

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

РЕЛЯЦІЙНО-ТЕМПОРАЛЬНА МОДЕЛЬ НАБОРУ СУТНОСТЕЙ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ДЛЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ РІШЕННЯ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІЙ ІНФОРМАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ

Предметом дослідження є процеси формування причинно-наслідкових зв'язків між станами сутностей предметної області у процесі функціонування інтелектуальної інформаційної системи. Дані каузальні зв'язки відображають залежності, які лежать в основі процесу отримання результату в інформаційній системі, і тому вони можуть бути використані для формування пояснень щодо цього процесу. Пояснення відображає знання щодо причин та наслідків як щодо отриманого результату в цілому, так і щодо окремих дій процесу прийняття рішення в інформаційній системі. Використання таких знань підвищує довіру користувача до отриманих від інформаційної системи рішень. Мета роботи полягає в розробці реляційно-темпоральної моделі представлення множини взаємопов'язаних сутностей предметної області, які є об'єктом формування рішення в інформаційній системі, з тим, щоб створити умови для виявлення каузальних залежностей щодо процесу формування рішення в такій системі. Для досягнення сформульованої мети вирішуються такі задачі: структуризація залежностей між сутностями предметної області у атрибутивному та темпоральному аспектах; визначення обмежень щодо процесу отримання рішення в інформаційній системі на основі статичних залежностей між сутностями; визначення темпоральних зв'язків в рамках одного класу сутностей як відображення каузальних залежностей між сутностями у процесі отримання рішення в інтелектуальній системі; побудова реляційно-темпоральної моделі взаємопов'язаних сутностей предметної області. Висновки. Виконано структуризацію статичних та динамічних залежностей між сутностями предметної області, що є об'єктом формування рішення в інформаційній системі. Визначено статичні обмеження щодо процесу формування рішення, які пов'язані із властивостями предметної області. Визначено темпоральні залежності між сутностями предметної області, які відображають причинно-наслідкові зв'язки між діями процесу з формування рішення. Запропоновано реляційно-темпоральну модель пов'язаних сутностей предметної області, що містить класи еквівалентності сутностей, статичні залежності між властивостями різних класів еквівалентності, а також темпоральні залежності між властивостями в рамках кожного класу. Модель дає можливість перевірити обмеження на процес формування рішення на основі статичних зв'язків між сутностями предметної області, а також визначити можливі послідовності зміни властивостей сутностей у часі, що створює умови для побудови каузальних залежностей, які лежать в основі процесу формування рішення. Отримані каузальні залежності є ключовим елементом пояснень щодо процесу функціонування інформаційної системи.

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

S. CHALYI, V. LESHCHYNSKYI, I. LESHCHYNSKA

RELATIONAL-TEMPORAL MODEL OF SET OF SUBSTANCES OF SUBJECT AREA FOR THE PROCESS OF SOLUTION FORMATION IN INTELLECTUAL INFORMATION SYSTEMS

The subject of research is the processes of formation of causal relationships between the states of the entities of the subject area in the process of functioning of the information system. These causal links reflect the dependencies that underlie the process of obtaining a result in the information system, and therefore they can be used to form explanations for this process. The explanation reflects the knowledge of the causes and consequences of both the result obtained as a whole and the individual actions of the decision-making process in the information system. The use of such knowledge increases the user's confidence in the decisions received from the information system. The aim of the work is to develop a relational-temporal model of representation of many interconnected entities of the subject area, which are the object of decision formation in the information system, in order to create conditions for identifying causal dependencies on the decision formation process in such a system. To achieve the formulated goal, the following tasks are solved: structuring the relationships between the entities of the subject area in the attributive and temporal aspects; determining constraints on the decision-making process in the information system based on static dependencies between entities; definition of temporal connections within one class of entities as a reflection of causal dependencies between entities in the process of obtaining a solution in the intellectual system; construction of a relational-temporal model of interconnected entities of the subject area. Conclusions. The structuring of static and dynamic dependences between the entities of the subject area, which is the object of decision formation in the information system. Static constraints on the process of decision formation, which are related to the properties of the subject area, are determined. The temporal dependences between the entities of the subject area are determined, which reflect the cause-and-effect relations between the actions of the decision-making process. A relational-temporal model of related entities of the subject area is proposed, which contains classes of entity equivalence, static dependencies between properties of different equivalence classes, as well as temporal dependencies between properties within each class. The model makes it possible to test constraints on the decision-making process based on static relationships between entities of the subject area, as well as to determine possible sequences of changing properties of entities over time, which creates conditions for building causal relationships that underlie the decision-making process. The obtained causal dependencies are a key element of explanations about the process of functioning of the information system.

