

УДК 004.891.3

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.142664

## Розробка методу ймовірнісного виведення послідовностей робіт бізнес-процесу для підтримки процесного управління

В. М. Левикін, О. В. Чала

*Запропоновано моделі темпоральних правил виконання дій бізнес-процесу, що застосовуються у випадку відсутності в процесній моделі повної інформації про причини виконання цих дій внаслідок втручання виконавців робіт. Правила формуються на основі аналізу порядку подій в журналі бізнес-процесу, що дозволяє визначити темпоральні умови й обмеження на виконання відповідних дій. Моделі правил можуть бути застосовані як елемент представлення знань для системи процесного управління, оскільки вони відображають записаний у журналі досвід реалізації бізнес-процесу. Використання правил дозволяє обмежити кількість можливих варіантів виконання бізнес-процесу з урахуванням його поточного стану. В результаті скорочується час прийняття рішень із процесного управління для випадку невідповідності поточного екземпляру бізнес-процесу та його моделі.*

*Запропоновано новий метод ймовірнісного виведення, який використовує представлені правила для того, що сформувані нові, допустимі послідовності дій у нетиповій ситуації, що виникла внаслідок коригування бізнес-процесу його виконавцями. Метод застосовує представлення знань на основі марківської логічної мережі, що дозволяє упорядкувати нові послідовності дій за ймовірністю їх реалізації з використанням зважених темпоральних правил. Використання комбінації правил для пар послідовних та пар віддалених в часі дій дозволяє підвищити точність обчислення ймовірності реалізації нових варіантів бізнес-процесу. Метод враховує інформацію із журналу подій при доповненні правил, що дозволяє забезпечити безперервне поповнення правил при виконанні бізнес-процесу. Зазначене обумовлює можливість практичного застосування методу при автоматизованій побудові та розширенні бази знань системи процесного управління у реальному часі*

*Ключові слова: бізнес-процес, марківська логічна мережа, ймовірнісне виведення, обмеження на виконання дій, журнал подій*

### 1. Вступ

Процесне управління підприємством реалізується шляхом управління бізнес-процесами. Бізнес-процес містить послідовність робіт з виробництва продукції або створення послуг, що мають цінність для споживача. Управління бізнес-процесами виконується з використанням моделей цих процесів [1].

Модель бізнес-процесу містить всі можливі послідовності дій із зазначенням обмежень, умов та допустимих результатів цих дій. Умови та обмеження зазвичай задають потрібні ресурси (матеріали, виконавців,

обладнання) для виконання дій. В результаті виконання кожної дії змінюється стан бізнес-процесу [2].

Ефективність процесного управління визначається повнотою знань про можливі послідовності дій бізнес-процесу в поточних умовах зовнішнього середовища. Від повноти знань про бізнес-процес залежить адекватність процесної моделі. Такі знання зазвичай використовуються при побудові моделі бізнес-процесу. Після завершення виконання бізнес-процесу, на етапі аналізу його життєвого циклу, знання уточнюються та виконується коригування моделі.

Однак для класу знання-ємних процесів [3] вирішення проблеми неповноти знань пов'язано із труднощами внаслідок їх гнучкості та багатоваріантності. Кваліфіковані виконавці цих процесів з урахуванням поточного стану предметної області можуть створювати нові послідовності дій, які не включені до існуючої моделі. Зазвичай виконавці змінюють процес на основі використання своїх неявних знань. Ці знання враховують їх персональний досвід, мають вигляд контекстних шаблонів дій, та не можуть бути отримані традиційними методами інженерії знань. Персональні знання важко перевірити, тому після втручання виконавця необхідно оцінити поточний стан бізнес-процесу, а також ймовірність переходу від поточного до цільового стану. Актуальність проведення такої оцінки полягає в тому, що її результати можуть бути використані для підтримки прийняття рішень при реалізації управління бізнес-процесами.

## **2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми**

В роботі [1] показано, що для вирішення задач процесного управління необхідно всі знання про можливі варіанти виконання бізнес-процесу включити до складу його моделі. Однак існуючі підходи дозволяють лише частково виділити знання виконавців. Дослідження в цьому напрямку передбачають структурування неявних знань виконавців на ряд базових елементів, зокрема: професійне розуміння задач; корпоративні цінності; контекстно-орієнтований досвід [3]. Виділені елементи включаються до об'єктів знань у моделі бізнес-процесу, як показано в роботі [4]. Ключові недоліки цих підходів з позицій процесного управління полягають в наступному. По-перше, наведена структура знань не дозволяє представити причини зміни послідовності дій процесу в конкретній ситуації у вигляді формальних залежностей, обмежень та умов виконання дій. По-друге, не забезпечується можливість прогнозувати подальші допустимі послідовності дій. По-третє, для виділення елементів знань потрібен кваліфікований експерт, який обізнаний із процесами у даній предметній області.

Альтернативний підхід до використання знань виконавців в моделях бізнес-процесів застосовується при побудові віртуальних підприємств. Як показано в дослідженні [5], при використанні даного підходу формується онтологія субпідрядників. Для доповнення цієї онтології застосовується мультиагентна технологія. Використання онтологій дозволяє адаптувати бізнес-процес з урахуванням особливостей поточного заказу та можливостей субпідрядників. Однак подальший вибір субпідрядників та коригування

послідовності дій також залежить від комбінації формальних знань про бізнес-процес та персональних знань виконавців, що обмежує застосування даного підходу для підтримки процесного управління.

Підтримка процесного управління на основі порівняння відомої моделі бізнес-процесу «як повинно бути» та моделі «як є» виконується за допомогою методів process mining. Остання модель відображає вплив неявних знань виконавців на послідовність виконання дій бізнес-процесу. При побудові моделі «як є» використовуються журнали подій бізнес-процесів. Як показано в роботі [6], дана модель може бути сформована у вигляді графу з використанням нотації BPMN. Аналіз цього графу дозволяє виділити знання про бізнес-процес у вигляді умов та обмежень на виконання послідовностей робіт. У випадку більш складних журналів, що містять змішані послідовності подій із декількох бізнес-процесів, потрібні залежності можуть бути отримані після фільтрації логу запропонованим у роботі [7] методом. Для формування таких неявних залежностей за результатами аналізу журналу подій в роботі [8] запропоновано використовувати реляційні мережі. Сукупність розглянутих підходів дозволяє виявити умови й обмеження на виконання дій бізнес-процесу. Однак вони не дозволяють прогнозувати послідовність дій бізнес-процесу у новій, нестандартній ситуації, наприклад, при втручанні виконавця внаслідок конфлікту при доступі до ресурсів декількох бізнес-процесів.

При прогнозуванні внаслідок відсутності інформації про майбутні зовнішні впливи необхідно враховувати не лише логічний, але і ймовірнісний характер прогнозованих послідовностей дій. Для представлення логічних та ймовірнісних залежностей використовуються марківські логічні мережі, які представлені в роботі [9]. Адаптація марківських логічних мереж для їх застосування у процесному управлінні розглядається в роботі [10].

