research are also identified: creating a base for the unified implementation of digital twins and automated analysis systems of ontologies presented in OWL formats, and generating new, complex framework models based on them. The paper consists of a preliminary justification for the concept of new system development for the life cycle of economic and business project management in the agricultural sector.*

Keywords: *Agrarian Project, Digital Twins, Ontology, OWL, Sustainable Development.*