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

Вступ. Сьогодні в інтелектуальних системах використовуються складні методи обчислювального інтелекту, що призначені для вирішення практично важливих задач великої розмірності.

Такі задачі вирішуються в умовах невизначеності та неконтрольованих зовнішніх впливів. Методи обчислювального інтелекту базуються на машинному навчанні, що робить процес отримання кінцевого рішення непрозорим для користувача, тобто не дає можливості явно виділити каузальні залежності, які привели до цього рішення. Тому виділення каузальних залежностей є важливою умовою для формування

пояснень щодо роботи інтелектуальної інформаційної системи. Пояснення забезпечують довіру користувачів до отриманих результатів, що створює умови для ефективного використання останніх [1–3].

Важливий аспект побудови пояснень щодо результатів інтелектуальної системи пов'язаний із впливом на результат вхідних даних, які використовуються для навчання. Викривлення у вхідних даних приводять до неточних результатів, що обмежує застосування цих результатів користувачем. Такі викривлення є наслідком як помилок при зборі даних, так і наявності в даних залежностей, що відображають упередження

© С. Ф. Чалий, В. О. Лещинський, І. О. Лещинська 2022

людей, які вирішують відповідні задачі. Тому виявлення каузальних зв'язків, які лежать в основі процесів прийняття рішень в інтелектуальній інформаційній системі, є актуальною проблемою [4–6].

Для вирішення цієї проблеми необхідно визначити залежності між діями інтелектуальної системи. При використанні машинного навчання для налагодження моделей такі залежності не завжди можуть бути представлені явним чином. Однак вони відображаються через зв'язки між властивостями сутностей предметної області, а також при зміні значень цих властивостей внаслідок функціонування інтелектуальної інформаційної системи. Тобто залежності між властивостями сутностей відображають процес отримання результату в інформаційній системі [7, 8].

Такі залежності мають статичну й темпоральну складові [9, 10]. Перша задає структуру предметної області. Друга відображає послідовність станів сутностей у процесі формування рішення в інтелектуальній системі [11]. Відповідно, на основі цих залежностей можуть бути отримані статичні каузальні залежності, що обмежують можливості отримання результату, а також динамічні залежності, що визначають процес функціонування інтелектуальної інформаційної системи.

Зазначене свідчить про важливість побудови моделі взаємопов'язаних сутностей предметної області як умови для виявлення каузальних залежностей, що лежать в основі процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі, а також подальшого формування пояснення з використанням отриманих причинно-наслідкових залежностей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Науковий напрямок, пов'язаний із побудовою пояснень з використанням каузальних зв'язків розвивається в рамках програми Explainable Artificial Intelligence [1]. Каузальність в рамках даного напрямку розглядається на трьох рівнях [12]. На першому рівні представлені статистичні закономірності у наборах даних, що відображають існуючі процеси функціонування інтелектуальної системи. На другому рівні визначаються каузальні залежності, що забезпечують отримання нових результатів. Наприклад, залежність виду «Як зміниться прибуток компанії при збільшенні зарплатні певним виконавцям вдвоє?». На третьому рівні каузальні залежності використовуються в якості пояснення для процесу роботи інформаційної системи [13]. Тобто каузальні залежності на даному рівні визначаються як причини отримання остаточних або проміжних результатів роботи інтелектуальної системи для заданого набору вхідних даних.

Представлені на першому рівні каузальності залежності відповідають темпоральним правилам, що розглядалися в роботах [4–8]. Такі залежності задають упорядкованість для пар послідовних станів сутностей предметної області, або ж станів, між якими можуть бути реалізовані проміжні стани [10].

Прототипи каузальних залежностей другого рівня в роботах [14, 15] запропоновано відображати на основі реляційних моделей сукупності сутностей предметної області. В подальшому такі моделі можуть

бути використані для формування каузальних залежностей даного рівня з використання підходу d-separation.

