

*С. Ф. ЧАЛИЙ, В. О. ЛЕЩИНСЬКИЙ, І. О. ЛЕЩИНСЬКА*

### **КОНТРАФАКТУАЛЬНА ТЕМПОРАЛЬНА МОДЕЛЬ ПРИЧИННО-НАСЛІДКОВИХ ЗВ'ЯЗКІВ ДЛЯ ПОБУДОВИ ПОЯСНЕНЬ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ**

Предметом дослідження є процеси побудови пояснень на основі причинно-наслідкових зв'язків між станами або діями інтелектуальної системи. Пояснення представляє собою знання про послідовність причин та наслідків, які визначають процес та результат роботи інтелектуальної інформаційної системи. Мета роботи полягає в розробці контрафактуальної темпоральної моделі причинно-наслідкових зв'язків у складі пояснення процесу функціонування інтелектуальної системи з тим, щоб забезпечити виявлення каузальних залежностей на основі аналізу журналів поведінки такої системи. Для досягнення сформульованої мети вирішуються такі задачі: визначення темпоральних властивостей контрафактуального опису причинно-наслідкових зв'язків між діями або станами інтелектуальної інформаційної системи; розробка темпоральної моделі каузальних зв'язків, що враховує як факти виникнення подій в інтелектуальній системі, так і можливість виникнення подій, що не впливають на формування поточного рішення. Висновки. Виконано структурування темпоральних властивостей каузальних зв'язків для пар подій, які виникають послідовно в часі, або мають проміжні події. Такі зв'язки представлено альтернативними причинно-наслідковими зв'язками з використанням темпоральних операторів «Next» та «Future», що дає можливість реалізувати контрафактуальний підхід до представлення причинності. Запропоновано контрафактуальну темпоральну модель причинно-наслідкових зв'язків, яка визначає детерміновані каузальні зв'язки для пар послідовних подій та пар подій, між якими є інші події, що визначає властивість транзитивності таких залежностей і, відповідно, створює умови для опису послідовності причин та наслідків у складі пояснення в інтелектуальній системі з заданим ступенем деталізації. Модель забезпечує можливість визначення причинно-наслідкових зв'язків, між якими є проміжні події, які не впливають на кінцевий результат роботи інтелектуальної інформаційної системи.

**Ключові слова:** пояснення; інтелектуальна інформаційна система; темпоральні правила; каузальність; причинно-наслідкові зв'язки.

*С. Ф. ЧАЛИЙ, В. А. ЛЕЩИНСКИЙ, И. А. ЛЕЩИНСКАЯ*

### **КОНТРАФАКТУАЛЬНАЯ ТЕМПОРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ОБЪЯСНЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

Предметом исследования являются процессы построения объяснений на основе причинно-следственных связей между состояниями или действиями интеллектуальной системы. Объяснение представляет собой знания о последовательности причин и следствий, определяющих процесс и результат работы интеллектуальной информационной системы. Цель работы состоит в разработке контрафактуальной темпоральной модели причинно-следственных связей в составе разъяснения процесса функционирования интеллектуальной системы с тем, чтобы обеспечить выявление каузальных зависимостей на основе анализа журналов поведения такой системы. Для достижения сформулированных целей решаются следующие задачи: определение темпоральных свойств контрафактуального описания причинно-следственных связей между действиями или состояниями интеллектуальной информационной системы; разработка темпоральной модели каузальных связей, учитывающей как факты возникновения событий в интеллектуальной системе, так и возможность возникновения событий, не влияющих на формирование текущего решения. Выводы. Выполнена структуризация темпоральных свойств каузальных связей для пар событий, которые возникают последовательно во времени или имеют промежуточные события. Такие связи представлены альтернативными причинно-следственными отношениями с использованием темпоральных операторов «Next» и «Future», что позволяет реализовать контрафактуальный подход к представлению причинности. Предложена контрафактуальная темпоральная модель причинно-следственных связей, которая определяет детерминированные каузальные связи для пар последовательных событий и пар событий, между которыми есть другие события, что определяет свойство транзитивности таких зависимостей и, соответственно, создает условия для описания последовательности причин и следствий в составе объяснения в интеллектуальной системе с заданной степенью детализации. Модель обеспечивает возможность определения причинно-следственных связей, между которыми есть промежуточные события, не влияющие на конечный результат работы интеллектуальной информационной системы.

**Ключевые слова:** объяснение; интеллектуальная информационная система; темпоральное правило; каузальность; причинно-следственная связь.

