УДК 004. 891.3 **doi: 10.26906/SUNZ.2022.3.099**

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

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

КАУЗАЛЬНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ПОБУДОВИ ПОЯСНЕНЬ В ІНФОРМАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ

Анотація. Предметом вивчення в статті є процеси формування пояснень щодо прийнятих в інтелектуальній інформаційній системі рішень. **Метою** є розробка моделі процесу побудови деталізованих пояснень щодо прийнятого інтелектуальною інформаційною системою рішення на основі каузальних залежностей між відомими станами інтелектуальної інформаційної системи для більш ефективного використання отриманого рішення при вирішенні практичних задач користувача. **Завдання**: темпоральна структуризація процесу формування пояснень в інтелектуальній інформаційній системі; розробка каузальної моделі процесу формування пояснень. Використовуваними **підходами** є: підходи до побудови каузальних залежностей, підходи використання темпоральних залежностей у процесах прийняття рішень. Отримані наступні **результати**. Визначено структуру процесу побудови пояснень з урахуванням темпорального аспекту. На базі отриманої структури розроблено каузальну модель процесу побудови пояснень в інтелектуальній інформаційній системі **Висновки**. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному. Запропоновано модель процесу побудови пояснень щодо послідовності дій з формування рішень в інтелектуальній інформаційній системі, що містить у собі упорядковану за множиною темпоральних правил множину станів процесу прийняття рішення в системі, а також множину детермінованих та ймовірнісних каузальних правил, що визначають причинно-наслідкові зв'язки між станами процесу прийняття рішення. Модель орієнтована на побудову пояснень у вигляді послідовності каузальних правил, що зв'язують як послідовні у часі стани процесу прийняття рішення, так і стани, між якими існують послідовності інших станів. Запропонована модель дає можливість виконати деталізацію пояснення, представивши узагальнену каузальну залежність у вигляді комплексу причинно-наслідкових залежностей між проміжними станами процесу прийняття рішення.

Ключові слова: інтелектуальна система, пояснення, процес прийняття рішення, темпоральність, каузальність, причинно-наслідковий зв'язок, темпоральні правила.

Вступ

Використання складних алгоритмів у процесі прийняття рішень в інформаційних системах приводить до труднощів з використанням отриманих рішень, оскільки користувач не завжди може встановити причинно-наслідкові залежності між вхідними даними, ресурсами та отриманим результатом. Складність і непрозорість алгоритмів, що використовуються для отримання рішення, не завжди сприяє довірі користувача до отриманих результатів. В результаті користувач може не використати запропоноване рішення, наприклад щодо рекомендованих товарів або послуг в системі електронної комерції [1-3]. Вирішення цієї проблеми передбачає використання пояснень щодо отриманого рішення [4, 5]. Пояснення описує процес прийняття рішення у вигляді сукупності каузальних залежностей [6]. Такий опис дає можливість пояснити послідовність дій з прийняття рішення із різним ступенем деталізації а також з урахуванням непередбачуваних впливів [7].

На сьогодні існує два підходи до побудови пояснення [8]. По-перше, функціональність пояснення може бути безпосередньо імплементована у процес прийняття рішення в інтелектуальній інформаційній системі. Такий підхід забезпечує використання всієї доступної інформації щодо процесу формування рішення, що дає можливість сформувати детерміновані каузальні залежності як елементи пояснення. Однак даний підхід має суттєвий недолік: включення можливості пояснення до існуючої системи потребує виконання трудоємних робіт з кардинальної переробки, перепроектування останньої.

Другий підхід полягає у доповненні існуючого процесу формування рішення можливостями пояснення щодо запропонованих інформаційною системою рішень. Даний підхід передбачає доступ до даних щодо побудови рішення, його стану, виконаних дій, а також виявлення каузальних залежностей між станами та діями даного процесу з урахуванням їх упорядкованості у часі. Однак даний підхід має недолік, пов'язаний із складністю повного доступу до даних щодо процесу прийняття рішення. Відсутність повної інформації щодо станів процесу потребує враховувати непередбачувані зовнішні впливи при побудові каузальних залежностей як складових пояснення. Для подолання даного недоліку необхідно розробити моделі та методи опису і побудови каузальних залежностей щодо процесу прийняття рішення в умовах невизначеності.