Таким чином, на сьогодні окремо розглядаються темпоральні залежності між станами сутностей предметної області, що відповідають першому рівню каузальності, та реляційні залежності між такими сутностями, що є основою для побудови відношень другого рівня каузальності. Однак для побудови пояснень щодо роботи інтелектуальної інформаційної системи доцільно розглянути залежності першого та другого рівня як єдину систему, що має статичний та темпоральні аспекти.

Метою цієї статті є розробка реляційно-темпоральної моделі представлення множини взаємопов'язаних сутностей предметної області, які є об'єктом формування рішення в інформаційній системі, з тим, щоб створити умови для виявлення каузальних залежностей щодо процесу формування рішення в такій системі.

Для досягнення сформульованої мети вирішуються наступні задачі:

- структуризація залежностей між сутностями предметної області у атрибутивному та темпоральному аспектах;
- визначення обмежень щодо процесу отримання рішення в інформаційній системі на основі статичних залежностей між сутностями;
- визначення темпоральних зв'язків в рамках одного класу сутностей як відображення каузальних залежностей між сутностями у процесі отримання рішення в інтелектуальній системі;
- побудова реляційно-темпоральної моделі взаємопов'язаних сутностей предметної області.

Статичні та динамічні властивості сукупності взаємопов'язаних сутностей як об'єктів формування рішення в інформаційній системі.

Узагальнено предметна область, що містить комплексний об'єкт формування рішення в інтелектуальній інформаційній системі, представляється множиною E сутностей $e_{i,j}$, таких що кожна сутність описується множиною атрибутів $B_{i,j}$:

$$E = \{e_{i,j} : (\forall i \forall j) \exists B_{i,j}\}. \quad (1)$$

Атрибути задають властивості сутностей. В рамках запропонованого підходу використовується лінійна структура атрибутів. Ієрархія властивостей предметної області задається через зв'язки між сутностями. Іншими словами, комплексна властивість однієї сутності може бути представлена через іншу сутність та її властивості. Атрибути останньої також можна деталізувати через властивості додаткових сутностей. Така організація опису предметної області дає можливість єдиним чином представити прості й комплексні властивості сутностей, а також відобразити зміну їх станів через зміну значень відповідних властивостей з часом. В результаті отримуємо мережний опис предметної області зі статичною та динамічною (темпоральною) складовими.

Статична складова даного представлення визначає структуру фрагменту предметної області, з яким оперує інтелектуальна інформаційна система. Ця структура визначає допустимі послідовності дій у процесі функціонування інформаційної системи, оскільки зв'язки між сутностями впливають на можливі дії, а також на їх послідовність. Іншими словами, статична складова задає множину можливих послідовностей дій у процесі функціонування інформаційної системи.

Якщо у інформаційній системі зафіксовано дії, які не відповідають статичному опису предметної області, то це свідчить або про нерегламентоване функціонування такої системи, або про неточний, неповний опис предметної області на поточний момент часу. Тому невідповідність статичного опису та процесів функціонування інформаційної системи є умовою для пояснення щодо помилок в роботі системи і, відповідно, некоректного результату. Таке пояснення дає можливість користувачеві не використовувати неточний отриманий результат, що в подальшому збільшує довіру користувача до результатів роботи системи. Фактично, статична складова опису взаємопов'язаних сутностей предметної області дає можливість обґрунтувати висновок (або пояснення) щодо коректності отриманих в результаті роботи інформаційної системи результатів.

В свою чергу, динамічна складова дає можливість оцінити ефективність отриманого результату. В даній ситуації є дві варіанти оцінки.

По-перше, ефективність може бути оцінена відносно результату роботи інформаційної системи. Така можливість виникає у випадку, якщо опис предметної області містить сутності, з якими взаємодіє отриманий в інформаційній системі результат. Наприклад, якщо рекомендаційна система пропонує блок безперебійного живлення для комп'ютера, то оцінка може бути виконана з урахуванням відповідності значень атрибутів цього блоку та значень відповідних атрибутів комп'ютера, для якого цей блок буде використано (потужність, час резервування, форма синусоїди, тощо).

