

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОНФЛІКТУ ІНТЕРЕСІВ У БУДІВНИЦТВІ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ІГОР, BIM ТА AI-АНАЛІЗУ

Бородін М. О.¹, Ткач Т. В.², Єлісєєва М. О.³, Балакін К. В.⁴

^{1,2,4}Український державний університет науки і технологій

ННІ Придніпровська державна академія будівництва та архітектури

³Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Анотація. У статті наведено ігрову модель взаємодії замовника та підрядника, яка поєднує теорію ігор, BIM і штучний інтелект. Запропонований підхід дозволяє оптимізувати термін, вартість і стимули з огляду на конфлікт інтересів, забезпечуючи баланс стратегій сторін.

Ключові слова: теорія ігор, BIM, штучний інтелект, управління будівництвом, конфлікт інтересів, оптимізація, стратегія, контрактні умови.

Вступ

Будівельні проекти, зокрема в умовах високого рівня невизначеності або обмежених ресурсів, визначаються складною взаємодією між основними стейкхолдерами – замовником і підрядником. У цій взаємодії часто виникає конфлікт інтересів: замовник зацікавлений у мінімізації вартості та терміну реалізації проекту, тоді як підрядник прагне максимізувати власний прибуток, що іноді супроводжується подовженням термінів і збільшенням вартості робіт. Така асиметрія мети створює стратегічну напругу, яка може суттєво впливати на процес здійснення робіт, порушувати графік і призводити до перевитрат.

У традиційних підходах до управління будівництвом, зокрема в процесі використання діаграм Ганта, CPM (Critical Path Method) або PERT, основна увага приділяється технічно-послідовному плануванню завдань без урахування поведінкових та економічних стратегій учасників. Такі методи формують календарні графіки в умовно «ідеальному» середовищі без врахування інтересів учасників, мотиваційних факторів, змін у ресурсному забезпеченні та погодних умовах. Це обмежує можливості гнучкого реагування на зміни й ускладнює своєчасне виявлення й урегулювання потенційних конфліктів.

Сучасні цифрові інструменти, зокрема інформаційне моделювання будівель (BIM), дають можливість отримувати точну інформацію про об'єкт: обсяги, послідовність робіт, ресурси, логістичні обмеження. Водночас штучний інтелект (AI) може застосовуватись для прогнозування тривалості, оптимізації ресурсів, виявлення ризиків затримок, а також для моделювання поведінки

учасників проекту [1]. Проте інтеграція цих чинників у систему управління потребує чіткого формального підґрунтя, що враховує потенційні конфлікти інтересів і передбачає механізми досягнення компромісу.

Аналіз публікацій

У [2] подається огляд ключових напрямів використання ігрового підходу в будівництві – управління контрактами, вибір стратегії, конфлікти. Корисним елементом для обґрунтування вибору є теорія ігор як основа формалізації поведінки замовника й підрядника. У [3] аналізуються види ігор (кооперативні, некооперативні), типи конфліктів, механізми стимулювання. Це важливо для класифікації типу гри, що використовується в дослідженнях (наприклад гра Stackelberg), і для аргументації структури стратегій. У [4] наведено приклади застосування AI для підтримки процесу прийняття рішень в умовах невизначеності під час ігрових сценаріїв. У [5] розглядається приклад некооперативної гри з конфліктом інтересів між учасниками будівельного процесу. Автор аналізує ризики, затримки, втрати довіри. У [6] систематизується, як саме BIM-моделювання може забезпечити інформацію для прийняття рішень, а AI – автоматизацію процесів. Це пояснює, чому саме ці технології є основою цифрової моделі гри. У [7] автор демонструє можливості глибокої аналітики, моніторингу та передбачення ризиків за допомогою AI. У [4] наведено приклади використання AI для підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності, що може бути корисним під час прогнозування ризиків, тривалості процесу робіт і поведінки підрядників. У [8] описуються реальні кейси, як Machine Learning (ML) працює з BIM-даними для автоматич-

