

УДК 004.9:625.7:005.334

РИЗИК-МЕНЕДЖМЕНТ У БУДІВНИЦТВІ ДОРІГ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ

Іваненко Д. А.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків

Ризик-менеджмент у дорожньому будівництві з використанням цифрових моделей поєднує класичні принципи управління ризиками з можливостями цифрових технологій – інформаційного моделювання об'єктів інфраструктури (Building Information Modeling, BIM), цифрових двійників (Digital Twin) та аналітики даних (Data Analytics). Ці інструменти забезпечують перехід від реактивного до прогностичного управління ризиками, дозволяючи оцінювати невизначеність на всіх стадіях життєвого циклу об'єкта – від проєктування до експлуатації. У дорожньому секторі, де ризики традиційно пов'язані з природно-кліматичними, техніко-технологічними та організаційними чинниками, цифрові моделі створюють принципово нові можливості для підвищення точності проєктування, контролю виконання робіт і зниження непередбачених витрат.

Система ризик-менеджменту у будівництві доріг має ґрунтуватися на принципах стандарту ISO 31000:2018, який формує рамку для ідентифікації, оцінки, моніторингу та контролю ризиків. У цифровому середовищі ця рамка доповнюється положеннями ISO 19650, що визначає принципи управління інформацією в BIM-проєктах і регламентує спільне інформаційне середовище (Common Data Environment, CDE). Інтеграція обох стандартів забезпечує контроль якості даних, простежуваність рішень і відповідальність за інформаційні потоки. Це критично важливо, адже ризики в цифровому будівництві пов'язані не лише з матеріально-технічними аспектами, але й із вразливістю інформаційної інфраструктури – від некоректних даних до кіберзагроз.

ВІМ-моделі та цифрові двійники стають основними інструментами ризик-менеджменту. ВІМ відображає геометрію та атрибути елементів об'єкта, забезпечуючи точність розрахунків матеріалів і виявлення колізій на стадії проектування. Digital Twin, своєю чергою, поєднує цю модель з даними з сенсорів і телеметрії, створюючи динамічне відображення стану об'єкта в реальному часі. Це дає можливість оцінювати вплив навантажень, погодних умов і технологічних відхилень на ресурс конструкцій та прогнозувати необхідність технічних втручань. Як свідчать аналітичні звіти Федерального управління автомобільних доріг США (FHWA) та Міжнародної дорожньої асоціації (PIARC), інтеграція інформаційного моделювання та цифрових двійників у процеси управління дорожньою інфраструктурою дає змогу суттєво знизити невизначеність у плануванні, скоротити витрати, пов'язані з непередбачуваними відхиленнями, і підвищити точність прогнозування технічного стану об'єктів [1, 2]. Ці дослідження підкреслюють, що цифрові моделі не лише підвищують ефективність використання ресурсів, а й формують основу для превентивного управління ризиками на всіх стадіях життєвого циклу дорожнього проекту.

Оцінка ризиків у цифровому середовищі здійснюється через ризик-реєстр, інтегрований із цифровою моделлю. Для кожного елемента (із зазначенням ID у ВІМ/DT) визначаються ймовірність і вплив події. Ймовірності можуть оновлюватися в реальному часі за допомогою байєсівських мереж, що враховують надходження нових даних із сенсорів або звітів. Монте-Карло симуляції дозволяють моделювати можливі сценарії вартості та строків, а аналіз чутливості – визначати найвпливовіші чинники ризику. Зв'язок цих моделей із календарно-ресурсними графіками (4D/5D ВІМ) дає змогу оцінювати ризики комплексно, у взаємозв'язку часових, фінансових і матеріальних показників.

Моніторинг виконання робіт і ресурсів через цифрові інструменти базується на даних із геодезичних сканів, сенсорів, GPS-трекерів техніки та систем контролю якості. Порівняння фактичних і планових параметрів

(as-built vs. as-planned) здійснюється автоматично: при відхиленнях система генерує попередження, розраховує потенційні наслідки для бюджету і строків, а також пропонує альтернативні сценарії дій. Цифрові моделі дозволяють точно розраховувати потребу в матеріалах, запобігаючи як дефіциту, так і надлишковим закупівлям. У поєднанні з CDE це забезпечує прозорість постачання, своєчасну корекцію графіків і зниження фінансових ризиків.