По-друге, ефективність може бути оцінена відносно процесу формування рішення. В даному випадку також можливі два варіанти: атрибутивна оцінка ефективності й темпоральна оцінка ефективності.

Атрибутивна оцінка визначається особливостями предметної області. Наприклад, для рекомендаційної системи в якості оцінки може бути використаний відсоток конверсії. Тобто відсоток користувачів, які придбали товари або послуги із рекомендованого списку.

Темпоральна оцінка ефективності задає відхилення інтервалу часу на отримання результату від бажаного. Оцінка може бути модифікована в залежності від того, як ми враховуємо відхилення в строках завершення процесу отримання результату. Зазвичай використовується обмеження по строках і вводиться штраф за запізнення. Однак така оцінка дає можливість оцінити лише один процес, що виконується у системі. Якщо ж інформаційна система контролює

паралельне виконання декількох процесів, то може бути використана оцінка «точно в час», за якою штрафується також передчасне завершення кожного процесу. Дана оцінка дає можливість врахувати обмежені ресурси. Тобто передчасне виконання одного з процесів може привести до запізнь інших процесів внаслідок конкурування за спільні об'єкти (сутності предметної області).

Реляційно-темпоральна модель взаємопов'язаних сутностей предметної області в інформаційній системі.

Запропонований підхід до формального опису взаємопов'язаних сутностей предметної області, з якими оперує інформаційна система, базується на інтеграції атрибутивного та темпорального аспектів таких сутностей.

Атрибутивний аспект визначає множину властивостей сутностей, а темпоральний – зміну стану кожної сутності з часом. Множина атрибутів фактично визначає клас сутності. Стан сутності задається значеннями її атрибутів.

Виділення атрибутивної та темпоральної складової дає можливість розділити сутності різних класів, різні сутності одного класу, а також зміну станів сутності з часом.

Концептуальну схему опису окремих сутностей в обох аспектах наведено на рис. 1.

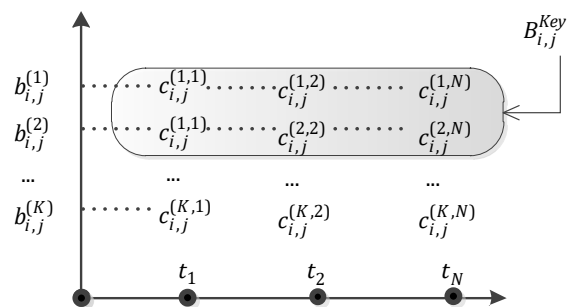


Рис. 1. Атрибутивна та темпоральна складова сутності предметної області

На даному рисунку на вертикальній осі показано множину атрибутів $B_{i,j} = \{b_{i,j}^k\}$ сутності $e_{i,j}$. На горизонтальній осі вказані дискретні моменти часу t_1, t_2, \dots, t_N , в які стан предметної області i , відповідно, стан сутності може змінюватись внаслідок реалізації процесів прийняття рішень в інтелектуальній системі, або ж внаслідок зовнішніх впливів на ці сутності.

Поточний стан сутності $e_{i,j}$ у довільний момент часу t_n задається множиною $C_{i,j}^n$ значень $c_{i,j}^{k,l}$ атрибутів цієї сутності:

$$C_{i,j}^n = \{c_{i,j}^{k,l} | t = t_n\}. \quad (2)$$

Слід зазначити, що згідно виразу (2), множина значень $C_{i,j}^n$ має темпоральну прив'язку, на відміну від окремих значень атрибутів $c_{i,j}^{k,l}$.

Відповідно, процес обробки сутності при формуванні рішення в інтелектуальній системі задається послідовністю множин значень її атрибутів:

$$\Pi_{i,j} = \langle C_{i,j}^1, \dots, C_{i,j}^n, \dots, C_{i,j}^N \rangle. \quad (3)$$

Частина атрибутів сутності може змінювати своє значення у процесі обробки в інтелектуальній системі, інша залишається незмінною. Підмножина незмінних атрибутів характеризує сутність і тому ми будемо розглядати її як підмножину ключових атрибутів $B_{i,j}^{Key}$:

$$B_{i,j}^{Key} = \{b_{i,j}^k : (\forall k)(\forall t_n) c_{i,j}^{k,n} = c_{i,j}^{k,1}\}. \quad (4)$$

