

**Пархомей Ігор Ростиславович**

Д.т.н., професор, професор кафедри інформаційних систем та технологій  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м.Київ, Україна  
ORCID ID: 0000-0002-9510-7657  
ihor.parhomey@knu.ua

**Загородній Дмитро Віталійович**

Студент кафедри Інформаційних систем та технологій  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м.Київ, Україна  
ORCID ID: 0009-0007-8280-7201  
dimahome8@gmail.com

**Полоневич Ольга Володимирівна**

К.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій  
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м.Київ, Україна  
ORCID ID: 0000-0002-4906-2785  
o.polonevych@duikt.edu.ua

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ ВПРОВАДЖЕННЯ ІОТ-РІШЕНЬ У SMART GRID НА ОСНОВІ ГІБРИДНОГО ПІДХОДУ**

**Анотація.** У статті розв'язано актуальне науково-прикладне завдання щодо вдосконалення методів та моделей управління проєктами розроблення і впровадження рішень Інтернету речей (IoT) в енергетичні системи (Smart Grid). Наявні підходи до управління IT-проєктами здебільшого зосереджуються або на забезпеченні високого рівня гнучкості процесу розроблення, що характерно для адаптивних методологій, або на суворо регламентованій, послідовній моделі реалізації етапів проєкту, властивій традиційним підходам. Водночас такі методи часто не в повній мірі враховують специфічні особливості IoT-проєктів, які функціонують як складні кіберфізичні системи та потребують інтегрованого управління як програмними, так і апаратними компонентами, мережевою взаємодією, обробкою даних у реальному часі та забезпеченням надійності фізичних пристроїв. В статті доведено, що застосування виключно гнучких (Agile) або каскадних (Waterfall) методологій у середовищі критичної інфраструктури є неефективним через високі інтеграційні ризики та суворі галузеві вимоги до сертифікації. Розроблено спеціалізовану математичну модель багатокритеріальної оптимізації, яка вперше формалізує нелінійну залежність між розміром проєктного релізу, архітектурною складністю системи та супутніми витратами на проходження процедур комплаєнсу, верифікації і валідації. За допомогою методів математичного аналізу виведено рівняння для розрахунку оптимального розміру інкременту, що мінімізує сумарну вартість проєкту. Проведене чисельне симулювання підтвердило наявність яскраво вираженого оптимуму, чим математично обґрунтовано доцільність застосування гібридних (Agile + Stage-Gate) фреймворків. Отримані результати надають керівникам проєктів об'єктивний аналітичний інструментарій для структурування етапів впровадження кіберфізичних систем із мінімізацією ризиків перевищення бюджету та строків.

**Ключові слова:** управління проєктами, Інтернет речей (IoT), Smart Grid, гібридна методологія, математичне моделювання, багатокритеріальна оптимізація, розмір релізу, кіберфізичні системи, інтеграційна складність, комплаєнс.

**Ihor Rostyslavovych Parkhomey**

Doctor of Technical Sciences, Professo, Professor Department of Information Systems and Technologies  
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine  
ORCID: 0000-0002-9510-7657  
ihor.parhomey@knu.ua

**Dmytro Vitaliiiovych Zahorodnii**

Student, Department of Information Systems and Technologies  
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine  
0009-0007-8280-7201  
dimahome8@gmail.com

**Olha Volodymyrivna Polonevych**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies  
State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine  
ORCID ID: 0000-0002-4906-2785  
o.polonevych@duikt.edu.ua

## MATHEMATICAL MODEL FOR OPTIMIZING PROJECT MANAGEMENT OF IoT SOLUTION IMPLEMENTATION IN SMART GRID BASED ON A HYBRID APPROACH

**Abstract.** The paper addresses a relevant scientific and applied problem related to improving methods and models for managing projects of development and implementation of Internet of Things (IoT) solutions in energy systems (Smart Grid). Existing approaches to IT project management mostly focus either on ensuring a high level of flexibility in the development process, which is typical of adaptive methodologies, or on a strictly regulated, sequential model of project implementation stages, which is typical of traditional approaches. At the same time, such methods often do not fully take into account the specific features of IoT projects, which function as complex cyber-physical systems and require integrated management of both software and hardware components, network interaction, real-time data processing, and ensuring the reliability of physical devices. It is demonstrated that the exclusive use of either Agile or Waterfall methodologies in critical infrastructure environments is ineffective due to high integration risks and strict industry certification requirements. A specialized mathematical model for multi-criteria optimization is developed, which for the first time formalizes the nonlinear relationship between project release size, system architectural complexity, and the associated costs of compliance, verification, and validation procedures. Using methods of mathematical analysis, equations are derived to calculate the optimal increment size that minimizes the total project cost. Numerical simulation confirms the existence of a clearly defined optimum, thereby providing a mathematical justification for the feasibility of applying hybrid (Agile + Stage-Gate) frameworks. The obtained results provide project managers with an objective analytical toolkit for structuring the stages of cyber-physical system implementation while minimizing the risks of budget overruns and schedule delays.

**Keywords:** project management, Internet of Things (IoT), Smart Grid, hybrid methodology, mathematical modeling, multi-criteria optimization, release size, cyber-physical systems, integration complexity, compliance.

**Вступ.** Умови цифрової трансформації енергетики зумовлюють активне впровадження IoT-рішень для моніторингу стану обладнання, збору телеметричних даних, підтримки диспетчеризації, автоматизації технологічних процесів та підвищення надійності функціонування енергетичних систем. Разом із розширенням сфер застосування таких рішень зростає потреба не лише у створенні відповідних апаратно-програмних засобів, а й у розробленні ефективних моделей управління проектами їх розробки, інтеграції та впровадження в реальну енергетичну інфраструктуру. Водночас інтеграція кіберфізичних компонентів у критично важливі об'єкти ускладнена суворими галузевими стандартами, вимогами до сумісності та процедурами сертифікації.

Традиційні методології управління проектами - Agile або Waterfall - у таких умовах виявляються недостатньо ефективними: часті релізи Agile збільшують витрати на перевірки та комплаєнс, а великі каскадні релізи Waterfall підвищують складність інтеграції та ризик технічного боргу. Аналіз сучасних досліджень підтверджує перспективність гібридних методів, проте відсутня формалізована математична модель, яка б дозволяла оптимально планувати параметри IoT-проектів у Smart Grid.

**Постановка проблеми.** На відміну від типових IT-проектів, у яких домінує логіка швидких ітерацій та оперативного випуску проміжних версій продукту, IoT-проекти в енергетичній галузі реалізуються в середовищі підвищеної технічної, нормативної та інтеграційної складності. Упровадження нових цифрових компонентів потребує забезпечення сумісності з наявними інформаційно-керуючими системами, дотримання вимог стандартів, проходження багаторівневих процедур верифікації, валідації та перевірки безпечності до моменту їх практичного використання. За таких умов застосування стандартних Agile-моделей у чистому вигляді не завжди є ефективним, оскільки часта зміна конфігурації продукту та короткі цикли постачання інкрементів спричиняють непропорційне зростання витрат на повторне тестування та інтеграцію.

Проблема посилюється тим, що існуючі підходи до управління IT-проектами переважно орієнтовані або на гнучкість розроблення, або на жорстко регламентовану послідовну реалізацію, і недостатньо враховують специфіку IoT-проектів як складних кіберфізичних систем. У наявних моделях не повною мірою формалізовано вплив архітектурної неоднорідності компонентів, рівня стандартизованості технічних рішень та критичності енергетичних вузлів на загальні витрати часу і ресурсів для підтвердження працездатності системи. Це знижує точність планування, ускладнює вибір методології реалізації проекту та не дає змоги своєчасно прогнозувати перевищення строків і бюджету в умовах багатокритеріального вибору.

Таким чином, виникає науково-практична задача розроблення спеціалізованої математичної моделі управління проектами впровадження IoT-рішень в енергетичних системах, яка б поєднувала IT-логіку проектування цифрових компонентів із галузевими обмеженнями щодо надійності та сертифікації. Така модель має враховувати вплив архітектурної складності, критичності енергетичних об'єктів і додаткових витрат на верифікацію та валідацію, що дасть змогу обґрунтувати вибір гібридного підходу до управління проектом, оптимізувати структуру пакетів робіт і підвищити ефективність реалізації IoT-проектів у Smart Grid-середовищі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Управління проектами цифрової трансформації енергетичної інфраструктури, зокрема впровадження технологій Інтернету речей у системи Smart Grid, є комплексним міждисциплінарним завданням, яке привертає значну увагу наукової та інженерної спільноти. Базові принципи, організаційні структури, життєві цикли та ключові виклики реалізації таких масштабних інфраструктурних проектів, що вимагають тісної інтеграції інформаційних мереж з високовольтним обладнанням, детально розглядаються у звітах та методологічних рекомендаціях профільних галузевих інститутів, таких як Power System Engineering [1]. З огляду на високу капіталомісткість, масштаби впровадження та критичну важливість енергетичних об'єктів для національної безпеки, вибір оптимальних проектних і технологічних рішень традиційно спирається на методи багатокритеріального аналізу (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA). Як зазначають J.-J. Wang та співавтори [2], використання таких підходів дозволяє математично збалансувати технічні, економічні, екологічні та експлуатаційні фактори при прийнятті стратегічних рішень в енергетиці.

Зі стрімким розвитком концепції IoT дослідники та практики дедалі частіше звертаються до гнучких методологій управління проектами (Agile), які довели свою ефективність у сфері розробки програмного забезпечення. Зокрема, у дослідженні Goyal обґрунтовується ефективність поєднання архітектури IoT-рішень та Agile-практик для прискорення розроблення, підвищення адаптивності команд та оперативного постачання розумних інженерних систем кінцевому замовнику [3]. Гнучкі методології, такі як Scrum або Kanban, дозволяють оперативню реагувати на зміни вимог стейкхолдерів та забезпечують безперервну інтеграцію програмних модулів.

Проте застосування виключно гнучких підходів у проектах розроблення та впровадження кіберфізичних систем, якими є сучасні інтелектуальні енергомережі, стикається із серйозними фундаментальними перешкодами на етапах апаратної інтеграції, дослідної експлуатації та обов'язкової галузевої сертифікації. Як детально аналізують Е. С. Conforto та Д. С. Amaral [4], для високотехнологічних проектів, що поєднують розробку програмного та апаратного забезпечення (hardware/software co-design), чистий Agile генерує надмірні ризики технічного боргу та невідповідності стандартам якості. Вони доводять, що оптимальним рішенням для таких інноваційних середовищ є застосування гібридного підходу, який поєднує гнучкі ітерації на рівні R&D з традиційною моделлю жорстких контрольних точок (Stage-Gate Model) на етапах тестування та випуску продукту.

Обмеження виключно гнучких підходів стають ще більш очевидними при аналізі специфіки управління IT-проектами в умовах критичної інфраструктури. Впровадження IoT-сенсорів у діючі SCADA-системи вимагає багатоетапного тестування сумісності протоколів передачі даних (MQTT, CoAP, DNP3, IEC 61850) [6]. Часті релізи, притаманні Agile, у цьому контексті є економічно та технологічно недоцільними, оскільки кожна зміна конфігурації вимагає зупинки частини мережі (outage time) та проведення повторної процедури верифікації і валідації. Отже, проектний менеджмент у Smart Grid потребує гібридних фреймворків, які б оптимізували розмір і частоту постачання інкрементів.

Критичним аспектом управління такими проектами є створення математичного інструментарію для обґрунтування управлінських рішень. Класичною задачею у цій сфері є пошук оптимального компромісу між часом, вартістю та якістю виконання робіт (Time-Cost-Quality Trade-off Problem, TCQTP). Фундаментальні основи вирішення цієї задачі були закладені в роботі А. Р. Babu та Н. Suresh [5], які запропонували лінійні моделі для визначення оптимального графіка робіт за умов обмеженого бюджету та заданих вимог до якості. Сучасний розвиток цього напрямку відображено в дослідженнях, що застосовують еволюційні та метаевристичні алгоритми оптимізації. Так, у праці Zhang et al [7] запропоновано використання модифікованих генетичних алгоритмів для вирішення багатовимірних задач TCQTP у великомасштабних інженерних проектах, що дозволяє менеджеру проекту автоматизовано генерувати множини Парето-оптимальних сценаріїв розподілу ресурсів. У роботі Ghadir et al. розглянуто задачу компромісу «час–вартість–якість» у плануванні проектів за умов невизначеності, використовуючи нечітку логіку та метаевристичні алгоритми. Дослідження демонструє, що застосування таких методів дозволяє враховувати нечіткі параметри та ризики, які неминуче виникають у реальних інженерних та управлінських проектах.

Незважаючи на потужний математичний апарат, існуючі моделі TCQTP розглядають інфраструктурні та IT-проекти здебільшого абстрактно, не враховуючи специфіки кіберфізичної безпеки та інтеграційної складності енергетичного сектора. Впровадження IoT у Smart Grid кардинально збільшує площу потенційних кібератак. Дослідження наголошує, що витрати на забезпечення інформаційної безпеки (кіберкомплаєнс) зростають нелінійно залежно від архітектурної складності системи та кількості гетерогенних пристроїв. У стандартних проектних моделях ці витрати та пов'язані з ними часові затримки часто розглядаються як статичні ризикові резерви, що призводить до систематичної помилки в плануванні. [8]

Більше того, як показують результати дослідження інтеграційних процесів в енергетиці, тривалість фази тестування та здачі в експлуатацію експоненційно залежить від рівня стандартизованості обраних технічних рішень. Використання нестандартних (кастомних) IoT-компонентів для критичних вузлів енергомережі призводить до багаторазового зростання так званої «бюрократичної затримки» (аудити, експертизи, отримання дозволів Держенергонагляду тощо). [9] Існуючі моделі багатокритеріального управління портфелями IT-проектів хоч і враховують ризики впровадження, однак не містять формалізованих залежностей між архітектурою рішення, суворими вимогами стандартів енергетичної галузі та нелінійним зростанням вартості інтеграційного тестування [10].

Отже, аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про наявність суттєвої наукової прогалини. З одного боку, існує розвинений апарат багатокритеріальної оптимізації проектних параметрів (вартості, часу, надійності). З іншого боку, існують доведені на практиці гібридні методології управління інтеграцією IoT в енергетику. Проте на сьогодні відсутня єдина математична модель управління проектами впровадження IoT у Smart Grid, яка б кількісно оцінювала і оптимізувала проектні сценарії з безпосереднім урахуванням специфічних штрафних функцій - інтеграційної складності, критичності енергетичних об'єктів та додаткових витрат часу і бюджету на проходження багаторівневих процедур комплаєнсу та сертифікації. Розроблення такої моделі дозволить перевести вибір проектних конфігурацій та методологій (Agile/Waterfall) з площини експертних оцінок у площину точних математичних розрахунків.

**Мета і задачі дослідження.** Зважаючи на виявлену в процесі аналізу наукових джерел фундаментальну суперечність між необхідністю забезпечення високої адаптивності під час розроблення інноваційних рішень та жорсткими галузевими вимогами енергетичного сектора, виникає потреба в концептуальному перегляді підходів

до проектного планування. Існуючі дослідження доводять, що спроби прямого перенесення гнучких методологій (Agile) у середовище критичної інфраструктури без математичного коригування призводять до систематичних помилок в оцінці тривалості та бюджету. Відповідно, метою даної статті є розроблення спеціалізованої математичної моделі управління проектами впровадження IoT-рішень у середовище Smart Grid, яка б дозволила оптимізувати конфігурацію проектних етапів з одночасним урахуванням вартості, часу, надійності та специфічних інтеграційно-бюрократичних обмежень енергетичної галузі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити низку взаємопов'язаних завдань. Передусім, ключовим завданням є адаптація класичної багатокритеріальної задачі оптимізації проектних параметрів (Time-Cost-Quality Trade-off Problem) до специфічних умов розгортання кіберфізичних систем шляхом введення додаткових цільових функцій. Далі передбачається побудова математичного апарату для опису нелінійного зростання часових та фінансових витрат під час інтеграції гетерогенних IoT-компонентів, з формалізацією залежностей між рівнем критичності вузла енергосистеми та супутніми витратами на проведення процедур комплаєнсу, верифікації і валідації. Зрештою, практична реалізація моделі вимагає розроблення підходу для знаходження оптимального розміру проектного релізу, що забезпечить строге математичне обґрунтування доцільності застосування гібридних (Agile + Stage-Gate) методологій управління IT-проектами в енергетиці.

**Результати досліджень.** В основу запропонованої моделі покладено концепцію кіберфізичної системи, у якій реалізація проекту розглядається як процес послідовної або паралельної інтеграції множини IoT-компонентів в існуючу архітектуру Smart Grid. На відміну від класичної задачі оптимізації проектних параметрів (Time-Cost-Quality Trade-off), де вартість і тривалість є лінійними або дискретними функціями від обраного сценарію виконання робіт, у сфері енергетики вирішальне значення має розмір проектного релізу (інкременту). Гнучкі методології управління (Agile) передбачають часте постачання малих інкрементів системи, що дозволяє швидко отримувати зворотний зв'язок. Однак в енергетичній галузі кожен реліз вимагає проходження суворих процедур комплаєнсу, перевірки кібербезпеки та сертифікації на відповідність ДСТУ, що формує значні фіксовані накладні витрати на кожну ітерацію. З іншого боку, каскадна модель (Waterfall) з одним великим релізом наприкінці проекту мінімізує кількість перевірок, але експоненційно збільшує архітектурну складність інтеграції та ризик несумісності компонентів.

Для математичної формалізації цієї суперечності введемо такі параметри. Нехай  $N$  - загальна кількість IoT-компонентів або модулів, які необхідно впровадити в межах проекту. Весь обсяг робіт розбивається на пакети (релізи), причому в кожному пакеті міститься  $k$  компонентів. Відповідно, загальна кількість релізів (ітерацій постачання) дорівнюватиме  $N/k$ . Для кожного релізу визначаються два типи витрат: фіксовані витрати на процедури комплаєнсу та аудиту ( $C_{fixed}$ ), які не залежать від розміру пакету, та змінні витрати на технічну інтеграцію ( $C_{int}$ ), які зростають нелінійно залежно від кількості компонентів у пакеті через зростання кількості потенційних конфліктів між модулями.

Цільова функція сумарної вартості проекту  $F_{Cost}$  може бути описана наступним рівнянням:

$$F_{Cost}(k) = \frac{N}{k} * (C_{fixed} + c * k^2) = \frac{N * C_{fixed}}{k} + N * c * k, \quad (1)$$

де  $c$  - коефіцієнт інтеграційної складності, що відображає ступінь нестандартності використовуваних протоколів (наприклад, суміщення MQTT зі старими системами SCADA), а  $k^2$  моделює квадратичне зростання кількості зв'язків між  $k$  компонентами.

Аналогічно, цільова функція загальної тривалості проекту  $F_{Time}$  враховує фіксований час на верифікацію та валідацію (V&V) одного релізу ( $T_{fixed}$ ), що включає бюрократичні затримки на отримання дозволів, та час на технічне зневадження:

$$F_{Time}(k) = \frac{N}{k} * T_{fixed} + N * t * k, \quad (2)$$

де  $t$  - часовий коефіцієнт складності інтеграції.

Третім критерієм у багатокритеріальній моделі є надійність системи  $F_{Reliability}$ , яка обернено пропорційна ймовірності виникнення критичної помилки на етапі експлуатації. Згідно з дослідженнями надійності програмно-апаратних комплексів, тестування дрібних пакетів забезпечує вищий рівень якості локального коду, однак збільшує ризик системних відмов на стиках ітерацій.

Завдання керівника проекту полягає у знаходженні такого розміру проектного релізу  $k^*$ , який мінімізує згорнуту цільову функцію, що враховує баланс між вартістю, часом та надійністю. Дослідивши функцію  $F_{Cost}(k)$  на екстремум (прирівнявши першу похідну до нуля), отримуємо аналітичний вираз для оптимального розміру інкременту за критерієм вартості:

$$\frac{dF_{Cost}}{dk} = -\frac{N * C_{fixed}}{k^2} + N * c, \quad k^* = \sqrt{\frac{C_{fixed}}{c}}, \quad (3)$$

З отриманого рівняння випливає важливий науковий висновок: що вищими є бюрократичні вимоги до сертифікації в енергетиці (велике значення  $C_{fixed}$ ), то більшими мають бути розміри пакетів робіт (зміщення у бік

каскадної моделі управління). І навпаки, застосування високостандартизованих IoT-рішень (мале значення  $c$ ) дозволяє зменшити обсяг релізу, наближаючи методологію до класичного Agile.

Для верифікації запропонованої математичної моделі було проведено симуляційне моделювання проекту впровадження IoT-системи, що складається з  $N=100$  компонентів. Вихідні дані для симуляції базувалися на усереднених метриках експертних оцінок:  $C_{\text{fixed}} = 50$  умовних одиниць (витрати на аудит та перевірки безпеки одного релізу),  $c = 0.5$  (коефіцієнт складності інтеграції).

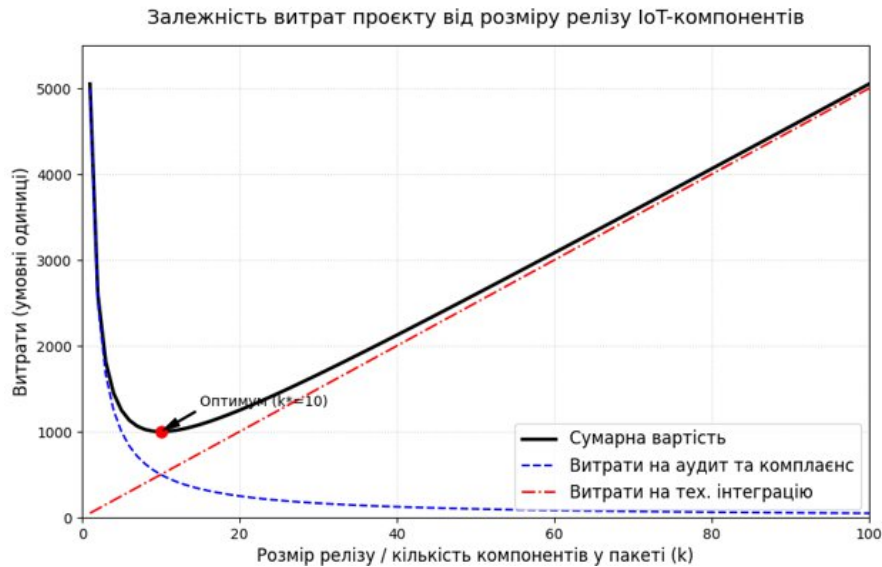


Рис. 1. Залежність витрат проекту від розміру релізу IoT-компонентів.

Отримані результати графічного моделювання наочно демонструють наявність яскраво вираженого оптимуму. Ліва частина графіка ілюструє спробу застосування чистого Agile-підходу. У цьому випадку інтеграційні витрати є мінімальними, однак сумарна вартість проекту стрімко зростає до 5000 умовних одиниць через колосальне накопичення витрат на постійні перевірки комплаєнсу та аудити безпеки. Права частина графіка відображає класичний Waterfall, де реліз відбувається одноразово. У цьому сценарії фіксовані витрати мінімізуються, проте експоненційне зростання складності інтеграції призводить до критичного накопичення технічного боргу, збільшуючи сумарну вартість.

Золота середина (гібридний підхід) досягається у точці  $k=10$ , де сумарні витрати є мінімальними. Саме цей розрахунковий оптимум підтверджує доцільність використання гібридних фреймворків (Agile+Stage-Gate) в управлінні проектами Smart Grid. Модель дозволяє менеджменту проекту (РМО) приймати обґрунтовані рішення щодо структурування робіт не інтуїтивно, а на основі строгих математичних розрахунків, адаптуючи життєвий цикл розробки до конкретних умов регуляторного середовища.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** У результаті проведеного дослідження було розв'язано актуальне науково-прикладне завдання щодо удосконалення методів та моделей управління IT-проектами в енергетичній сфері. Зокрема, розроблено спеціалізовану математичну модель управління проектами впровадження IoT-рішень у середовище Smart Grid, яка враховує специфіку кіберфізичних систем. На відміну від існуючих моделей, запропонований математичний апарат формалізує нелінійну залежність між архітектурною складністю системи, розміром проектного релізу та супутніми витратами на проходження процедур комплаєнсу, верифікації і валідації.

Головним науковим результатом є аналітичне доведення неефективності застосування «чистих» методологій (Agile або Waterfall) для проектів критичної інфраструктури. За допомогою отриманого рівняння для розрахунку оптимального розміру релізу (пакета робіт) математично обґрунтовано необхідність використання гібридних фреймворків управління. Чисельне моделювання цільової функції витрат підтвердило наявність яскраво вираженого оптимуму: надмірне подрібнення ітерацій (сценарій Agile) призводить до експоненційного зростання витрат на аудит та сертифікацію, тоді як формування єдиного масштабного релізу (сценарій Waterfall) генерує критичний рівень технічного боргу та вартості архітектурної інтеграції. Практична цінність розробленої моделі полягає у наданні керівникам проектів (РМО) об'єктивного інструментарію для планування життєвого циклу розробки та структурування етапів впровадження на основі кількісних метрик, а не лише експертних оцінок.

Перспективи подальших розвідок у даному напрямку пов'язані з переходом від теоретичного комп'ютерного моделювання до практичної верифікації запропонованого математичного апарату. Наступним кроком дослідження стане апробація моделі на масивах емпіричних даних, отриманих під час розгортання реальних IoT-рішень в існуючих енергомережах. Крім того, подальшого розвитку потребує врахування фактора

невизначеності (ризиків затримки постачання апаратних компонентів) шляхом інтеграції апарату нечіткої логіки або марковських ланцюгів у структуру запропонованої оптимізаційної моделі.

**Внесок авторів.**

Пархомей Ігор Ростиславович – розробка математичних моделей, участь у формуванні висновків дослідження.

Загородній Д.В. – підготовка огляду літератури, симуляційне моделювання, підготовка графіків, участь у формуванні висновків дослідження.

Полоневич Ольга Володимирівна - підготовка огляду літератури та теоретичних основ дослідження, аналіз результатів моделювання, участь у формуванні висновків дослідження.

**Декларація про штучний інтелект.** Автори не використовували штучний інтелект при створенні матеріалів статті.

**Конфлікт інтересів.** Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів та підтверджує, що під час підготовки цієї роботи не існувало жодних комерційних, фінансових чи інших взаємовідносин, які могли б бути розцінені як такі, що здатні вплинути на результати дослідження або їх інтерпретацію. Робота виконана відповідно до принципів академічної доброчесності, етичних норм проведення наукових досліджень та вимог редакційної політики щодо запобігання конфлікту інтересів.

**Список використаної літератури**

- 1.[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.powersystem.org/wp-content/uploads/2018/04/Project-Management-for-Implementing-the-Smart-Grid.pdf> (дата звернення: 29.01.2026). – Назва з екрана.
- 2.Wang, J.-J., Jing, Y.-Y., Zhang, C.-F., & Zhao, J.-H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2263–2278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.021>
- 3.Goyal, A. (2023). Integrating IoT and agile methodologies for smarter engineering solutions. *International Journal of Science, Research and Arts*. DOI: <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2023.8.2.0284>
- 4.Conforto, E. C., Amaral, D. C. (2016). Agile project management and stage-gate model: A hybrid framework for technology-based companies. *Journal of Engineering and Technology Management*, 40, 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2016.02.003>
- 5.Babu, A. R., & Suresh, N. (1996). Project management with time, cost, and quality considerations. *European Journal of Operational Research*, 88(2), 320–327. DOI:[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00202-9](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00202-9)
- 6.Cavalieri, S., et al. (2022). Integration of IoT technologies into the smart grid. *Sensors*, 22(7), 2475. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22072475>
- 7.Ghadir, H., et al. (2022). Solving the Problem of Time, Cost, and Quality Trade-Off in Project Scheduling under Fuzzy Conditions Using Meta-Heuristic Algorithms. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/6401061>
- 8.Szczepaniuk, E. K., Szczepaniuk, H. (2025). Cybersecurity of Smart Grids: Requirements, Threats, and Countermeasures. *Energies*, 18(18), 5017. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18185017>
- 9.Wei, T., Li, H., Miao, J. (2025). Integration and Development Path of Smart Grid Technology: Technology-Driven, Policy Framework and Application Challenges. *Processes*, 13(8), 2428. DOI:<https://doi.org/10.3390/pr13082428>
10. Interoperable Europe Portal. (2026). Smart grids and metering – Standardisation rolling plan. European Commission. Retrieved from <https://interoperable-europe.ec.europa.eu/collection/rolling-plan-ict-standardisation/smart-grids-and-metering>

Надійшла до редакції: 25.02.26

Прийнята до друку:12.06.26

Опубліковано:30.06.26