Існуючі підходи та методи формування пояснень в інтелектуальних інформаційних системах були розроблені згідно програмою побудови самопояснювального штучного інтелекту (Explanable Artificial intelligence) [9]. В рамках даної програми значна увага приділяється використанню каузальних залежностей як основи для побудови пояснень. Каузальні залежності визначаються з використанням баєсовського підходу [10, 11].

Каузальні закономірності можуть бути визначені не лише для окремих змінних, а й для структурованих об'єктів, кожен із яких характеризується множиною змінних [12].

Однак існуючі підходи до виявлення каузальних залежностей недостатньо уваги приділяють побудові причинно-наслідкових зв'язків в умовах динамічного середовища, з урахуванням темпорального аспекту процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі. Темпоральний аспект враховується лише в сенсі виділення підмножин даних для заданого періоду часу [13].

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

В той же час, каузальні залежності базуються на темпоральній упорядкованості процесу прийняття рішення. Тобто причина має бути реалізована до наслідку. Відповідно, наявність темпорального зв'язку між станами процесу прийняття рішення є необхідною умовою для виявлення каузальних залежностей між цими станами.

Темпоральні залежності були розглянуті в роботах [14-16]. В роботах [14, 15] запропоновано використовувати зважені темпоральні правила для декомпозиції та формування процесів підтримки прийняття управлінських рішень. В [16] деталізовано відмінності між x-правилами, що задають порядок для пари послідовних станів, та f-правилами, що призначені для упорядкування станів з меншою деталізацією, наприклад початкового та кінцевого станів підпроцесу.

Таким чином, доповнення процесу прийняття рішеннями можливостями пояснень з використанням каузальних залежностей, що відображають упорядкованість станів та дій цього процесу у часі, є актуальною задачею.

Метою статті є розробка моделі процесу побудови деталізованих пояснень щодо прийнятого інтелектуальною інформаційною системою рішення на основі каузальних залежностей між відомими станами інтелектуальної інформаційної системи для більш ефективного використання отриманого рішення при вирішенні практичних задач користувача. Для досягнення поставленої мети вирішуються такі задачі:

– темпоральна структуризація процесу формування пояснень в інтелектуальній інформаційній системі;

– розробка каузальної моделі процесу формування пояснень.

Темпоральна структуризація процесу формування пояснень в інтелектуальній інформаційній системі

Процес побудови пояснень щодо прийнятого рішення в інтелектуальній інформаційній системі є розширенням процесу формування такого рішення. Останній складається з послідовності автоматизованих та автоматичних дій. Перші виконуються у взаємодії з користувачем, а другі – засобами інформаційної системи за заданим алгоритмом. Тому в першому випадку послідовність дій містить ймовірнісну складову, а в другому є детермінованою. Кожна з цих дій змінює стан інформаційної системи.

Розглянемо темпоральні властивості процесу прийняття рішення. Послідовність станів у часі відображає послідовність виконаних дій даного процесу. Багаторазове формування рішення приводить до виникнення множини послідовностей виникнення станів $S_i : (\forall i) S_i = \langle s_{i.1}, s_{i.2}, ... \rangle$.

Кожна з указаних лінійних послідовностей S_i відображає лише один варіант формування рішення і складається із упорядкованих у часі подій виникнення станів $s_{i.j}$, $s_{i,m}$, $s_{i,n}$.

Тобто для довільної пари подій виникнення станів $\langle s_{i,j}, s_{i,n} \rangle$, що належать до однієї послідовності, завжди існує темпоральна залежність $r_{i,n}^{i,j}$:

$$\forall \left(s_{i,j}, s_{i,n} \right) \in S_i \; \exists r_{i,n}^{i,j}. \qquad (1)$$

Темпоральне правило r_n^j об'єднує у собі декілька залежностей $r_{i,n}^{i,j}$ [16].

Якщо всі послідовності S_i містять у собі залежність $r_{i,n}^{i,j}$, то правило є обмеженням, що задає обов'язкове виконання дії, яка привела інформаційну систему від події виникнення стану $s_{i.j}$ до виникнення стану $s_{i,n}$ у моменти часу t_j та t_n відповідно.

В іншому випадку правило визначає можливі умови виконання дій при виникненні станів $s_{i.j}$ та $s_{i,n}$. Тобто обмеження задає більш загальні залежності між станами.

Наведені властивості темпорального обмеження свідчать, що воно може бути використано для побудови детермінованої каузальної залежності між станами інформаційної системи при формуванні пояснень. Умовні переходи між станами є основою для ймовірнісних каузальних залежностей, оскільки вони мають враховувати вплив непередбачуваних зовнішніх та внутрішніх факторів.