Однак проблема прогнозування допустимих послідовностей дій з урахуванням ймовірностей виконання цих дій відносно поточного стану бізнес-процесу для підтримки прийняття рішень при процесному управлінні потребує свого вирішення.

### **3. Мета та задачі дослідження**

Мета дослідження полягає у розробці методу імовірнісного логічного виведення допустимих послідовностей дій для досягнення кінцевого стану бізнес-процесу із врахуванням його поточного стану.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні задачі:

- розробити моделі темпоральних правил виконання послідовностей дій бізнес-процесу на основі аналізу його журналу подій;
- обґрунтувати можливість підтримки процесного управління на основі імовірнісного виведення у марківській логічній мережі з використанням правил виконання дій бізнес-процесу;
- виконати експериментальну перевірку запропонованого методу імовірнісного виведення.

#### 4. Розробка моделей темпоральних правил виконання дій бізнес-процесу на основі аналізу його журналу подій

Журнали подій мають наступні властивості, які є суттєвими для ймовірнісного виводу: інформація про виконання бізнес-процесу представлена у вигляді множини трас, що складаються з подій (1); кожна траса містить послідовність подій  $\langle e_1, e_2, \dots, e_j, e_{j+1}, \dots \rangle$ , яка відповідає послідовності дій при одноразовому виконанні бізнес-процесу (2); кожна подія фіксує виконання або зміну стану відповідної дії процесу; події траси упорядковані за мітками часу (3); кожна подія характеризується множиною одних і тих же атрибутів з різними значеннями (4); атрибути події одночасно є атрибутами артефактів – об'єктів, які використовує бізнес-процес (5); множина значень атрибутів артефактів у поточний момент часу характеризує умови для запуску дій бізнес-процесу у цей момент (6).

Властивості (2) та (3) визначають для кожної пари послідовних подій  $(e_j, e_{j+1})$  з однієї траси перевагу першої події перед другою при виконанні бізнес-процесу. Така перевага зазвичай відображається у вигляді правила “if  $e_j$  then  $e_{j+1}$ ”, що пов’язує причини й наслідки відповідних дій бізнес-процесу. Однак у випадку журналу подій дана перевага визначається лише в темпоральному аспекті: при виконанні бізнес-процесу спершу виникає подія  $e_j$ , а після неї подія  $e_{j+1}$ . Враховуючи цей аспект, перевагу події  $e_j$  перед подією  $e_{j+1}$  доцільно представити з використанням оператора  $X(neXt)$  темпоральної логіки [11]. Даний оператор задає істинність наступної події після поточної, відповідно залежність має такий вигляд:  $e_jXe_{j+1}$ .

*Визначення 1.* Атомарний порядок для пари подій із траси логу визначається для пари подій в тому випадку, якщо ці події зафіксовані в два послідовних дискретних моменти часу  $\tau_j$  та  $\tau_{j+1}$ , тобто між ними не існує іншої події:

$$\tau_{j+1} > \tau_j \Rightarrow e_jXe_{j+1} \mid \forall \tau^* \neq \tau_j \tau^* < \tau_j \vee \tau^* \geq \tau_{j+1}. \quad (1)$$

Визначимо трасу  $\pi$  журналу подій бізнес-процесу як послідовність подій в часі із заданим порядком для кожної пари послідовних подій:

$$\pi \models \{e_jXe_{j+1} \mid \forall j \tau_{j+1} > \tau_j\}, \quad j = \overline{1, J-1}, \quad (2)$$

де  $e_j, e_{j+1}$  – дві послідовні події логу, що виникли в моменти часу  $\tau_j$  та  $\tau_{j+1}$ .

На основі порядку для пар подій упорядковується вся траса журналу, що дозволяє визначити можливість досягнення кінцевої події  $e_j$  наступним чином:

$$\pi \models e_jFe_j \mid \exists e_jXe_{j+1}X\dotsXe_j, \quad j = \overline{1, J-1}, \quad (3)$$

де  $F$  – оператор темпоральної модальної логіки, який задає виникнення події в майбутньому.

У відповідності до властивостей (1)–(3) визначимо обмеження на послідовність подій траси бізнес-процесу. Журнал подій  $L$  складається з множини трас  $\pi_i$ , які були записані під час багаторазового виконання бізнес-процесу:  $L = \{\pi_i\}$ . Атомарний порядок для пар подій  $(e_j, e_{j+1})$  є сторогим, якщо він виконується на всіх відомих трасах логу. Позначимо строгий порядок для пар подій за допомогою індексу  $\infty$  для модального оператора:  $X^\infty$ . Тоді строгий порядок для пари подій  $(e_{i,j}, e_{i,j+1})$  із траси  $\pi_i$  визначимо наступним чином:

$$\forall \pi_i \in L \exists e_{i,j} X e_{i,j+1} \Rightarrow e_{i,j} X^\infty e_{i,j+1}. \quad (4)$$

Порядок  $e_{i,j} X^\infty e_{i,j+1}$  задає множину відомих обмежень на допустимі послідовності дій з виконання бізнес-процесу. Строгий порядок  $e_{i,j} F^\infty e_{i,n}$  для пари подій, між якими є інші події, задається аналогічно.

*Визначення 2.* Обмеження  $C^\infty$  на послідовність подій траси бізнес-процесу є кон'юнкцією пар подій, на яких задано строгий порядок.

$C^\infty$  обмежує множину потенційно можливих трас виконання бізнес-процесу. Тобто для всіх реалізованих та відомих з апріорної моделі трас виконання бізнес-процесу повинна виконуватись умова:  $L = \{\pi_i | C^\infty\}$ .

Множина правил  $C$ , що визначають потенційно допустимі послідовності подій, складається із обмежень  $C^\infty$  та умов  $C^\wedge$ . Умови  $C^\wedge$ , на відміну від  $C^\infty$ , можуть бути порушені із ненульовою ймовірністю.

Упорядкування подій у відповідності до (1) та (3) обумовлює формування двох типів темпоральних правил. Порядок (1) задає правило послідовного виконання двох дій бізнес-процесу, тобто правило типу *next*:  $c_{next} = e_j X e_{j+1}$ . Порядок подій (3) задає правило типу *future* на виконання послідовності дій, що призводить до цільової дії бізнес-процесу. Дане правило задається початковою та цільовою дією, які відображені початковою  $e_j$  та цільовою подіями  $e_n$  на трасі логу. Таке правило має вигляд:  $c_{future} = e_j F e_n$ . Узагальнене правило має вигляд:  $c = (e_j X e_{j+1}) \vee (e_j F e_n), j < n \leq J$ . Комбінування правил обох типів для опису обмежень та умов дозволяє дати більш детальне представлення допустимих послідовностей дій бізнес-процесу.