ного аналізу. Стаття [9] ілюструє, як AI може працювати з BIM у реальному часі для координації дій у відповідь на зміну умов (вплив простоїв на вибір стратегії). Матеріал статті [10] сфокусовано на проєктуванні, але він демонструє потенціал генеративного AI у створенні рішень. В [11] наведено аналіз адаптивного підходу на основі навчання, що наближений до вибору стратегій у грі. Усі джерела доповнюють різноманітні аспекти запропонованої моделі:

- теорія ігор (2–5) – формалізація стратегії та конфлікту інтересів;
- BIM (6, 8, 9) – джерело структурованих параметрів;
- AI/ML (6, 7, 10, 11) – елемент оптимізації, прогнозування, навчання;
- інтеграція (4, 6) – підтвердження актуальності комплексного підходу.

Мета та постановка завдання

Метою цієї статті є розроблення ігрової моделі взаємодії замовника та підрядника, що поєднує апарат теорії ігор із сучасними BIM-технологіями та AI-інструментами, забезпечуючи побудову адаптивної, цифрово підтриманої стратегії управління календарним плануванням у будівельній галузі. Запропонована модель дозволяє формалізувати конфлікт інтересів, врахувати вплив умов контракту на поведінку сторін та забезпечити основу для розроблення автоматизованих рішень, що збалансують мету учасників й оптимізують процес проєкту.

Постановка завдання полягає у створенні ігрової моделі взаємодії замовника та підрядника з використанням BIM і AI, що дозволяє оптимізувати строки, вартість і стимули для збереження балансу інтересів сторін.

Теоретичний огляд

Теорія ігор є потужним математичним елементом для моделювання ситуацій, у яких кілька учасників мають власні інтереси й приймають рішення, що впливають одне на одне. У проєктному управлінні теорія ігор застосовується для аналізу конфлікту інтересів, розподілу ресурсів, вибору оптимальних стратегій підрядників і замовників, формування тендерних умов або контрактних моделей.

Класичними прикладами є двоосібні ігри з нульовою або ненульовою сумою, ієрархічні ігри Stackelberg [3], де один із гравців задає умови, а інший адаптується до них, або кооперативні ігри, у яких сторони об'єд-

нують зусилля заради спільної мети. У контексті будівництва такі моделі допомагають формалізувати відносини «замовник-підрядник», зокрема тоді, коли між ними виникає напруження щодо термінів, оплати або обсягів.

У роботах з прикладної економіки конфлікт інтересів між учасниками інвестиційно-будівельного процесу пояснюється такими чинниками, як асиметрія інформації, опортуністична поведінка, моральний ризик і недосконалість контрактів. Наприклад, підрядник може володіти інформацією про технологічні ризики, але приховувати її з метою отримання вигоди, тоді як замовник схильний до контролю та жорсткого управління термінами.

Дослідження в галузі будівництва вказують, що конфлікти найчастіше виникають через невизначеність обсягів, погодні умови, ризики, недоліки в плануванні та нечітке стимулювання. Саме тому виникає потреба в математичних моделях, які дозволяють формалізувати інтереси сторін і звести їх до рівноважної стратегії.

Інформаційне моделювання будівель (BIM) є джерелом структурованих і цифрових даних про об'єкт будівництва. Сучасні BIM-платформи (наприклад, Autodesk Revit, Graphisoft Archicad, Bentley OpenBuildings) надають таку інформацію:

- про просторово-часові параметри проєкту;
- фізичні об'єми конструкцій (m^3 , m^2 , т);
- типи матеріалів і ресурсів;
- залежності між етапами робіт;
- поточний стан процесу (у 4D-/5D-моделях).

Ця інформація критично важлива для математичних моделей, які враховують часову динаміку та вартісні характеристики. Зокрема BIM може автоматично згенерувати мережу подій для побудови графа задач, які потім використовуються в алгоритмах оптимізації та формуванні вигравшних функцій гравців.

Також застосовують й інші технологічні інновації, зокрема AI для прогнозування й оптимізації.

Штучний інтелект відкриває нові горизонти в плануванні будівництва. Методи машинного навчання можуть прогнозувати тривалість процесу вирішення завдання на основі історичних даних, виявляти аномалії, оптимізувати розподіл ресурсів та адаптувати стратегії в реальному часі.

