

DOI: 10.20998/2079-0023.2026.01.06
УДК 004.9

К. Е. ПЕТРОВ, доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри інформаційних управляючих систем, м. Харків, Україна; e mail: kostiantyn.petrov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1973-711X>

Т. В. ЧАЛИЙ, аспірант кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, taras.chalyi@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3796-5810>

КОНТРАФАКТИЧНА МОДЕЛЬ МЕДИЧНОГО БІЗНЕС-ПРОЦЕСУ

Предметом дослідження є медичні бізнес-процеси. Мета роботи полягає у розробці контрафактичної моделі медичного бізнес-процесу з тим, щоб забезпечити можливість вибору альтернативних рішень при наданні первинної медичної допомоги, подальшого амбулаторного лікування, а також клінічного шляху та реабілітації. Досягнення мети орієнтовано на забезпечення гнучкості медичних бізнес-процесів в умовах ресурсних, фінансових і регуляторних обмежень. Для досягнення мети вирішуються наступні задачі: розробити формальну структуру контрафактичної моделі медичного бізнес-процесу як розширення ситуаційної моделі узагальненого медичного бізнес-процесу, з включенням каузальних залежностей та системи темпоральних правил, що описують допустимі послідовності подій і часові інтервали між ними; виконати експериментальну перевірку системи клінічних обмежень, що задає простір можливих контрафактичних сценаріїв. Запропоновано контрафактичну модель медичного бізнес-процесу, яка на відміну від існуючих поєднує ситуаційну структуру медичного бізнес-процесу, каузальний граф причин для виконання дій процесу, систему обмежень, що визначають можливість реалізації траєкторій процесу згідно клінічних протоколів, а також темпоральні правила, що визначають послідовність подій медичного бізнес-процесу у часі. Експериментальна перевірка моделі з урахуванням системи обмежень, каузального графу та темпоральних правил підтвердила зменшення частки клінічно неприйнятних сценаріїв у порівнянні з традиційним підходом до побудови контрафактичних пояснень. Подальший розвиток запропонованої контрафактичної моделі медичного бізнес-процесу пов'язаний із розробкою інформаційної технології підтримки прийняття рішень у медичних бізнес-процесах для побудови індивідуалізованих маршрутів лікування з урахуванням потреб пацієнта та обмежень системи охорони здоров'я.

Ключові слова: медичний бізнес-процес; контрафактична модель; ситуаційна модель; структурна причинна модель; темпоральні правила; клінічні обмеження; темпоральні обмеження; індивідуалізоване лікування.

Вступ. Бізнес-процес (БП) включає послідовність процедур зі створення продукту або послуги, що становить цінність для користувача [1]. Цикл управління бізнес-процесами включає етапи аналізу діяльності організації у процесному аспекті, побудову та подальшу реалізацію моделей бізнес-процесів, моніторинг БП й удосконалення моделей БП за результатами моніторингу. У процес удосконалення процесу враховуються ресурсні, фінансові і темпоральні обмеження на зв'язки між процедурами процесу [2].

Медичні бізнес-процеси (МБП) є класом БП, що інтегрують послідовність дій з надання медичної допомоги, починаючи з первинного звернення пацієнта й до виписки й подальшого за ним спостереження. МБП включають діагностичні, лікувальні, а також реабілітаційні та адміністративні процедури.[3] Ключова особливість медичних процесів полягає в необхідності та важливості враховувати індивідуальні особливості пацієнта та динаміку клінічної ситуації, що потребує розробки процесних моделей, які дають можливість адаптувати послідовність і параметри процедур за умови збереження узгодженості з клінічними протоколами та наявними ресурсними обмеженнями медичного закладу [4] Це істотно ускладнює моделювання.