У відповідності до властивостей (1) та (2), набір трас бізнес-процесу, що записаний в журналі подій  $L$ , містить у собі лише ті послідовності дій, що були реалізовані на практиці. Тобто журнал містить лише підмножину можливих трас  $\Pi$  бізнес-процесу:  $L \in \Pi$ . Множина можливих трас логу містить у собі множину відомих з практики трас, а також множину впорядкованих потенційно допустимих трас  $\pi_i^{new}$ :

$$\Pi = \left\{ L, \left\langle \pi_1^{new}, \dots, \pi_i^{new}, \dots, \pi_l^{new} \right\rangle \right\}. \quad (5)$$

Мета впорядкування потенційно допустимих трас полягає в тому, щоб визначити траси, найбільш придатні для реалізації в поточних умовах зовнішнього середовища. Очевидно, що траси, на яких частіше виконуються правила, є типовими, тобто придатними для виконання для великої множини станів зовнішнього середовища. Такі траси матимуть менший індекс у кортежі у виразі (5).

*Приклад 1.* Нехай у журналі  $L$  зафіксовано дворазове виконання бізнес-процесу і він складається із таких завершених послідовностей подій:

$$L = \{ \langle e_{1,1}, e_{1,2}, e_{1,4}, e_{1,5} \rangle, \langle e_{2,1}, e_{2,2}, e_{2,3}, e_{2,4}, e_{2,5} \rangle \}.$$

Події журналу записані у відповідності до часу їх виникнення, тобто друга подія  $e_{1,2}$  виникла пізніше першої  $e_{1,1}$ :  $\tau_{1,2} > \tau_{1,1}$ , подія  $e_{1,4}$  пізніше ніж  $e_{1,2}$ :  $\tau_{1,4} > \tau_{1,2}$  і т. п. Кожна подія містить запис про виконання дії бізнес-процесу. Дія визначається другим індексом події, тобто події  $e_{1,1}$  та  $e_{2,1}$  містять записи про виконання першої дії,  $e_{1,2}$  та  $e_{2,2}$  – другої і т.п. Згідно виразів (2) та (3), на першій трасі  $\pi_1$  виконуються такі темпоральні залежності між парами подій:

$$\pi_1 | = \{ e_{1,1} X e_{1,2}, e_{1,2} X e_{1,4}, e_{1,4} X e_{1,5}, e_{1,1} F e_{1,4}, e_{1,1} F e_{1,5}, e_{1,2} F e_{1,5} \}.$$

На другій трасі істинними є такі залежності:

$$\pi_2 | = \{ e_{2,1} X e_{2,2}, e_{2,2} X e_{2,3}, e_{2,3} X e_{2,4}, e_{2,4} X e_{2,5}, e_{2,1} F e_{2,3}, e_{2,1} F e_{2,4}, e_{2,1} F e_{2,5}, e_{2,2} F e_{2,3}, e_{2,2} F e_{2,4}, e_{2,2} F e_{2,5}, e_{2,3} F e_{2,5} \}.$$

Ці залежності містять у собі умови та обмеження на допустимі послідовності дій бізнес-процесу.

У відповідності до виразу (4), обмеження для даного бізнес-процесу поєднує у собі всі залежності, які виконуються на обох трасах, що дає можливість не враховувати перший індекс для подій:

$$\begin{aligned} C^\infty &= (e_{1,1} X e_{1,2} \wedge e_{1,1} F e_{1,5} \wedge e_{1,2} F e_{1,5}) \wedge (e_{2,1} X e_{2,2} \wedge e_{2,1} F e_{2,5} \wedge e_{2,2} F e_{2,5}) = \\ &= e_1 X e_2 \wedge e_1 F e_5 \wedge e_2 F e_5. \end{aligned}$$

Множина умов містить у собі всі інші залежності, які були виконані щонайменше на одній із трас бізнес-процесу. Тому індекс траси в описі умов доцільно виключити із опису цих залежностей:

$$\begin{aligned} C^r &= \{ e_{1,2} X e_{1,4}, e_{1,4} X e_{1,5}, e_{1,1} F e_{1,4}, e_{2,2} X e_{2,3}, e_{2,3} X e_{2,4}, e_{2,4} X e_{2,5}, \\ &e_{2,1} F e_{2,3}, e_{2,1} F e_{2,4}, e_{2,2} F e_{2,4}, e_{2,3} F e_{2,5} \} = \\ &= \{ e_2 X e_4, e_4 X e_5, e_2 X e_3, e_3 X e_4, e_1 F e_3, e_1 F e_4, e_2 F e_4, e_3 F e_5 \}. \end{aligned}$$

Отримані із  $L$  умови та обмеження фактично є знаннями про допустиму поведінку нових трас  $\pi_i^{new}$ , що відображають переваги одних дій бізнес-процесу над іншими. На кожній із цих трас повинні виконуватись обмеження  $C^\infty$ . Умови для кожної траси бізнес-процесу визначаються кон'юнкцією підмножини елементів із  $C^\infty$ . Зокрема, сукупність наведених вище обмежень та умов  $e_2 X e_3 \wedge e_1 F e_3$  представляють собою знання про таку допустиму нову послідовність дій: 1, 2, 3, 5.

### 5. Метод імовірнісного виведення допустимих послідовностей дій відносно поточного стану бізнес-процесу

Запропонований метод використовує представлення знань на основі марківської логічної мережі. Головною особливістю такого представлення є поєднання логічної та імовірнісної складових при описі логічних фактів та причинно-наслідкових залежностей для того щоб задати можливі стани та послідовності дій знання-ємного бізнес-процесу.

Узагальнене представлення знань, що враховує упорядкованість подій журналу, має такий вигляд:

$$KB = \left( \left\{ e_{i,j} \right\}, \left\{ c_m^\infty, w_m = \infty \right\}, \left\{ c_j^\infty, w_j \right\}, P(A = \{ \alpha_{i,j}^k \} | e_{i,j}) \right), \quad (6)$$

де  $c_m^\infty$  – обмеження;  $w_m$  – вага обмеження;  $c_j^\infty$  – умова;  $w_j$  – вага умови;  $\alpha_{i,j}^k$  – значення  $k$  – атрибуту поточної події  $e_{i,j}$ ;  $P(A = \{ \alpha_{i,j}^k \})$  – ймовірність досягнення цільової події  $e_{i,j}$ , що задана множиною значень атрибутів  $\{ \alpha_{i,j}^k \}$  відносно поточного стану бізнес-процесу, що характеризується подією  $e_{i,j}$ .

У відповідності до властивостей (4) – (6) журналу подій, при обчисленні обмежень  $c_m^\infty$  та умов  $c_j^\infty$  кожна подія задається у вигляді логічних фактів на основі значень атрибутів артефактів бізнес-процесу, тобто  $e_{i,j} = f_i(\{ \alpha_{i,j}^k \})$ . В подальшому при формуванні обмежень та умов будуть розглядатися події (або траса) в цілому, без деталізації по атрибутам. Вага  $w_j$  для умов  $c_j^\infty$  обчислюється з урахуванням ймовірності їх виникнення у відповідності до традиційного для марківських мереж виразу:

$$P(A = \{ \alpha_{i,j}^k \} | e_{i,j}) = \frac{1}{Z} \exp \left( \sum_j w_j c_j^\infty \right), \quad (7)$$

де  $Z$  – функція розподілу, яка використовується для нормування.