В цілому при темпоральній структуризації процес побудови рішення задається через множину станів $S = \{s_n\}$. Кожен стан характеризується множиною змінних, що відображають властивості процесу прийняття рішення в інтелектуальній інформаційній системі. Значення цих змінних у момент часу t_n характеризують виникнення стану s_n на одній з можливих послідовностей дій з формування рішення такої системи. Між станами процесу побудови рішення задано темпоральні відношення $r_{i,n}^{i,j}$. Останні узагальнюються у вигляді темпоральних правил r_n^j.

Процес прийняття рішення з урахуванням представленої структуризації може бути представлений у вигляді направленого ациклічного графу G.

Вершинами даного графу є стани інформаційної системи s_n, а дугами - темпоральні правила r_n^j, які відображають дії з формування рішення та пов'язують стани інформаційної системи:

$$G : S \times S \to R, \qquad (2)$$

де $R = \{r_n^j\}$ - множина темпоральних правил.

Ілюстративний приклад графу G з окремими темпоральними правилами наведено на рис. 1.

На даному рисунку окремо виділено темпоральні правила типу “future” [16] позначенням f_n^j. Дані правила пов'язують вершини графу, між якими є інші вершини. Наприклад, темпоральне правило f_{10}^5 задає упорядкованість для пари станів $\langle s_5, s_{10} \rangle$, між якими існують інші стани (позначено 3 точками).

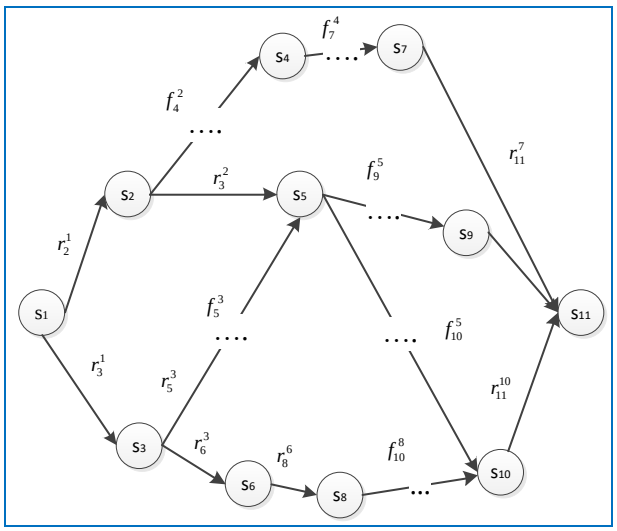

Рис. 1. Приклад графу G
з окремими темпоральними правилами

На відміну від *f*-правил, всі інші правила пов'язують лише послідовні пари станів. Наприклад, правило r_2^1 пов'язує стани $\langle s_1, s_2 \rangle$, що виникли послідовно у часі, тобто має узагальнений вид r_{j+1}^j.

З позицій побудови пояснення перехід між станами для правила виду r_{j+1}^j може бути обґрунтований виконанням відповідної дії з формування рішення. У випадку, якщо такі правила є обмеженням, то сформовані на їх основі пояснення однозначно задають причинно-наслідкову залежність y_{j+1}^j для пари станів (s_j, s_{j+1}) на любій послідовності S_i, тобто для любої пари подій виникнення станів $\langle s_j, s_{j+1} \rangle$:

$$y_{j+1}^j = \langle s_j, s_{j+1} | \forall i \exists \langle s_{i,j}, s_{i,j+1} \rangle \rangle. \quad (4)$$

Іншими словами, відомий перехід між станами s_j та s_{j+1} є наслідком однієї дії з формування управлінського рішення. Оскільки кожен стан задається множиною змінних, то така дія може бути представлена в моделі процесу формування пояснень як властивість стану. Дане узагальнення дає можливість безпосередньо показати причину переходу від стану s_j до стану s_{j+1} через властивість другого стану.

В тому випадку, якщо темпоральне правило r_{j+1}^j не є обмеженням, то на його основі доцільно сформувати ймовірнісну каузальну залежність. Дана залежність враховує непередбачувані впливи, інформація про які не враховується у вигляді станів у графі G. Тобто ймовірнісна залежність відображає неповноту моделі процесу прийняття рішення. Остання викликана «непрозорістю» даного процесу в системах обчислювального інтелекту.