МБП може бути представлений на основі ситуаційної моделі. Остання містить послідовність ситуацій, у кожній із яких здійснюється вибір альтернатив виконання процедур з комплексу обмежень[5]. За результатами вибору приймається рішення щодо виконання подальших дій МБП з урахуванням доступних ресурсів, часу лікування та клінічних обмежень. Дії МБП реалізують послідовність фаз первинної медичної допомоги, подальшого амбулаторного лікування, а та-

кож клінічного шляху та реабілітації. Комбінації цих фаз утворюють альтернативні траєкторії виконання МБП [6]

Разом із тим процесний аналіз у сучасних медичних інформаційних системах здебільшого зосереджується на виявленні відхилень від стандартизованих моделей (conformance checking) та не забезпечує автоматизованого формування клінічно здійснених альтернативних траєкторій [7–9]. Контрафактичний аналіз, який розглядає альтернативні сценарії типу «що було б, якби певне рішення було змінено», активно застосовується для пояснення рішень моделей машинного навчання, але не враховує обмежень медичної сфери, пов'язані із ризиком для здоров'я людини [10, 11].

Таким чином, розробка контрафактичних моделей медичних бізнес-процесів дає можливість забезпечити індивідуалізацію медичної допомоги з урахуванням наявних ресурсних і фінансових обмежень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні підходи до моделювання бізнес-процесів орієнтовані на формування набору можливих послідовностей дій, що забезпечують досягнення цільового стану системи процесного управління. Послідовності дій описуються як послідовності активностей у складі підпроцесів з використанням стандартизованих нотаций, таких як BPMN [5, 7, 8].

У дослідженні з управління бізнес-процесами структурується повний життєвий БП, починаючи з визначення цілей, планування, побудов процесної моделі, й до виконання і моніторингу та подальшого удосконалення з використанням інтелектуального аналізу процесів на основі даних із журналів подій процесу [1, 7].

© Петров К. Е., Чалий Т. В., 2026



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



У сфері медичних бізнес-процесів процесний підхід використовується для підвищення якості медичних послуг, зменшення кількості помилок, скорочення часу очікування, оптимізації використання ресурсів та покращення координації між різними рівнями медичної допомоги [2, 3, 5]. Застосування інтелектуального аналізу процесів у МБП дає можливість виявляти вузькі місця, раціоналізувати маршрути пацієнтів та стандартизувати процес їх лікування та подальшої реабілітації. Проте вирішення цих задач потребує розробки гнучких процесних моделей, призначених для індивідуалізації лікування [2, 4, 9].

В групі медичних бізнес-процесів окремо розглядаються клінічні шляхи (clinical pathways), шляхи догляду за пацієнтами (care pathways) та шляхи лікування захворювання (disease management), що відображають різні аспекти надання медичної допомоги [4–6]. Традиційний підхід до виділення клінічних шляхів сприяє зниженню варіативності лікування і забезпечує передбачуваність його результатів, однак обмежує врахування індивідуальних потреб пацієнта та обмежень закладів охорони здоров'я [4, 5].

Контрфактичний аналіз зазвичай застосовується для пояснення рішень, отриманих в інтелектуальних системах, зокрема при вирішенні задач класифікації та прогнозування, де пропонуються методи генерації контрфактичних прикладів як альтернативних вхідних наборів даних, що змінюють результат моделі [10–12]. Дослідження щодо контрфактичних пояснень, підтверджують підвищення довіри лікарів до систем штучного інтелекту. Проте на практиці стандартні алгоритми часто не враховують незмінювані властивості пацієнта, а також клінічні протоколи, що може привести до формування неприйнятних сценаріїв виконання МБП [13, 14].

Представлена в [5] ситуаційна модель узагальненого медичного бізнес-процесу забезпечує вибір альтернативних сценаріїв. Проте у моделі не виділено контрфактичні сценарії та не визначено множину клінічних обмежень, які визначають можливості практичного застосування моделі.

Даний аналіз свідчить про практичну потребу у забезпеченні індивідуалізації лікування з урахування ресурсних обмежень на основі побудови медичних бізнес-процесів, проте існуючі методи до побудови БП орієнтовані на традиційні бізнес-процеси і не враховують важливість індивідуалізації медичного обслуговування на основі аналізу можливих альтернатив, представлених контрфактами, що і свідчить про актуальність дослідження.