Оскільки значення атрибутів  $\{ \alpha_{i,j}^k \}$  визначає кінцеву подію траси, то замість них в якості аргументу може бути вказана відповідна траса  $\pi_i^{new}$ . Базовий алгоритм обчислення ваг умов наведено в роботі [9]. Вага правила визначає ймовірність виконання відповідної залежності: чим більше вага, тим частіше ця

залежність виконується. Значення ваги  $\infty$  для обмежень обумовлює їх виконання для всіх можливих реалізацій бізнес-процесу.

Задача ймовірнісного логічного виводу на представленні знань (6) має такі підзадачі: перевірка можливості успішного завершення бізнес-процесу відносно його поточного стану; виявлення найкращої послідовності дій (подій) для успішного завершення бізнес-процесу.

Результати цих підзадач дозволяють забезпечити підтримку прийняття рішень ОПР у випадку, якщо виконавець змінив послідовність дій процесу та нова послідовність не виконувалась іншими екземплярами бізнес-процесу, тобто  $\pi_i^{new} \notin L$ .

Метод ймовірнісного виведення використовує такі вхідні дані: лог подій  $L$ , що містить траси минулих реалізацій бізнес-процесу, а також поточну трасу; граничний час запису послідовностей подій  $\tau^l$ ; умови  $C^{\wedge}$  виконання дій. Метод містить у собі такі етапи.

*Етап 1.* Фільтрація підмножини  $l$  вхідних трас журналу подій.

Журнал бізнес-процесу містить записи про виконання значної кількості екземплярів бізнес-процесу. Внаслідок удосконалення бізнес-процесу, з часом застарілі траси можуть не відповідати його поточній поведінці. Кожна подія містить мітку часу. Тому фільтрація трас журналу подій виконується з використанням цих міток за умовою граничного часу запису траси  $\tau^l$ :  $\forall \pi_i \in l \tau_{i,j} \geq \tau^l$ , де  $\tau_{i,j}$  – мітка часу  $j$  – події на трасі  $\pi_i$ .

*Етап 2.* Відбір умов  $C^{\wedge}$  для підмножини трас логу  $l$ .

На даному етапі враховуються лише ті умови  $c_j^{\wedge}$ , які пов'язують події із підмножини трас із  $l$ , тобто виконується умова:  $\exists \pi_i: c_j^{\wedge} = true$ .

*Етап 3.* Відбір обмежень  $C^{\infty}$  та уточнення умов для підмножини трас логу  $l$ .

На даному етапі із множини  $C^{\wedge}$  відбираються такі залежності  $c_j^{\wedge}$ , для яких виконується:  $\forall \pi_i \in l c_j^{\wedge} = true$ . Ці залежності виключаються  $C^{\wedge}$  із та вносяться до множини обмежень  $C^{\infty}$ . Із  $C^{\wedge}$  додатково видаляються умови, що містять у собі події із множини обмежень. Для тих умов, що лишилися, обчислюються ваги та значення функції розподілу  $Z$ . Для обчислення використовуються алгоритми, наведені в [9, 11].

*Етап 4.* Відбір із трас  $\pi_i \in l$  підмножини подій  $E^l$ , які не задовольняють обмеженням  $C^{\infty}$ , що отримані на етапі 2. Умова відбору події  $e_j$  має такий вигляд:  $\forall e_j \in E^l \# c_m^{\infty} = true$ . Індекс траси в даній умові не використовується, оскільки ми відбираємо події з усіх трас. Тобто одна подія із множини  $E^l$  може бути зафіксована на декількох трасах журналу. Додатково видаляється остання подія поточної траси, оскільки вона не може бути використана при формуванні нових трас.



Мета даного етапу полягає в тому, щоб зменшити кількість потенційно можливих трас, які будуть сформовані на етапі 5. Множина можливих трас визначається як сума всіх можливих розміщень для вибраного набору подій. Кількість та послідовність подій, що задовольняють обмеженням, є незмінною на всіх трасах підмножини  $l$ , що дозволяє зменшити кількість розміщень.

*Етап 5.* Формування множини потенційно допустимих трас  $\{\pi_i^{new}\}$ .

5. 1. Формування всіх можливих розміщень із  $E^l$  по 1, по 2, ..., по  $|E^l|$ .

5. 2. Доповнення отриманих розміщень послідовностями подій, що задовольняють обмеженням  $c_m^\infty$ . Кожна пара подій упорядковується на трасі  $\pi_i^{new}$  у відповідності до свого обмеження  $c_m^\infty$ .

*Етап 6.* Обчислення потенціалу кожної траси  $\pi_i^{new}$ . Потенціал, у відповідності до виразу (7), розраховується як сума ваг всіх умов, що виконуються на даній трасі. Обмеження при обчисленні потенціалу не враховуються, оскільки вони однакові для всіх трас.

*Етап 7.* Обчислення ймовірностей реалізації кожної з трас  $Pot(\pi_i^{new})$  за формулою (7).

*Етап 8.* Упорядкування трас  $\pi_i^{new}$  у відповідності до значень ймовірностей, згідно (5).

Результатом даного методу є упорядкована за значеннями ймовірностей множина потенційно можливих трас  $\pi_i^{new}$ .

*Приклад 2.* Нехай метод ймовірнісного виведення використовує такі вхідні дані. (1) Журнал  $L$ , що складається із наступних послідовностей подій:

$$L = \{\langle e_{1,1}, e_{1,2}, e_{1,3}, e_{1,5} \rangle, \langle e_{2,1}, e_{2,2}, e_{2,4}, e_{2,5} \rangle, \langle e_{3,1}, e_{3,2}, e_{3,3}, e_{3,4}, e_{3,5} \rangle, \langle e_{4,1}, e_{4,2}, e_{4,6} \rangle\}.$$

Подія  $e_{4,6}$  є останньою записаною до журналу подією екземпляру бізнес-процесу, що виконується (тобто  $\tau_{4,6}$  відповідає поточному часу). Послідовності подій упорядковані за часом виконання чотирьох екземплярів бізнес-процесу, тобто:  $\tau_{4,6} > \tau_{4,1} > \tau_{3,5} > \tau_{3,1} > \tau_{2,5} > \tau_{2,1} > \tau_{1,5} > \tau_{1,1}$ . (2) Граничний час запису траси, що становить  $\tau^1 > \tau_{1,5}$ . (3) множина умов для всіх чотирьох послідовностей подій:

$$C^r = \{e_1Xe_2, e_1Fe_5, e_2Fe_5, e_2Xe_4, e_4Xe_5, e_2Xe_3, e_3Xe_4, e_1Fe_3, e_1Fe_4, e_2Fe_4, e_3Fe_5, e_3Xe_5, e_1Fe_6, e_2Xe_6\}.$$

Порядок формування цих умов наведено в підрозділі 4.