Важливість виділення підмножини $B_{i,j}^{Key}$ полягає в тому, що ключові атрибути дають можливість виділити одну й ту саму сутність у різні моменти часу. Якщо для довільної пари сутностей $(e_{i,j}, e_{i,m})$ множини ключових атрибутів $B_{i,j}^{Key}$ та $B_{i,m}^{Key}$ є еквівалентними, то можна вважати, що пара $(e_{i,j}, e_{i,m})$ відображає одну й ту ж саму сутність у різні моменти часу. Тому сутності $e_{i,j}$ та $e_{i,m}$ є еквівалентними тобто $e_{i,j} \sim e_{i,m}$:

$$\exists(e_{i,j}, e_{i,m}) : (\forall j \forall m) B_{i,j}^{Key} \equiv B_{i,m}^{Key} \Rightarrow e_{i,j} \sim e_{i,m}. \quad (5)$$

Введення еквівалентності для довільної пари сутностей $e_{i,j}$ та $e_{i,m}$ дає можливість визначити клас еквівалентності сутностей $[e_i]$, який містить екземпляри $e_{i,j}$ однієї й тієї ж сутності у різні моменти часу t_n :

$$[e_i] = \{e_{i,1}, \dots, e_{i,j}, \dots\} : (\forall j) e_{i,1} \sim e_{i,j}. \quad (6)$$

Клас еквівалентності сутностей задає множину еквівалентних екземплярів однієї сутності, які були використані у процесі формування рішення в інтелектуальній системі у різні моменти часу.

З урахуванням визначення еквівалентності можна деталізувати, що даний клас задає множину станів однієї сутності у процесі прийняття рішення. Відмінності між станами сутності задаються підмножиною B_i^{State} значень її властивостей, яка містить мітку часу зміни стану сутності:

$$B_i^{State} = B_i \setminus B_i^{Key} \mid \exists c_i^{k,l} \in C_i^{State} : c_i^{k,l} = t_n. \quad (7)$$

Таким чином, клас еквівалентності сутності задає представлені на рис. 1 об'єкту та темпоральну складову, що дає можливість встановлювати обмеження на можливу взаємодію об'єктів ,а також послідовність взаємодії та оперування цими об'єктами у часі.

Наприклад, для сутності – виконавця клас еквівалентності може містити підмножину атрибутів $B_1^{Key} = \{b_1^1 = \text{ПІБ}, b_1^2 = \text{роль}\}$, та підмножину атрибутів

$$B_1^{State} = \{b_1^3 = \text{процес}, b_1^4 = \text{завдання}, b_1^5 = t_n\}.$$

Перша група атрибутів дає можливість ідентифікувати виконавця через його прізвище та роль на підприємстві. Друга група атрибутів визначає його поточну діяльність.

Аналогічно, в рекомендаційній системі для товару або послуги перша група може містити такі атрибути:

$$B_2^{Key} = \{b_2^1 = \text{Шифр}, \text{назва}, b_2^2 = \text{товарна_група}\}.$$

$$\text{Друга група може містити такі атрибути: } B_2^{State} = \{b_2^3 = \text{ціна}, b_2^4 = \text{популярність}, b_2^5 = \text{рейтинг}, b_2^6 = t_n\}.$$

Атрибути b_1^2 та b_2^2 задають посилання на інші сутності, що дає можливість встановити реляційні відношення між сутностями. Останні задають статичну конфігурацію предметної області і, фактично, визначають обмеження при реалізації процесу прийняття рішень в інтелектуальній системі.

Із наведених прикладів видно, що з використанням атрибутів першої групи можуть бути задані реляційні відношення $r_{m,s}^{i,k}$ між сутностями з класів еквівалентності $[e_i]$ та $[e_m]$. Тобто між даними класами існує відношення по атрибутам b_i^k та b_m^s :

$$r_{m,s}^{i,k} \equiv b_i^k r b_m^s \mid (\forall i \forall j) [e_i] \cap [e_m] = \emptyset, \quad (8)$$

$$\exists k, \exists s : b_i^k = b_m^s.$$

Сукупність відношень $R = \{r_{m,s}^{i,k}\}$ задає реляційну складову розробленої моделі, яка задає неявні обмеження на процес формування рішення в інтелектуальній інформаційній системі.