Мета та задачі дослідження. Мета роботи полягає у розробці контрфактичної моделі медичного бізнес-процесу як подальший розвиток ситуаційного підходу до моделювання узагальненого медичного бізнес-процесу з тим, щоб забезпечити можливість вибору альтернативних рішень при лікуванні в клініці, при догляді та в рамках повного процесу лікування захворювання. Досягнення мети орієнтовано на забезпечення гнучкості медичних бізнес-процесів в умовах ресурсних, фінансових і регуляторних обмежень.

Для досягнення мети вирішуються такі задачі:

– розробити формальну структуру контрфактичної моделі медичного бізнес-процесу як розширення ситуаційної моделі узагальненого медичного бізнес-процесу, з включення каузальних залежностей та системи темпоральних правил, що описують допустимі послідовності подій і часові інтервали між ними;

– визначити та виконати експериментальну перевірку системи клінічних обмежень, що задає простір можливих контрфактичних сценаріїв.

Контрфактична модель медичного бізнес-процесу.

Ситуаційна модель узагальненого медичного бізнес-процесу задається з трійкою $\langle S, D_{in}, D_{out} \rangle$ із послідовності ситуацій S , а також множин вхідних D_{in} і вихідних D_{out} даних та може бути інтерпретована як «карта» етапів процесу, що містить дані про пацієнта до та після лікування.

Контрфактична модель CM розширює ситуаційне представлення, додаючи до нього множину альтернативних сценаріїв і систему обмежень, що можна розглядати як доповнення моделі множиною альтернативних варіантів виконання та набору обмежень, які відфільтровують неприйнятні варіанти. Контрфактична модель формально задається як кортеж:

$$CM = \langle S, D_{in}, D_{out}, CF, \Pi \rangle, \quad (1)$$

де CF – множина контрфактичних сценаріїв виконання МБП;

Π – система обмежень, що визначає можливість клінічної реалізації відповідних сценаріїв.

Кожний контрфактичний сценарій $cf \in CF$ інтерпретується як альтернативна траєкторія процесу із зміненними рішеннями у вибраних ситуаціях, але із збереженням послідовності ситуацій S . Відображення

$$\varphi : CF \rightarrow S^* \quad (2)$$

ставить у відповідність кожному сценарію послідовність ситуацій, які він виконує, що дозволяє інтерпретувати сценарії в термінах ситуаційного опису медичного бізнес-процесу. Якщо множини сценаріїв та обмежень не враховуються, то контрфактична модель спрощується до початкової ситуаційної моделі.

Важливим елементом контрфактичної моделі є структурна каузальна модель медичного бізнес-процесу. Дана модель визначає взаємний вплив один на одного факторів та подій у медичному бізнес-процесі. Модель представляється як орієнтований граф, де вершинами є клінічні фактори та рішення, а дугами є причинні залежності.

Формально така модель задається орієнтованим ациклічним графом $G = (V, E)$, де V – множина змінних (кроки лікування, стани пацієнта, результати), E – множина дуг, що задають причинно-наслідкові зв'язки між ними.

Для кожної змінної $X_i \in V$ задається функція f_i , яка визначає, як значення цієї змінної формується на

основі значень її батьківських (з урахуванням орієнтованості графа G) змінних та випадкових факторів ε_i :

$$X_i = f_i(\text{Pa}(X_i), \varepsilon_i), \quad (3)$$

де $\text{Pa}(X_i)$ – множина батьківських змінних для X_i ;

ε_i – стохастичне збурення, яке моделює невраховані фактори.

Це означає, що у МБП кожна подія та її результати мають «попередників», від яких вона залежить. На подію також може впливати випадкова складова.

Слід виділити приховані спільні причини, характерні саме для МБП. Такі причини одночасно впливають на вибір траєкторії лікування та кінцевий результат лікування.

Такими причинами, наприклад, може бути базовий стан здоров'я або супутні захворювання пацієнта.

Опис втручання дає можливість змінити певне рішення в моделі і оцінити відповідні зміни результату. Втручання позначається оператором *do*:

$$P(Y | do(X = x')), \quad (4)$$

де X – змінна, на яку здійснюється втручання (наприклад, вибір типу лікування);

x' – нав'язане значення;

Y – результат після втручання.