До найпоширеніших застосувань належать такі:

- регресійні моделі для визначення тривалості та вартості;
- класифікаційні моделі для визначення ймовірності затримок;
- алгоритми підкріплення (reinforcement learning) для вибору дій у динамічному середовищі;
- нейромережі й ансамблеві методи для узагальнення поведінкових патернів.

У контексті запропонованої статті AI може діяти як модератор між гравцями, автоматично пропонуючи умови контракту, які мінімізують сумарні втрати, а також адаптувати модель у відповідь на зміну зовнішніх факторів (кліматичні умови, логістика, вартість).

Формалізація ігрової моделі

У запропонованій моделі взаємодії беруть участь два основні гравці:

- замовник (P_1) – сторона, що фінансує будівництво й зацікавлена в мінімізації загальних витрат і строків реалізації проєкту.
- підрядник (P_2) – учасник будівельного процесу, цільовою функцією якого є максимізація чистого прибутку, що зумовлює його потенційну схильність до пролонгації термінів здійснення робіт і підвищення їхньої кінцевої вартості.

Ці сторони мають асиметричні інтереси, що є визначальним для реального ринку будівництва, де взаємозалежність сторін потребує узгодження стратегій і контрактних умов.

Мета та функції виграшу.

Нехай:

- T – тривалість проєкту, (дн.);
- $C(T)$ – загальна вартість реалізації проєкту, яка залежить від тривалості;
- $B(T)$ – винагорода (бонус) за дострокове виконання (виплачується підряднику);
- $F(T)$ – функція витрат, що залежить від часу (T), яка враховує штрафні санкції, що виплачуються замовником або стягуються з підрядника у випадку затримки;
- $R(T)$ – витрати підрядника на проведення робіт.

Функція виграшу замовника:

$$U_1 = -C(T) - \alpha T - B(T) + F(T), \quad (1)$$

де α – коефіцієнт втрат від затримки (наприклад, недоотриманий прибуток).

Функція виграшу підрядника:

$$U_2 = P(T) - R(T) + B(T) - F(T), \quad (2)$$

де $P(T)$ – сума контрактної оплати, що також може залежати від тривалості процесу.

Стратегія замовника полягає у виборі умов контракту:

- граничний термін процесу (T_0), що є верхньою межею для тривалості проєкту згідно з контрактом;
- система виплат, що стимулюють, і штрафних санкцій $F(T)$ і $B(T)$, що залежить від терміну здійснення робіт. Вона моделює фінансові взаємовідносини між замовником і підрядником у разі відхилення від графіка;
- рівень допустимих витрат.

Стратегія підрядника – це вибір фактичної тривалості процесу, яка залежить від рівня ресурсів, організації робіт тощо.

Кожен гравець оптимізує власну стратегію, залежно від стратегії, вибраної іншим гравцем, що формує динамічну взаємодію у грі. Наприклад, підрядник може оптимізувати швидкість процесу, якщо потенційна винагорода висока, або пролонгувати терміни, якщо витрати від штрафних санкцій є незначними.

У найпростішому варіанті модель може бути подана як двогравцева гра з кінцевими стратегіями, де будується матриця виграшів за фіксованих варіантів (T) та умов контракту.

З метою підвищення рівня реалістичності математичного моделювання взаємодії сторін у будівництві доцільно застосувати модель гри Stackelberg, що передбачає ієрархічну структуру прийняття рішень: лідером у ній є замовник, тоді як підрядник діє як послідовник.

У цій моделі:

- замовник визначає умови контракту (T_0 , B , F);
- підрядник вибирає оптимальну поведінку (T), максимізуючи (U_2);
- сторони досягають рівноваги Stackelberg, яка є розв'язком гри.

Час та витрати безпосередньо впливають на виграш кожної зі сторін:

- зі збільшенням тривалості процесу (T) рівень задоволення замовника зменшується ($U_1 \downarrow$), тоді як для підрядника може виникати додаткова вигода за умови зниження витрат;
- система бонусів стимулює підрядника скорочувати тривалість (T), однак водночас призводить до збільшення витрат замовника;

- штрафні санкції здійснюють функцію регулювального механізму: вони зменшують виграш підрядника в разі порушення строків, водночас частково компенсуючи збитки замовника.