З використанням атрибутів другої групи формуються темпоральні відношення $\tau_{i,k}^{l,n}$ для пар значень $c_i^{k,l}, c_i^{k,n}$ одного й того ж атрибуту b_i^k у моменти часу $t_n < t_w$:

$$\tau_{i,k}^{l,n} \equiv c_i^{k,l} \tau c_i^{k,n} \mid (\exists [e_i]) : t_n < t_w, c_i^{k,l} \neq c_i^{k,n}. \quad (9)$$

Сукупність відношень $\Gamma = \{\tau_{i,k}^{l,n}\}$ задає темпоральну складову представлення сукупності взаємопов'язаних сутностей предметної області.

Сукупність класів еквівалентності $E = \{[e_i]\}$ задає сутнісну складову темпорально-реляційної моделі:

$$M = \{E, R, \Gamma\}. \quad (10)$$

Модель (10) комбінує статичні й динамічні залежності, що дає можливість перевірити темпоральні відношення $\tau_{i,k}^{l,n}$ на відповідність обмеженням $r_{m,s}^{i,k}$. Тобто таке поєднання дає можливість виділити підмножини відношень $\tau_{i,k}^{l,n}$ для обмежень $r_{m,s}^{i,k}$ як основу для пояснення. Подальше перетворення темпоральних відношень в каузальні дає можливість безпосередньо сформулювати пояснення.

Розглянемо приклад використання моделі для пари сутностей $[e_1]$ = ноутбук_модель та $[e_2]$ = категорія_ноутбук як об'єктів, які можуть бути використані в рекомендаційній системі.

Перша сутність має властивість b_1^1 = товарна_група, яка відповідає аналогічній властивості b_2^1 класу $[e_2]$. Реляційне відношення $r_{1,1}^{1,1}$ між відповідними властивостями цих класів є аналогічним відношенню між таблицями реляційної бази даних і тому виступає обмеженням при побудові рекомендацій. Сутність даного обмеження залежить від типу відношення $r_{1,1}^{1,1}$ (один до одного, один до багатьох, багато до багатьох). Темпоральне відношення $\tau_{1,3}^{1,2}$ визначає зміни значення атрибуту b_1^3 = ціна (нижні індекси правила) від моменту часу t_1 до моменту часу t_2 (верхні індекси правила). Підмножина темпоральних правил $T_{1,3}$ $\left\{ \tau_{1,3}^{1,2}, \tau_{2,3}^{1,2}, \tau_{3,3}^{1,2}, \dots \right\}$ для даного ноутбуку (тобто правила $\tau_{1,3}^{2,3}, \tau_{3,3}^{3,4}, \dots$, що відрізняються лише моментами часу t_2, t_3, t_4 задовольняє умовам обмеження $r_{1,1}^{1,1}$, тобто має відношення лише до вартості ноутбука:

$$T_{1,3} = \left\{ \tau_{1,3}^{1,2}, \tau_{1,3}^{2,3}, \tau_{3,3}^{3,4}, \dots \mid r_{1,1}^{1,1} \right\}. \quad (11)$$

Поєднання підмножин (11) дає можливість сформулювати множини темпоральних правил, що відображають зміни цін на ноутбуки. З урахуванням інших залежностей виду $r_{1,1}^{1,1}$ ця множина є вхідним набором для побудови каузальних залежностей щодо процесу побудови рекомендованого переліку моделей ноутбуків.

Висновки. Виконано структурування у атрибутивному та темпоральному аспектах відношень між сутностями предметної області, які є об'єктом прийняття рішень в інформаційній системі. Перший аспект відображає статику, а другий – динаміку сутностей предметної області.

Показано, що в атрибутивному аспекті такі відношення задають обмеження на процес прийняття рішення в інформаційній системі. Темпоральні ж відношення визначають послідовність дій процесу прийняття рішень.

Темпоральні відношення сформовано на базі класів еквівалентності сутностей. До одного класу еквівалентності належить один і той же екземпляр сутності, значення властивостей якого змінювались з часом. Такий підхід дає можливість в рамках класу еквівалентності врахувати всі можливі варіанти зміни властивостей сутності з часом, тим самим відобразивши можливі комбінації процесу прийняття рішень в інформаційній системі.