*Результат етапу 1.* Оскільки  $\tau^1 > \tau_{1,5}$ , то перша послідовність подій виключається з подальшого розгляду і підмножина  $l$  має такий вигляд:

$$l = \{\langle e_{2,1}, e_{2,2}, e_{2,4}, e_{2,5} \rangle, \langle e_{3,1}, e_{3,2}, e_{3,3}, e_{3,4}, e_{3,5} \rangle, \langle e_{4,1}, e_{4,2}, e_{4,6} \rangle\}.$$

*Результат етапу 2.* Після виключення першої послідовності подій із множини  $C^{\sim}$  видаляється пов'язана з нею залежність  $e_3Xe_5$  і множина умов приймає такий вигляд:

$$C^{\sim} = \{e_1Xe_2, e_1Fe_5, e_2Fe_5, e_2Xe_4, e_4Xe_5, e_2Xe_3, e_3Xe_4, e_1Fe_3, e_1Fe_4, e_2Fe_4, e_3Fe_5, e_1Fe_6, e_2Xe_6\}.$$

*Результати етапу 3.* Із множини умов відокремлюються ті залежності, які є істинними на всіх трасах із  $l$ . Ці залежності складають обмеження на виконання дій бізнес-процесу. Отримані умови й обмеження мають такий вигляд:

$$C^{\infty} = e_1Xe_2 \wedge e_1Fe_5 \wedge e_2Fe_5, C^{\sim} = \\ = \{e_2Xe_4(1,37), e_4Xe_5(0,47), e_2Xe_3(0,65), e_3Xe_4(0,37), e_2Fe_4(0,15), e_3Fe_5(0,2), e_2Xe_6(1,84)\}.$$

Умови  $e_1Fe_3$ ,  $e_1Fe_4$ ,  $e_1Fe_6$  видаляються із множини  $C^{\sim}$ , оскільки вони розкладаються на послідовність умов та обмежень. Зокрема, умова  $e_1Fe_3$  деталізується через обмеження  $e_1Xe_2$  та умову  $e_2Xe_3$ . Вага умов та значення функції розподілу  $Z$  розраховується у відповідності до [11]. У множині  $C^{\sim}$  вага умов наведена в дужках після залежності. Чим більше вага, тим нижче ймовірність порушення правила. Всі обмеження мають вагу  $\infty$ : вони не можуть бути порушені при виконанні процесу. Це і обумовлює виключення з подальшого розгляду подій, пов'язаних із обмеженнями. Значення  $Z$  становить 19,18.

*Результат етапу 4.* При формуванні підмножини подій  $E^l$  у відповідності до обмеження  $e_1Xe_2$  не враховується перша подія. Події  $e_2$  та  $e_5$  також не враховуються при формуванні розміщень внаслідок дії обмеження  $e_2Fe_5$ . Подія  $e_6$  відображає поточний стан бізнес-процес і також не враховується. Результуюча множина має вигляд  $E^l = \{e_3, e_4\}$ .

*Результати етапу 5.* На кроці 5.1 із подій підмножини  $E^l$  формуються такі послідовності подій:  $\langle e_3, e_4 \rangle$ ,  $\langle e_4, e_3 \rangle$ . На кроці 5.2 формуються такі нові траси:

$$\pi_5^{new} = \langle e_1, e_2, e_6, e_3, e_4, e_5 \rangle, \pi_6^{new} = \langle e_1, e_2, e_6, e_4, e_3, e_5 \rangle \langle e_3, e_4 \rangle, \langle e_4, e_3 \rangle.$$

*Результати етапу 6.* Отримана траса  $\pi_5^{new}$  характеризується такою кон'юнкцією умов:  $e_2Fe_4 \wedge e_3Xe_4 \wedge e_3Fe_5 \wedge e_4Xe_5$ . Траса  $\pi_6^{new}$  характеризується такими умовами:  $e_2Fe_4$ . Потенціал кожної з цих трас складає суму ваг їх умов. Для вказаних вхідних даних:  $Pot(\pi_5^{new}) = 0,15 + 0,37 + 0,2 + 0,47 = 1,19$ ;  $Pot(\pi_6^{new}) = 0,15$ .

*Результати етапу 7.* Ймовірності нових трас мають таке значення:  $P(\pi_5^{new} | e_6) = 0,171$ ;  $P(\pi_6^{new} | e_6) = 0,087$ .

*Результати етапу 8.* Отримані в результаті виводу нові траси упорядковуються за значенням ймовірності:  $\langle \pi_5^{new}, \pi_6^{new} \rangle$ .

Множина можливих трас, що згідно (5) поєднує уже реалізовані та допустимі послідовності подій, має такий вигляд:  $\Pi = \{ \langle e_{2,1}, e_{2,2}, e_{2,4}, e_{2,5} \rangle, \langle e_{3,1}, e_{3,2}, e_{3,3}, e_{3,4}, e_{3,5} \rangle, \langle \pi_5^{new}, \pi_6^{new} \rangle \}$ .

## 6. Експериментальна перевірка методу ймовірнісного виводу на прикладі процесу сервісного обслуговування

Розглядається спрощена модель бізнес-процесу сервісного обслуговування електронних приладів. Опис процесу у журналі містить 5 типових трас з двома послідовностями подій. На момент моделювання бізнес-процес знаходиться у стані переходу до гарантійного ремонту. Цей стан відображено в журналі поточною подією  $e_{i,10}$ . Стан є нетиповим, оскільки подія  $e_{i,10}$  не належить до відомих завершених трас.

Мета експериментальної перевірки, по-перше, полягає в тому, щоб визначити множину потенційно допустимих трас  $\pi_i^{new}$  від поточної події  $e_{i,10}$  до відомої фінальної події  $e_{i,8}$ . По-друге, необхідно впевнитись у відповідності отриманих нових трас існуючим підходам до сервісного обслуговування. Для досягнення наведеної мети експерименту формуються потенційно допустимі траси та визначаються їх ймовірності, а також виконується аналіз подій цих трас з урахуванням опису відповідних дій бізнес-процесу.

При реалізації ймовірнісного виводу використовується журнал подій бізнес-процесу, а також обмеження та умови виконання дій.

### 6.1. Траси журналу подій

Вхідні траси журналу подій представлені в табл. 1 та табл. 2.

Табл. 1 містить лог бізнес-процесу у складі 5 відомих трас:  $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5$ , та однієї поточної траси  $\pi_6^{new}$ . Кожна подія має два індекси: індекс траси та індекс дії бізнес-процесу. Наприклад, подія  $e_{5,9}$  є третьою подією траси  $\pi_5$ , що виконує дев'яту дію бізнес-процесу.

Таблиця 1

Траси журналу подій бізнес-процесу

Траси	Послідовність подій
$\pi_1$	$\langle e_{1,1}, e_{1,2}, e_{1,3}, e_{1,4}, e_{1,5}, e_{1,6}, e_{1,7}, e_{1,8} \rangle$
$\pi_2$	$\langle e_{2,1}, e_{2,2}, e_{2,3}, e_{2,4}, e_{2,5}, e_{2,6}, e_{2,7}, e_{2,8} \rangle$
$\pi_3$	$\langle e_{3,1}, e_{3,2}, e_{3,3}, e_{3,4}, e_{3,5}, e_{3,6}, e_{3,7}, e_{3,8} \rangle$
$\pi_4$	$\langle e_{4,1}, e_{4,2}, e_{4,9}, e_{4,7}, e_{4,8} \rangle$
$\pi_5$	$\langle e_{5,1}, e_{5,2}, e_{5,9}, e_{5,7}, e_{5,8} \rangle$
$\pi_6^{new}$	$\langle e_{6,1}, e_{6,2}, e_{6,10}, \dots \rangle$

Індексований перелік дій процесу, що відповідають подіям журналу, наведено в табл. 2.