*S. CHALYI, V. LESHCHYNSKYI, I. LESHCHYNSKA*

### **COUNTERFACTUAL TEMPORAL MODEL OF CAUSAL RELATIONSHIPS FOR CONSTRUCTING EXPLANATIONS IN INTELLIGENT SYSTEMS**

The subject of the research is the processes of constructing explanations based on causal relationships between states or actions of an intellectual system. An explanation is knowledge about the sequence of causes and effects that determine the process and result of an intelligent information system. The aim of the work is to develop a counterfactual temporal model of cause-and-effect relationships as part of an explanation of the process of functioning of an intelligent system in order to ensure the identification of causal dependencies based on the analysis of the logs of the behavior of such a system. To achieve the stated goals, the following tasks are solved: determination of the temporal properties of the counterfactual description of cause-and-effect relationships between actions or states of an intelligent information system; development of a temporal model of causal connections, taking into account both the facts of occurrence of events in the intellectual system, and the possibility of occurrence of events that do not affect the formation of the current decision. Conclusions. The structuring of the temporal properties of causal links for pairs of events that occur sequentially in time or have intermediate events is performed. Such relationships are represented by alternative causal relationships using the temporal operators "Next" and "Future", which allows realizing a counterfactual approach to the representation of causality. A counterfactual temporal model of causal relationships is proposed, which determines deterministic causal relationships for pairs of consecutive events and pairs of events between which there are other events, which determines the transitivity property of such dependencies and, accordingly, creates conditions for describing the sequence of causes and effects as part of the explanation in intelligent system with a given degree of detail. The model provides the ability to determine cause-and-effect relationships, between which there are intermediate events that do not affect the final result of the intelligent information system.

**Keywords:** explanation; intelligent information system; temporal rules; causality, cause-and-effect relationships.

**Вступ.** Сучасні інтелектуальні технології та системи застосовують методи обчислювального інтелекту для вирішення складних задач, що містять невідомості або є стохастичними за своєю природою.

Використання таких методів передбачає навчання моделей, що забезпечують подальшу підтримку процесу формування рішень в інтелектуальній системі. Для навчання використовують набори вхідних даних, що характеризують предметну область та процеси вирішення відповідних завдань для користувача [1].

Однак, внаслідок особливостей процесу машинного навчання, алгоритм прийняття рішень при використанні навчених моделей зазвичай не є зрозумілим для користувача. Усунення даної невідповідності потребує додаткового використання пояснень щодо причинно-наслідкових зв'язків між діями інтелектуальної системи, які й призвели до представленого рішення. Використання пояснень дає можливість обґрунтувати отримане інтелектуальною системою рішення на основі представлення причин як рішення в цілому, так і окремих дій з його досягнення, а також його переваг та недоліків. Тому пояснення створює підґрунтя для розуміння користувачем наслідків використання отриманого рішення [2].

В цілому, пояснення дає можливість користувачеві зрозуміти процес отримання рішення та його переваги через представлену інформацію щодо каузальних зв'язків між сутностями предметної області, а також між діями із його досягнення. Це забезпечує користувачеві можливість обґрунтованого застосування сформованого рішення, або ж відмови від запропонованих інтелектуальною системою рекомендацій [3, 4]. Наприклад, пояснення щодо популярності запропонованих предметів в системах електронної комерції дає можливість користувачеві спростити вибір цільового товару або послуги серед широкого спектру аналогічних товарів. Тобто пояснення обґрунтовує причину вибору певного предмету через сукупність таких його важливих для використання характеристик, які призводять до популярності цього товару у інших споживачів [4].

Таким чином, побудова пояснень в інтелектуальних системах базується на визначенні підмножини актуальних у процесі прийняття рішення причинно-наслідкових залежностей в рамках множини можливих каузальних зв'язків. Отримані ланцюжки з причин та їх наслідків дають можливість обґрунтувати послідовність кроків прийняття рішення, починаючи з вводу та обробки вхідних даних, й до формування кінцевого результату, який є суттєвим для вирішення задач користувача. Представлення каузального ланцюжка може бути виконано з різним ступенем деталізації причин і наслідків, що дає можливість однотипним чином надати пояснення як для процесу прийняття рішень, так і для сформованої інтелектуальною системою рекомендації.

Пояснення відображає послідовність станів або дій з прийняття рішення у часі, тому ключовий елемент пояснення, множина каузальних залежностей, характеризується темпоральною асиметричністю [5]. Тобто кожна пара подій (причина, наслідок) є строго упорядкованою у часі. Однак упорядкованість у часі для декількох пар подій не завжди є строгою. Причина такої властивості полягає в тому, що процес прийняття рішення може бути описаний різними

підмножинами причинно-наслідкових залежностей. Також слід враховувати варіативність самого процесу отримання рішення. Тому пояснення має наводити відмінності альтернативних каузальних залежностей: як фактичної, так і тих, що не можуть бути реалізовані у поточному процесі прийняття рішення, оскільки лише одна з можливих залежностей відображає фактичну послідовність дій з отримання результату в інтелектуальній системі.