Сукупність статичних да динамічних характеристик сутностей предметної області дає можливість встановити каузальні зв'язки між діями процесу отримання рішення. При цьому статичні залежності обмежують можливі варіанти реалізації даного процесу, а темпоральні зв'язки відображають причинно-наслідкові залежності між діями у процесі отримання рішення.

Запропоновано реляційно-темпоральну модель набору взаємопов'язаних сутностей предметної області в інтелектуальній інформаційній системі. Модель містить у собі класи еквівалентності сутностей, статичні залежності між класами й темпоральні залежності в рамках кожного класу. Модель дає можливість описати динаміку отримання результатів у процесі прийняття рішення в інформаційній системі, що створює умови для побудови каузальних залежностей щодо даного процесу. Отримані каузальні залежності можуть бути використані для побудови пояснень щодо процесу функціонування інтелектуальної системи.

Список літератури

- Gunning D., Aha D. DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program. *AI Magazine*. 2019. № 40(2). P. 44-58.
- Engelbrecht Andries P. *Computational Intelligence: An Introduction*. NJ: John Wiley & Sons, 2007. 632 p.
- 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.
- 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.
- Lewis D. Causation. *Journal of Philosophy*. 1973. № 70 (17). P. 556-567.
- 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 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.
- Chalyi S., Leshchynskyi 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.
- Чалий С.Ф., Лещинський В.О., Лещинська І.О. Декларативно-темпоральний підхід до побудови пояснень в інтелектуальних інформаційних системах. *Вісник Нац. ун-ту "ХПИ": зб. наук. пр. Темат. вип. Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2(4). С. 51-56.
- Pearl J. *Causality: models, reasoning and inference*. Cambridge University Press, USA. 2009. №2.
- 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.

14. Maier M., Marazopoulou K., Jensen D. Reasoning about Independence. *Probabilistic Models of Relational Data*. 2014.
15. Marazopoulou K., Maier M., and Jensen D. Learning the structure of causal models with relational and temporal dependence. *Proceedings of the Thirty-First Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*. 2015.
10. Chalyi S., Leshchynskyi V. Temporal representation of causality in the construction of explanations in intelligent systems. *Advanced Information Systems*. 2020, vol. 4, no 3, pp. 113-117.
11. Chalyi S., Leshchynskyi V., Leshchynska I. Deklaratyvno-temporalnyi pidkhdid do pobudovy poiasnen v intelektualnykh informatsiynk 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.

References (transliterated)

1. Gunning D., Aha D. DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program. *AI Magazine*. 2019. no 40(2), pp. 44-58.
2. Engelbrecht Andries P. *Computational Intelligence: An Introduction*. NJ: John Wiley & Sons, 2007. 632 p.
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. Lewis D. Counterfactual Dependence and Time's Arrow. *Counterfactuals and Laws*. 1979. Vol. 13, no. 4, pp. 455-476.
5. Paul L. A., Hall. N. *Causation: A User's Guide*. Oxford: Oxford University Press, 2013. 259 p.
6. Lewis D. Causation. *Journal of Philosophy*. 1973, no 70 (17), pp. 556-567.
7. Halpern J. Y. Axiomatizing causal reasoning. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2000, no 12, pp. 317-337.
8. 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.
9. 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..
12. Pearl J. *Causality: models, reasoning and inference*. Cambridge University Press, USA. 2009, no. 2.
13. 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.
14. Maier M., Marazopoulou K., Jensen D. Reasoning about Independence. *Probabilistic Models of Relational Data*. 2014.
15. Marazopoulou K., Maier M., and Jensen D. Learning the structure of causal models with relational and temporal dependence. *Proceedings of the Thirty-First Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*. 2015.

Надійшло (received) 20.05.2022

Відомості про авторів / 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

Лецинський Володимир Олександрович (Лецинский Владимир Александрович, Leshchynskyi Volodymyr Oleksandrovich) – 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.leshchynskyi@nure.ua

Лецинська Ірина Олександрівна (Лецинская Ирина Александровна, Leshchynska Irina Oleksandrivna) – 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: iryna.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

Leshchynskyi 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.leshchynskyi@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: iryna.leshchynska@nure.ua