Таким чином, визначення оптимізаційного завдання сторін зводиться до визначення рівноважних значень стратегій, що забезпечують досягнення рівноваги у грі за Stackelberg:

- T^* – оптимальна тривалість;
- B^*, F^* – система стимулів, що мінімізує сукупні збитки.

Для параметризації моделі використовуються:

- BIM-модель, яка генерує інформацію про обсяги, ресурси, та послідовність робіт;
- AI-моделі, які прогнозують можливу тривалість (T), вартість $C(T)$, ризики затримки, оптимальне розміщення ресурсів тощо.

Таким чином, цифрові технології дозволяють перейти від абстрактної теорії ігор до практичної цифрової реалізації контрактних стратегій.

Інтеграція BIM та AI

У запропонованій моделі взаємодії замовника та підрядника ключову функцію здійснює використання цифрових технологій інформаційного моделювання будівель (BIM) як джерела формалізованих параметрів проєкту та штучного інтелекту (AI), як інструменту для прогнозування, оптимізації та генерації стратегічних рішень.

Інформаційна модель будівлі (наприклад, створена в Revit) містить такі структуровані дані:

- про будівельні обсяги (m^3 бетону, m^2 облицювання тощо);
- типи конструктивних елементів (колонни, стіни, перекриття);
- матеріали та ресурси (арматура, цегла, крани);
- залежності між роботами (попередні та наступні завдання);
- просторові та часові обмеження.

Автоматизоване отримання інформації здійснюється засобами Dymapo, IFC- або API-запитів, після чого вони імплементуються у функції виграшу кожного учасника моделі.

Наприклад:

- обсяги впливають на витрати $C(T)$, $R(T)$;
- залежності формують критичний шлях і обмеження для вибору (T);

- відомості про логістику впливають на ймовірність затримок.

Таким чином, BIM забезпечує об'єктивну основу для моделювання ігрової ситуації, де кожна зміна в моделі одразу змінює математичні умови гри.

Варто зазначити також функцію AI у прогнозуванні та аналізі ризиків.

Методи AI застосовуються для таких процесів:

- прогнозування тривалості здійснення робіт на основі історичних даних, типології елементів, обсягів і сезонних чинників;
- визначення ймовірності відхилень від календарного графіка під впливом зовнішніх факторів (кліматичні умови, перебої з постачанням, нестача робочої сили тощо);
- моделювання поведінки учасників проєкту, залежно від умов контракту;
- розрахування очікуваних втрат або виграшів за різних сценаріїв розвитку подій.

Типовий приклад – нейронна мережа або «ансамбль» моделей (XGBoost, Random Forest), тренувана на результатах попередніх проєктів, яка отримує на вхід параметри з BIM і визначає прогнозовану тривалість завдань або рівень ризику.

AI-модуль може бути інтегрований як інтелектуальний агент, який здійснює такі процеси:

- аналізує параметри з BIM-моделі;
- використовує функції виграшу гравців (U_1, U_2);
- проводить імітаційне програвання сценаріїв гри з різними комбінаціями бонусів (B), штрафів (F) і строків (T_0).

Модель дозволяє оптимізувати параметри контракту для забезпечення таких елементів:

- 1 рівноваги (наприклад, гра Stackelberg);
- 2 мінімізації загальних витрат для обох сторін;
- 3 стимулювання ефективної поведінки підрядника.

Процедура оптимізації може бути реалізована за допомогою градієнтних, еволюційних або метаевристичних алгоритмів (зокрема імітації відпалу).

