УДК 005.8:519.2
DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-193-216

ЙМОВІРНІСНІ МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ НА ОСНОВІ БАЙЄСІВСЬКОГО ПІДХОДУ

Н.М. Піддубна
старший викладач кафедри «Управління логістичними системами та проєктами»
ORCID 0000-0001-6870-0132
Poddubnaya.natnik@gmail.com

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. *Робота вирішує проблему неефективного оновлення проєктних параметрів через створення адаптивної системи прийняття рішень на основі теорії Байєса. Традиційні методи планування базуються на статичних оцінках, що призводить до накопичення відхилень між плановими та фактичними показниками. Байєсівські методи залишаються переважно теоретичними конструкціями без достатньої адаптації для проєктної практики. Розроблено методологічну систему, яка інтегрує байєсівське оновлення в чотири напрями: динамічну оцінку ризиків, адаптивне прогнозування термінів, оптимізацію контролю якості та гнучке управління ресурсами. Алгоритм структуровано як п'ятиетапний процес від визначення областей застосування до організаційного навчання. Емпіричну верифікацію здійснено на будівельному об'єкті вартістю 25 мільйонів євро. Оцінка метеорологічних ризиків знизила ймовірність критичних затримок з 25 % до 7 %, вивільнивши 300 тисяч євро резервів. Інтеграція щоденних метрик продуктивності за 20 днів скоротила прогнозну невизначеність з восьми до трьох днів, що становить підвищення точності на 65 %. Послідовне оцінювання субпідрядника підняло рівень довіри з 70 % до 95 %. Комплексний аналіз підтримав рішення про прискорене введення об'єкта з очікуваною цінністю 119 тисяч євро при ймовірності успіху 70 %. Виявлено обмеження: залежність від коректності початкових припущень, математичні бар'єри для користувачів, операційне навантаження від збору даних. Теоретичний внесок полягає у специфікації байєсівського апарату для проєктних умов з високою динамікою. Прикладне значення визначається покращенням точності оцінювання та обґрунтованості управлінських рішень в інфраструктурних проєктах зі значними фінансовими ризиками.*

Ключові слова: *ймовірнісне планування, байєсівське оновлення, проєктний менеджмент, логістичний центр, прийняття рішень.*

© Піддубна Н.М., 2025

UDC 005.8:519.2
DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-193-216

PROBABILITY THEORY AS A PROJECT MANAGEMENT TOOL: BAYESIAN METHODOLOGY FOR DECISION-MAKING

Natalia Piddubna
Senior Lecturer at the Department of Logistics Systems and Project Management
ORCID 0000-0001-6870-0132
Poddubnaya.natnik@gmail.com

Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine

Abstract. *This study addresses the problem of inefficient project parameter updating through development of an adaptive decision-making system based on Bayesian theory. Traditional planning methods rely on static estimates that are not systematically adjusted as new data emerges, leading to accumulation of deviations between planned and actual indicators. Analysis of contemporary research demonstrates that Bayesian methods remain predominantly theoretical constructs without sufficient operationalization for project practice. A methodological system has been developed that integrates Bayesian updating into four domains: dynamic risk assessment, adaptive schedule forecasting, quality control optimization, and flexible resource management. The implementation algorithm is structured as a five-stage process from identifying application areas through probabilistic model formation to organizational training. Empirical verification was conducted on a construction facility worth twenty-five million euros, where three Bayesian applications were tested. Meteorological risk assessment reduced the probability of critical delays from twenty-five to seven percent, releasing three hundred thousand euros in reserves. Integration of daily productivity metrics over twenty working days reduced forecast uncertainty from eight to three days, demonstrating a sixty-five percent accuracy improvement. Sequential subcontractor evaluation raised confidence levels from seventy to ninety-five percent, justifying reduction in reserve funds. Synthetic analysis of three updates supported the decision for accelerated facility commissioning with expected value of one hundred nineteen thousand euros at seventy percent success probability. Identified limitations include: dependence on initial assumption accuracy, mathematical barriers for users, operational burden of data collection, misalignment between model assumptions and actual interdependencies. Construction of integrated Bayesian architectures with multilevel parameter linkages has been identified as a prospective direction. Theoretical contribution lies in specification of Bayesian apparatus for project conditions with high dynamics. Applied significance is determined by improved assessment accuracy and substantiation of managerial decisions in infrastructure projects with significant financial risks.*

Keywords: *probabilistic planning, Bayesian updating, project management, logistics center, decision-making.*

Постановка проблеми. Сучасне проєктне управління характеризується зростаючою складністю та невизначеністю, що створює значні виклики для традиційних методів планування та контролю. Згідно з дослідженнями Project Management Institute, лише 67 % проєктів завершуються успішно, при цьому основними причинами невдач є неточність первісних оцінок, неефективне управління ризиками та неадекватна реакція на зміни в проєктному середовищі [1].

Традиційні методи управління проєктами, такі як критичний шлях або матриці ризиків, базуються на статичних оцінках, встановлених на початку проєкту, та не забезпечують систематичного оновлення цих оцінок у міру надходження нової інформації. Це призводить до накопичення невідповідностей між плановими показниками та реальною ситуацією, що негативно впливає на якість управлінських рішень.

Вирішенням даної проблеми може стати застосування формули Байєса, яка пропонує математичний апарат для систематичного оновлення ймовірнісних оцінок на основі нової інформації і має потенціал для суттєвого покращення якості управління проєктами. Проте відсутність адаптованої методології застосування цього підходу в проєктному середовищі обмежує його практичне використання.

У зв'язку з цим виникає необхідність розробки практичної методології застосування формули Байєса в управлінні проєктами для підвищення точності прогнозів та якості управлінських рішень.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Проблематика застосування ймовірнісних методів в управлінні проєктами активно досліджується в сучасній науковій літературі. У роботах [1; 2] підкреслюється важливість адаптивних підходів до управління проєктами в умовах невизначеності. Зазначається, що традиційні детерміністичні методи планування втрачають свою ефективність у складному та динамічному проєктному середовищі, що вимагає розвитку нових підходів, здатних враховувати ймовірнісний характер проєктних параметрів. Подальші дослідження [3; 4] розглядають нелінійне стратегічне управління інфраструктурними програмами та розвиток можливостей управління проєктами на прикладі масштабних національних проєктів. Моделі системи управління проєктами для розвитку самокерованих організацій у портфелях проєктів відновлення інфраструктури розглядаються у дослідженні [5], де підкреслюється актуальність розвитку синкретичних методологій управління для проєктів розвитку, що особливо важливо в контексті післявоєнної відбудови. Особливості управління проєктами в умовах глобальних криз аналізуються у роботі [6], де демонструється необхідність адаптивних методологій управління в умовах швидкозмінного зовнішнього середовища з високим рівнем невизначеності. Застосування кількісних методів в управлінні проєктними ризиками досліджується у праці [7], де підкреслюється необхідність розвитку математичного апарату для обробки невизначеності в проєктах, але не розглядається специфіка байєсівського підходу як інструменту для систематичного оновлення ризикових оцінок.