Таблиця 2  
Дії бізнес-процесу

Індекс події	Опис
1	Заявка на ремонт приладу
2	Розбирання приладу
3	Діагностування несправності
4	Узгодження ремонту з замовником
5	Покупка вузлу або деталі
6	Заміна вузлу або деталі
7	Складання приладу
8	Оплата та передача приладу замовнику
9	Чистка приладу
10	Перехід до гарантійного ремонту для несправного вузла

Граф процесу наведено на рис. 1. Для подій з потенційно допустимих трас  $\pi_i^{new}$ ,  $i = \overline{6, I}$  перший індекс не вказано з метою спрощення.

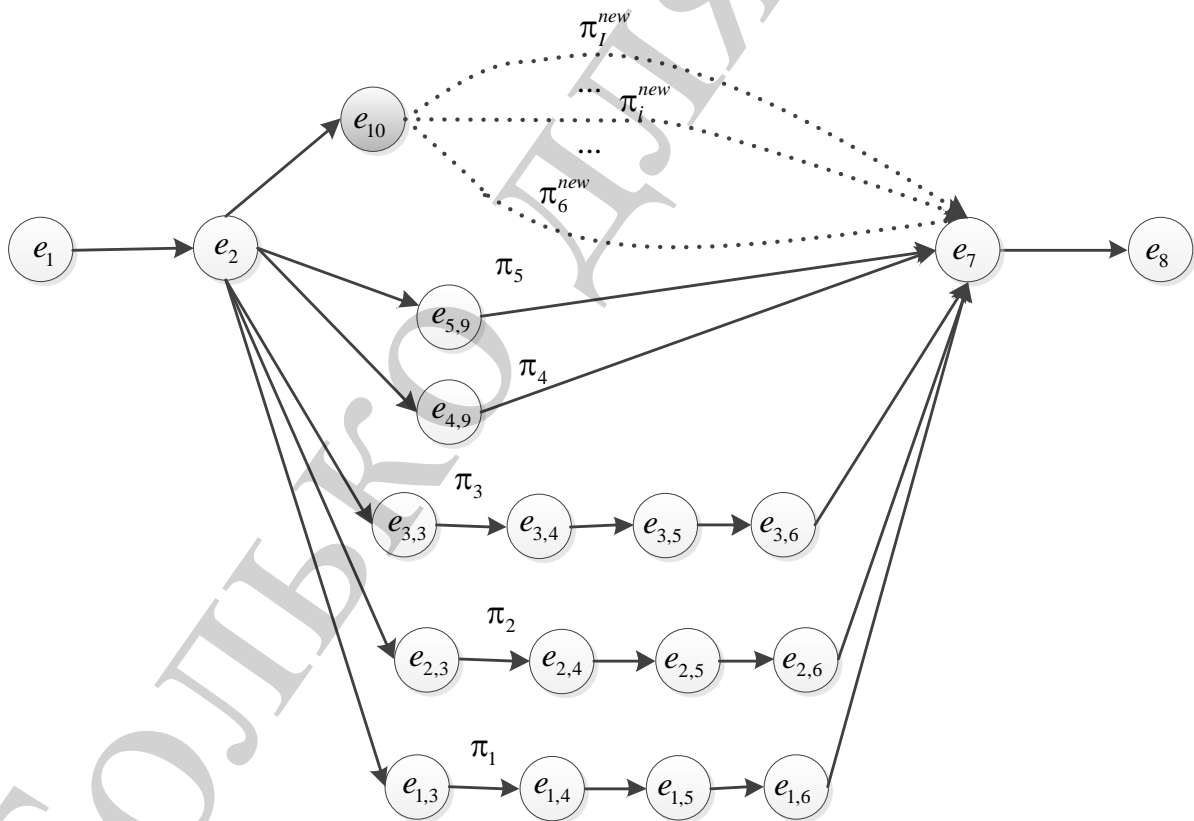


Рис. 1. Відомі  $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5$  та можливі траси  $\{\pi_i^{new}\}$  спрощеного бізнес-процесу сервісного обслуговування

Множина можливих трас є множиною всіх розміщень подій бізнес-процесу, виключаючи поточну подію  $e_{i,10}$ . Тобто довжина можливої траси може змінюватись від 1 до 10 подій. Однак з урахуванням обмежень та відсутності циклів з потенціальної траси потрібно виключити події  $e_{i,1}$ ,  $e_{i,2}$ ,  $e_{i,10}$ . Також виключається остання подія  $e_{i,8}$ , оскільки досягнення цієї події свідчить про завершення бізнес-процесу. Таким чином, множина можливих трас дорівнює сумі кількості розміщень із 6 по 1, із 6 по 2, ..., із 6 по 6 та становить  $|\{\pi_i^{new}\}| = 1965$ .

## 6.2. Обмеження та умови на послідовності дій для потенційно допустимих трас бізнес-процесу

В даному підрозділі представлено результати етапу 3 методу ймовірнісного виводу. Обмеження наведені в табл. 3. Всім обмеження присвоєно вагу  $\infty$ , з тим, щоб забезпечити їх безумовне виконання в рамках моделі представлення знань на основі марківської логічної мережі [9].

Таблиця 3  
Обмеження бізнес-процесу

Обмеження	Зміст
$e_1Xe_2$	Заявка на ремонт приладу > Розбирання приладу
$e_7Xe_8$	Складання приладу > Оплата та передача приладу замовнику
$e_1Fe_7$	Заявка на ремонт приладу >> Складання приладу
$e_1Fe_8$	Заявка на ремонт приладу >> Оплата та передача приладу замовнику
$e_2Fe_7$	Розбирання приладу >> Складання приладу
$e_2Fe_8$	Розбирання приладу >> Оплата та передача приладу замовнику

В наведених обмеженнях не використовується індекс траси для подій, оскільки ці події належать до всіх трас журналу.

В подальшому, при визначенні нових трас, також не буде використано перший індекс, оскільки всі події з однаковим індексом дії відображають виконання тієї ж самої дії для різних реалізацій бізнес-процесу.

В результаті застосування наведених обмежень, а також з урахуванням поточного стану бізнес-процесу  $e_{10}$ , максимальна кількість елементів нової траси складає 4:  $\{e_4, e_5, e_6, e_9\}$ . Кількість можливих трас  $|\{\pi_i^{new}\}| = 64$ , тобто для даного бізнес-процесу вдалось зменшити складність задачі прогнозування приблизно в 30 разів.

Умови виконання дій бізнес-процесу представлені правилами типу *NeXt* та *Future* наведені в табл. 4.