Для медичного бізнес-процесу це формалізоване втручання дає можливість оцінити відповіді на запитання типу: «яким був би результат лікування, якби замість варіанту $X = x$ було вибрано $X = x'$?». Множина допустимих втручань обмежується системою обмежень Π , зокрема обмеженнями на клінічні протоколи, що виключає сценарії, які суперечать медичним знанням

Система Π задає формальні правила, що визначають, які контрфактичні сценарії є неприйнятними з медичної точки зору. Множина Π включає обмеження щодо заборони змін стабільних характеристик пацієнта (вік, стать, базові анатомо-фізіологічні параметри), а також темпоральні обмеження. Останні формалізують допустимі часові відношення між клінічними подіями у вигляді темпоральних правил: наприклад, «після події 1 протягом не більше ніж t часу має відбутися подія 2 або 3» чи «подія 2 не може відбутися раніше за 1» [15, 16].

Темпоральний аспект контрфактичних сценаріїв у моделі задається системою формальних темпоральних правил над послідовностями подій медичного бізнес-процесу. Для кожної події визначається часовий інтервал Δ , в межах якого перевіряється виконання відповідних темпоральних правил. Темпоральне правило формулюється у вигляді імплікації: якщо на інтервалі події Δ зустрічається певний тригер (подія 1), то в цьому самому вікні протягом заданого часу повинна з'явитися хоча б одна з подій-наслідків (2 або 3). Сукупність темпоральних обмежень становить систему правил, які можуть бути представлені у вигляді формул лінійної темпоральної логіки.

Експериментальна перевірка розробленої моделі.

Експериментальна перевірка орієнтована на оцінювання ефективності системи обмежень для скорочення частки контрфактичних сценаріїв, що не можуть бути реалізовані згідно клінічних протоколів, порівняно з базовим методом контрфактичного пояснення DiCE [13]. В якості вхідних даних використано фрагмент логу медичного бізнес-процесу, що містить реалізовані траєкторії виконання МБП. Ці траєкторії охоплюють інформацію про характеристики пацієнта, послідовність виконаних процедур, їх тривалість.

На першому етапі перевірки створювались контрфактичні сценарії шляхом застосування допустимих втручань, які змінювали вибір процедур, їх порядок та тривалість, але не враховували обмеження Π .

Для кожного сценарію розраховувались агреговані показники вартості, тривалості та використання ресурсів. Аналогічно, за допомогою методу DiCE формувались контрфактичні варіанти без прив'язки до ситуацій.

На другому етапі до сценаріїв контрфактичної моделі та до DiCE-сценаріїв застосовувалась система обмежень Π . Спочатку відфільтровувались сценарії, що порушували обмеження щодо зміни незмінюваних характеристик пацієнта. В подальшому перевірялися темпоральні обмеження у формі темпоральних правил, що визначали відповідність часовим вимогам щодо порядку і допустимих лагів між діагностикою, лікуванням і контрольними оглядами.

Також застосовувались обмеження щодо відповідності бізнес-процесу вимогам клінічних протоколів. Результати експериментальної перевірки наведено в табл. 1.

Як видно з таблиці, при використанні базового методу DiCE понад половина згенерованих контрфактичних сценаріїв порушує принаймні одне з клінічних обмежень. Для розробленої моделі частка клінічно неприйнятних сценаріїв зменшується до 9 %.

Таблиця 1 – Порівняння виконання обмежень для контрфактичних сценаріїв медичного бізнес-процесу

| Підхід | Кількість згенерованих сценаріїв | Кількість клінічно неприйнятних сценаріїв | Частка клінічно неприйнятних сценаріїв, % |
|----------------------|----------------------------------|---|---|
| DiCE | 80 | 52 | 65 |
| Контрфактична модель | 80 | 7 | 9 |

Перевага розробленої контрфактичної моделі медичного бізнес-процесу полягає в тому, що контрфактичні сценарії формуються на рівні ситуаційної структури медичного бізнес-процесу, а не лише на рівні векторів ознак, як при традиційних підходах, що забезпечує виконання обмежень предметної області.