Алгоритм такий:

- 1 ініціалізація вхідних параметрів з BIM-моделі: обсяги, кількість завдань, критичний шлях;
- 2 визначення стартових значень (T_0, B, F);
- 3 побудова ігрової моделі (Stackelberg або інша);
- 4 аналіз виграшів (U_1, U_2) за поточних параметрів;

5 застосування AI-оптимізації для пошуку (T_0^*, B^*, F^*), що здійснюють такі процеси:

- максимізують (U_1);
- гарантують, що $U_2(T_0, B, F) \geq U_{2,threshold}$ (щоб підряднику було вигідно співпрацювати);

6 валідація моделі на тестовому кейсі.

Математичну постановку задачі оптимізації наведемо в такому варіанті:

$$\max_{T_0, B, F} U_1(T_0, B, F), \quad (3)$$

$$\text{За умов } U_2(T_0, B, F) \geq U_{2,threshold}$$

$$T_0 \in [T_{min}, T_{max}], \quad (4)$$

$$B \in [B_{min}, B_{max}], \quad (5)$$

$$F \in [F_{min}, F_{max}], \quad (6)$$

де U_1 – вигрaш замовника, U_2 – вигрaш підрядника, $U_{2,threshold}$ – мінімальний прийнятний рівень вигрaшу для підрядника, T_0, B, F – оптимізовані параметри (час, бюджет, ресурс/фактор).

Результатом є цифрово сформована контрактна пропозиція, яку замовник може затвердити, а підрядник прийняти чи обговорити.

Така інтеграція має низку переваг:

- об'єктивність: основою для всіх розрахунків є реальні обсяги та конструкції;
- адаптивність: AI автоматично адаптує умови у випадку зміни моделі;
- збалансованість: досягається компроміс між інтересами сторін;
- прозорість: усі умови контракту мають цифрове пояснення.

Запропонований алгоритм може бути реалізований як окремий програмний модуль, наприклад, на Python або як Динамо/IFC-скрипт для автоматизованого вилучення BIM-параметрів. Основні етапи, тобто імпорт вихідних результатів, побудова функцій вигрaшу та здійснення оптимізаційної процедури, вже формалізовані в цій роботі. Оскільки стаття є методологічною, детальна алгоритмічна й програмна реалізація не наводиться, але є предметом подальших досліджень.

Наведена модель пройшла пробне апробаційне тестування на типовому будівельному проєкті, що підтвердило коректність логіки взаємодії гравців і працездатність оптимізаційної процедури. Через методологічність статті детальні числові результати

не наводяться, однак модель продемонструвала стійку роботу в межах сформованих припущень і довела можливість практичного застосування підходу.

Обговорення результатів

Ігрова модель взаємодії замовника та підрядника дає змогу перейти від статичного календарного планування до динамічного, поведінково-чутливого управління, де враховуються не лише фізичні параметри проєкту, але й економічні інтереси сторін. Замість жорстко заданих строків і штрафів, модель пропонує збалансовані сценарії, які стимулюють ефективну поведінку підрядника та мінімізують ризики для замовника.

Ігровий підхід дозволяє:

- заздалегідь прогнозувати можливі конфлікти на основі симуляції реакцій сторін;
- вибрати контрактні умови (бонуси, терміни, штрафи), які призводять до рівноваги;
- адаптуватися до змін у середовищі (наприклад, коливання цін, затримки поставання).

Інтеграція ігрової моделі з BIM-технологіями, які надають достовірну структуровану інформацію про об'єкт, та інструментами AI, що забезпечують аналітику, прогнозування й оптимізацію, дозволяє створити цифрову практичну реалізацію для аналізу конфліктів.

Ефективність запропонованої моделі залежить від якості вихідних BIM-даних і точності AI-прогнозів. Неконсистентні або неповні моделі можуть спотворювати результати аналізу вартості, тривалості та ризиків. У роботі це обмеження враховано через використання лише базових параметрів (обсяги, залежності, критичний шлях), що дозволяє мінімізувати вплив неточностей і робить модель придатною навіть за умови використання неповних BIM-моделей.

З огляду на зазначені фактори система здійснює такі функції:

1 BIM є джерелом об'єктивних даних (обсяги, ресурси, залежності);

2 AI – інструмент оброблення, що моделює поведінку учасників, прогнозує ризики та визначає параметри для досягнення бажаного результату;

3 гра – формалізована межа, яка зводить ці елементи до керованої стратегії взаємодії.