У англомовній літературі байєсівські методи в управлінні проєктами розглядаються більш широко. У дослідженнях [8; 9] демонструється практична цінність байєсівських методів для прийняття рішень в умовах неповної інформації

та пропонується використання байєсівських мереж для моделювання складних взаємозв'язків між ризиками, однак не розробляється практична методологія застосування формули Байєса, адаптована до специфіки повсякденної проєктної практики. У дослідженні [10] зазначається, що основними перешкодами для широкого впровадження байєсівських методів є складність математичного апарату та відсутність стандартизованих процедур. Підкреслюється необхідність розробки спрощених підходів, доступних для практиків без глибокої математичної підготовки. Удосконалений підхід до планування проєктів з урахуванням невизначеності за допомогою байєсівських мереж розглядається у праці [11]. Дослідження демонструє потенціал байєсівського підходу для інтеграції різних типів інформації та оновлення оцінок планування, але обмежується теоретичними аспектами без детальної практичної методології. Застосування байєсівських методів у будівельній галузі представлено у дослідженнях [12; 13]. Кількісна оцінка ризиків планування в будівельних проєктах за допомогою байєсівських мереж переконань показує ефективність байєсівського підходу для управління ризиками планування [12], але фокусується виключно на будівельній галузі. Вплив кліматичних факторів на будівельні проєкти детально аналізується на прикладі Чилі [13], що підтверджує значущість погодних умов як фактору ризику затримок у будівництві та необхідність їх систематичного врахування при плануванні проєктів. У роботі [14] розглядається широке застосування байєсівських мереж у різних сферах, включаючи управління проєктами. Надається детальний математичний апарат, але практичні приклади обмежені специфічними випадками. Різні статистичні методи динамічного планування проєктів, включаючи елементи байєсівського підходу, досліджуються у праці [15]. Підкреслюються переваги динамічного оновлення прогнозів, але не розробляється комплексна методологія застосування формули Байєса. Застосування байєсівського підходу для покращення зрілості управління проєктами з метою зниження ризиків перевищення вартості в інженерних проєктах розглядається у дослідженні [16]. Результати показують суттєве підвищення точності прогнозів при використанні байєсівських методів порівняно з традиційними підходами.

Аналіз літератури свідчить, що, незважаючи на визнання потенціалу байєсівських методів у проєктному управлінні, існує значний розрив між теоретичними розробками та практичним застосуванням. Більшість досліджень або фокусується на специфічних аспектах (наприклад, управління ризиками в будівництві), або розглядає складні моделі, важкодоступні для практичного використання. Відсутня комплексна методологія, яка б забезпечувала систематичне застосування формули Байєса в різних аспектах управління проєктами.

Завдання дослідження. Метою дослідження є розробка теоретичних основ та практичної методології застосування формули Байєса в управлінні проєктами, а також апробація запропонованого підходу на конкретному прикладі. Завданнями дослідження є: аналіз релевантності байєсівського підходу для проєктного середовища; розробка практичних механізмів застосування формули Байєса в ключових областях управління проєктами; створення поетапної методології

впровадження байєсівського підходу; проведення апробації розробленої методології та аналіз результатів.

Основний матеріал дослідження. Формула Байєса являє собою математичний інструмент, який дозволяє оновлювати наші уявлення про ймовірність події при надходженні нової інформації. На відміну від класичної статистики, яка працює з фіксованими даними, байєсівський підхід дозволяє динамічно коригувати оцінки в міру накопичення досвіду та знань.

Сама формула має вигляд

$$P_A(B_i) = \frac{P(B_i) \cdot P_{B_i}(A)}{P(B_1) \cdot P_{B_1}(A) + ... + P(B_n) \cdot P_{B_n}(A)}, (i = 1, 2, ..., n)$$

де $P_A(B_i)$ позначає апостеріорну ймовірність гіпотези B_i за умови настання спостережуваної події A, що характеризує оновлену оцінку ймовірності гіпотези після інкорпорації емпіричних спостережень. Априорна ймовірність $P(B_i)$ відображає початкове суб'єктивне або об'єктивне оцінювання ймовірності гіпотези B_i до отримання додаткової інформації про подію A. Функція правдоподібності $P_A(B_i)$ квантифікує ймовірність спостереження події A за умови істинності гіпотези B_i. Нормалізуючий фактор $P(A)$ представляє повну ймовірність події A, що обчислюється як $P(A) = P(B_1) \cdot P_{B_1}(A) + ... + P(B_n) \cdot P_{B_n}(A)$ для всіх можливих гіпотез і забезпечує коректність імовірнісного розподілу.

Дана формула становить концептуальну основу байєсівського підходу до статистичного висновку, дозволяючи здійснювати систематичне оновлення оцінок ймовірності гіпотез у світлі нових емпіричних даних та забезпечуючи методологічну базу для розв'язання широкого спектра задач статистичної інференції.

Ключова особливість байєсівського мислення полягає в тому, що воно ітеративне. Після кожного нового спостереження або отримання даних можна оновлювати наявні оцінки. Вчорашня апостеріорна ймовірність стає сьогоднішньою апріорною, до якої застосовується нова інформація. Цей процес безперервного навчання та корекції уявлень особливо цінний у динамічному середовищі управління проєктами, де ситуація постійно змінюється.

Слід зазначити, що формула Байєса не генерує інформацію - вона забезпечує логічно та математично обґрунтований механізм інтерпретації наявних емпіричних даних. Якість байєсівських висновків безпосередньо детермінується точністю початкових припущень та достовірністю спостережуваних даних. Некоректні апріорні оцінки або недостовірна емпірична інформація неминуче призводять до помилкових результатів аналізу.

Залежність від якості початкових даних та можливість їх поступового уточнення найбільш характерно проявляється в проєктному менеджменті. Кожен проєкт за визначенням є унікальним починанням з високим ступенем невизначеності, де початкові параметри характеризуються значною мірою приблизності.

На етапі ініціації проєкту формуються оцінки термінів, бюджету та ризиків на основі обмеженої інформаційної бази, що включає аналогії з попередніми проєктами, експертні висновки та базові припущення. Ці первинні оцінки становлять апріорні ймовірності байєсівської моделі.

У процесі реалізації проєкту інформаційне середовище зазнає кардинальних трансформацій. Систематично, з періодичністю від щоденних до щотижневих циклів, проєктна команда отримує нові емпіричні дані: результати тестування можуть відхилятися від прогнозованих показників якості в бік збільшення або зменшення кількості дефектів, фактична продуктивність команди може перевищувати або не досягати планових значень, зовнішні фактори можуть розвиватися відмінно від початкових прогнозів, замовник може ініціювати зміни у специфікаціях проєкту. Усі ці інформаційні потоки повинні систематично впливати на корекцію проєктних планів та оновлення прогностичних моделей, однак традиційні методології управління проєктами зазвичай не забезпечують структурованого механізму для такого динамічного оновлення параметричних оцінок.

Класичний проєктний менеджмент зазвичай передбачає створення детального плану на початку проєкту з подальшим контролем відхилень від нього. Однак такий підхід погано адаптується до нової інформації. Коли з'ясовується, що первинні оцінки були неточними, багато команд або ігнорують нові дані, продовжуючи слідувати застарілому плану, або кардинально переглядають весь проєкт, що створює хаос та невизначеність.

Байєсівська методологія пропонує збалансоване рішення зазначеної проблеми. Вона забезпечує систематичний та науково обґрунтований механізм корегування планів та оцінок відповідно до надходження нової інформації, уникаючи крайніх підходів повного ігнорування змін або хаотичного перегляду цілісного проєкту. Дана методологія демонструє особливу цінність в контексті agile-розробки, де ітеративність та адаптивність становлять фундаментальні принципи.

Іншою важливою характеристикою проєктного середовища є необхідність прийняття рішень в умовах інформаційної невизначеності. Проєктні менеджери систематично стикаються із ситуаціями, що вимагають вибору між альтернативами за відсутності повної інформаційної картини: вибір технологічних рішень, доцільність залучення додаткових ресурсів, формування стратегій реагування на ідентифіковані ризики. Формула Байєса забезпечує математичну основу для прийняття подібних рішень, дозволяючи здійснювати кількісну оцінку ймовірності різних сценаріїв та обирати оптимальні стратегічні рішення.

Окрім того, проєктна діяльність за своєю природою передбачає управління ризиками − подіями стохастичного характеру, які можуть або не можуть реалізуватися, впливаючи на результативність проєкту. Конвенційний ризик-менеджмент часто обмежується якісною оцінкою ризиків та формуванням статичних планів реагування. Байєсівська методологія забезпечує динамічне оновлення оцінок ймовірності ризиків на основі поточної інформації та відповідне корегування стратегій управління ними.