Представлення каузальності з урахуванням розглянутої особливості реалізовано в рамках контрфактуального аналізу. Згідно даного підходу, причинно-наслідковий зв'язок між двома подіями існує лише в тому випадку, коли друга подія завжди виникає після виникнення першої, і є відсутнім в тому випадку, якщо перша подія не існує [6]. Відмінність між фактичними і потенційними каузальними зв'язками з урахуванням нестрогої упорядкованості у часі каузальних залежностей із різних альтернатив потребує урахування аспекту часу виникнення фактичних подій, які відображають послідовність прийняття рішення.

Зазначене свідчить про актуальність проблеми формалізації каузальних залежностей для відображення процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі з урахуванням множини можливих потенційних альтернатив, а також змін причинно-наслідкових залежностей з часом. Темпоральна формалізація причинно-наслідкових зв'язків дає можливість побудувати динамічні пояснення, які відображають поточний процес прийняття рішення в інтелектуальній системі у вигляді послідовності каузальних залежностей із заданим ступенем деталізації. Використання таких пояснень забезпечує умови для підвищення довіри користувача до запропонованих інтелектуальною системою рішень та, відповідно, підвищення ефективності використання останніх.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Традиційний підхід до представлення пояснень, який передбачає опис процесу роботи експертної системи шляхом інтерпретації причинно-наслідкових залежностей у формі правил, наведено в роботі [3]. Контрфактуальний аналіз причинно-наслідкових залежностей був представлений в роботах [5, 6] та уточнений і доповнений ймовірнісними можливостями, а також врахуванням ланцюжків подій в роботі [7]. Ключова ідея аналізу полягає у визначенні каузальності не лише на основі послідовності фактичних подій, але й з врахуванням контрфактуальних послідовностей, які потенційно можуть бути істинними, але не є реалізованими по факту. На сьогодні даний підхід є базовим при формалізації каузальності, однак він має ряд недоліків. Зокрема, не завжди вирішується питання транзитивності каузальних зв'язків, а також питання випередження причин, що не дає можливість однозначно описати причини відповідних подій. Підхід до вирішення даного питання на основі врахування аспектів подій було запропоновано в роботах [8, 9]. Головна ідея аспектного підходу полягає у співставленні аспектів подій для визначення каузальних зв'язків між ними. Подальший розвиток контрфактуального аналізу каузальності пов'язаний із

роботами [10–12], в яких запропоновано визначати каузальні зв'язки з використанням фреймворку структурних рівнянь (SEF). Такі залежності задаються на основі направленої графу, вершинами якого є змінні, що відповідають причинам або наслідкам, а дугами – відношення між цими змінними. Виділяються екзогенні та ендогенні змінні. Перші визначаються зовнішніми факторами, а другі відношенням між змінними. Значення змінних визначають контекст причинно-наслідкових залежностей. Однак структурні рівняння не враховують темпоральний фактор. В той же час, дослідження в сфері сприйняття інформації людьми [13] показали, що при описі послідовності подій важливо враховувати час їх виникнення, оскільки попередні події вважаються більш значимими порівняно з наступними подіями.

Темпоральний аспект пояснень розглядається в роботах [14–17]. В роботах [14, 15] представлено підходи до побудови пояснень з використанням темпоральних правил, що базуються на операторах темпоральної логіки. В роботах [16, 17] запропоновано модель та принципи використання причинно-наслідкових залежностей для побудови пояснень з урахуванням темпоральних зв'язків між фактами. Однак контрфактуальний опис каузальності, з можливими альтернативами причин та наслідків, потребує подальших досліджень.

Таким чином, існуючі можливості контрфактуального підходу до опису каузальності дають можливість сформулювати альтернативні варіанти пояснень, однак не приділяють уваги суттєвому для сприйняття пояснень користувачем темпоральному аспекту. Зазначене свідчить про важливість формалізації причинно-наслідкових залежностей з використанням темпоральних операторів.

**Метою цієї статті** є розробка темпоральної моделі причинно-наслідкових зв'язків у складі пояснення процесу функціонування інтелектуальної системи з тим, щоб забезпечити виявлення каузальних залежностей на основі аналізу журналів поведінки такої системи.

Для досягнення сформульованої мети вирішуються такі задачі:

- визначення темпоральних властивостей контрфактуального опису причинно-наслідкових зв'язків між діями або станами інтелектуальної інформаційної системи;

- розробка темпоральної моделі каузальних зв'язків, що враховує як факти виникнення подій в інтелектуальній системі, так і можливість виникнення подій, що не впливають на формування поточного рішення.