У подальшому запропонована система може бути реалізована як цифровий арбітр,

здатний автоматизовано аналізувати динаміку будівельного процесу, ідентифікувати відхилення від планових показників, здійснювати аналіз розподілу відповідальності між учасниками проєкту та формувати рекомендації щодо застосування коригувальних заходів.

Незважаючи на потенційні переваги, практична імплементація моделі супроводжується низкою недоліків:

- дефіцит інформації – інформація про проєкти здебільшого є неповною або недостатньо формалізованою, що ускладнює навчання AI-моделей;
- нестандартизовані BIM-моделі – відсутність уніфікованих підходів до моделювання ускладнює процес автоматизації;
- складність налаштування ігрових сценаріїв – визначення справедливих функцій виграшу потребує залучення експертів та інституційної підтримки;
- недовіра до автоматичних рішень – учасники можуть відхиляти результати AI-/ігрової моделі без належних пояснень, що зумовлює необхідність застосування підходів Explainable AI.

Попри недоліки, модель має значний потенціал у таких контекстах:

- 1 державне замовлення: прозоре та цифрове формування умов тендеру з урахуванням інтересів обох сторін, а також моніторинг процесу;
- 2 реконструкція після руйнувань: швидкий аналіз сценаріїв взаємодії з різними підрядниками в проєктах відбудови;
- 3 масштабні інфраструктурні проєкти: складні багаторівневі залежності та підрядники можуть бути ефективно змодельовані через розширену багатогравцеву ігрову систему.

Висновки

У статті було запропоновано інноваційний підхід до управління будівельними проєктами на основі інтеграції теорії ігор, BIM-технологій та штучного інтелекту. Такий підхід дозволяє подолати обмеження традиційного календарного планування, яке не враховує поведінкові особливості стейкхолдерів, вплив зовнішнього середовища та потенційні конфлікти інтересів.

Основні результати дослідження:

- 1 сформульовано ігрову модель взаємодії замовника та підрядника, яка враховує термін, вартість робіт, а також систему бонусів і штрафів. Модель дає змогу обчислю-

вати функції виграшу сторін та визначати рівновагу в їхніх стратегіях;

- 2 BIM-моделі є джерелом точних параметрів, необхідних для побудови функцій виграшу: обсягів робіт, ресурсних потреб, технологічних залежностей;

- 3 AI-модулі здійснюють процеси прогнозування тривалості, виявлення ризиків та адаптивну генерацію умов контракту, орієнтованих на досягнення взаємовигідного компромісу;

- 4 симуляційний кейс доводить, що правильна конфігурація бонусів і штрафів на основі моделювання дає змогу уникнути затримок і підвищити загальний виграш системи.

Таким чином, запропонована модель є фундаментом для створення адаптивної, цифрово підтриманої системи управління будівництвом, у якій конфлікт інтересів не пригнічується, а оптимізується на основі раціональних стратегій і прозорих результатів.

У роботі модель розглянута у двогравцевій постановці, що відповідає найпоширенішій конфігурації реальних контрактних відносин. Крім того, структура гри допускає розширення: субпідрядники можуть бути додатковими гравцями з власними функціями виграшу, а органи контролю – регуляторами, що змінюють штрафні параметри та параметри стимулювання. Це визначено як напрям подальших досліджень.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на такі процеси:

- розширення моделі для багатогравцевих сценаріїв із залученням субпідрядників, органів контролю та постачальників;
- інтеграцію з платформами цифрового девелопменту та державними системами тендерного управління;
- впровадження програмного модуля-демонстратора для перевірки роботи моделі на реальних кейсах із використанням відкритих BIM-даних.