Отримані результати експерименту демонструють, що інтеграція системи обмежень у контрфактичну

модель дозволяє суттєво зменшити частку сценаріїв, що не можуть бути реалізовані порівняно з базовими методами контрфактичного пояснення. Тобто розроблена модель забезпечує урахування доменних обмежень у медичній сфері при побудові контрфактичних сценаріїв, що відображають альтернативні варіанти виконання медичних бізнес-процесів.

Використання комбінації каузальних та темпоральних залежностей дозволяє перевіряти коректність причинно-наслідкових залежностей, оскільки причина завжди в часі має передувати наслідку.

Можливості розробленої моделі суттєво залежать від повноти формалізації клінічних протоколів і темпоральних обмежень, а також доступності логів з темпоральними мітками. У предметних областях, де протоколи є неповними або неоднозначними, система обмежень потребує додаткового налаштування, а контрфактичні сценарії мають бути валідовані експертами.

Перспективними напрямками подальших досліджень є розширення застосування на інші види медичних бізнес-процесів, зокрема на мультидисциплінарні маршрути лікування пацієнтів, а також розробка інтегрованих метрик оцінки якості контрфактичних сценаріїв.

Висновки. Запропоновано контрфактичну модель медичного бізнес-процесу, яка поєднує ситуаційну структуру медичного бізнес-процесу, каузальний граф причин для виконання дій процесу, систему обмежень, що визначають можливість реалізації траєкторій процесу згідно клінічних протоколів, а також темпоральні правила, що визначають послідовність подій медичного бізнес-процесу у часі.

Експериментальна перевірка моделі з урахуванням системи обмежень, каузального графу та темпоральних правил виконана на прикладі даних з медичного бізнес-процесу, де показано істотне зменшення частки клінічно неприйнятних сценаріїв у порівнянні з базовим методом побудови контрфактичних сценаріїв.

Подальший розвиток запропонованої контрфактичної моделі медичного бізнес-процесу пов'язаний із розробкою інформаційних технологій підтримки прийняття рішень у медичних бізнес-процесах для побудови індивідуалізованих маршрутів лікування з урахуванням потреб пацієнта та обмежень системи охорони здоров'я.

Декларація про використання генеративного штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при написанні тексту цієї роботи.

Список використаних джерел інформації

1. Van der Aalst W. Business Process Management: A Comprehensive Survey. *ISRN Software Engineering*. 2013. P. 1–37. DOI: 10.1155/2013/507984.
2. De Ramón Fernández A., Ruiz Fernández D., Sabuco García Y. Business Process Management for optimizing clinical processes: A systematic literature review. *Health Informatics Journal*. 2020. Vol. 26, no. 2. P. 1305–1320. DOI: 10.1177/1460458219877092.
3. Patharkar A. C., Cai F. B., Zardiniy A., Al-Hindawi F., Wu T. Predictive modeling of biomedical temporal data in healthcare applications: review and future directions. *Frontiers in Physiology*. 2024. Vol. 15. DOI: 10.3389/fphys.2024.1386760.

4. De Büscher A., Kugler J. The effectiveness of clinical pathways in inpatient settings – an umbrella review. *Journal of Public Health*. 2024. P. 1–15. DOI: 10.1007/s10389-024-02227-w.
5. Петров К. Е., Чалий Т. В. Ситуаційна модель медичного бізнес-процесу. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»*: зб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. Харків: НТУ «ХПІ», 2024. № 2(12), С. 42–45. DOI: 10.20998/2079-0023.2024.01.17.
6. De Ramón Fernández A., Ruiz Fernández D. Clinical pathways: A systematic review of definitions, components, and applications. *Health Policy*. 2019. Vol. 123, no. 12. P. 1223–1232.
7. Dumas M., La Rosa M., Mendling J., Reijers H. A. *Fundamentals of Business Process Management*. Berlin: Springer, 2018. 527 p.
8. Chinosi M., Trombetta A. BPMN: An introduction to the standard. *Computer Standards & Interfaces*. 2012. Vol. 34. P. 124–134.
9. Van der Aalst W. *Process Mining: Data Science in Action*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2016. 467 p.
10. Petrocelli J. V. Pitfalls of Counterfactual Thinking in Medical Practice: Preventing Errors by Using More Functional Reference Points. *Journal of Public Health Research*. 2013. Vol. 2:e24. P. 136–143.
11. Wachter S., Mittelstadt B., Russell C. Counterfactual Explanations without Opening the Black Box: Automated Decisions and the GDPR. *Harvard Journal of Law & Technology*. 2018. Vol. 31, no. 2. P. 841–887.
12. Pearl J., Mackenzie D. *The Book of Why: The New Science of Cause and Effect*. New York: Basic Books, 2018. 432 p.
13. Muthilal R. K., Sharma A., Tan C. Explaining Machine Learning Classifiers through Diverse Counterfactual Explanations. *Proceedings of the ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency (FAccT 2020)*. 2020. P. 607–617. DOI: 10.1145/3351095.3372850.
14. Van Looveren A., Klaise J., Vacanti G., Coca A. Interpretable Counterfactual Explanations Guided by Prototypes. *Proceedings of the European Conference on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (ECML PKDD 2021)*. 2021. P. 650–665.
15. Chala O. V. Pobudova temporalnykh pravyl dlia predstavleniia znan v informatsiinykh systemakh upravlinnia. *Suchasni informatsiini systemy*. 2018. Vol. 2, no. 3. P. 54–58. DOI: 10.20998/2522-9052.2018.3.09. (In Ukr.)
16. Chala O. V. Model uzahalnenoho predstavleniia temporalnykh znan v intelektualnykh informatsiinykh systemakh upravlinnia. *Suchasni informatsiini systemy*. 2020. Vol. 4, no. 2. P. 30–35. DOI: 10.20998/2522-9052.2020.2.05. (In Ukr.)

References (transliterated)

1. Van der Aalst W. Business Process Management: A Comprehensive Survey. *ISRN Software Engineering*. 2013, pp. 1–37. DOI: 10.1155/2013/507984.
2. De Ramón Fernández A., Ruiz Fernández D., Sabuco García Y. Business Process Management for optimizing clinical processes: A systematic literature review. *Health Informatics Journal*. 2020, vol. 26, no. 1, pp. 1305–1320. DOI: 10.1177/1460458219877092.
3. Patharkar A. C., Cai F. B., Zardiniy A., Al-Hindawi F., Wu T. Predictive modeling of biomedical temporal data in healthcare applications: review and future directions. *Frontiers in Physiology*. 2024, vol. 15. DOI: 10.3389/fphys.2024.1386760.
4. De Büscher A., Kugler J. The effectiveness of clinical pathways in inpatient settings – an umbrella review. *Journal of Public Health*. 2024, pp. 1–15. DOI: 10.1007/s10389-024-02227-w.
5. Petrov K. E., Chaliy T. V. Sytuatsiina model medychnoho biznes-protsesu [Situational model of a medical business process]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seriya: Systemnyi analiz, upravlinnia ta informatsiini tekhnologii: zb. nauk. prats [Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: System analysis, control and information technology: Collection of scientific papers]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2024, no. 1. DOI: 10.20998/2079-0023.2024.01.17. (In Ukr.)
6. De Ramón Fernández A., Ruiz Fernández D. Clinical pathways: A systematic review of definitions, components, and applications. *Health Policy*. 2019, vol. 123, no. 12, pp. 1223–1232.
7. Dumas M., La Rosa M., Mendling J., Reijers H. A. *Fundamentals of Business Process Management*. Berlin, Springer Publ., 2018. 527 p.