**Темпоральні властивості каузальних зв'язків в рамках контрфактуального аналізу причинності.**

Структуризацію темпоральних властивостей причинності проведемо для пари подій, які виникли послідовно в часі, або мають проміжні події.

Нехай існує множина упорядкованих у часі послідовностей подій  $E = \{E_i\}$ , які відображають послідовність прийняття рішення в інтелектуальній системі. Кожна з цих послідовностей подій може мати

вигляд (1) або (2), тобто складатись із пар подій  $e_{i,j}$ ,  $e_{i,k}$ , між якими можуть виникати інші події:

$$E_i^{(1)} = \langle e_{i,1}, \dots, e_{i,j}, e_{i,k}, \dots \rangle, \quad (1)$$

$$E_i^{(2)} = \langle e_{i,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{i,m}, \dots, e_{i,k}, \dots \rangle. \quad (2)$$

У послідовності  $E_i^{(1)}$  зв'язок між подіями  $e_{i,j}$ ,  $e_{i,k}$  представлено явно, а у  $E_i^{(2)}$  – опосередковано, оскільки між ними існує щонайменше одна інша подія. Тоді, згідно контрфактуального підходу, між подіями  $e_{i,j}$  та  $e_{i,k}$  у послідовності  $E_i^{(1)}$  існує каузальний зв'язок, якщо виконується умова:

$$(\forall i) e_{i,j} X e_{i,k}, \quad (3)$$

де  $X$  – темпоральний оператор типу «Next», який визначає, що безпосередньо за подією  $e_{i,j}$  виникає подія  $e_{i,k}$ .

Для послідовності  $E_i^{(2)}$  умова каузальності за контрфактуальним підходом має вигляд:

$$(\forall i) e_{i,j} F e_{i,k}, \quad (4)$$

де  $F$  – темпоральний оператор типу «Future», який визначає, що через деякий час за подією  $e_{i,j}$  виникає подія  $e_{i,k}$ .

Необхідною умовою каузальності у відповідності до (3) є виникнення події  $e_{i,k}$  безпосередньо за подією  $e_{i,j}$  на всіх послідовностях  $E_i^{(1)}$ , які описують можливі варіанти поведінки інтелектуальної системи.

Умова каузальності (4) встановлює, що подія  $e_{i,k}$  виникає після події  $e_{i,j}$  на всіх послідовностях  $E_i^{(2)}$  через одну або декілька проміжних подій  $e_{i,m}$ . За даною умовою, каузальний зв'язок між подіями  $e_{i,j}$  та  $e_{i,k}$  об'єднує декілька проміжних каузальних залежностей типу «Next»:

$$e_{i,j} F e_{i,k} \equiv e_{i,j} N \dots N e_{i,m} N \dots N e_{i,k}. \quad (5)$$

Тобто з використанням темпоральних операторів може бути отриманий ланцюжок подій, за допомогою якого було запропоновано представляти контрфактуальну каузальність у роботі [7].

Таким чином, представлення каузальності в рамках контрфактуального підходу з урахуванням темпорального аспекту (3) дає можливість визначити детерміновані причинно-наслідкові залежності для пари послідовних у часі подій. Представлення каузального

зв'язку (4) дає можливість визначити ланцюжок детермінованих причинно-наслідкових залежностей, який описує фрагмент процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі. Такий фрагмент є спільним для всіх можливих реалізацій даного процесу.

#### Контрфактуальна темпоральна модель каузальних зв'язків.

Узагальнене представлення каузальності  $C$  у темпоральному аспекті на множині послідовностей подій  $E = \{E_i\}$  містить множину каузальних залежностей  $c_k^j$ , так що кожна залежність задається для пари подій  $(e_{i,j}, e_{i,k})$ , що виникли на всіх послідовностях із множини  $E$ :

$$C = \{c_k^j : (\forall i) \exists (e_{i,j}, e_{i,k})\}. \quad (6)$$

Кожна каузальна залежність  $c_k^j$  поєднує представлення (3) та (4):

$$c_k^j = \begin{cases} \text{true, if } (\forall i) \exists e_{i,j} : \\ (e_{i,j} E e_{i,k}) \vee (e_{i,j} F e_{i,k}), \\ \text{false, otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

Вираз (7) визначає такі причинно-наслідкові зв'язки між подіями  $e_{i,j}$  та  $e_{i,k}$ , які реалізуються для всіх можливих послідовностей  $E_i$  прийняття рішень в інтелектуальній системі. Тому множина каузальних залежностей (6) задає «скелет» процесу прийняття рішення та може розглядатись як множина обмежень на можливі послідовності дій в інтелектуальній системі. Зазначене підтверджує детермінований характер каузальних залежностей  $c_k^j$ .