Література

1. Бородин М. О., Ткач Т. В., Мартиш О. О. Організаційні аспекти використання штучного інтелекту в будівництві. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2025. № 1. С. 73–80. <http://uajcea.pgasa.dp.ua/article/view/323324>.
2. Eissa R. *Current applications of game-theory in construction engineering and management research: a social network analysis approach*. ASCE Journal of Construction Engineering and Management. <https://ascelibrary.com/doi/10.1061/>

- %28ASCE%29CO.1943-7862.0002085 (дата звернення: 17.09.2025).
3. Narbaev T. (*A Review of the Use of Game Theory in Project Management*. ASCE Journal of Management in Engineering. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29ME.1943-5479.0001092> (дата звернення: 17.09.2025).
 4. Serugga J. *AI-Assisted Game Theory Approaches to Bid Pricing Under Uncertainty*. MDPI, Construction Ethics. <https://www.mdpi.com/2673-9909/5/2/39> (дата звернення: 17.09.2025).
 5. Grzył B. *Application of Game Theory to Conflict Management in a Construction Work Contract*. MDPI Sustainability. 1983. 11(7). <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/7/1983> (дата звернення: 17.09.2025).
 6. Pan Y., & Zhang L. *Integrating BIM and AI for Smart Construction Management: Current Status and Future Directions*. Archives of Computational Methods in Engineering. DOI:10.1007/s11831-022-09830-8 (дата звернення: 17.09.2025).
 7. Baduge S. K. *Artificial intelligence and smart vision for building and construction*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104440> (дата звернення: 17.09.2025).
 8. Zabin A. *Applications of machine learning to BIM: A systematic review*. Automation in Construction. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101474> (дата звернення: 17.09.2025).
 9. *An Extension of BIM Using AI: A Multi Working-Machines Pathfinding Solution* / Y. Xiang et al. 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.06635> (дата звернення: 17.09.2025).
 10. He Z., Wang Y.-H., & Zhang J. *Generative AIBIM: An automatic and intelligent structural design pipeline integrating BIM and generative AI*. 2023. <https://arxiv.org/abs/2311.04052> (дата звернення: 17.09.2025).
 11. *Adaptive control of resource flow to optimize construction work and cash flow via online deep reinforcement learning* / C. Jiang et al. 2023. arxiv. <https://arxiv.org/abs/2307.10574> (дата звернення: 17.09.2025).
 - Journal of Management in Engineering. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29ME.1943-5479.0001092> (accessed: 17.09.2025).
 4. Serugga, J. (2025). *AI-Assisted Game Theory Approaches to Bid Pricing Under Uncertainty*. MDPI, Construction Ethics. <https://www.mdpi.com/2673-9909/5/2/39> (accessed: 17.09.2025).
 5. Grzył, B. (2019). *Application of Game Theory to Conflict Management in a Construction Work Contract*. MDPI Sustainability, 11(7), 1983. <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/7/1983> (accessed: 17.09.2025).
 6. Pan, Y., & Zhang, L. (2022). *Integrating BIM and AI for Smart Construction Management: Current Status and Future Directions*. Archives of Computational Methods in Engineering. DOI:10.1007/s11831-022-09830-8 (accessed: 17.09.2025).
 7. Baduge, S. K. (2022). *Artificial intelligence and smart vision for building and construction*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104440> (accessed: 17.09.2025).
 8. Zabin, A. (2022). *Applications of machine learning to BIM: A systematic review*. Automation in Construction. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101474> (accessed: 17.09.2025).
 9. Xiang, Y., Liu, K., Su, T. et al. (2021). *An Extension of BIM Using AI: A Multi Working-Machines Pathfinding Solution*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2105.06635> (accessed: 17.09.2025).
 10. He, Z., Wang, Y.-H., & Zhang, J. (2023). *Generative AIBIM: An automatic and intelligent structural design pipeline integrating BIM and generative AI*. <https://arxiv.org/abs/2311.04052> (accessed: 17.09.2025).
 11. Jiang, C., Li, X., Lin, J.-R., Liu, M., & Ma, Z. (2023). *Adaptive control of resource flow to optimize construction work and cash flow via online deep reinforcement learning*. arxiv. <https://arxiv.org/abs/2307.10574> (accessed: 17.09.2025).