Зрештою, проєктна команда функціонує як система, що самонавчається. З кожним завершеним етапом, з кожною вирішеною проблемою команда акумулює знання та досвід, які мають інтегруватися для оптимізації майбутніх рішень. Байєсівський підхід формалізує процес організаційного навчання, трансформуючи накопичений досвід у кількісні корекції оцінок та прогностичних моделей. Це набуває особливої значущості для організацій, які реалізують множину схожих проєктів і прагнуть до систематичного покращення своїх прогностичних здібностей та планувальних процесів на основі накопиченого організаційного досвіду.

Для ілюстрації конкретних механізмів реалізації описаних теоретичних принципів доцільно розглянути практичні застосування байєсівської методології в різних аспектах проєктного управління.

Практичне застосування формули Байєса в галузі *управління проєктними ризиками* являє собою одну з найбільш перспективних областей використання даного математичного апарату. Традиційні методи оцінки ризиків, зокрема матриці ймовірності та впливу, зазвичай передбачають статичну оцінку ризиків на початковій стадії проєкту з періодичними переглядами. Проте такий підхід не враховує динамічну природу ризиків та постійне надходження нової інформації, яка може суттєво впливати на ймовірність реалізації ризикових подій.

Байєсівський підхід до управління ризиками забезпечує систематичне оновлення оцінок ймовірності ризиків відповідно до розвитку проєкту та отримання нових даних. На етапі планування проєкту команда встановлює апріорні ймовірності ризикових подій, базуючись на історичному досвіді, галузевих показниках або експертних оцінках. У процесі виконання проєкту надходить нова інформація, яка може вказувати на підвищення або зниження ймовірності реалізації ризику. Кожен такий елемент інформації формалізується як спостереження, що дозволяє оновити оцінку ймовірності ризику з використанням формули Байєса. Ключова перевага даного підходу полягає в тому, що він забезпечує кількісну оцінку впливу нової інформації на зміну оцінки ризику. Це набуває особливої важливості в ситуаціях, коли різні члени команди можуть по-різному інтерпретувати ідентичну інформацію. Математична формалізація сприяє досягненню консенсусу та забезпечує об'єктивність в оновленні ризикових оцінок.

Окрім управління ризиками, байєсівська методологія демонструє високу ефективність у широкому спектрі інших проєктних процесів. Насамперед, доцільно розглянути застосування байєсівського підходу в контексті *прогнозування термінів*. Прогнозування термінів виконання проєктних робіт становить одне з найбільш складних та важливих завдань в управлінні проєктами. Конвенційні підходи, зокрема метод критичного шляху або діаграми Ганта, зазвичай базуються на детерміністичних оцінках тривалості завдань, які встановлюються на початковій стадії проєкту. Проте практичний досвід свідчить, що первинні оцінки часто виявляються неточними, і в процесі виконання робіт накопичується інформація, яка може суттєво підвищити точність прогнозів.

Застосування формули Байєса в прогнозуванні термінів забезпечує систематичне врахування фактичної продуктивності команди та корегування часових оцінок для робіт, що залишилися. Початкова оцінка тривалості робіт формується на

основі аналізу проєктної документації, очікуваних умов реалізації та досвіду виконавця. Ця оцінка становить апріорний розподіл ймовірностей для часу завершення робіт. У процесі виконання проєкту команда систематично отримує дані про фактичну продуктивність: темпи виконання окремих видів робіт, вплив зовнішніх факторів на графік, ефективність координації між учасниками. Кожен період моніторингу надає нові емпіричні спостереження, які можуть бути інтегровані в байєсівську модель для оновлення прогнозу часу завершення, забезпечуючи більш точне та адаптивне планування проєктних ресурсів.

Паралельно з управлінням часовими параметрами, байєсівський підхід демонструє значну ефективність у сфері *контролю якості* проєктів. Управління якістю в проєктах часто стикається з дилемою визначення оптимального обсягу контрольних заходів. Надмірно інтенсивне тестування та перевірки можуть сповільнити проєкт та збільшити витрати, тоді як недостатній контроль якості може призвести до випуску продукту з дефектами. Формула Байєса надає математичний апарат для прийняття обґрунтованих рішень щодо необхідності додаткового тестування на основі результатів вже проведених перевірок. На початку фази тестування команда має апріорну оцінку ймовірності наявності дефектів у продукті, засновану на складності реалізованої функціональності, досвіді розробників, застосовуваних технологіях та інших факторах. У процесі проведення тестів накопичуються дані про кількість та типи виявлених дефектів, які дозволяють оновити оцінку загальної якості продукту.

Третім важливим аспектом застосування байєсівської методології є *управління ресурсами*, що становить одну з найбільш складних задач в управлінні проєктами, особливо в умовах роботи з матричними організаційними структурами, де спеціалісти можуть бути задіяні в декількох проєктах одночасно. Традиційні підходи до планування ресурсів часто базуються на статичних припущеннях про доступність команди, які можуть суттєво відрізнятися від реальної ситуації. Застосування формули Байєса в управлінні ресурсами дозволяє динамічно коригувати плани завантаження спеціалістів на основі інформації, яка постійно надходить, про їх фактичну доступність та продуктивність. На початку проєкту планування базується на апріорних оцінках: очікуваному завантаженню спеціалістів за іншими проєктами, ймовірності хвороб або відпусток, середньостатистичній продуктивності для даного типу завдань.

Впровадження байєсівського підходу в практику управління проєктами вимагає систематичного та поетапного підходу, який враховує як технічні аспекти застосування формули Байєса, так і організаційні особливості проєктної команди (рис. 1). Успішне впровадження передбачає не лише розуміння математичних принципів, але і здатність інтегрувати новий підхід у існуючі процеси управління проєктами без суттєвого ускладнення робочих процедур.

Представимо розгорнутий опис алгоритмічної структури байєсівського підходу.

Перший етап впровадження полягає в ідентифікації областей застосування байєсівського підходу в рамках конкретного проєкту або організації. Не всі аспекти управління проєктами однаково підходять для застосування формули Байєса.

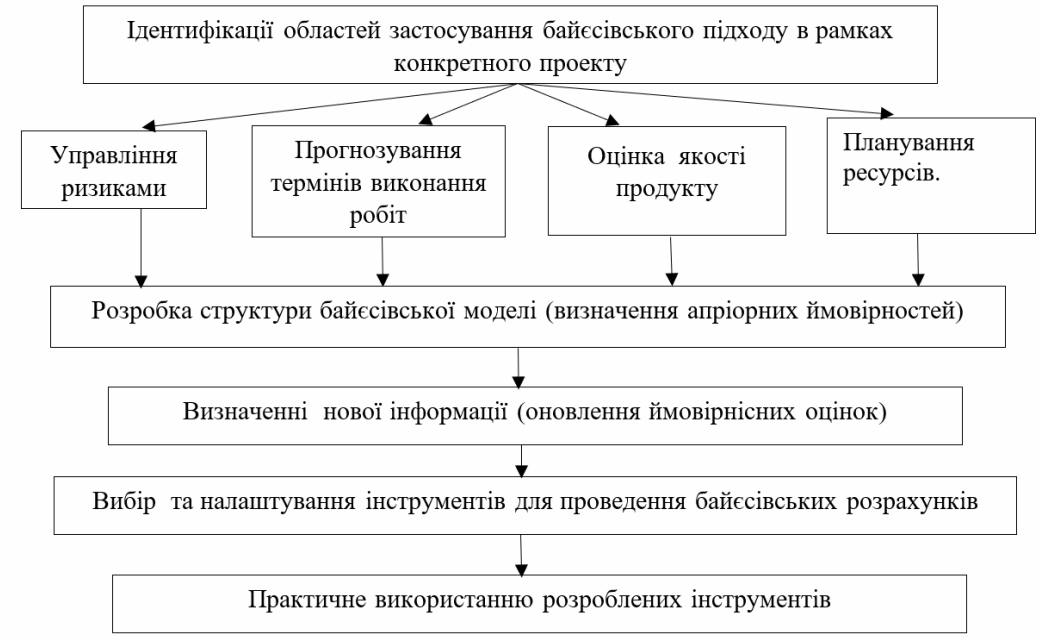

Рис. 1. Алгоритм впровадження байєсівського підходу

Джерело: Власна розробка

Найбільшу користь даний підхід приносить у ситуаціях з високим ступенем невизначеності, де регулярно надходить нова інформація, здатна впливати на ключові параметри проєкту. До таких областей належать управління ризиками, прогнозування термінів виконання робіт, оцінка якості продукту та планування ресурсів.