Представлення каузальних зв'язків на основі комбінації темпоральних операторів «Next» та «Future» дає можливість обґрунтувати властивість транзитивності каузальності в рамках контрфактуального підходу.

Проблема транзитивності у контрфактуальному представленні виникає внаслідок того, що не всі пари подій у визначеному ланцюжку містять каузальні зв'язки. Деякі події є проміжними і не впливають на ланцюжок причинно-наслідкових зв'язків. Класичний приклад недостатніх можливостей контрфактуального підходу щодо обґрунтування транзитивності каузальних зв'язків наведено в роботі [18]. У даному прикладі розглядається послідовність подій, що привела до підпалення від вогнища легкозаймистих предметів.

Така послідовність містить події: палаюче вогнище (1); внесення солі калію до вогнища (2); колір вогнища змінюється на фіолетовий (3); вогнище підпалює сусідні легкозаймисті предмети (4). Однак візуальна причина: зміна кольору вогнища не є причиною підпалу. Тобто порушується ланцюжок каузальних зв'язків і, відповідно, властивість транзи-

тивності для причинно-наслідкових залежностей, що складають даний ланцюжок. Для вирішення даної проблеми опису властивості транзитивності каузальних залежностей в роботах [9, 10] запропоновано враховувати різні аспекти вказаних подій. Тобто невідповідність аспектів 3-ї (зміна кольору вогнища) та 4-ї події (підпалення предметів) приводить до невірної визначення каузальності.

Запропонований темпоральний опис дає можливість обґрунтувати транзитивність таких залежностей за рахунок комбінування каузальних зв'язків, заданих за допомогою темпоральних операторів «Next» та «Future». Перший оператор визначає безпосередню каузальну залежність між двома подіями, а другий дає можливість «пропускати» події, які не є суттєвими для відображення каузальних зв'язків.

Розглянемо обґрунтування транзитивності каузальних зв'язків з урахуванням відмінності у їх представленні.

У відповідності до визначення темпорального оператора «Future», для довільної пари подій  $(e_{i,j}, e_{i,k})$ , таких що  $c_k^j = e_{i,j} F e_{i,k}$ , мають місце проміжні каузальні зв'язки  $e_{i,j} N e_{i,m}$ ,  $e_{i,m} N e_{i,k}$  типу (3), а також  $e_{i,m} F e_{i,k}$  або  $e_{i,j} F e_{i,m}$  типу (4) для кожної проміжної події  $e_{i,m}$ :

$$\begin{aligned} & (\forall c_k^j = e_{i,j} F e_{i,k}) \exists e_{i,m} : \\ & : (e_{i,j} N e_{i,m} F e_{i,k}) \vee (e_{i,j} F e_{i,m} N e_{i,k}) \vee \\ & \vee (e_{i,j} N e_{i,m} N e_{i,k}). \end{aligned} \quad (8)$$

Графічне представлення виразу (8) при деталізації каузальної залежності у вигляді  $e_{i,j} N e_{i,m} F e_{i,k}$ ,  $e_{i,j} F e_{i,m} N e_{i,k}$  та  $e_{i,j} N e_{i,m} N e_{i,k}$  наведено на рис. 1, рис. 2 та рис. 3 відповідно.

Наведена деталізація  $c_k^j = e_{i,j} F e_{i,k}$  через пару залежностей  $c_{j,m} = e_{i,j} N e_{i,m}$  та  $c_{m,k} = e_{i,m} N e_{i,k}$  типу «Next» безпосередньо свідчить про властивість транзитивності (рис. 1):

$$c_m^j \wedge c_k^m \Rightarrow c_k^j. \quad (9)$$

Аналогічно, деталізація  $c_k^j$  через залежності  $c_m^j = e_{i,j} N e_{i,m}$  та  $c_k^m = e_{i,m} F e_{i,k}$  або  $c_m^j = e_{i,j} F e_{i,m}$  та  $c_k^m = e_{i,m} N e_{i,k}$  не лише відображає властивість транзитивності, але й забезпечує можливість подальшої деталізації ланцюжка подій (рис. 2, рис. 3).

Тоді у випадку відсутності каузальних зв'язків згідно прикладу [19] достатньо задати каузальну залежність типу «Future», що дає можливість не визначати зв'язок для подій (3) та (4).

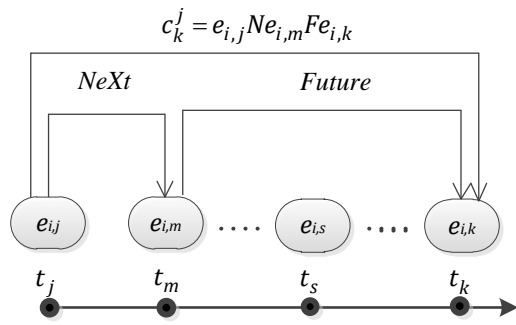


Рис. 1. Зв'язок з проміжною подією  $e_{i,m}$  для каузальної залежності, представленій оператором «Future», та деталізованої у вигляді  $e_{i,j}Ne_{i,m}Fe_{i,k}$

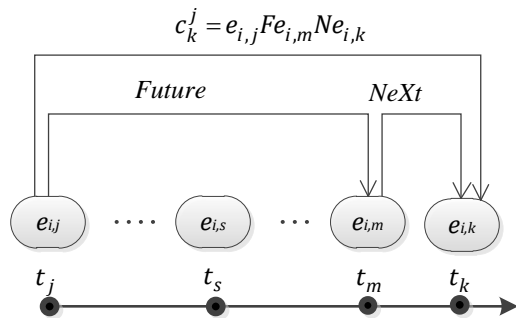


Рис. 2. Зв'язок з проміжною подією  $e_{i,m}$  для каузальної залежності, представленій оператором «Future», та деталізованої у вигляді  $e_{i,j}Fe_{i,m}Ne_{i,k}$

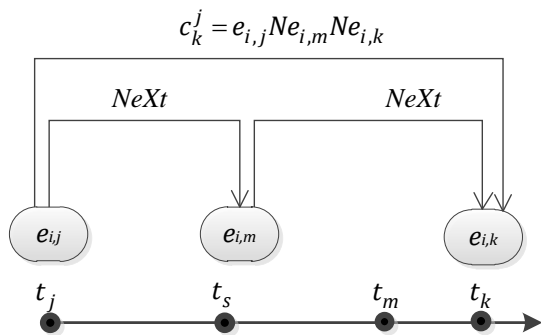


Рис. 3. Зв'язок з проміжною подією  $e_{i,m}$  для каузальної залежності, представленій оператором «Future», та деталізованої у вигляді  $e_{i,j}Ne_{i,m}Ne_{i,k}$

Якщо ж проміжні зв'язки існують, то виконується подальша деталізація залежностей  $c_k^m = e_{i,m}Fe_{i,k}$  або  $c_m^j = e_{i,j}Fe_{i,m}$  за схемою (8).

Дану модель було використано при побудові причинно-наслідкових зв'язків між подіями логу процесу сервісного обслуговування фірми «Вольво-ІТ». Лог складається із множини слідів виконання різних варіантів процесу сервісного обслуговування (трас). Ці альтернативи виконуються різними виконавцями, в різних країнах. Кожна траса складається із

лінійної послідовності подій, що відображають дії процесу. Побудова причинно-наслідкових зв'язків дала можливість порівняти виконання дій із сервісного обслуговування для виконавців з різних країн, що створює умови для модернізації альтернативних послідовностей дій згідно з кращими варіантами процесу сервісного обслуговування.

**Висновки.** Виконано структурування темпоральних властивостей каузальних зв'язків для пар подій, які виникають послідовно в часі, або мають проміжні події. Такі зв'язки представлено альтернативними причинно-наслідковими зв'язками з використанням темпоральних операторів «Next» та «Future», що дає можливість реалізувати контрфактуальний підхід до представлення причинності.

Запропоновано контрфактуальну темпоральну модель причинно-наслідкових зв'язків, яка визначає детерміновані каузальні зв'язки для пар послідовних подій та пар подій, між якими є інші події, що визначає властивість транзитивності таких залежностей і, відповідно, дає можливість описати послідовність причин та наслідків у складі пояснення в інтелектуальній системі з заданим ступенем деталізації.