Для кількісної оцінки ризику доцільно використовувати розрахунок очікуваних втрат (Expected Monetary Value), що визначає середній рівень фінансових наслідків ризику, а також агрегований індекс ризиковості для всієї моделі. В аналітичних платформах ризикові показники візуалізуються безпосередньо на 3D-моделі, що полегшує ухвалення управлінських рішень. Важливо, щоб ризик-реєстр оновлювався синхронно з модельними даними, а оцінки ризику враховували зміни у реальних параметрах виконання робіт.

Організаційно управління ризиками в цифровому середовищі потребує нових ролей – менеджера інформаційних моделей, аналітика даних, координатора CDE. Усі вони відповідають за цілісність даних, своєчасне оновлення моделі та контроль доступу. Політика кібербезпеки стає невід’ємною частиною ризик-менеджменту: передбачаються резервні копії моделей, шифрування каналів, аудит змін і обмеження доступу за рівнями. Важливо також забезпечити навчання персоналу та регламентовані процедури перевірки і валідації даних.

У контрактах на будівництво доцільно передбачати вимоги щодо інформаційних поставок: частоту оновлення моделі, формат даних, порядок передачі ризик-реєстру. Впровадження BIM Execution Plan з чітко визначеними зонами відповідальності та вимогами до обміну інформацією мінімізує ризики втрати або спотворення даних. У поєднанні з регулярними аудитами інформаційних процесів це формує культуру проактивного управління ризиками, а не реагування на наслідки.

Економічна ефективність цифрових моделей у системі ризик-менеджменту проявляється у зниженні варіативності витрат і строків реалізації проєктів. Порівняльне моделювання сценаріїв «з BIM» і «без BIM» дає змогу кількісно оцінити приріст чистої приведеної вартості (NPV) завдяки скороченню ймовірності непередбачених витрат і підвищенню точності планування ресурсів. За результатами досліджень та проєктів, узагальнених у рамках програми Call 2022 «Data» Конференції європейських директорів доріг (CEDR) та ініціативи DROIDS (Digital Road Operator Information and Data Strategy), впровадження цифрових двійників у дорожні проєкти сприяє підвищенню ефективності управління активами, зменшенню кількості дефектів та оперативнішому реагуванню на відхилення від планових параметрів, що безпосередньо впливає на зниження загальних експлуатаційних витрат і ризиків протягом життєвого циклу дороги.

Для практичного впровадження цифрового ризик-менеджменту у дорожніх проєктах доцільно послідовно реалізувати такі кроки:

- створити централізований ризик-реєстр у межах CDE з прив'язкою до елементів моделі;
- налаштувати автоматичні порогові попередження для ключових параметрів (затримки, відхилення обсягів, якість матеріалів);
- застосовувати ймовірнісні методи оцінки та сценарне моделювання з використанням реальних даних сенсорів;
- формалізувати політику оновлення та перевірки моделей, включно з верифікацією джерел даних;
- інтегрувати ризик-менеджмент у договірні відносини та систему управління якістю.

Таким чином, цифрові моделі не лише візуалізують ризики, а й створюють підґрунтя для їх кількісної оцінки й контролю. Вони забезпечують прозорість процесів, інтеграцію даних і можливість перевіряти сценарії управління, що перетворює ризик-менеджмент із реактивного інструменту в системну складову стратегічного управління проєктом.

Реалізація такої моделі потребує належного нормативного забезпечення, кваліфікованого персоналу та організаційної зрілості, але саме цей підхід формує основу для стійкого розвитку дорожньо-будівельної галузі в умовах цифрової економіки.

Література:

1. Building Information Modeling (BIM) Practices in Highway Infrastructure: FHWA Global Benchmarking Program Report № FHWA-PL-21-024, 2021. URL: https://international.fhwa.dot.gov/pubs/pl21024/fhwa_pl21024.pdf
2. BIM and Digitalization in Road Asset Management: PIARC Technical Report № 2023R48EN, 2024. URL: <https://www.yakist.org/wp-content/uploads/2024/09/bim-and-digitalization-in-road-asset-management-technical-report.pdf>