Другий етап передбачає розробку структури байєсівської моделі для обраної області застосування. Це включає визначення апріорних ймовірностей, які слугуватимуть відправною точкою для подальших оновлень. Встановлення апріорних ймовірностей є важливим елементом, оскільки вони суттєво впливають на результати байєсівського аналізу, особливо на початкових етапах, коли обсяг нових спостережень ще невеликий.

Третій етап полягає у визначенні типів спостережень або нової інформації, які використовуватимуться для оновлення ймовірнісних оцінок. Це вимагає встановлення чітких критеріїв для збору та класифікації даних, а також визначення частоти оновлення оцінок. Занадто часте оновлення може призвести до зайвої волатильності прогнозів, у той час як рідкісні оновлення знижують цінність байєсівського підходу.

Четвертий етап передбачає вибір та налаштування інструментів для проведення байєсівських розрахунків. Залежно від складності моделі та технічних можливостей команди це можуть бути прості електронні таблиці для основних

розрахунків, спеціалізоване програмне забезпечення для статистичного аналізу або інтеграція байєсівських алгоритмів у існуючі системи управління проєктами.

П'ятий етап включає навчання проєктної команди принципам байєсівського мислення та практичному використанню розроблених інструментів. Це не обмежується технічним навчанням використання програмного забезпечення, але включає розвиток розуміння ймовірнісного підходу до прийняття рішень та інтерпретації результатів байєсівського аналізу.

Для демонстрації практичної цінності розробленої методології наведемо її апробацію на прикладі проєкту створення крупного логістичного центру площею 50000 м² для міжнародної транспортної компанії. Проєкт включає будівництво складських приміщень, офісного комплексу, системи автоматизованого управління складом та транспортної інфраструктури. Плановий бюджет становив 25 мільйонів євро, термін реалізації — 15 місяців.

Розглянемо застосування байєсівського підходу в трьох ключових областях управління.

Управління ризиком погодних затримок.

Формулювання гіпотез:

- Гіпотеза H_1 : «Відбудуться значні погодні затримки більше 2 тижнів»
- Гіпотеза H_2 : «Значних погодних затримок не буде»

Крок 1. Встановлення початкових параметрів. На основі аналізу історичних даних про погодні умови в регіоні будівництва за останні 20 років, а також досвіду виконання аналогічних проєктів, команда встановила апріорні ймовірності:

- $P(H_1) = \frac{5}{20} = 0,25$ - апріорна ймовірність значних погодних затримок;
- $P(H_2) = 1 - 0,25 = 0,75$ - апріорна ймовірність відсутності затримок;

Ця оцінка базувалася на наступних даних:

- Середня кількість днів з несприятливими погодними умовами для будівництва: 45 днів на рік;
- Концентрація критичних погодних періодів: 60% припадає на зимові місяці;
- Досвід підрядника: з 20 аналогічних проєктів у 5 випадках спостерігалися погодні затримки більше 2 тижнів.

Крок 2: Аналіз нових спостережень. Через 3 місяці після початку будівельних робіт команда отримала наступну інформацію:

- Довгостроковий прогноз погоди вказує на більш м'яку зиму, ніж зазвичай (температура на 3°C вище середньої);
- Фактичні погодні умови в перші 3 місяці були сприятливішими, ніж очікувалося (лише 8 днів несприятливої погоди замість очікуваних 15)
- Підрядник впровадив нові технології, що дозволяють працювати в більш широкому діапазоні погодних умов (нове обладнання дозволяє працювати при температурі до -15°*C*);
- Досвід підрядника: успішне завершення 3 проєктів у схожих умовах.

Позначимо сукупне спостереження як подію B − «сприятлива інформація про погодні умови».

Крок 3: Розрахунок умовних ймовірностей.

Розрахунок $P_{H_1}(B)$ − ймовірність спостереження сприятливих сигналів при наявності майбутніх затримок, де $B = \sum_{i=1}^{3} B_i$:

Фактор 1: Довгостроковий прогноз м'якої зими $P_{H_1}(B_1) = 0,25$ (навіть при ризиках затримок, прогноз може бути оптимістичним у 25 % випадків).

Фактор 2: Сприятливі умови перших 3 місяців $P_{H_1}(B_2) = 0,30$ (з досвіду, 30 % проєктів з подальшими проблемами мали успішний початок).

Фактор 3: Нові технології підрядника $P_{H_1}(B_3) = 0,15$ (при існуючих ризиках нові технології створюють оптимізм лише у 15 % ситуацій).

Загальна оцінка методом усереднення: $P_{H_1}(B) = \frac{0,25 + 0,3 + 0,15}{3} \approx 0,2$

Розрахунок $P_{H_2}(B)$ - ймовірність спостереження сприятливих сигналів при відсутності майбутніх затримок:

Фактор 1: Довгостроковий прогноз м'якої зими $P_{H_2}(B_1) = 0,85$ (при сприятливих умовах прогноз природно буде оптимістичним)

Фактор 2: Сприятливі умови перших 3 місяців. $P_{H_2}(B_2) = 0,8$ (успішні проєкти зазвичай мають хороший початок)

Фактор 3: Нові технології підрядника $P_{H_2}(B_3) = 0,75$ (без об'єктивних перешкод технології працюють ефективно)

Загальна оцінка методом усереднення: $P_{H_2}(B) = \frac{0,82 + 0,8 + 0,75}{3} = 0,8$

Крок 4: Розрахунок повної ймовірності спостереження.

$$P(B) = P_{H_1}(B) \cdot P(H_1) + P_{H_2}(B) \cdot P(H_2) = 0,2 \cdot 0,25 + 0,8 \cdot 0,75 = 0,65$$

Крок 5: Застосування формули Байєса.

Апостеріорна ймовірність затримок

$$P_B(H_1) = \frac{P_{H_1}(B) \cdot P(H_1)}{P(B)} = \frac{0,2 \cdot 0,25}{0,65} \approx 0,077$$

Апостеріорна ймовірність відсутності затримок

$$P_B(H_2) = \frac{P_{H_2}(B) \cdot P(H_2)}{P(B)} = \frac{0,8 \cdot 0,75}{0,65} \approx 0,923$$

Результат та практичні наслідки: Після отримання сприятливої інформації ймовірність значних погодних затримок знизилася з 25 % до 7,7 %. Це дозволило команді проєкту переглянути фінансові резерви. Розрахунок початкового резерву. При апріорній ймовірності затримок 25 % та загальному бюджеті проєкту 25000000 євро команда зарезервувала 2 % бюджету на покриття можливих втрат від погодних затримок. $Резерв = 25000000 \cdot 0,02 = 500000$ євро.

Розрахунок скоригованого резерву. Після байєсівського оновлення апостеріорна ймовірність затримок склала 7,7 %. Новий резерв розраховується пропорційно до зміни ймовірності. Коефіцієнт зменшення ризику: $\frac{7,7\%}{25\%} = 0,308$. Розрахунковий резерв: $500000 \cdot 0,308 = 154000$ євро, або у відсотках від бюджету: $\left(\frac{7,7\%}{25\%}\right) \cdot 2\% = 0,616\%$ від бюджету. Сума: $\left(\frac{7,7\%}{25\%}\right) \cdot 2\% = 0,616\%$ євро.

З урахуванням мінімального страхового порога та округлення до зручного значення, команда встановила новий резерв у розмірі 200000 євро (0,8 % від бюджету).

Перерозподіл коштів. Вивільнені кошти: $500000 - 200000 = 300000$ євро. Ці кошти планується перерозподілити на прискорення робіт з внутрішнього оздоблення.