Таблиця 4

Умови виконання дій бізнес-процесу

Умова	Вага	Траси
$e_2Fe_4$	0,085714	$\pi_1, \pi_2, \pi_3$
$e_2Fe_5$	0,042857	$\pi_1, \pi_2, \pi_3$
$e_2Fe_6$	0,014286	$\pi_1, \pi_2, \pi_3$
$e_3Fe_5$	0,085714	$\pi_1, \pi_2, \pi_3$
$e_3Fe_6$	0,042857	$\pi_1, \pi_2, \pi_3$
$e_3Fe_7$	0,014286	$\pi_1, \pi_2, \pi_3$
$e_4Fe_6$	0,085714	$\pi_1, \pi_2, \pi_3$
$e_4Fe_7$	0,042857	$\pi_1, \pi_2, \pi_3$
$e_5Fe_7$	0,085714	$\pi_1, \pi_2, \pi_3$
$e_2Xe_3$	0,900000	$\pi_1, \pi_2, \pi_3$
$e_2Xe_9$	2,702733	$\pi_4, \pi_5$
$e_3Xe_4$	0,900000	$\pi_1, \pi_2, \pi_3$
$e_4Xe_5$	0,900000	$\pi_1, \pi_2, \pi_3$
$e_5Xe_6$	0,900000	$\pi_1, \pi_2, \pi_3$
$e_6Xe_7$	0,900000	$\pi_1, \pi_2, \pi_3$
$e_9Xe_7$	2,702733	$\pi_4, \pi_5$

Даний перелік є підмножиною всіх правил на множині трас журналу  $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5$ . Кожна потенційно допустима траса  $\pi_i^{new}$  характеризується кон'юнкцією із підмножини наведених умов. Сума ваг таких умов є потенціалом траси та, відповідно до (7), задає ймовірність її реалізації.

### 6.3. Результати ймовірнісного виводу

Результати роботи методу наведено в табл. 5. В даній таблиці наведено 12 трас із найбільшим значенням ймовірності із 64 трас, що були сформовані у результаті виводу.

Таблиця 5

Результати ймовірнісного виводу

$i$	Індекс події								Потенціал	Ймовірність траси	Умови	
1	1	2	3	10	4	9		7	8	2,7599	0,0426	$e_3Fe_6, e_3Fe_7, e_9Xe_7$
2	1	2	3	10	6	9		7	8	2,7599	0,0426	$e_3Fe_6, e_3Fe_7, e_9Xe_7$
3	1	2	3	10	4	6	9	7	8	2,8027	0,0444	$e_4Fe_7, e_3Fe_7, e_9Xe_7$

4	1	2	3	10	6	4	9		7	8	2,8027	0,0444	$e_3Fe_6, e_4Fe_7, e_3Fe_7, e_9Xe_7$
5	1	2	3	10	5	4	9		7	8	2,8456	0,0464	$e_3Fe_5, e_4Fe_7, e_3Fe_7, e_9Xe_7$
6	1	2	3	10	5	9			7	8	2,8884	0,0484	$e_3Fe_5, e_5Fe_7, e_3Fe_7, e_9Xe_7$
7	1	2	3	10	5	4	6	9	7	8	2,9742	0,0528	$e_3Fe_5, e_3Fe_6, e_3Fe_7, e_5Fe_7, e_3Fe_5, e_4Fe_7, e_9Xe_7$
8	1	2	3	10	6	5	4	9	7	8	2,9742	0,0528	$e_3Fe_5, e_3Fe_6, e_3Fe_7, e_5Fe_7, e_3Fe_5, e_4Fe_7, e_9Xe_7$
9	1	2	3	10	4	5	6		7	8	3,0571	0,0573	$e_3Fe_5, e_3Fe_6, e_3Fe_7, e_4Xe_5, e_4Fe_6, e_4Fe_7, e_5Xe_6, e_5Fe_7, e_6Xe_7$
10	1	2	3	10	9	4	5	6	7	8	3,0571	0,0573	$e_3Fe_5, e_3Fe_6, e_3Fe_7, e_4Xe_5, e_4Fe_6, e_4Fe_7, e_5Xe_6, e_5Fe_7, e_6Xe_7$
11	1	2	3	10	5	6	9		7	8	3,8313	0,1243	$e_3Fe_5, e_3Fe_6, e_3Fe_7, e_5Xe_6, e_5Fe_7, e_9Xe_7$
12	1	2	3	10	6	4	5	9	7	8	3,8742	0,1298	$e_3Fe_5, e_3Fe_6, e_3Fe_7, e_4Xe_5, e_4Fe_7, e_5Fe_7, e_9Xe_7$

Індекс  $i$  траси  $\pi_i^{new}$  наведено в першій колонці. Колонка «Потенціал» містить суму ваг всіх правил, що розміщені в колонці «Умови».

Аналіз чотирьох найбільш ймовірних трас  $\pi_{12}^{new}$ ,  $\pi_{11}^{new}$ ,  $\pi_{10}^{new}$ ,  $\pi_9^{new}$  показує наступне.

Траса  $\pi_{12}^{new}$  має ймовірність 0,1298 та містить таку послідовність робіт: заявка на ремонт приладу (1); розбирання приладу (2); діагностування несправності (3); перехід до гарантійного ремонту для несправного вузла (10); заміна вузла або деталі (6); узгодження ремонту з замовником (4); покупка вузла або деталі (5); чистка приладу (9); складання приладу (7); оплата та передача приладу замовнику (8).

Дана траса значній мірі відображає логіку сервісного обслуговування в тому випадку, якщо необхідна для ремонту деталь є на складі: спочатку виконується заміна, а потім – покупка деталі. Траса також містить дію з узгодження ремонту з замовником. На практиці таке узгодження може відбуватись у випадку заміни поламаної деталі не на таку ж саму, а на деталь з аналогічними характеристиками.

Траса  $\pi_{11}^{new}$  має ймовірність 0,1243 та містить у собі такі ключові дії після переходу до гарантійного ремонту: Покупка вузла або деталі (5); заміна вузла або деталі (6); Чистка приладу (9). Дана траса в повній мірі відображає логіку гарантійного ремонту.

Траса  $\pi_{10}^{new}$  має ймовірність 0,0573 та поєднує дію з чистки приладу (9), а також послідовність робіт із траси  $\pi_1$ . Дана траса в повній мірі відображає логіку гарантійного ремонту.

Траса  $\pi_9^{new}$  має ймовірність 0,0573 містить у собі послідовність робіт із траси  $\pi_1$ . Дана траса в повній мірі відображає логіку гарантійного ремонту.

## 7. Обговорення результатів дослідження методу ймовірнісного виводу

Отриманий в роботі метод ймовірнісного логічного виведення використовує представлення знань на основі марківських логічних мереж. Ключовими елементами такого представлення є правила модальної логіки, які зв'язують події трас логу бізнес-процесу та задають обмеження й умови виконання дій. Ці обмеження й умови визначаються в залежності від контексту виконання дій бізнес-процесу.

Експериментальна перевірка запропонованого методу підтвердила можливість прогнозування допустимих послідовностей дій бізнес-процесу з використанням правил, отриманих на основі аналізу логу подій.