На відміну від розглянутих правил r_{j+1}^j, темпоральні правила виду f_n^j містять проміжні стани s_m, які впливають на фінальний стан s_n. Такі проміжні стани можуть бути доступними для користувача, або ж виникати внаслідок неконтрольованих впливів. В останньому випадку інформація про такі стани є неповною або ж відсутньою.

Ілюстрація відмінності між правилами для зафіксованих та недоступних проміжних станів представлена на рис. 2.

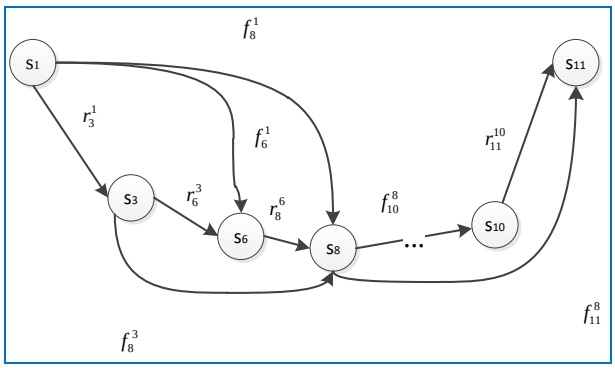

Рис. 2. Відмінності між правилами
для зафіксованих та недоступних проміжних станів

В першому випадку правила f_n^j можуть бути представлені у вигляді множини послідовних темпоральних правил, наприклад:

$$f_n^j = \langle r_{j+1}^j, r_n^{j+1} \rangle. \quad (5)$$

Кожне з правил r_{j+1}^j, r_n^{j+1} зв'язує послідовні стани $\langle s_j, s_{j+1} \rangle, \langle s_{j+1}, s_n \rangle$, що створює умови для формування пояснення шляхом формування причинно-наслідкових залежностей r_{j+1}^j та r_n^{j+1} між цими парами станів. Наприклад, на рис. 2 правило f_6^1 має вигляд: $f_6^1 = \langle r_3^1, r_6^3 \rangle$. На базі даного правила формується ймовірнісна каузальна залежність y_6^1 для побудови пояснення:

$$y_3^1 = \langle y_3^1, y_6^3 \rangle. \quad (6)$$

Ймовірність реалізації цієї залежності традиційно є добутком ймовірностей її складових:

$$P(p_3^1) = P(y_3^1) P(y_6^3). \quad (7)$$

Останні розраховуються на основі співвідношення кількості послідовностей S_i, на яких були реалізовані ці залежності, та загальної кількості послідовностей I:

$$P(y_{j+1}^j) = \left| \left\{ S_i : \exists \langle s_{i,j} s_{i,j+1} \rangle \right\} \right| / I. \quad (8)$$

У другому випадку для темпорального правила f_n^j існують незафіксовані проміжні стани s_m, або ж інформація про ці стани не є повною. Це означає, що на причинно-наслідковий зв'язок між станами s_j та s_n впливали не лише дії з формування рішення, але й

зовнішні фактори. В даному випадку для визнакомпозицію темпоральних зв'язків між станами на зв'язки між окремими змінними, що характеризують ці стани, виділити змінні, які змінили значення при переході від стану s_j до стану s_n, та встановити каузальні залежності між цими станами методами, запропонованими в роботах [10]. Виконана структуризація процесу формування пояснень з урахуванням темпорального аспекту дає можливість формалізувати каузальну модель даного процесу.

Каузальна модель процесу формування пояснень

Процес формування пояснень містить у собі такі елементи:

– множину S станів процесу формування рішення в інтелектуальній інформаційній системі;

– множину R темпоральних залежностей між станами, що відображають послідовність подій виникнення станів в результаті виконання послідовності дій з формування рішення в інформаційній системі;

– множину Y ймовірнісних та детермінованих каузальних залежностей між станами, що відображають причини виникнення кожного з станів процесу формування рішення з урахуванням попереднього стану та дії, що привела до поточного стану.

Характеристики каузальних залежностей даного процесу формування наведено в табл. 1 та табл. 2. Каузальна модель процесу формування пояснень, що враховує упорядкованість дій даного процесу у часі, має вигляд:

$$M = \langle S, R, Y \rangle, S = \{s_n\},$$
$$R = \left\{ r_n^j : (\forall n \neq j) \exists \langle s_j, s_n \rangle \right\}, \quad (9)$$
$$Y = \left\{ y_n^j : (\forall y_n^j) \exists r_n^j \right\}.$$

Модель (9) передбачає роздільне виявлення детермінованих та ймовірнісних каузальних залежностей з урахуванням наявності проміжних станів між початковим та кінцевим станом кожної залежності.

Таблиця 1 – **Характеристики каузальних залежностей для пар послідовних станів**

Залежність	Базове темпоральне правило	Відмінності при формуванні пояснення
Детермінована залежність для двох послідовних станів	Темпоральне обмеження для двох послідовних станів	Виконується для всіх варіантів формування рішення
Ймовірнісна залежність для двох послідовних станів	Темпоральна умова для виникнення двох послідовних станів процесу формування рішення	Враховується вплив зовнішніх факторів; виконується не для всіх послідовностей станів процесу формування рішення

Таблиця 2 – **Характеристики каузальних залежностей для пар станів, що пов'язані темпоральними залежностями *f* - типу**

Залежність	Базове темпоральне правило	Відмінності при формуванні пояснення
Детермінована каузальна залежність для двох станів, між якими існують інші відомі стани	Темпоральне обмеження *f* - типу	Є об'єднанням декількох каузальних залежностей для двох послідовних станів
Ймовірнісна каузальна залежність для двох станів, між якими існують інші відомі стани	Темпоральна умова *f* - типу	Є об'єднанням декількох ймовірнісних каузальних залежностей для двох послідовних станів
Детермінована каузальна залежність для двох станів, не всі стани між якими є відомими	Темпоральне обмеження *f* - типу	Дана залежність є узагальненою і не може бути деталізована через залежності між проміжними станами; дана залежність може бути використана для спрощеного, узагальненого пояснення
Ймовірнісна каузальна залежність для двох станів, не всі стани між якими є відомими	Темпоральна умова *f* - типу	Дана залежність може бути уточнена з урахуванням ймовірностей проміжних станів; може бути використана поетапної деталізації пояснення

Висновки

Виконано темпоральну структуризацію процесу формування пояснень в інтелектуальній інформаційній системі. Визначено такі структурні елементи даного процесу: стани процесу прийняття рішень; темпоральні зв'язки між станами; каузальні залежності між станами, що відповідають темпоральним зв'язкам та представляють елементи пояснення. Запропонована структура орієнтована на вирішення задачі доповнення існуючого процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі можливостями пояснення. Запропоновано модель процесу побудови пояснень щодо послідовності дій з формування рішень в інтелектуальній інформаційній системі, що містить у собі упорядковану за множиною темпоральних правил множину станів процесу прийняття рішення в системі, а також множину детермінованих та ймовірнісних каузальних правил, що визначають причинно-наслідкові зв'язки між станами процесу прийняття рішення. Модель орієнтована на побудову пояснень у вигляді послідовності каузальних правил, що зв'язують як послідовні у часі стани процесу прийняття рішення, так і стани, між якими існують послідовності інших станів. Запропонована модель дає можливість виконати деталізацію пояснення, представивши узагальнену каузальну залежність у вигляді комплексу причинно-наслідкових залежностей між проміжними

станами процесу прийняття рішення. **Подальший розвиток** даного підходу пов'язаний із удосконаленням методів побудови каузальних залежностей на основі темпоральних правил з урахуванням непередбачуваних зовнішніх впливів на процес прийняття рішення.

REFERENCES

1. Fararni K., Aghoutane B., Riffi J., Abdelouahed S. (2020). Comparative Study on Approaches of Recommendation Systems. Embedded Systems and Artificial Intelligence, 753-764. doi: 10.23919/AEIT.2018.8577311. Available at: https://www.researchgate.net/publication/340497029_Comparative_Study_on_Approaches_of_Recommendation_Systems.
2. Izquierdo-Castillo, J. (2015). The new media business concept led by Netflix: A study of the model and its projection into the Spanish market. El Profesional de la Informacion, 24 (6), 819-826. 24. 819. doi: 10.3145/epi.2015.nov.14. Available at: https://recyt.fecyt.es/index.php/EPI/article/view/epi.2015.nov.14.
3. Chalyi, S., Leshchynskyi, V., Leshchynska, I. (2019). Method of forming recommendations using temporal constraints in a situation of cyclic cold start of the recommender system. EUREKA: Physics and Engineering, 4, 34–40. doi: https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00952 . Available at: http://eu-jr.eu/engineering/article/view/952/934.
4. Tsai C., Brusilovsky P. (2019). Explaining recommendations in an interactive hybrid social recommender. Proceedings of the 24th International Conference on Intelligent User Interfaces (IUI '19), 391-396. doi: 10.1145/3301275.3302318. Available at: https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3301275.3302318.
5. Chalyi S., Leshchynskyi V., Leshchynska I. (2019). Моделювання пояснень щодо рекомендованого переліку об’єктів з урахуванням темпорального аспекту вибору користувача. Системи управління, навігації та зв’язку, 6 (58), 97-101. – doi:https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.6.097.
6. Chalyi, S., Leshchynskyi, V. (2020). Method of constructing explanations for recommender systems based on the temporal dynamics of user preferences. EUREKA: Physics and Engineering, 3, 43-50. doi: 10.21303/2461-4262.2020.001228.
7. Чалий С. Ф. Реляційно-темпоральна модель набору сутностей предметної області для процесу формування рішення в інтелектуальній інформаційній системі / С. Ф. Чалий, В. О. Лещинський, І. О. Лещинська // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Системний аналіз, управління та інформаційні технології = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : System analysis, control and information technology : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2022. – № 1 (7). – С. 84-89.
8. Adadi, A., Berrada, M. (2018) Peeking inside the black-box: a survey on explainable artificial intelligence (XAI). IEEE Access 6, 52138– 52160.
9. Gunning i D. Aha, (2019) “DARPA’s Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program”, AI Magazine, Vol. 40(2), pp.44-58, doi: 10.1609/aimag.v40i2.2850.
10. Pearl J (2009) Causality: Models, Reasoning and Inference, 2nd ed. Cambridge University Press, USA.
11. Halpern J. Y., Pearl J. (2005), Causes and explanations: A structural-model approach. Part II: Explanations. The British Journal for the Philosophy of Science. Vol.56 (4). P. 889-911.
12. Maier M, Marazopoulou K, Jensen D (2014) Reasoning about Independence in Probabilistic Models of Relational Data. arXiv
13. Marazopoulou, Katerina, Maier, Marc, and Jensen, David. Learning the structure of causal models with relational and temporal dependence. In Proceedings of the Thirty-First Conference on Uncertainty in Articial Intelligence (2015).
14. . Levykin V., Chala O. Development of a method of probabilistic inference of sequences of business process activities to support business process management. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 5/3(95). P. 16-24. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.142664
15. Чала О. В. (2020) Модель узагальненого представлення темпоральних знань для задач підтримки управлінських рішень. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Системний аналіз, управління та інформаційні технології. № 1(3). С. 14-18. DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.03.
16. Chala O. (2018) Models of temporal dependencies for a probabilistic knowledge base. Econtechmod. An International Quarterly Journal. Vol. 7, No. 3. P. 53 – 58.

Received (Надійшла) 29.05.2022
Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.08.2022

Causal model of the process of constructing explanations in the information system

S. Chalyi, V. Leshchynskyi, I. Leshchynska

Abstract. The **subject matter** of the article is the processes of formation of explanations regarding the decisions made in the intellectual information system. **The goal** is to develop a model for the process of constructing detailed explanations regarding the decision made by an intelligent information system based on causal dependencies between known states of an intelligent information system for more efficient use of the resulting solution in solving practical user problems. **Tasks:** temporal structuring of the process of formation of explanations in the intellectual information system; development of a causal model of the process of formation of explanations. The **approaches** used are: approaches to the construction of causal dependencies, approaches to the use of temporal dependencies in decision-making processes. The following results are obtained. The structure of the process of constructing explanations is determined, taking into account the temporal aspect. On the basis of the obtained structure, a causal model of the process of constructing explanations in an intelligent information system has been developed. **Conclusions.** The scientific novelty of the obtained results is as follows. A model of the process of constructing explanations regarding the sequence of actions for the formation of decisions in an intelligent information system is proposed, containing a set of states of the decision-making process ordered by a set of temporal rules, as well as a set of deterministic and probabilistic causal rules that determine cause-and-effect relationships between the states of the decision-making process. The model is focused on construction of explanations in the form of a sequence of causal rules that connect both successive states of the decision-making process in time, and states between which there are sequences of other states. The proposed model makes it possible to refine the explanation by presenting a generalized causal dependence through a complex of cause-and-effect dependencies between intermediate states of the decision-making process.

Keywords: intellectual system, explanation, decision-making process, temporality, causality, causality, temporal rules.