Застосування байєсівського підходу для *прогнозування продуктивності будівництва.* На основі технічних норм та досвіду підрядника була встановлена апріорна оцінка продуктивності будівництва: 200 м² площі на день при роботі однієї бригади. З урахуванням запланованих 4 бригад очікувана продуктивність становила 800 м² на день. Враховуючи загальну площу будівництва 50000 м² та необхідність додаткового часу на складні ділянки, первинна оцінка часу будівництва становила 80 робочих днів.

Формулювання задачі та гіпотез:

Гіпотеза H – «Час завершення будівництва становитиме T днів».

Спостереження D - «Фактична продуктивність за перші 20 днів роботи»

Крок 1: Встановлення апріорного розподілу

Базова оцінка продуктивності:

- Технічні норми: 200 м² на день на одну бригаду;
- Кількість бригад: 4;
- Теоретична продуктивність: 4 × 200 = 800 м² на день.
- Розрахунок базового часу будівництва;
- Загальна площа: 50000 м²;
- Базовий час: $t_{баз} = \frac{500000}{800} = 62,5$ дні;
- З урахуванням складних ділянок (+28 %): $t_{баз+28\%} = 62,5 \cdot 1,28 \approx 80$ днів.

Обґрунтування апріорних параметрів:

- $\mu_0 = 80$ днів - апріорне математичне сподівання:

- Базується на технічних нормах та досвіді підрядника;

- Враховує 28 % додаткового часу на складні ділянки (фундаменти, комунікації, фінішні роботи).

- $\sigma_0 = 8$ днів – апріорне стандартне відхилення, яке показує міру невизначеності початкового прогнозу та характеризує, наскільки фактичний час завершення будівництва може відхилятися від планового значення μ_0 = 80 днів через різні непередбачувані фактори:

- Величина 8 днів становить 10 % від планового терміну μ_0 (8/80=0,1);

- Відображає типову варіативність будівельних проєктів;

- Базується на аналізі 20 аналогічних проєктів підрядника, де 68 % проєктів завершувались у діапазоні ±10 % від планового часу.

Крок 2: Аналіз спостережуваних даних

Фактичні результати за 20 днів отримані шляхом щоденної фіксації виконання робіт (табл.1):

Таблиця 1

Фіксація виконання робіт по днях

День	Результат, м²	День	Результат, м²
1	780	11	900
2	820	12	840
3	860	13	870
4	890	14	810
5	840	15	880
6	0*	16	850
7	0*	17	920
8	880	18	830
9	850	19	860
10	870	20	840

Джерело: Власна розробка

* 6-7: вихідні дні.

Розрахунок середньої продуктивності:

- Загальний обсяг за 18 робочих днів: 15300 м²;

- Середня продуктивність: $\frac{15300}{18} = 850$ м²/день;

- Порівняння з планом: $\frac{850-800}{800}=+6,25\,\%$.

Перерахунок часу на основі нових даних:

$\mu_{дані}=75$ днів - оцінка на основі спостережуваної продуктивності,

де $\mu_{дані}$ - математичне сподівання часу завершення будівництва, розраховане на основі реальних спостережуваних даних за перші 20 днів роботи

Обґрунтування розрахунку:

Залишилось для будівництва: $50000-(850\cdot 20)=50000-17000=33000$ м². При збереженні продуктивності 850 м²/день: $\frac{33000}{850}\approx 38,8$ днів. Загальний час: $20+38,8\approx 59$ днів.

З урахуванням поправки на складність фінальних етапів (+27 %): $59\cdot 1,27\approx 75$ днів. Перерахунок стандартного відхилення на основі фактичних даних: $\sigma_{дані}=3$ дні.

Обґрунтування меншого відхилення:

- Вибірка з 20 днів реальних спостережень більш надійна, ніж теоретичні оцінки;
- Стабільна висока продуктивність зменшує невизначеність;
- Сприятливі погодні умови знижують ризики;
- Становить 4 % $\mu_{дані}$ ($\frac{3}{75}=0,04$), що відповідає точності короткострокових прогнозів.

Крок 3: Байєсівське оновлення

Виходячи з формули Байєса, з урахуванням введених позначень *H* і *D*, розглядувана задача демонструє застосування байєсівської парадигми оновлення знань в умовах послідовного надходження інформації.

Класичне формулювання теореми Байєса у контексті аналізованої проблематики трансформується в спеціалізовану математичну конструкцію, адаптовану для роботи з неперервними випадковими величинами, що підпорядковуються нормальному закону розподілу. Апріорний розподіл $H\sim N(\mu_0,\sigma_0^2)$ формалізує попередні знання про часові параметри реалізації проєкту, засновані на сукупності технічних стандартів, регламентів і накопиченого емпіричного досвіду, де параметр $\mu_0=80$ одиниць часу представляє центральну тенденцію розподілу, а параметр $\sigma_0=8$ одиниць характеризує міру розкиду відносно центрального значення (рис. 2).

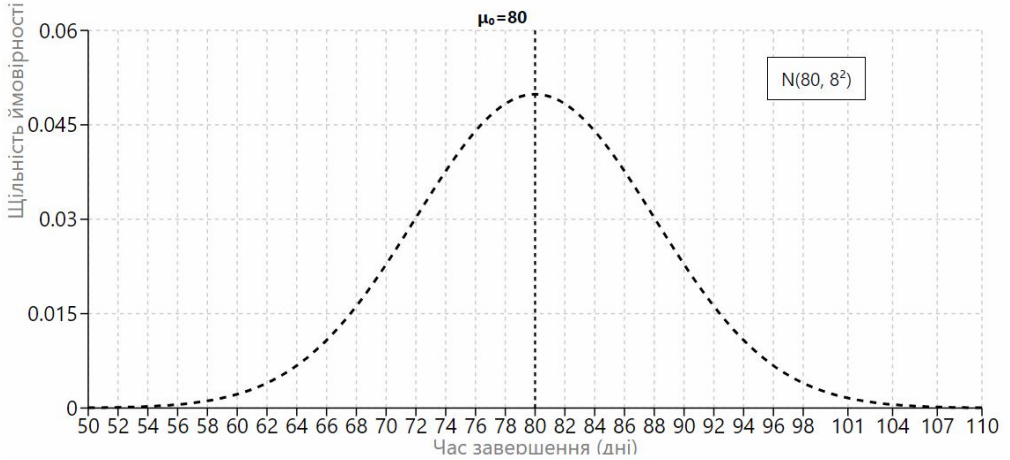

Рис. 2. Апріорний розподіл часу завершення проєкту

Джерело: Власна розробка

Класична формула Байєса оперує дискретними випадковими величинами, для неперервних розподілів – використовуємо щільності

$$p_D(H) = \frac{p_H(\mathrm{D}) \cdot p(\mathrm{H})}{\mathrm{p}(D)},$$

де $p_D(H)$ – апостеріорна щільність ймовірності (оновлена оцінка після отримання даних);

$p_H(\mathrm{D})$ – функція правдоподібності даних D за умови гіпотези H (ймовірність спостереження даних за умови гіпотези);

$p(\mathrm{H})$ – апріорна щільність розподілу $D \mid H \sim N(\mu_0, \sigma_0^2)$, $p(D)$ – нормалізуюча константа (повна ймовірність даних).

Функція правдоподібності $D \mid H \sim N(\mu_{дані}, \sigma_{дані}^2)$ показує, наскільки ймовірно спостерігати дані D при різних можливих значеннях гіпотези H. У рамках розглядуваної задачі $\mu_{дані} = 75$ одиниць часу представляє точкову оцінку, отриману за допомогою екстраполяції спостережуваних показників продуктивності, тоді як $\sigma_{дані} = 3$ одиниці кількісно виражає рівень статистичної точності даної оцінки, що базується на аналізі реальних вимірювань. Графік функції (рис. 3) показує розподіл правдоподібності для різних можливих значень часу завершення проєкту H, демонструючи, які терміни найбільш узгоджуються зі спостережуваною продуктивністю будівництва.