Визначено набори обмежень та умов виконання дій для спрощеного бізнес-процесу ремонту електронних приладів. В результаті ймовірнісного виведення сформовано 64 траси для переходу від нетипового стану до кінцевого стану бізнес-процесу. Аналіз 4 трас із найбільшим значенням ймовірності показав, що три з 4 трас повністю відповідають традиційним послідовностям робіт із проведення ремонту. Одна траса визначає нестандартну послідовність робіт для випадку, якщо деталі для ремонту є на складі. Вказана відмінність цієї траси пов'язана з тим, що для навчання було використано всього 5 трас, причому підмножини  $\{\pi_1, \pi_2, \pi_3\}$  та  $\{\pi_4, \pi_5\}$  мають однакові послідовності дій кожна.

Також слід зазначити, що використання умов типу *Future* дозволяє більш обґрунтовано визначити послідовності виконання дій бізнес-процесу. Розрахункова ймовірність успішного завершення 10 найбільш вірогідних послідовностей збільшилась в середньому на 21,2% з урахуванням цих правил.

Запропонований метод не враховує циклічного виконання дій бізнес-процесу, а також атрибутів подій, що потребує проведення подальших досліджень. Врахування атрибутів подій дає можливість узагальнити або деталізувати правила. Узагальнені правила спрощують пошук потенційно можливих траєкторій виконання дій бізнес-процесу, а деталізовані правила дозволяють більш точно виділити ці траєкторії.

Перевага запропоновано методу полягає в тому, що він забезпечує можливість безперервної адаптації рекомендацій по мірі виконання бізнес-процесу, оскільки обмеження та умови виконання дій можуть бути скориговані на основі нових подій, внесених до складу логу.

Досить цікава сфера використання запропонованого методу полягає в прогнозуванні перспективних напрямків створення програмних екосистем. Існуючі підходи є трудомісткими і використовують параметричну ідентифікацію [13] та онтології [14]. Використання журналів подій існуючих інформаційних систем дозволяє визначити обмеження та умови, які є суттєвими



для створення дружньої поведінки в інформаційному середовищі. Нові траєкторії поведінки інформаційних систем можуть бути сформовані з урахуванням цих обмежень та умов.

## **8. Висновки**

1. Розроблені моделі правил виконання дій бізнес-процесу, що поєднують обмеження та умови реалізації кожної можливої послідовності робіт. Сукупність правил визначає пріоритети щодо виконання дій для конкретного стану процесу в умовах неповноти інформації про причини виконання цих дій. Це дає можливість порівнювати різні варіанти реалізації бізнес-процесу у випадку непередбачуваних зовнішніх впливів на хід робіт. Також запропоновані моделі правил дозволяють автоматизувати побудову бази знань для системи процесного управління шляхом визначення порядку в парах подій по трасах журналу бізнес-процесу та подальшого розподілу отриманих залежностей на обмеження й умови виконання дій. Представлення правил у вигляді упорядкованих пар подій дає можливість доповнювати базу знань в реальному часі, по мірі запису нових подій до журналу бізнес-процесу.

2. Розроблено метод імовірнісного виведення послідовностей дій бізнес-процесу. Сутність методу полягає у побудові та упорядкуванні за ймовірнісною оцінкою множини нових варіантів виконання бізнес-процесу відносно поточного нестандартного стану з використанням знань у формі правил виконання дій. Метод дозволяє скоротити час прийняття рішень ОПР щодо управління бізнес-процесом на основі вибору нової послідовності дій із упорядкованої множини допустимих для виконання варіантів. Також метод дає можливість доповнити модель бізнес-процесу такими варіантами виконання дій, що враховують зміни у стані предметної області або нові зовнішні впливи на діяльність підприємства, на якому виконується бізнес-процес.

3. Виконана експериментальна перевірка показала, що отримані запропонованим методом нові послідовності дій із найбільшими значеннями ймовірності відображають існуючу логіку виконання робіт бізнес-процесу. Запропоноване поєднання умов та обмежень виконання дій дозволяє щонайменше на порядок зменшити кількість допустимих послідовностей робіт бізнес-процесу і відповідно знизити потребу у обчислювальних ресурсах при використанні методу імовірнісного виведення. Доповнення умов для пар послідовних дій умовами для довільних пар дій дозволяє точніше (більш ніж на 20 %) визначати ймовірність отриманих трас.

## **Література**

1. Polyvyanyu A., Smirnov S., Weske M. Business Process Model Abstraction // Handbook on Business Process Management 1. 2014. P. 147–165. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-45100-3\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-45100-3_7)
2. Müller D., Reichert M., Herbst J. Data-Driven Modeling and Coordination of Large Process Structures // On the Move to Meaningful Internet Systems 2007: CoopIS, DOA, ODBASE, GADA, and IS. 2007. P. 131–139. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-76848-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-540-76848-7_10)

3. Gronau N., Heinze P., Weber E. Conversion and Transformation-Oriented View on Knowledge Flows // Modeling and Analyzing knowledge intensive business processes with KMDL. 2012. P. 249–268.

4. A Proposal to Model Knowledge in Knowledge-Intensive Business Processes / Vladova G., Thim C., Weber E., Ullrich A., Gronau N. // Proceedings of the Sixth International Symposium on Business Modeling and Software Design. 2016. doi: <https://doi.org/10.5220/0006222600980103>

5. Information support for business processes at virtual enterprises with multi-agent technologies / Pavlenko V., Shostak I., Morozova O., Danova M. // 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/dessert.2018.8409189>

6. Process mining using BPMN: relating event logs and process models / Kalenkova A. A., van der Aalst W. M. P., Lomazova I. A., Rubin V. A. // Software & Systems Modeling. 2015. Vol. 16, Issue 4. P. 1019–1048. doi: <https://doi.org/10.1007/s10270-015-0502-0>

7. Causality-based model checking in business process management tasks / Sergii C., Ihor L., Aleksandr P., Ievgen B. // 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/dessert.2018.8409176>

8. Implementation of search mechanism for implicit dependences in process mining / Kalynychnenko O., Chalyi S., Bodyanskiy Y., Golian V., Golian N. // 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS). 2013. doi: <https://doi.org/10.1109/idaacs.2013.6662657>

9. Richardson M., Domingos P. Markov logic networks // Machine Learning. 2006. Vol. 62, Issue 1-2. P. 107–136. doi: <https://doi.org/10.1007/s10994-006-5833-1>

10. Levykin V., Chala O. Method of automated construction and expansion of the knowledge base of the business process management system // EUREKA: Physics and Engineering. 2018. Issue 4. P. 29–35. doi: <http://dx.doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00676>

11. Konur S. A survey on temporal logics for specifying and verifying real-time systems // Frontiers of Computer Science. 2013. Vol. 7, Issue 3. P. 370–403.

12. Lowd D., Domingos P. Efficient Weight Learning for Markov Logic Networks // European Conference on Principles of Data Mining and Knowledge Discovery. PKDD 2007: Knowledge Discovery in Databases. 2007. P. 200–211. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-74976-9\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-540-74976-9_21)

13. A retrospective analysis technology of the Green Software Ecosystems development on the parametric identification of the Brown's model / Shostak I., Danova M., Romanenkov Yu., Kuznetsova Yu. // 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/dessert.2018.8409197>

14. Shostak I., Volobuyeva L., Danova M. Ontology based approach for green software ecosystem formalization // 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies. 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/dessert.2018.8409196>