#### Список літератури

- Engelbrecht Andries P. *Computational Intelligence: An Introduction*. NJ: John Wiley & Sons, 2007. 632 p.
- Gunning D., Aha D. DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program. *AI Magazine*. 2019. № 40(2). P. 44-58.
- Swartout W., Moore J. Explanation in Second Generation Expert Systems / ed. David J-M., Krivine J-P., Simmons R. *Second generation expert systems*, Springer-Verlag. 1993. P. 543-585.
- Tintarev N., Masthoff J. A survey of explanations in recommender systems. *The 3rd international workshop on web personalisation, recommender systems and intelligent user interfaces (WPRSIUT'07)*. 2007. P. 801-810.
- Lewis D. Counterfactual Dependence and Time's Arrow. *Counterfactuals and Laws*. 1979. Vol. 13, № 4. P. 455-476.
- Lewis D. Causation. *Journal of Philosophy*. 1973. № 70 (17). P. 556-567.
- Lewis D. Causation as influence. *Journal of Philosophy*. 2000. Vol. 97, № 4. P. 182-97.
- Paul L. A. *Aspect Causation*. In Collins, Hall & Paul. 2004. P. 205-24.
- Paul L. A., Hall. N. *Causation: A User's Guide*. Oxford: Oxford University Press, 2013. 259 p.
- Halpern J. Y. Axiomatizing causal reasoning. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2000. № 12. P. 317-337.
- Halpern J. Y., Pearl J. Causes and explanations: A structural-model approach. Part I: Causes. *The British Journal for the Philosophy of Science*. 2005. № 56 (4). P. 843-887.
- Halpern J. Y., Pearl J. Causes and explanations: A structural-model approach. Part II: Explanations. *The British Journal for the Philosophy of Science*. 2005. № 56 (4). P. 889-911.
- Miller D. T., Gunasegaram S. Temporal order and the perceived mutability of events: Implications for blame assignment. *Journal of personality and social psychology*. 1990. № 59 (6). P. 1111- 1118.
- Чалий С.Ф., Лещинський В.О., Лещинська І.О. Інформаційна технологія побудови пояснень з урахуванням темпоральних змін у вимогах користувачів рекомендаційної системи. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2020. № 3. С. 99-103.
- Чалий С.Ф., Лещинський В.О., Лещинська І.О. Декларативно-темпоральний підхід до побудови пояснень в інтелектуальних інформаційних системах. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. пр. Темат. вип. Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2(4). С. 51-56.

16. Chalyi S., Leshchynskiy V. Temporal representation of causality in the construction of explanations in intelligent systems. *Advanced Information Systems*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2020. Vol. 4, № 3. P. 113-117.
17. Чалий С.Ф., Лещинський В.О., Лещинська І.О. Використання темпоральних властивостей каузальних залежностей у поясненнях в рекомендаційних системах. *VI Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем»*. 2020. С. 169-170.
18. Ehring D. Causal Relata. *Synthese*. 1987. № 73(2). P. 319–28.
12. Halpern J. Y., Pearl J. Causes and explanations: A structural-model approach. Part II: Explanations. *The British Journal for the Philosophy of Science*. 2005, 56 (4), pp. 889-911.
13. Miller D. T., Gunasegaram S. Temporal order and the perceived mutability of events: Implications for blame assignment. *Journal of personality and social psychology*. 1990, no 59 (6), pp. 1111- 1118.
14. Chalyi S., Leshchynskiy V., Leshchynska I. Informatsiina tekhnolohiia pobudovy poiasnen z urakhuvanniam temporalnykh zmin u vymohakh korystuvachiv rekomendatsiinoi systemy [Information technology of construction of explanations considering temporal changes in requirements of the recommender system's users]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku* [Control, navigation and communication systems]. 2020, no 3, pp. 99-103.
15. Chalyi S., Leshchynskiy V., Leshchynska I. Deklaratyvno-temporalnyi pidkhd do pobudovy poiasnen v intelektualnykh informatsiynykh systemakh [Declarative-temporal approach to the construction of explanations in intelligent information systems]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI": zb. nauk. pr. Temat. vyp. Systemnyi analiz, upravlinnia ta informatsiini tekhnolohii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ, 2020, no. 2(4), pp. 51-56.
16. Chalyi S., Leshchynskiy V. Temporal representation of causality in the construction of explanations in intelligent systems. *Advanced Information Systems*. 2020, vol. 4, no 3, pp. 113-117.
17. Chalyi S., Leshchynskiy V., Leshchynska I. Vykorystannia temporalnykh vlastyvoستي каузальних залежностей u poiasnenniakh v rekomendatsiynykh systemakh [Use of temporal properties of causal dependences in explanations in recommendation systems]. *VI Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia «Kompiuterne modeliuвання ta optymizatsiia skladnykh system»* [VI International Scientific and Technical Conference "Computer Modeling and Optimization of Complex Systems"]. 2020, pp. 169-170.
18. Ehring D. Causal Relata. *Synthese*. 1987, no 73(2), pp. 319–28.