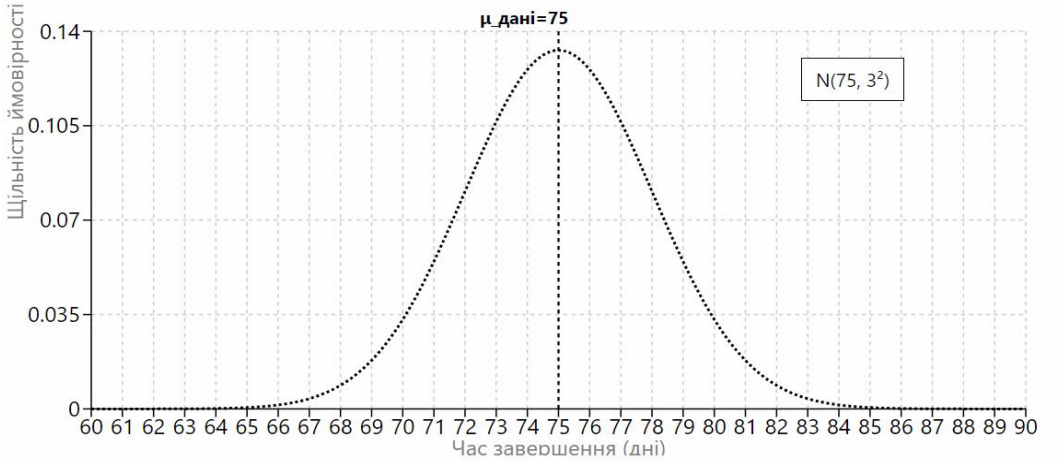

Рис. 3. Функція правдоподібності $p_D(H)$

Джерело: Власна розробка

Фундаментальна властивість байєсівського виводу для родини нормальних розподілів полягає в тому, що апостеріорний розподіл гіпотези за умови спостережень ($H|D$) зберігає належність до того ж параметричного сімейства, що забезпечує можливість отримання аналітичного розв'язку в замкнутій формі. Коли як апріорна щільність $\mathrm{p}(H)$, так і функція правдоподібності $p_H(D)$ мають нормальний характер, результуюча апостеріорна щільність $p_D(H)$ також належить до нормального розподілу, що є проявом властивості спряженості в байєсівській статистиці.

Формула $\mu_1 = \frac{\sigma_0^2 \cdot \mu_{дані} + \sigma_{дані}^2 \cdot \mu_0}{\sigma_0^2 + \sigma_{дані}^2}$ представляє собою математичний вираз зваженого середнього апостеріорної щільності ймовірності, де вагові коефіцієнти детермінуються величинами, оберненими до відповідних дисперсій. Ця формула безпосередньо випливає з теореми Байєса для неперервних розподілів, де замість дискретних ймовірностей $P(H)$ використовуються щільності ймовірності $\mathrm{p}(H)$, що дозволяє працювати з неперервними випадковими величинами.

Концептуальна основа даної формули розкривається через принцип обернено пропорційного впливу дисперсій на формування підсумкової оцінки. Точніші дані з меншим стандартним відхиленням автоматично отримують більший вплив у формуванні апостеріорного середнього, що математично виражається через те, що $\sigma^2_{дані}$ стоїть як коефіцієнт при μ_0, а σ_0^2 – як коефіцієнт при $\mu_{дані}$, забезпечуючи автоматичне балансування між різними джерелами інформації залежно від їх статистичної достовірності.

Чисельна реалізація розглядуваної формули дає

$$\mu_1 = \frac{64 \cdot 75 + 9 \cdot 80}{64 + 9} = \frac{5520}{73} \approx 75,6 \text{ одиниць часу.}$$

Апостеріорне стандартне відхилення обчислюється за формулою

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sigma_0^2 \cdot \sigma_{дані}^2}{\sigma_0^2 + \sigma_{дані}^2}} = \sqrt{\frac{64 \cdot 9}{64 + 9}} \approx 2,8 \text{ одиниці часу.}$$

Даний результат ілюструє механізм байєсівської конвергенції щільностей ймовірності, за допомогою якого досягається оптимальний компроміс між апріорною щільністю $\mathrm{p}(H)$ та функцією правдоподібності $p_H(\mathrm{D})$. Домінування нових емпіричних спостережень у підсумковій оцінці математично обґрунтовано їх значно вищою точністю ($\sigma_{дані}$=3) порівняно з апріорними знаннями ($\sigma_{_0}$=8), що відображається у співвідношенні коефіцієнтів 64:9 у чисельнику формули.

Графічне зображення процесу байєсівського оновлення (рис. 4) наочно демонструє композицію трьох щільностей ймовірності: апріорної $\mathrm{p}(H)$, функції правдоподібності $p_H(\mathrm{D})$ та результуючої апостеріорної щільності $p_D(H)$, що є математичним відображенням раціонального поєднання різних джерел статистичної інформації.

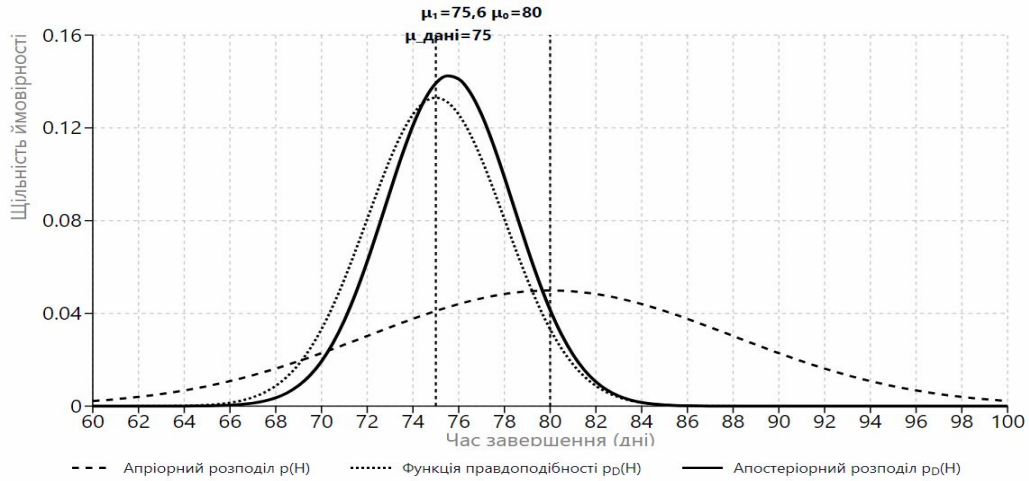

Рис.4. Байєсівське оновлення щільностей ймовірності: від апріорного до апостеріорного розподілу

Джерело: Власна розробка

Графік наочно демонструє, як раціональна актуалізація системи переконань через композицію щільностей ймовірності призводить до формування більш точної та обґрунтованої оцінки в умовах структурної невизначеності. Концептуальна інтерпретація даного процесу може бути сформульована як раціональна актуалізація системи переконань у рамках послідовного байєсівського навчання через оновлення щільностей ймовірності.

Результат та практичні наслідки: Застосування байєсівського підходу для прогнозування продуктивності будівництва продемонструвало економічний ефект через підвищення точності планування. Байєсівське оновлення дозволило скоротити невизначеність часу завершення проєкту з $\sigma_0 = 8$ днів до $\sigma_1 = 2,8$ днів, що становить покращення точності на 65 %.

Коригування очікуваного терміну завершення з 80 до 75,6 днів забезпечило скорочення проєктного часу на 80-75,6=4,4 дня. Оскільки в документі не вказані конкретні витрати на утримання будмайданчика, можна оцінити їх як приблизно 1600 євро/день (виходячи з пропорції бюджету 25 млн. євро до загального терміну 15 місяців ≈ 450 робочих днів). Це створило б пряму економію у розмірі приблизно 7000 євро.

Підвищена точність прогнозування оптимізувала логістичні процеси, дозволивши постачальникам планувати доставки з точністю ±2,8 днів замість ±8 днів. Зменшення проєктних ризиків через звуження діапазону невизначеності дозволило підвищити впевненість у дотриманні термінів.