8. Chinosi M., Trombetta A. BPMN: An introduction to the standard. *Computer Standards & Interfaces*. 2012, vol. 34, pp. 124–134.
9. Van der Aalst W. *Process Mining: Data Science in Action*. 2nd ed. Berlin, Springer Publ., 2016. 467 p.
10. Petrocelli J. V. Pitfalls of Counterfactual Thinking in Medical Practice: Preventing Errors by Using More Functional Reference Points. *Journal of Public Health Research*. 2013, vol. 2:e24, pp. 136–143.
11. Wachter S., Mittelstadt B., Russell C. Counterfactual Explanations without Opening the Black Box: Automated Decisions and the GDPR. *Harvard Journal of Law & Technology*. 2018, vol. 31, no. 2, pp. 841–887.
12. Pearl J., Mackenzie D. *The Book of Why: The New Science of Cause and Effect*. New York, Basic Books Publ., 2018. 432 p.
13. Mothilal R. K., Sharma A., Tan C. Explaining Machine Learning Classifiers through Diverse Counterfactual Explanations. *Proc. of the ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency (FAccT 2020)*. 2020, pp. 607–617. DOI: 10.1145/3351095.3372850.
14. Van Looveren A., Klaise J., Vacanti G., Coca A. Interpretable Counterfactual Explanations Guided by Prototypes. *Proc. of the European Conference on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (ECML PKDD 2021)*. 2021, pp. 650–665.
15. Chala O. V. Pobudova temporalnykh pravyl dlia predstavleniia znan v informatsiinykh systemakh upravlinnia [Building temporal rules for knowledge representation in information control systems]. *Suchasni informatsiini systemy [Advanced Information Systems]*. 2018, vol. 2, no. 3, pp. 54–58. DOI: 10.20998/2522-9052.2018.3.09. (In Ukr.)
16. Chala O. V. Model uzahalnenoho predstavleniia temporalnykh znan v intelektualnykh informatsiinykh systemakh upravlinnia [Model of generalized representation of temporal knowledge in intelligent information control systems]. *Suchasni informatsiini systemy [Advanced Information Systems]*. 2020, vol. 4, no. 2, pp. 30–35. DOI: 10.20998/2522-9052.2020.2.05. (In Ukr.)

Надійшла (received) 17.03.2026

Прийнята (accepted) 02.04.2026

Опублікована (published) 20.05.2026

UDC 004.9

K. E. PETROV, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Head of the Department of Information Control Systems, Kharkiv, Ukraine; e-mail: kostiantyn.petrov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1973-711X>

T. V. CHALYI, PhD student of the Department of Information Control Systems, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine, taras.chalyi@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3796-5810>

COUNTERFACTUAL MODEL OF A MEDICAL BUSINESS PROCESS

The subject of the research is medical business processes. The aim of the work is to develop a counterfactual model of a medical business process in order to enable the selection of alternative decisions when providing primary medical care, subsequent outpatient treatment, as well as clinical pathways and rehabilitation. Achieving this aim is oriented towards ensuring the flexibility of medical business processes under resource, financial, and regulatory constraints. To achieve the aim, the following tasks are addressed: to develop the formal structure of a counterfactual model of a medical business process as an extension of a situational model of a generalized medical business process, including causal dependencies and a system of temporal rules that describe admissible event sequences and time intervals between them; to perform an experimental validation of a system of clinical constraints that defines the space of possible counterfactual scenarios. A counterfactual model of a medical business process is proposed which, in contrast to existing approaches, combines the situational structure of a medical business process, a causal graph of reasons for performing process actions, a system of constraints that determine the feasibility of process trajectories in accordance with clinical guidelines, as well as temporal rules that define the sequence of medical business process events in time. Experimental validation of the model, taking into account the system of constraints, the causal graph, and the temporal rules, has confirmed a reduction in the share of clinically unacceptable scenarios compared to the traditional approach to constructing counterfactual explanations. Further development of the proposed counterfactual model of a medical business process is associated with the design of an information technology for decision support in medical business processes, aimed at constructing individualized treatment pathways that take into account patient needs and the constraints of the healthcare system.

Keywords: medical business process; counterfactual model; situational model; structural causal model; temporal rules; clinical constraints; temporal constraints; individualized treatment.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Петров Костянтин Едуардович / Petrov Kostiantyn Eduardovych

Автор 2 / Author 2: Чалий Тарас Володимирович / Chalyi Taras Volodymyrovych