References

1. Borodin, M. O., Tkach, T. V., Martysh, O. O. (2025). *Organizational aspects of the use of artificial intelligence in construction*, *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury*, no. 1, pp. 73–80, 2025. <http://uajcea.pgasa.dp.ua/article/view/323324>.
2. Eissa, R. (2021). *Current applications of game-theory in construction engineering and management research: a social network analysis approach*. ASCE Journal of Construction Engineering and Management. <https://ascelibrary.com/doi/10.1061/%28ASCE%29CO.1943-7862.0002085> (accessed: 17.09.2025).
3. Narbaev, T. (2022). *A Review of the Use of Game Theory in Project Management*. ASCE

Бородин Максим Александрович¹, к.т.н., доц. каф. організації і управління будівництва, borodin.maksym@pdaba.edu.ua, +38 067 724-96-31,

Ткач Таїсія Вячеславівна², к.т.н., доц. каф. організації і управління будівництва, tkach.taisiia@pdaba.edu.ua, +38 096 231-35-79,

Слісєва Марина Олександрівна³, к.т.н., старший викладач каф. будівництва, геотехніки і геомеханіки, Yelisiieva.M.O@nmu.one, +380994200731,

³Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, м. Дніпро, 1949005, Україна,

Балакін Костянтин Валерійович⁴, аспірант, balakinkonst@gmail.com, +38 099 796-64-12

^{1,2,4}Український державний університет науки і технологій ННІ «Придніпровська державна

академія будівництва та архітектури»,
вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а,
49005, м. Дніпро, Україна.

Mathematical Modeling of Conflict of Interests in Construction Based on Game Theory, BIM, and AI Analysis

Abstract. Problem. Construction projects often face conflicts of interest between the client, who seeks to minimize costs and duration, and the contractor, who pursues profit maximization, sometimes at the expense of longer timelines. Traditional tools such as CPM or PERT focus on technical scheduling, neglecting behavioral and strategic dynamics, which limits risk anticipation and interest alignment. **Goal.** The study aims to develop a mathematical game-theoretic model of client-contractor interaction that integrates Building Information Modeling (BIM) and artificial intelligence (AI) to formalize conflicts of interest, optimize contract terms, and achieve equilibrium strategies. **Methodology.** The framework combines a Stackelberg game structure with BIM-generated data (volumes, resources, dependencies) and AI-based forecasting. Payoff functions incorporate project duration, costs, bonuses, and penalties. Optimization techniques such as gradient descent, evolutionary algorithms, and simulated annealing are applied to identify equilibrium solutions. A case study validates the approach using BIM and AI-derived parameters. **Results.** The model identifies equilibrium conditions (T^*, B^*, F^*) , where the client maximizes utility and the contractor ensures acceptable profitability. Simulations show that well-adjusted incentive systems reduce delays, balance strategies, and improve project outcomes. **Originality.** Unlike conventional scheduling, the model explicitly considers economic and behavioral interactions, integrates real-time BIM data, and applies AI-driven

optimization to dynamically adapt contract conditions. **Practical value.** The approach offers a digital decision-support tool for contract design and project governance, enabling transparent, adaptive management, minimizing risks, and supporting fair, efficient strategies in both public and private projects.

Keywords: game theory; BIM; artificial intelligence; construction management; conflict of interest; optimization; equilibrium strategies.

Borodin Maksym¹, PhD, Assoc. Prof, Department of Organisation and Management in Construction, borodin.maksym@pdaba.edu.ua, +38 (067) 724-96-31,

ORCID: 0000-0003-0513-3876,

Tkach Taisiia², Ph.D., Assoc. Prof, Department of Organisation and Management in Construction. tkach.taisiia@pdaba.edu.ua,

+38 (096) 231-35-79,

ORCID ID: 0000-0002-9433-7514,

Maryna Yelisieieva³, PhD, Assoc. Prof, Department of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Yelisieieva.M.O@nmu.one,

+38(099)4200731,

ORCID: 0009-0002-7112-9904,

³Dnipro University of Technology, 49005,

Dnipro, 19, Dmytro Yavornytskyi av.,

Balakin Kostiantyn Valeriiovych⁴, PhD, Stud., balakinkonst@gmail.com,

+38 (099) 796-64-12,

ORCID ID: 0009-0007-8329-3505,

^{1,2,4}Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine.