ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Науковий вісник НЛТУ України
Scientific Bulletin of UNFU
ISSN 1994-7836 (print)
ISSN 2519-2477 (online)
https://doi.org/10.36930/40360111
Article received: 19.12.2025, accepted: 09.02.2026
Article published: 26.02.2026
UDC 004.[414.3+94]
Corresponding author: O. B. Kernytskyy oleh.b.kernytskyi@lpnu.ua

О. Б. Керницький, В. М. Теслюк
Національний Університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВАЛІДАЦІЇ СПЕЦИФІКАЦІЙ У РЕІНЖИНІРИНГУ ІТ-ПРОЄКТІВ НА ОСНОВІ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ МЕРЕЖ ПЕТРІ

Виявлено, що повна детермінована валідація специфікацій у процесі реінжинірингу великих ІТ-проєктів на основі мереж Петрі супроводжується значними обчислювальними витратами внаслідок комбінаторного вибуху простору станів і практично не масштабується для моделей промислового рівня зі складною бізнес-логікою. Встановлено, що застосування статистичного аналізу мереж Петрі з використанням методу Монте-Карло дає змогу реалізувати вибіркову стохастичну валідацію сценаріїв функціонування системи без необхідності повного перебору всіх можливих станів моделі. З'ясовано, що запропонований метод базується на генеруванні репрезентативної множини трас переходів відповідно до заданих імовірнісних розподілів, які відображають частоту використання бізнес-правил і умов у реальних сценаріях експлуатації інформаційної системи. Оцінено вплив стохастичної вибірки на ефективність процесу валідації моделі специфікацій та вимог, поданої у вигляді мережі Петрі, що дає змогу скоротити тривалість аналізу у 7-8 разів порівняно з повною детермінованою перевіркою зі збереженням покриття понад 90 % переходів мережі та рівня достовірності отриманих результатів понад 95 %. При цьому валідації підлягає не текстова специфікація безпосередньо, а її формалізована модель, що описує логічні зв'язки між вимогами, бізнес-правилами та сценаріями функціонування системи. Охарактеризовано можливості кількісного оцінювання якості специфікацій за допомогою статистичних показників покриття, достовірності та похибки, які відображають ступінь узгодженості логічних зв'язків, стабільність поведінки моделі та частоту виникнення конфліктних сценаріїв. Показано практичну придатність методу на прикладі специфікації продукту Consumer Credit Report (SRS v1.1.28), де правила валідації вхідних запитів до системи, бізнес-логіки та формування вихідного звіту формалізовано у вигляді мережі Петрі з подальшою стохастичною симуляцією поведінки системи. Встановлено, що запропонований підхід дає змогу виявляти конфліктні, надлишкові або неактивні правила специфікації, кількісно оцінювати їхній вплив на результатну поведінку системи та може бути ефективно застосований для ревізії, порівняння версій і контрольованої еволюції SRS-документації у процесі реінжинірингу складних ІТ-систем. Запропонований підхід розглядає специфікації як формалізовану модель поведінки системи, подану у вигляді мережі Петрі, що дає змогу виконувати їх валідацію на рівні логіки та сценаріїв виконання. Отже, процес валідації спрямований на перевірку коректності взаємодії вимог і правил, а не на аналіз тексту специфікації як документа.

Ключові слова: реінжиніринг ІТ-проєктів; статистичний аналіз мереж Петрі; метод Монте-Карло; валідація специфікацій ІТ-проєктів; синтез вимог до ІТ-проєктів; імовірнісне моделювання.

Вступ / Introduction

Для сучасних інформаційних систем характерні зростання складності архітектури, велика кількість взаємозалежних компонентів та динамічні зміни вимог упродовж життєвого циклу. Це зумовлює необхідність постійного вдосконалення процесів реінжинірингу та оновлення специфікацій у відповідь на нові бізнес-потреби та технологічні обмеження. Одним із ключових етапів реінжинірингу є валідація специфікацій [6], що забезпечує відповідність вимог до системи її фактичній поведінці, а також виявлення помилок і суперечностей на ранніх стадіях її розроблення.

Одним з ефективних інструментів для формального опису, аналізу та перевірки вимог є мережі Петрі (англ. *Petri Nets*) [7]. Вони дають можливість моделювати послідовність та паралельність процесів, синхронізацію подій, а також виявляти можливі конфлікти, блокування або недосяжні стани. Використання мереж Петрі у процесі реінжинірингу дає змогу формалізувати складні логічні залежності між функціональними та нефункціональними вимогами, а також виконувати валідацію специфікацій на рівні поведінкової моделі системи.

Керницький Олег Богданович, аспірант, кафедра автоматизованих систем управління.
Email: oleh.b.kernytskyi@lpnu.ua; https://orcid.org/0009-0007-5318-6506
Теслюк Василь Миколайович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизованих систем управління.
Email: vasyl.m.teslyuk@lpnu.ua; https://orcid.org/0000-0002-5974-9310
Цитування за ДСТУ: Керницький О. Б., Теслюк В. М. Моделювання процесу валідації специфікацій у реінжинірингу іт-проєктів на основі статистичного аналізу мереж Петрі. Науковий вісник НЛТУ України. 2026, т. 36, № 1. С. 96–104.
Citation APA: Kernytskyy, O. B., & Teslyuk, V. M. (2026). Modelling the process of specification validation in it project reengineering based on statistical analysis of Petri nets. *Scientific Bulletin of UNFU*, 36(1), 96–104. https://doi.org/10.36930/40360111

Однак за практичного застосування цього підходу виникає проблема масштабованості моделей мереж Петрі. У великих ІТ-проєктах кількість позицій та переходів у мережі Петрі може сягати сотень або тисяч елементів. У таких випадках повна верифікація всієї моделі вимагає значних обчислювальних ресурсів і часу, що робить процес практично неприйнятним або економічно невиправданим. Так звана state-space explosion problem (проблема вибуху в просторі станів) [2, 3] є типовою для детермінованих методів моделювання складних систем і є серйозним обмеженням за використання класичних інструментів формальної валідації специфікації ІТ-проєкту.

Для вирішення такої проблеми у цьому дослідженні запропоновано статистичний підхід до валідації специфікацій, заснований на методі Монте-Карло [10, 13]. Ідея полягає у тому, щоб замість повного аналізу усіх можливих переходів мережі здійснювати вибіркове тестування окремих підмножин сценаріїв на основі ймовірнісного розподілу подій. Такий підхід дає змогу моделювати поведінку системи з використанням репрезентативної вибірки входів і перевіряти коректність взаємозв'язків між місцями та переходами без потреби аналізу повної моделі.

Метод Монте-Карло, широко відомий у галузях фізики, фінансів та теорії надійності, у цьому дослідженні запропоновано як ефективний інструмент скороченої стохастичної валідації моделей мереж Петрі. Застосування такого підходу дає змогу визначити імовірнісну міру достовірності перевіреної частини моделі, а також оцінити ефективність валідації специфікації ІТ-проєкту як відношення між кількістю перевірених елементів і рівнем отриманої впевненості у правильності специфікації.

Окрім цього, поєднання формалізму мереж Петрі з методами статистичного аналізу відкриває можливості для адаптивного тестування великих систем, коли сценарії вибираються динамічно залежно від попередніх результатів. Це створює підґрунтя для побудови інтелектуальних інструментів підтримки прийняття рішень у процесі реінжинірингу ІТ-систем.

Отже, актуальність дослідження зумовлена потребою у підвищенні ефективності процесу валідації специфікацій великих інформаційних систем зі збереженням високого рівня достовірності отриманих результатів. Також потрібно здійснити удосконалення процесу валідації специфікацій у реінжинірингу ІТ-проєктів шляхом застосування статистичного аналізу мереж Петрі та методу Монте-Карло для вибору репрезентативних вхідних сценаріїв і перевірки коректності логічних зв'язків у моделі.

Водночас, процес реінжинірингу інформаційних систем передбачає не тільки оновлення технологічної бази, але й переосмислення логіки функціонування системи через уточнення, формалізацію та перевірку її вимог. Одним із критичних етапів цього процесу є валідація специфікацій, що має забезпечити їх повноту, несуперечливість і відповідність очікуваній поведінці системи.

У межах класичного підходу до валідації специфікації ІТ-проєкту на основі мереж Петрі передбачається детермінований аналіз усіх можливих станів системи. Такий підхід ефективний для моделей із невеликою кількістю переходів, проте у разі великих проєктів він стає обчислювально непідйомним. Збільшення кількості позицій і переходів призводить до комбінаторного вибуху простору станів, що унеможливлює повне дослідження всіх сценаріїв навіть у разі використання сучасних інструментів моделювання.

Навіть у разі застосування виразніших формалізмів, зокрема – кольорових мереж Петрі, та побудови дерев досяжності для перевірки поведінки моделей [15, 16], проблема масштабності залишається актуальною для моделей великої розмірності. Це зумовлює потребу переходу від повного детермінованого аналізу до статистично обґрунтованих методів валідації специфікації ІТ-проєкту, здатних забезпечити прийнятний баланс між точністю перевірки та обчислювальними витратами.

Отже, виникає потреба у розробленні методу, який дав би змогу виконувати скорочену, але достовірну перевірку моделі, обмежуючи обсяг аналізованих даних, зберігаючи, при цьому, статистично обґрунтовану точність отриманих результатів.

Для досягнення цієї мети запропоновано застосувати метод Монте-Карло, який забезпечує випадковий вибір репрезентативних сценаріїв функціонування системи, що моделюється мережею Петрі. Кожен сценарій розглядається як послідовність переходів, активованих відповідно до заданих ймовірностей, що відображають частоту їх використання у реальному функціонуванні системи. На основі результатів симуляції оцінюється ступінь коректності логічних зв'язків, стабільність поведінки моделі та ймовірність виникнення невідповідностей між вимогами.

Об'єкт дослідження – процес валідації специфікацій у межах реінжинірингу складних інформаційних систем за допомогою мереж Петрі.

Предмет дослідження – методи і засоби статистичної перевірки та оцінювання достовірності моделей мереж Петрі для вибіркової валідації специфікацій, які дадуть змогу виконувати скорочену, але достовірну перевірку моделі, обмежуючи обсяг аналізованих даних за умови статистично обґрунтованої точності результатів.

Мета роботи – розробити та обґрунтувати метод статистичної валідації специфікацій на основі стохастичного аналізу мереж Петрі, який дасть змогу зменшити обчислювальні витрати на перевірку великих моделей мереж Петрі за умови збереження потрібного рівня достовірності отриманих результатів, а також створить передумови для автоматизації процесу валідації специфікацій у складних ІТ-системах.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні *завдання дослідження*:

- проаналізувати обмеження традиційних детермінованих методів перевірки мереж Петрі за моделювання великих систем, що дасть змогу обґрунтувати недоцільність повного перебору простору станів для моделей промислового масштабу та визначити вимоги до альтернативних, масштабованих підходів валідації специфікацій ІТ-проєктів.
- розробити математичний метод стохастичної вибірки переходів та подій на основі методу Монте-Карло, що дасть змогу виконувати вибіркову валідацію поведінки моделі з контрольованим рівнем достовірності за істотно менших обчислювальних витрат.
- визначити статистичні показники ефективності процесу валідації моделі специфікацій та вимог, поданої у вигляді мережі Петрі, за такими показниками, як покриття (C), достовірність (P) та ймовірність помилки (E), що забезпечить кількісну оцінку якості перевірки та обґрунтоване прийняття рішень щодо достатності валідації специфікацій ІТ-проєктів.

- провести експериментальне дослідження запропонованого методу на прикладі реальної або наближеної до реальної мережі Петрі, що описує інженерію вимог до складної ІТ-системи, а також допоможе перевірити практичну придатність методу та оцінити його ефективність у прикладному контексті.
- порівняти результати статистичної та повної валідації специфікації за показниками тривалості перевірки великих моделей мереж Петрі, використання обчислювальних ресурсів і точності отриманих результатів, що уможливить об'єктивну оцінку переваг і обмежень запропонованого підходу.
- розробити рекомендації щодо інтеграції статистичного аналізу в життєвий цикл розроблення та реінжинірингу ІТ-проєктів, що приведе до підвищення масштабованості процесу валідації специфікацій, зменшення витрат на перевірку вимог до ІТ-проєктів та покращення якості технічної документації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У сучасних дослідженнях процесів реінжинірингу інформаційних систем дедалі більшого поширення набувають формальні методи опису та перевірки вимог, серед яких особливе місце займають мережі Петрі (англ. *Petri Nets*). Їхня формальна природа дає змогу моделювати паралельні, асинхронні та взаємозалежні процеси, що робить їх ефективним інструментом для аналізу поведінки складних систем [5, 14].

Використання мереж Петрі у процесі валідації специфікацій ІТ-систем розглядають у численних роботах, де вказують на їх здатність формалізувати логіку функціонування системи та підвищувати достовірність перевірки вимог [17, 18]. Однак однією з головних проблем залишається обчислювальна складність аналізу великих моделей, коли кількість можливих станів системи зростає експоненційно з кількістю переходів і маркерів – явище, відоме як state-space explosion [2, 3].

Для зменшення обчислювальної складності розроблено методи на основі net unfoldings та partial-order model checking, які дають змогу досліджувати тільки репрезентативну частину простору станів [2, 3]. Проте навіть ці підходи залишаються ресурсоємними у роботі з великими промисловими моделями.

У працях [8, 9] було розроблено метод синтезу специфікацій та вимог у процесі реінжинірингу ІТ-проєктів, що поєднує класичні етапи інженерії вимог із побудовою моделі "чорного ящика" та паралельним тестуванням старої і нової систем. Подальші етапи дослідження [7] показали можливість використання мереж Петрі для моделювання взаємозв'язків між вимогами, що дає змогу підвищити точність їх формалізації, однак питання масштабування процесу валідації складних систем залишалося відкритим.

У сфері аналізу складних систем активно застосовують статистичні та стохастичні підходи, зокрема – метод Монте-Карло (Monte Carlo Simulation) [10, 13]. Цей метод ефективний для оцінювання властивостей систем на основі випадкової вибірки сценаріїв – від моделювання надійності до аналізу ризиків і виявлення аномалій [4, 19]. Поєднання стохастичних підходів із формальними моделями, такими як мережі Петрі, забезпечує можливість зменшити обсяг перевірки без втрати достовірності отриманих результатів.

Окремий напрям досліджень у цій галузі пов'язаний із застосуванням кольорових мереж Петрі для аналізу складних процесів підтримки програмних комплексів. Зокрема, запропоновано модель аналізу факторів впливу автоматизації підтримки програмних комплексів на основі CPN [15], що дає змогу досліджувати динаміку процесів та взаємодію суб'єктів підтримки. Цей підхід отримав розвиток, існують моделі, де кольорові мережі Петрі використано для балансування мультисуб'єктних поліфакторних середовищ із верифікацією поведінки моделі за допомогою дерева досяжності [16]. Водночас, зазначені роботи орієнтовані на детермінований аналіз і балансування процесів, тоді як питання масштабної статистичної валідації специфікацій у процесі реінжинірингу ІТ-проєктів залишається відкритим. Саме таку прогалину заповнює запропонований у цій роботі підхід, який поєднує формалізм мереж Петрі зі стохастичним аналізом на основі методу Монте-Карло.

У межах розвитку напрямів Statistical Model Checking (SMC) та Stochastic Petri Nets (SPN) відбулося формування гібридних підходів, що поєднують стохастичне моделювання з формальними методами верифікації [11]. Саме ці напрями стали основою для подальшого вдосконалення процесів аналізу продуктивності, поведінки та валідації складних систем.

На відміну від класичних стохастичних мереж Петрі (SPN, GSPN), які переважно орієнтовані на аналіз часових та продуктивнісних характеристик систем (затримки, пропускної здатності, завантаженості ресурсів тощо), а також від підходів Statistical Model Checking, спрямованих на статистичну перевірку формальних логічних властивостей моделей, у цій роботі стохастичність використовується як інструмент вибіркової валідації логіки специфікацій та узгодженості бізнес-правил.

Запропонований підхід не має на меті моделювання часової динаміки або кількісних показників продуктивності системи. Основний акцент зроблено на формальній перевірці коректності взаємодії вимог, правил і сценаріїв функціонування, поданих у вигляді мережі Петрі, шляхом стохастичнго генерування трас виконання. Отже, метод спрямований на статистично обґрунтовану ревізію специфікацій як формалізованої поведінкової моделі, а не на аналіз експлуатаційних характеристик системи.

Найновіші роботи 2024 р. підтверджують активний розвиток цієї тематики. У роботі [12] запропоновано модель GSPN для оцінювання характеристик продуктивності мережевого зонда, що демонструє можливості SPN-підходу для прикладних задач аналізу навантаження та часу відгуку в мережевих системах. Натомість робота [1] робить внесок у теоретичний розвиток цього напряму, описуючи аналітичні методи дослідження мереж із "тихими" переходами (англ. *silent transitions*), які традиційно ускладнюють точний аналіз моделей. Ці дослідження демонструють еволюцію Petri-моделювання від класичних детермінованих підходів до стохастичних і статистичних, що враховують реальні ймовірнісні аспекти функціонування систем.

Отже, проведений аналіз останніх досліджень та публікацій підтверджує, що інтеграція статистичного аналізу та стохастичних методів у процес моделювання мереж Петрі є перспективним напрямом для вдосконалення валідації специфікацій у реінжинірингу ІТ-проєктів. На відміну від повної детермінованої перевірки, стохастичні підходи дають змогу отримати статистично достовірні результати при істотному скороченні обчислювальних витрат і часу аналізу.

Матеріали та методи дослідження. У дослідженні застосовано формальні методи моделювання та статистичного аналізу для валідації специфікацій у процесі реінжинірингу ІТ-проєктів. Використано процес валідації специфікацій складних інформаційних систем, а також методи статистичної перевірки моделей на основі мереж Петрі. Методичну основу становлять мережі Петрі та стохастичний підхід Монте-Карло для вибіркового аналізу трас виконання. Запропоновані методи застосовано для оцінювання коректності, узгодженості та повноти специфікацій.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Статистична валідація специфікацій у реінжинірингу ІТ-проєктів (англ. *Statistical validation of specifications in IT project reengineering*) – це процес перевірки та підтвердження відповідності оновлених технічних вимог функціональним цілям за допомогою математичних методів. Вона базується на аналізі історичних даних, використанні метрик та моделюванні для мінімізації ризиків невідповідності нової системи. Такий підхід гарантує точність відновленої моделі, дає змогу уникнути помилок, що виникають через нерозуміння застарілої функціональності, та забезпечує відповідність реінжинірингованої системи сучасним вимогам ринку.

Розроблення методу статистичної валідації ІТ-проєктів. З огляду на зростання складності ІТ-систем та відповідно обсягів їхніх формальних моделей, повна детермінована перевірка мереж Петрі є малопридатною для практичного використання. Щоб зменшити обчислювальні витрати зі збереженням прийнятного рівня достовірності отриманих результатів, запропоновано метод статистичної валідації специфікацій, який базується на стохастичному виборі переходів у моделі за принципом Монте-Карло.

Розроблений метод статистичної валідації специфікацій ґрунтується на випадковому виборі підмножини переходів та маркерів у мережі Петрі згідно з імовірнісним розподілом, який відображає частоту їхнього реального використання у системі. Замість повного аналізу простору станів виконується статистично обґрунтована вибірка сценаріїв – траєкторій зміни станів, що репрезентують найтиповіші або критичні шляхи виконання процесів. Такий підхід дає змогу зменшити обсяг симуляцій, оцінити імовірність виникнення помилок у переходах і забезпечити контроль рівня довіри до отриманих результатів.

Введемо такі основні позначення:

- $T = \{t_j, j = \overline{1,N}\}$ – множина переходів мережі Петрі;
- $M = \{m_i, i = \overline{1,k}\}$ – множина досяжних маркувань;
- $W = \{w_i, i = \overline{1,k}\}$ – імовірність активації переходу t_j у системі (отримана з історичних даних або експертної оцінки);
- N – кількість ітерацій (симуляцій) у методі Монте-Карло.

Для кожної симуляції формується випадкова послідовність переходів:

$$\boldsymbol{S} = \left\{ S_j = \{t_{i,j}, i = \overline{1,M}\}, j = \overline{1,N} \right\},$$

яка визначає одну можливу траєкторію функціонування системи. На основі аналізу множини $\{S_j\}$ обчислюються три ключові статистичні показники – покриття, достовірності та похибки.

Показник покриття (Coverage) – це метрика, яка визначає частку елементів моделі, що були активовані хоча б один раз у процесі стохастичної симуляції, та використовується для оцінювання повноти валідації формалізованої моделі специфікації. Показник покриття визначають за формулою [11]

$$C = \frac{\{N_v\}}{\{N_t\}},$$

де: N_v – кількість переходів, що були активовані хоча б раз у вибірці; N_t – загальна кількість переходів у моделі. Показник C відображає частку частин моделі, які пройшли валідацію.

Показник достовірності (Confidence) – це метрика, яка визначає статистичну ймовірність отримання коректного результату в процесі стохастичної валідації та відображає рівень впевненості у правильності поведінки формалізованої моделі специфікації. Обчислюється як відносна частка успішних симуляцій, визначають за формулою [11]

$$P = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} R_j,$$

де: R_j – результат перевірки для j-ї симуляції (0 – помилка, 1 – успіх); N – загальна кількість симуляцій. Величина $P \in [0,1]$ є емпіричною оцінкою математичного сподівання випадкової величини R: $E(R)=P$.

Отже, P характеризує рівень статистичної довіри до отриманих результатів. У практичних застосуваннях зазвичай вважають, що модель є статистично валідованою при $P \geq 0{,}95$.

Показник похибки (Error rate) – це метрика, яка визначає відносну частоту сценаріїв (трас симуляції), у яких виявлено розбіжність між очікуваною та фактичною поведінкою формалізованої моделі специфікації, визначають за формулою [11]

$$E = \frac{\{N_e\}}{\{N\}},$$

де: N_e – кількість симуляцій, у яких виявлено розбіжність між очікуваною і фактичною поведінкою системи. Цей показник відображає відносну частоту виявлених помилок.

Алгоритм реалізації методу містить такі кроки:

Крок 1. Побудова або імпорт мережі Петрі. На основі специфікацій та вимог формується модель мережі Петрі $PN = (P, T, F, M_0)$, де F – множина дуг, а M_0 – початкове маркування.

Крок 2. Визначення розподілу імовірностей переходів.

Імовірності w_i задаються за результатами аналізу історичних даних, експертних оцінок або рівномірного розподілу, якщо інформація відсутня.

Крок 3. Генерування сценаріїв методом Монте-Карло. Виконується N симуляцій моделі. У кожній ітерації випадково обирається послідовність переходів згідно з w_i та фіксуються результати виконання.

Крок 4. Оцінювання результатів симуляцій. Для кожного сценарію перевіряється досягнення цільових станів, відсутність зациклення або deadlock-ситуацій. Результати реєструються у вигляді бінарних значень R_j.

Крок 5. Розрахунок показників C, P і E. Отримані значення агрегуються для оцінювання рівня покриття, достовірності та похибки.

Крок 6. Прийняття рішення щодо достатності валідації формалізованої моделі специфікації. Якщо $C \geq$

$C_{min,}$ та $P \geq P_{порог}$, модель вважають статистично валідованою. У протилежному разі кількість симуляцій N збільшується, або уточнюється розподіл w_i.

Стохастичний вибір переходів базується на ймовірнісному принципі активації. Для кожного переходу t_i обчислюється накопичена функція розподілу [11]:

$$F(t_i) = \sum_{k=1}^{i} w_k \text{ , де } \sum_{i=1}^{n} w_i = 1 .$$

Під час кожної симуляції генерується випадкове число $r \in [0,1]$, після чого активується перший перехід t_i, для якого виконується умова $F(t_i - 1) < r \leq F(t_i)$. Цей процес повторюється до досягнення кінцевого стану або максимальної довжини сценарію L_{max}.

Отже, система генерує послідовності подій, імовірність появи яких відповідає їхній частоті у реальному середовищі. Це забезпечує репрезентативність симуляцій і дає змогу виявляти аномалії у поведінці системи навіть без повного перебору всіх можливих станів.

Застосування описаного методу дає змогу:

- скоротити обсяг аналізованих сценаріїв у кілька разів (за результатами експериментальної апробації методу) порівняно з повною валідацією;
- отримати статистично достовірну оцінку коректності вимог до системи;
- виявляти критичні розбіжності з високою ймовірністю навіть у частковій вибірці;
- інтегрувати стохастичну валідацію в CI/CD-процеси реінжинірингу IT-систем.

Експериментальне дослідження. Для побудови Petri-мережі структуровано наявну специфікацію за CCR (англ. *Consumer Credit Report*) продукту на три логічні підсистеми:

1. Input & Common Validation – це перевірки коректності запиту, SSN/DOB/адреси, customer member number, режимів доступу тощо; а також класифікація помилок (англ. Common Validity Errors, Business Rules Errors, Processing Errors). Ці вимоги закладають підмережу початкових валідацій та гілку оброблення помилок.
2. Business Logic – правила "Hit Code", ідентифікації (DOB/AGE), оброблення розділу Trades (баланс, ліміти, "dangling trades"), медичні винятки, OFAC/FraudIQ тощо. Саме ця частина визначає основні переходи та умови гальмування/приглушення полів у вихідному звіті.
3. Output Composition & Error Handling – правила формування виходу (JSON/STS/TV), сортування/відображення сегментів, коди помилок CERR і несумісності опціональних фіч. Це утворює підмережу завершення/маршрутизації та замикає цикл валідації формалізованої моделі вимог на основі мереж Петрі.

Ключові приклади джерельних правил, які було інстанційовано у переходи мережі Петрі:

- hit Code Rules – відображення вербійджів, придушення дублів особливих кодів;
- identification – взаємовиключний вивід DOB/AGE, коригування для невалідних дат, обмеження віку;
- trades – бланкінг *monthsReviewed*, *balance*, *highCredit* та *creditLimit* за значеннями *rateStatus/activityDesignator*; визначення *dangling trade* і наслідки для полів;
- common/basic CERR – типові помилки на вхідних даних (неправильні коди, недостатньо даних, неавторизовані сценарії);
- OFAC та FraudIQ/SSN Alert – умови повернення OFAC у звіті; випадки, коли OFAC не повертається; формат викликів; правила обчислення SSN Alert.

Отримана PN-модель містить ≈250 позицій (P) і ≈400 переходів (T), де:

- позиції відповідають станам даних/готовності до застосування певного правила (наприклад, P_input_ok, P_id_ok, P_trades_ready, P_ofac_needed, P_output_ready);
- переходи – конкретним правилам/перевіркам (наприклад, T_validate_DOB_AGE, T_apply_hit_code, T_balance_blank_if_rate, T_suppress_highcredit, T_ofac_return, T_error_CERR034). Приклад: T_dangling_trade_detect спрацьовує, якщо виконуються всі умови з певного розділу специфікації (rate in {0,1}, balance>0 з урахуванням попередніх правил, pastDue=0/blank, internal update=on, dateReported>6 m із підстрахуванням dateLastActivity), після чого виконується бланкінг низки полів.

Для застосування Монте-Карло здійснено такі налаштування:

- ваги переходів w_i задавалися за емпіричною схемою: часті "вхідні"/"базові" перевірки мали вищі вагомості, рідкі – нижчі; частина вагомостей нормувалась у межах підмереж ($\sum w=1$);
- кількість симуляцій: N = 10000 та N = 20000;
- обмеження довжини трас: L_{max} = 120 переходів на один клієнтський запит (типова верхня межа для проходження всіх релевантних гілок: input ->business -> output);
- критерії успішності: досягнення P_output_ready без конфліктів правил, узгодженість полів відповідно до умов бланкінгу/придушення, відсутність взаємовиключних артефактів (наприклад, DOB і Age одночасно у заборонених конфігураціях; некоректна присутність OFAC при riskModelCodeOnly=M);
- порівняння: повний аналіз станів (еталон) vs статистичний (пропонований).

Для оцінювання ефективності статистичної вибірки проведено порівняльний аналіз результатів повної перевірки та моделювання методом Монте-Карло (таблиця).

Таблиця. Результати порівняння повної перевірки та статистичної валідації моделі мережі Петрі методом Монте-Карло / Comparison of full verification and Monte Carlo-based statistical validation results for the Petri net model

Підхід	Перевірені переходи	Тривалість аналізу, с	Покриття, C	Достовірність, P	Похибка, E
Повна перевірка	400	4 960	1,000	1,000	0,000
Монте-Карло, N = 10000	368	670	0,920	0,961	0,039
Монте-Карло, N = 20000	389	1 255	0,973	0,975	0,025

Як видно з цієї таблиці, зі збільшенням кількості симуляцій N показники C та P зростають, а значення показника E зменшується, що свідчить про збіжність результатів і підвищення статистичної достовірності.

Аналіз отриманих результатів дослідження. Найчастіше активовані підмережі (за часткою наявних трас) були такі:

- *input/Common Validation* (CERR-класи, частковий SSN, нормалізація імен) – 99 % трас;
- *identification* (*DOB/AGE*) – 88-92 % (залежно від сценаріїв недійсних дат).
- *trades* (*balance/highCredit/creditLimit blanking; dangling*) – 74-81 %;
- *hit Code* – 61-67 % (з урахуванням логіки дублів/придушення);
- *OFAC/FraudIQ* – 35-42 % (умови повернення/винятки).
- Виявлено певні конфлікти, як-от:
- date of birth (DOB)/Age взаємовиключність: частина трас породжувала одночасний вивід DOB і Age у конфігураціях, де це заборонено – симулятор позначав такі траси як помилкові, що збільшувало E. Після уточнення гвар-

дій переходу T_validate_DOB_AGE (пріоритет DOB над Age) – частка помилок знизилась;
- dangling trades: у 3-5 % трас моделювання позначало "висячі" трейді з подальшим бланкінгом набору полів, як цього вимагає правило 11.26 з CCR специфікацій; в окремих сценаріях виявлено конфлікт із паралельним "High Credit Rule" до бланкінгу – це дало змогу відкоригувати порядок застосування переходів у підмережі Trades;
- OFAC suppression при riskModelCodeOnly=M: знайдено одиничні траси з некоректним поверненням OFAC, що свідчило про відсутність відповідної гвардії на переході T_ofac_return. Додавання умови з правила 18.5 усунуло проблему;
- CERR-несумісності опціональних фіч (034): симуляції породили сценарії з Optional Feature Code "G" у конфігураціях, де він заборонений (формати кредитний звітів "T1"/"T4"/"T6"), що коректно призводило до переходів помилок CERR034. Це підтвердило життєздатність гілки оброблення помилок.

Аналіз чутливості, виконаний на основі експериментальних даних, показує такі метрики. Зі збільшенням N від 10 тис. до 20 тис.

- C зростає від 0,920 до 0,973;
- P – від 0,961 до 0,975;
- E зменшується від 0,039 до 0,025;
- час – ~1,9×, що підтверджує передбачувану "квазілінійну" вартість зі зростанням вибірки. За емпіричною оцінкою достатньо $N \approx 12 – 15$ тис., щоби досягти $C \geq 0{,}95$ та $P \geq 0{,}965$ для CCR-моделі описаного масштабу.

Побудова PN-моделі безпосередньо з правил CCR і подальша статистична валідація показали, що

- метод надійно виявляє конфлікти та "сірі зони" специфікації (взаємовиключність полів, конкуренція бланкінг-правил, виняткові OFAC-сценарії);
- забезпечує високе покриття критичних гілок бізнес-логіки за істотно меншого часу, ніж повна верифікація;
- надає кількісні індикатори якості специфікації (*C, P, E*), які можна використовувати під час ревізій правил (наприклад, для Trades/HitCode/OFAC/Identification).

Отже, стохастична вибірка сценаріїв для CCR-специфікації, побудована на детальних правилах SRS, дає статистично обґрунтоване наближення до повної перевірки, зберігаючи коректну інтерпретацію вимог (бланкінги та придушення полів (blanking, suppression), коди помилок і хітів (error and hit codes), винятки (exceptions)). Це робить метод придатним для регулярних ревізій та еволюції правил продукту.

Отримані результати моделювання (див. таблицю) на основі правил документації CCR (англ. *Consumer Credit Report*) (SRS v 1.1.28) підтвердили, що розроблений метод статистичної валідації формалізованої моделі специфікації є ефективним інструментом для оцінювання якості та узгодженості специфікацій. На відміну від класичної ручної перевірки правил, застосування стохастичної моделі мережі Петрі дає змогу не тільки виявляти логічні суперечності, але й кількісно оцінювати їхній вплив – через метрики покриття C, достовірності P та похибки E.

Статистична симуляція продемонструвала, що близько 90 % усіх бізнес-правил CCR беруть участь у типових сценаріях опрацювання даних. Решта 10 % виявилися "неактивними" – тобто не спрацьовують за жодного реалістичного набору умов, що вказує на можливу надлишковість або застарілість окремих вимог у SRS. Наприклад, правила з розділів *11.29 High Credit Rule* та *11.26 Dangling Trade* іноді активувалися взаємовиключно, створюючи конфлікт бланкінгу для полів *balance* та *highCredit*. Аналогічно, у моделі *Identification* (*4.1*) статистичне моделювання показало, що за певних конфігурацій вхідних даних відбувається одночасне відображення *DOB* і *Age*, що прямо суперечить вимозі специфікації. Виявлення таких випадків на рівні PN-моделі дає змогу зафіксувати не тільки факт помилки, а й її частоту (наприклад, 3-5 % трас), що є важливим для пріоритизації виправлень.

Під час валідації логічних зв'язків у специфікації побудована мережа Петрі дала змогу простежити причинно-наслідкові зв'язки між перевірками – від початкових правил валідації даних до вихідних правил складання звіту. Статистична симуляція показала, що більшість залежностей (Input Validation → Business Rules → Output Formatting) відпрацьовують стабільно з високим рівнем достовірності ($P > 0{,}96$). Водночас, у підмережі OFAC and FraudIQ зафіксовано сценарії з некоректним поверненням OFAC flag при riskModelCodeOnly = M, що вказує на відсутність перевірки в логіці переходу T_ofac_return.

Такі знахідки є типовим прикладом виявлення суперечностей між бізнес-правилами та умовами їхнього застосування, які складно відстежити за ручного рецензування SRS.

Використання метрик C, P та E дає змогу формувати набір кількісних показників якості специфікації:

- $C = 0{,}97$ – відображає ступінь покриття бізнес-правил у тестових сценаріях;
- $P = 0{,}975$ – характеризує узгодженість логіки між підрозділами правил;
- $E = 0{,}025$ – показує частку некоректних або суперечливих трас.

Завдяки цим метрикам аналітики можуть визначати, які ділянки SRS потребують ревізії, та моніторити динаміку змін між версіями документа (наприклад, між останніми версіями SRS документа, який використовувався для роботи – 1.1.27 та 1.1.28) у вигляді кількісних дельт: ΔC, ΔP, ΔE.

Метод показав, що валідацію можна виконувати на рівні тексту специфікації, ще до етапу реалізації. Перетворення вимог CCR на модель Петрі створює інструмент формальної перевірки структури та логіки документації. Тому статистичну валідацію формалізованої моделі специфікації можна застосовувати:

- для ревізії правил і виявлення дублювань у SRS;
- для оцінювання впливу змін у нових релізах продукту;
- для ідентифікації критичних гілок логіки, що мають найвищу ймовірність помилок;
- як частину процесу підтримки консистентності документації між технічними командами (аналітики, розробники, тестувальники).

Отже, розроблений стохастичний метод статистичної валідації специфікацій у реінжинірингу IT-проєктів довів свою ефективність як засіб формальної ревізії специфікацій бізнес-правил. Він забезпечує кількісні показники якості документації, дає змогу виявляти суперечності між правилами та надає статистично обґрунтовані дані для ухвалення рішень під час реінжинірингу. У випадку Consumer Credit Report метод дав змогу оцінити узгодженість понад 400 правил із достовірністю понад 95 %, що підтверджує можливість його практичного використання для регулярного аудиту й еволюції SRS-документації.

Обговорення результатів дослідження. Отримані в роботі результати підтверджують доцільність застосування стохастичної валідації на основі мереж Петрі для аналізу складних специфікацій у завданнях реінжинірингу ІТ-проєктів. Значення метрик покриття *C*, достовірності *P* та похибки *E*, отримані внаслідок моделювання методом Монте-Карло, демонструють збіжність статистичних оцінок до результатів повної перевірки зі зростанням кількості симуляцій *N*. Така поведінка узгоджується із загальними властивостями методу Монте-Карло, відповідно до яких збільшення обсягу вибірки приводить до зменшення статистичної похибки оцінок зі збереженням прийнятних обчислювальних витрат [10].

Порівняння запропонованого підходу із класичними методами аналізу мереж Петрі показує істотну відмінність у масштабованості. Детерміновані методи верифікації, зокрема – перевірка на основі розгорток (unfoldings), забезпечують формальну повноту аналізу, однак на практиці стикаються з проблемою вибуху простору станів за зростання кількості переходів і маркувань, що істотно обмежує їх застосування для моделей великої розмірності [19]. У випадку специфікацій промислового рівня, які містять сотні взаємопов'язаних бізнес-правил, повна перевірка стає обчислювально надмірною.

На відміну від повної верифікації, запропонований у роботі метод ґрунтується на стохастичній інтерпретації поведінки моделі, що узгоджується з підходами Statistical Model Checking [11]. У межах таких підходів властивості системи оцінюються не шляхом аналізу всіх можливих трас, а на основі статистично обґрунтованої вибірки сценаріїв виконання. Результати дослідження підтверджують, що навіть за часткової вибірки трас можливо з високою ймовірністю виявляти критичні конфлікти у специфікаціях, зокрема – взаємовиключні умови, конкуренцію правил бланкінгу та виняткові сценарії оброблення даних.

Порівняно із сучасними роботами, де проаналізовано стохастичні та узагальнені стохастичні мережі Петрі, у яких основний акцент зроблено на оцінюванні продуктивності та часових характеристик систем [12], у цьому дослідженні стохастичний апарат застосовано для задач валідації логіки специфікацій. Такий підхід розширює сферу використання стохастичних мереж Петрі, даючи змогу застосовувати їх не тільки для аналізу динаміки систем, але й як інструмент формальної ревізії вимог і бізнес-правил.

Отримані результати також узгоджуються із сучасними прикладними дослідженнями, у яких розширені моделі мереж Петрі застосовуються для аналізу складних програмних середовищ. Зокрема, у роботі [15] продемонстровано ефективність використання кольорових мереж Петрі для аналізу факторів автоматизації супроводу програмних комплексів. На відміну від зазначеного підходу, у цьому дослідженні акцент зроблено не на аналізі структури або балансуванні навантажень, а на статистичній валідації логіки специфікацій, що дає змогу кількісно оцінювати узгодженість бізнес-правил за умов зменшення обчислювальних витрат.

Отримані експериментальні результати також демонструють практичну цінність запропонованого методу для аналізу змін між версіями специфікацій. Використання метрик *C*, *P* та *E* у поєднанні з аналізом їхніх відносних змін дає змогу кількісно оцінювати вплив модифікацій правил на загальну узгодженість документації. Такий підхід є складним для реалізації в межах ручної експертної ревізії або традиційного тестування, що узгоджується із сучасними підходами до управління вимогами та контролю їх якості [6].

Водночас, потрібно зазначити, що точність статистичної валідації залежить від коректності задання ймовірностей активації переходів та вибору параметрів симуляції. Подібні обмеження характерні й для інших стохастичних методів аналізу моделей на основі мереж Петрі [1]. Проте зазначені обмеження компенсуються істотним виграшем у масштабованості та можливістю інтеграції методу у процеси регулярної ревізії специфікацій у середовищах безперервного розвитку ІТ-систем.

Внаслідок обговорення результатів дослідження з'ясовано, що стохастична валідація на основі мереж Петрі є ефективною альтернативою повній перевірці реінжинірингу ІТ-проєктів для аналізу специфікацій великої розмірності. Запропонований підхід поєднує формальність моделювання з практичною застосовністю, що робить його придатним для використання на ранніх етапах життєвого циклу ІТ-проєктів, зокрема – під час реінжинірингу та еволюції вимог.

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – вперше розроблено метод статистичної валідації специфікацій у процесі реінжинірингу ІТ-проєктів, основою якого є стохастичний аналіз мереж Петрі, що дає змогу зменшити обчислювальні витрати на перевірку великих моделей зі збереженням потрібного рівня достовірності отриманих результатів.

Практична значущість результатів дослідження – можна використати для автоматизації процесів валідації специфікацій у складних ІТ-системах, зокрема – під час реінжинірингу та еволюції бізнес-правил, шляхом інтеграції стохастичної валідації у процедури аналізу вимог і контролю якості документації.

Висновки / Conclusions

Розроблено та обґрунтовано метод статистичної валідації специфікацій на основі стохастичного аналізу мереж Петрі, який дає змогу зменшити обчислювальні витрати на перевірку великих моделей мереж Петрі за умови збереження потрібного рівня достовірності отриманих результатів, а також створить передумови для автоматизації процесу валідації специфікацій у складних ІТ-системах. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Проаналізовано обмеження традиційних детермінованих методів перевірки мереж Петрі за моделювання великих систем, що дало можливість обґрунтувати недоцільність повного перебору простору станів для моделей промислового масштабу та сформулювати вимоги до альтернативних, масштабованих підходів валідації специфікацій ІТ-проєктів.
2. Розроблено математичний метод стохастичної вибірки переходів і подій на основі методу Монте-Карло, який забезпечує вибіркову валідацію поведінки моделей мереж Петрі з контрольованим рівнем достовірності за істотно менших обчислювальних витрат.
3. Визначено статистичні показники ефективності процесу валідації специфікацій, поданих у вигляді мереж Петрі, а саме – покриття *C*, достовірність *P* та ймовірність помилки *E*, що забезпечує кількісну оцінку якості перевірки та обґрунтоване прийняття рішень щодо достатності валідації специфікацій ІТ-проєктів.

4. Проведено експериментальне дослідження запропонованого методу на прикладі реальної, наближеної до промислової, мережі Петрі, яка описує процес інженерії вимог до складної ІТ-системи, що підтвердило практичну придатність методу та його ефективність у прикладному контексті.
5. Порівняно результати статистичної та повної валідації специфікацій за показниками тривалості перевірки, використання обчислювальних ресурсів і точності отриманих результатів, що дало можливість об'єктивно оцінити переваги запропонованого підходу для валідації великих моделей мереж Петрі.
6. Розроблено рекомендації з інтеграції статистичного аналізу в життєвий цикл розроблення та реінжинірингу ІТ-проєктів, спрямовані на підвищення масштабованості процесу валідації специфікацій, зменшення витрат на перевірку вимог і покращення якості технічної документації.

References

1. Beccuti, M., Balbo, G., & Franceschinis, M. G. (2024). Analysis of stochastic Petri nets with silent transitions. Performance Evaluation, vol. 174, article ID 102280. https://doi.org/10.1016/j.is.2024.102383
2. Esparza, J. (1994). Model checking using net unfoldings. Science of Computer Programming, *23*(2-3), 151–195. https://doi.org/10.1016/0167-6423(94)00019-0
3. Esparza, J., & Heljanko, D. (2008). Unfoldings – A Partial-Order Approach to Model Checking. Lecture Notes in Computer Science, vol. 4931, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1–335. URL: https://www7.in.tum.de/~esparza/Unfoldings-Esparza-Heljanko.pdf
4. Fishman, G. (1996). *Monte Carlo: Concepts, Algorithms, and Applications*. Springer, 698 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2553-7
5. Giua, A. (2018). Petri nets and Automatic Control: A historical perspective. *Annual Reviews in Control*, vol. 45, pp. 223–239. https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.04.006
6. IIBA (International Institute of Business Analysis), A Guide to the Business Analysis Body of Knowledge (BABOK Guide), 3rd ed., (2015). International Institute of Business Analysis, Toronto, Ontario, Canada, 514 p. URL: https://www.iiba.org/standards-and-resources/babok/
7. Kernytskyy, O. B. (2023). Application of Petri nets in the development of specifications and requirements in the process of IT projects reengineering. *Itelligent Computer Systems and Networks: Proceedings of the VIII Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students*, pp. 31–32. [In Ukrainian]. URL: https://ki.wunu.edu.ua/conference/archive/2023_2.pdf
8. Kernytskyy, O. B., & Teslyuk, V. M. (2023). The synthesis method for specifications and requirements in the process of it project reengineering. *Ukrainian Journal of Information Technology*, *5*(2), 01–08. https://doi.org/10.23939/ujit2023.02.001
9. Kernytskyy, O., Kernytskyy, A., & Teslyuk, V. (2023). The Synthesis Method for Specifications and Requirements in the Process of IT Project Reengineering. *Proceedings of the 18th Annual International Conference Computer Science and Information Technologies* (CSIT 2023), pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/CSIT61576.2023.10324175
10. Kroese, R. E., Brereton, T., Taimre, S., & Botev, Z. I. (2014). *Why the Monte Carlo method is so important today. WIREs Computational Statistics*, *6*(6), pp. 386–392. https://doi.org/10.1002/9781118631980
11. Legay, A., Delahaye, B., & Bensalem, S. (2015). Statistical Model Checking: An Overview. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, vol. 17, 351–372. https://doi.org/10.1007/s10009-014-0361-y
12. Martínez-Álvarez, M., Muñoz, J. L., & García, A. B. (2024). Generalized stochastic Petri net-based performance analysis of a Wi-Fi network probe. *Computer Networks*, vol. 242, article ID 109897. https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2024.103683
13. Metropolis, T., & Ulam, S. (1949). The Monte Carlo Method. Journal of the American Statistical Association, *44*(247), 335–341. https://doi.org/10.1080/01621459.1949.10483310
14. Murata, T. (1989). Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. *Proceedings of the IEEE*, *77*(4), 541–580. https://doi.org/10.1109/5.24143
15. Pukach, A., & Teslyuk, V. (2024). Analysis of Software Complexes Support Automation Impact Factors with Usage of Colored Petri Nets. *Journal of Lviv Polytechnic National University "Information Systems and Networks"*, *16*, 88–103. https://doi.org/10.23939/sisn2024.16.088
16. Pukach, A., & Teslyuk, V. (2025). Colored Petri nets based balancing model for multisubject polyfactor software support environments. *Scientific Bulletin of UNFU*, *35*(2), 156–162. https://doi.org/10.36930/40350218
17. Reisig, W. (2013). *Understanding Petri Nets – Modeling Techniques, Analysis Methods*. Case Studies, Springer, 466 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33278-4
18. Schlingloff, H., & Petrenko, A. (2015). Black-Box Testing of Communicating Systems. *Proceedings of the 5th International Conference Application of Concurrency to System Design*. St. Malo, France, pp. 164–173. https://doi.org/10.1109/ACSD.2005.20
19. Xiong, D. (2021). An Incremental and Backward-Conflict Guided Method for Petri Net Unfolding-based Verification. *Symmetry*, *13*(3), article ID 392. https://doi.org/10.3390/sym13030392

O. B. Kernytskyy, V. M. Teslyuk

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

MODELLING THE PROCESS OF SPECIFICATION VALIDATION IN IT PROJECT REENGINEERING BASED ON STATISTICAL ANALYSIS OF PETRI NETS

This study addresses the challenge of validating specifications during IT project reengineering in the presence of large-scale, rule-intensive system models. The research proposes a statistical validation method for specification based on Petri net modeling combined with Monte Carlo simulation to overcome the scalability limitations of exhaustive, deterministic state-space exploration. The study constructs a formal Petri net representation of specification rules and applies probabilistic sampling of execution traces, consequently enabling selective verification of system behavior under realistic operational scenarios. In this context, validation is performed on the formal behavioral model derived from the specification, rather than on the specification document itself. The Petri net model represents logical dependencies and execution semantics of specification rules, allowing validation at the level of system behavior and rule interactions. Moreover, the method introduces quantitative validation metrics, including transition coverage, confidence level, and error rate, which allow systematic assessment of specification consistency and logical correctness. The proposed approach was evaluated using a real-world specification of the Consumer Credit Report system (SRS v1.1.28), where system inquiries validation rules, business logic, and output composition constraints were encoded *AS* Petri net structures. *AS* a result, the statistical validation achieved more than 90 % transition coverage with confidence levels exceeding 95 %, while reducing analysis time by a factor of seven to eight compared to full deterministic verification. Furthermore, the approach enabled identification of conflicting, redundant, and inactive specification rules and provided measurable insight into their frequency and impact on system behavior. The benefits of this study include improved scalability of specification validation, quantitative evaluation of documentation quality, and practical

support for iterative specification revision during system modernization. Consequently, the proposed method can be integrated into early-stage reengineering workflows and continuous quality assurance processes, while future research will focus on extending the approach to colored Petri nets and automated tool support for large industrial systems.

Keywords: IT project reengineering; statistical analysis of Petri nets; Monte Carlo method; validation of IT project specifications; synthesis of IT project requirements; probabilistic modelling.