#### References (transliterated)

1. Engelbrecht Andries P. *Computational Intelligence: An Introduction*. NJ: John Wiley & Sons, 2007. 632 p.
2. Gunning D., Aha D. DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program. *AI Magazine*. 2019. no 40(2), pp. 44-58.
3. Swartout W., Moore J. Explanation in Second Generation Expert Systems. David J.-M., Krivine J.-P., Simmons R. (ed) *Second generation expert systems*, Springer-Verlag, 1993, pp. 543-585.
4. Tintarev N., Masthoff J. A survey of explanations in recommender systems. *The 3rd International workshop on web personalisation, recommender systems and intelligent user interfaces (WPRSUI'07)*. 2007, pp. 801-810.
5. Lewis D. Counterfactual Dependence and Time's Arrow. *Counterfactuals and Laws*. 1979. Vol. 13, no. 4, pp. 455-476.
6. Lewis D. Causation. *Journal of Philosophy*. 1973, no 70 (17), pp. 556-567.
7. Lewis D. Causation as influence. *Journal of Philosophy*. 2000., vol. 97, no. 4, pp. 182–97.
8. Paul L. A. *Aspect Causation*. In Collins, Hall & Paul. 2004, pp. 205–24.
9. Paul L. A., Hall. N. *Causation: A User's Guide*. Oxford: Oxford University Press, 2013. 259 p.
10. Halpern J. Y. Axiomatizing causal reasoning. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2000, no 12, pp. 317-337.
11. Halpern J. Y., Pearl J. Causes and explanations: A structural-model approach. Part I: Causes. *The British Journal for the Philosophy of Science*. 2005, no. 56 (4), pp. 843-887.

1. Engelbrecht Andries P. *Computational Intelligence: An Introduction*. NJ: John Wiley & Sons, 2007. 632 p.
2. Gunning D., Aha D. DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program. *AI Magazine*. 2019. no 40(2), pp. 44-58.
3. Swartout W., Moore J. Explanation in Second Generation Expert Systems. David J.-M., Krivine J.-P., Simmons R. (ed) *Second generation expert systems*, Springer-Verlag, 1993, pp. 543-585.
4. Tintarev N., Masthoff J. A survey of explanations in recommender systems. *The 3rd International workshop on web personalisation, recommender systems and intelligent user interfaces (WPRSUI'07)*. 2007, pp. 801-810.
5. Lewis D. Counterfactual Dependence and Time's Arrow. *Counterfactuals and Laws*. 1979. Vol. 13, no. 4, pp. 455-476.
6. Lewis D. Causation. *Journal of Philosophy*. 1973, no 70 (17), pp. 556-567.
7. Lewis D. Causation as influence. *Journal of Philosophy*. 2000., vol. 97, no. 4, pp. 182–97.
8. Paul L. A. *Aspect Causation*. In Collins, Hall & Paul. 2004, pp. 205–24.
9. Paul L. A., Hall. N. *Causation: A User's Guide*. Oxford: Oxford University Press, 2013. 259 p.
10. Halpern J. Y. Axiomatizing causal reasoning. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2000, no 12, pp. 317-337.
11. Halpern J. Y., Pearl J. Causes and explanations: A structural-model approach. Part I: Causes. *The British Journal for the Philosophy of Science*. 2005, no. 56 (4), pp. 843-887.

Надійшла (received) 01.11.2021

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Чалий Сергій Федорович** – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри інформаційних управляючих систем, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9982-9091>; e-mail: [serhii.chalyi@nure.ua](mailto:serhii.chalyi@nure.ua)

**Лещинський Володимир Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8690-5702>; e-mail: [volodymyr.leshchynskiy@nure.ua](mailto:volodymyr.leshchynskiy@nure.ua)

**Лещинська Ірина Олександрівна** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8737-4595>; e-mail: [iryua.leshchynska@nure.ua](mailto:iryua.leshchynska@nure.ua)

**Чалий Сергій Федорович** – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры информационных управляющих систем, г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9982-9091>; e-mail: [serhii.chalyi@nure.ua](mailto:serhii.chalyi@nure.ua)

**Лещинский Владимир Александрович** – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры программной инженерии, г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8690-5702>; e-mail: [volodymyr.leshchynskiy@nure.ua](mailto:volodymyr.leshchynskiy@nure.ua)

**Лещинская Ирина Александровна** – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры программной инженерии, г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8737-4595>; e-mail: [iryua.leshchynska@nure.ua](mailto:iryua.leshchynska@nure.ua)

**Chalyi Serhii Fedorovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of the Department of Information Control System, Kharkiv; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9982-9091>; e-mail: [serhii.chalyi@nure.ua](mailto:serhii.chalyi@nure.ua)

**Leshchynskiy Volodymyr Oleksandrovich** – PhD, Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of the Department of Software Engineering, Kharkiv; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8690-5702>; e-mail: [volodymyr.leshchynskiy@nure.ua](mailto:volodymyr.leshchynskiy@nure.ua)

**Leshchynska Irina Oleksandrivna** – PhD, Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of the Department of Software Engineering доцент кафедри програмної інженерії, Kharkiv; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8737-4595>; e-mail: [iryua.leshchynska@nure.ua](mailto:iryua.leshchynska@nure.ua)