Основний ефект від застосування байєсівського підходу полягає не стільки в абсолютній економії коштів, скільки в якісному покращенні управління проєктом: підвищенні точності планування, зменшенні ризиків та створенні можливостей для більш ефективного розподілу ресурсів між паралельними проєктами підрядника.

Застосування байєсівського підходу для *оцінки надійності субпідрядника.*

Для системи автоматизації складу залучався новий субпідрядник без попереднього досвіду співпраці. Введемо позначення:

- A – «Успішне завершення робіт у термін та в рамках бюджету»;
- D_1 – «Хороший результат у місяці 1»;
- D_2 – «Хороший результат у місяці 2».

Апріорна ймовірність успішного завершення робіт була оцінена як $P(A) = 0,7$ на основі загальногалузевих показників для підрядників аналогічного профілю та розміру.

Протягом перших двох місяців роботи субпідрядника були отримані емпіричні спостереження, що дозволили застосувати байєсівське оновлення для корекції первинної оцінки надійності:

Місяць 1: Субпідрядник успішно завершив перший етап (проєктування системи) в термін та з якістю, що перевищила очікування. Для демонстрації байєсівської методології приймемо типові для галузі параметри правдоподібності: $P_A(D_1) = 0,85$ (надійні підрядники демонструють хороші результати в 85 %

випадків) та $P_{\overline{A}}(D_1) = 0,3$ (ненадійні підрядники досягають хороших результатів лише у 30 % випадків).

Застосовуючи формулу Байєса

$$P_{D_1}(A) = \frac{P_A(D_1) \cdot P(A)}{P_A(D_1) \cdot P(A) + P_{\overline{A}}(D_1) \cdot P(\overline{A})} = \frac{0,85 \cdot 0,7}{0,85 \cdot 0,7 + 0,3 \cdot 0,3} \approx 0,685$$

Таким чином, успішне завершення першого етапу підвищило оцінку надійності субпідрядника з 70 % до 87 %.

Місяць 2: Субпідрядник успішно завершив другий етап (поставка та попереднє налаштування обладнання), що призвело до подальшого оновлення оцінки

$$P_{D_1,D_2}(A) = \frac{P_A(D_2) \cdot P_{D_1}(A)}{P_A(D_2) \cdot P_{D_1}(A) + P_{\overline{A}}(D_2) \cdot P_{D_1}(\overline{A})} = \frac{0,85 \cdot 0,87}{0,85 \cdot 0,87 + 0,3 \cdot 0,13} \approx 0,95$$

Підвищення оцінки надійності субпідрядника з $P(A) = 0,7$ до $P_{D_1,D_2}(A) \approx 0,95$ створило підстави для скорочення обсягу додаткового контролю та зменшення фінансового резерву на можливі проблеми з 15 % до 8 % від вартості робіт субпідрядника.

Інтегроване рішення про дострокове відкриття. До 12-го місяця проєкту команда інтегрує всі накопичені байєсівські оцінки для прийняття рішення про можливість дострокового часткового відкриття логістичного центру. Для аналізу введемо позначення:

- B_1 – «Завершення будівництва до 13-го місяця»;
- B_2 – «Успішна установка системи автоматизації»;
- B_3 – «Відсутність критичних погодних затримок»;
- R - «Готовність всіх систем для відкриття».

Комплексний аналіз включав оцінку ймовірностей завершення ключових компонентів проєкту на основі накопичених спостережень:

- $P(B_1) = 0,85$ (базується на байєсівському оновленні продуктивності будівництва);
- $P(B_2) = 0,9$ (відповідає оновленій оцінці надійності субпідрядника $P_{D_1,D_2}(A) \approx 0,95$ з поправкою на складність завершальних робіт);
- $P(B_3) = 0,92$ (метеорологічний прогноз на наступні 4 тижні).

Припускаючи незалежність цих подій, загальна ймовірність готовності всіх систем становила

$$P(R) = P(B_1 \cap B_2 \cap B_3) = P(B_1) \cdot P(B_2) \cdot P(B_3) = 0,85 \cdot 0,9 \cdot 0,92 \approx 0,7$$

Аналіз очікуваної вартості рішення. Для прийняття рішення про дострокове відкриття проведемо розрахунки на основі параметрів проєкту: бюджет 25 млн. євро, термін 15 місяців, площа 50000 м^2.

Вихідні умовні параметри:

- Середні щоденні витрати проєкту: $\frac{25000000}{15 \cdot 22} \approx 75,76$ євро/день;
- Потенційний дохід клієнта від логістичного центру: 40000 євро/день;
- Термін дострокового відкриття: на 4 тижні (28 днів) раніше.

Розрахунок вигоди V_1*:* Вигода від дострокового відкриття для підрядника складається з:

- Бонус від клієнта за дострокове введення: 500000 євро (2% від бюджету);
- Економія на утриманні будмайданчика

$$28 \text{ днів} \cdot 15000 \text{ євро/день}=420000 \text{ євро}.$$

Всього: $V_1 = 500000 + 420000 = 920000$ євро.

Розрахунок втрат V_2*:* Втрати у випадку неготовності:

- Штрафні санкції за порушення зобов'язань: 3% від бюджету=750000 євро;
- Додаткові витрати на виправлення проблем: 400000 євро;
- Втрата репутації (оцінка майбутніх контрактів): 600000 євро;

Всього: V_2 = -1750000 євро.

Очікувана вартість рішення при *P(R)*=0,70:

$$E(V) = P(R) \cdot V_1 + P(\overline{R}) \cdot V_2 = P(R) \cdot V + (1 - P(R) \cdot V_2 =$$
$$= 644000 - 525000 = 119000 \text{ євро}.$$

Оскільки *E(V)*=119000 євро > 0, рішення про дострокове відкриття економічно обґрунтоване, хоча очікувана вигода менша, ніж у попередньому варіанті.

Проведена апробація байєсівської методології на прикладі проєкту логістичного центру підтвердила її практичну застосовність та ефективність у різних аспектах проєктного управління. Однак, як і будь-який методологічний підхід, застосування формули Байєса в управлінні проєктами має певні обмеження та застереження, які необхідно враховувати при його впровадженні.

Обмеження та застереження. Застосування байєсівського підходу в управлінні проєктами супроводжується рядом методологічних та практичних обмежень. Ключовою проблемою є суб'єктивність встановлення апріорних ймовірностей, які часто базуються на експертних оцінках або обмежених історичних даних. Якість байєсівського аналізу критично залежить від точності цих початкових припущень, що може призводити до систематичних помилок у випадку неадекватних апріорних оцінок. Складність математичного апарату створює бар'єр для широкого впровад-

ження методології серед практиків без відповідної статистичної підготовки. Крім того, байєсівський підхід вимагає систематичного збору та аналізу даних, що може значно збільшити адміністративне навантаження на проєктну команду. Припущення про незалежність подій, яке часто використовується в байєсівських розрахунках, може не відповідати реальності складних проєктних середовищ, де ризики та фактори часто взаємопов'язані. Нарешті, надмірна залежність від кількісних методів може призвести до недооцінки якісних факторів та інтуїтивного досвіду проєктних менеджерів.

Висновки. Дослідження продемонструвало значний потенціал застосування формули Байєса в управлінні проєктами як інструменту підвищення якості прийняття рішень в умовах невизначеності. Розроблена методологія забезпечує систематичний підхід до оновлення ймовірнісних оцінок на основі нової інформації, дозволяючи проєктним командам адаптивно реагувати на зміни в проєктному середовищі. Байєсівський підхід виявив особливу ефективність у сферах управління ризиками, прогнозування термінів, контролю якості та планування ресурсів, де традиційні детерміністичні методи демонструють обмежену адаптивність. Запропонована поетапна методологія впровадження створює практичну основу для інтеграції байєсівських методів у існуючі процеси управління проєктами без кардинального перегляду організаційних структур. Наукова новизна полягає в адаптації класичного байєсівського апарату до специфіки проєктного управління та створенні комплексної методології, яка поєднує теоретичну обґрунтованість з практичною застосовністю. Практична цінність визначається суттєвим підвищенням точності прогнозів, оптимізацією управління ризиками та покращенням якості стратегічних рішень у складних інфраструктурних проєктах з високим рівнем невизначеності.

Перспективним напрямком подальших досліджень є створення системної байєсівської архітектури управління проєктами, яка забезпечуватиме не лише локальні оновлення окремих параметрів, але й їх взаємний вплив через складну мережу причинно-наслідкових зв'язків. Розробка багаторівневих байєсівських мереж дозволить досягти синергетичного ефекту, коли загальна точність прогнозування та якість управлінських рішень перевищуватиме суму ефектів від застосування окремих байєсівських моделей.

ЛІТЕРАТУРА

1. Project Management Institute. Pulse of the Profession 2021: Beyond Agility. PMI Global Survey. 2021.
2. Бушуєв С.Д., Бушуєва Н.С. Механізми формування цінності в діяльності проектно-керованих організацій. *Управління розвитком складних систем*. 2018. № 36. С. 25-32.
3. Бушуєв С.Д., Козир Б.Ю., Заприводі А.В. Нелінійне стратегічне управління інфраструктурними програмами. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2019. № 4 (10). С. 14-23. DOI: 10.30837/2522-9818.2019.10.014

4. Бушуєв С.Д., Бушуєв Д.А., Козир Б.Ю. Розвиток можливостей управління проєктами програми інфраструктури. Чорнобильський випадок. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2020. № 2 (8). С. 31-39.
5. Bushuyev S., Ivko A. Project management models for development projects in self-managed organizations in a syncretic context. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Strategic management, portfolio, program and project management*. 2024. № 1 (8). P. 23-28.
6. Bushuyev S., Bushuiev D., Bushuieva V. Project management during infodemic of the COVID-19 pandemic. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2020. № 2 (12). P. 13-21. DOI: 10.30837/2522-9818.2020.12.013
7. Тесля Ю.М., Латишева Т.В. Кількісні методи оцінювання ризиків у проєктному менеджменті. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2019. № 2 (1327). С. 60-67.
8. Hubbard D. W. *How to Measure Anything: Finding the Value of Intangibles in Business*. 3rd ed. John Wiley & Sons, 2014.
9. Chapman C., Ward S. *How to Manage Project Opportunity and Risk: Why Uncertainty Management Can Be a Much Better Approach than Risk Management*. 3rd ed. John Wiley & Sons, 2011.
10. Williams T. M. The contribution of mathematical modelling to the practice of project management. *IMA Journal of Management Mathematics*. 2003. Vol. 14, № 1. P. 3-30.
11. Khodakarami V., Fenton N., Neil M. Project scheduling: improved approach to incorporate uncertainty using Bayesian networks. *Project Management Journal*. 2007. Vol. 38, № 2. P. 39-49. DOI: 10.1177/875697280703800205
12. Kim S.Y., Van Tuan N., Ogunlana S. O. Quantifying schedule risk in construction projects using Bayesian belief networks. *International Journal of Project Management*. 2009. Vol. 27, № 1. P. 39-50.
13. Ballesteros-Pérez P., del Campo-Hitschfeld M. L., González-Naranjo M. A., González-Cruz M. C. Climate and construction delays: Case study in Chile. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2015. Vol. 22, № 6. P. 596-621.
14. Fenton N., Neil M. *Risk Assessment and Decision Analysis with Bayesian Networks*. 2nd ed. CRC Press, 2018.
15. Vanhoucke M. *Project Management with Dynamic Scheduling: Baseline Scheduling, Risk Analysis and Project Control*. 2nd ed. Springer, 2012.
16. An Y., Huang X., Zhang L. An approach based on Bayesian network for improving project management maturity: An application to reduce cost overrun risks in engineering projects. *Computers & Industrial Engineering*. 2020. Vol. 142. Article 106341. DOI: 10.1016/j.cie.2020.106341

REFERENCES

1. Project Management Institute. (2021). Pulse of the Profession 2021: Beyond Agility. PMI Global Survey.
2. Bushuyev, S.D., & Bushueva, N.S. (2018). Mekhanizmy formuvannia tsinnosti v diialnosti proektno-kerovanykh orhanizatsii [Mechanisms of value formation in project-managed organizations activities]. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system – Management of Development of Complex Systems*, 36, P. 25-32 [in Ukrainian].
3. Bushuyev, S.D., Kozyr, B.Yu., & Zaprivodi, A.V. (2019). Neliniine stratehichne upravlinnia infrastrukturnymy prohramamy [Nonlinear strategic management of infrastructure programs]. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 4(10), P. 14-23. DOI: 10.30837/2522-9818.2019.10.014 [in Ukrainian].
4. Bushuyev, S.D., Bushuiev, D.A., & Kozyr, B.Yu. (2020). Rozvytok mozhlyvostei upravlinnia proektamy prohramy infrastruktury. Chornobylskyi vypadok [Development of project management capabilities for infrastructure programs. Chornobyl case]. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 2(8), P. 31-39 [in Ukrainian].
5. Bushuyev, S., & Ivko, A. (2024). Project management models for development projects in self-managed organizations in a syncretic context. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Strategic management, portfolio, program and project management*, 1(8), P. 23-28.
6. Bushuyev, S., Bushuiev, D., & Bushuieva, V. (2020). Project management during infodemic of the COVID-19 pandemic. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 2(12), 13-21. DOI: 10.30837/2522-9818.2020.12.013.
7. Teslia, Yu.M., & Latysheva, T.V. (2019). Kilkisni metody otsiniuvannia ryzykiv u proektnomu menedzhmenti [Quantitative methods for risk assessment in project management]. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU "KhPI"*, 2(1327), P. 60-67 [in Ukrainian].
8. Hubbard, D.W. (2014). *How to Measure Anything: Finding the Value of Intangibles in Business* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
9. Chapman, C., & Ward, S. (2011). *How to Manage Project Opportunity and Risk: Why Uncertainty Management Can Be a Much Better Approach than Risk Management* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
10. Williams, T.M. (2003). The contribution of mathematical modelling to the practice of project management. *IMA Journal of Management Mathematics*, 14(1), P. 3-30.
11. Khodakarami, V., Fenton, N., & Neil, M. (2007). Project scheduling: improved approach to incorporate uncertainty using Bayesian networks. *Project Management Journal*, 38(2), P. 39-49. DOI: 10.1177/8756972 80703800205.

12. Kim, S.Y., Van Tuan, N., & Ogunlana, S.O. (2009). Quantifying schedule risk in construction projects using Bayesian belief networks. *International Journal of Project Management*, 27(1), P. 39-50.
13. Ballesteros-Pérez, P., del Campo-Hitschfeld, M.L., González-Naranjo, M.A., & González-Cruz, M. C. (2015). Climate and construction delays: Case study in Chile. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 22(6), P. 596-621.
14. Fenton, N., & Neil, M. (2018). *Risk Assessment and Decision Analysis with Bayesian Networks* (2nd ed.). CRC Press.
15. Vanhoucke, M. (2012). *Project Management with Dynamic Scheduling: Baseline Scheduling, Risk Analysis and Project Control* (2nd ed.). Springer.
16. An, Y., Huang, X., & Zhang, L. (2020). An approach based on Bayesian network for improving project management maturity: An application to reduce cost overrun risks in engineering projects. *Computers & Industrial Engineering*, 142, 106341. DOI: 10.1016/j.cie.2020.106341.

Стаття надійшла до редакції 18.11.2025

Посилання на статтю: Піддубна Н.М. Ймовірнісні методи управління проєктами на основі байєсівського підходу // *Вісник Одеського національного морського університету:* Зб. наук. праць, 2025. № 4 (78). С. 193-216. DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-193-216.

Article received 18.11.2025

Reference a Journal Article: Piddubna N. Probability theory as a project management tool: bayesian methodology for decision-making // *Herald of the Odesa National Maritime University*: Coll. scient. works, 2025. № 4 (78). P. 193-216. DOI 10.47049/2226-1893-2025-4-193-216.