

doi: 10.32620/oikit.2026.107.18

УДК 004.8:004.9

С. Ф. Чалий, І. О. Лещинська

Нейросимвольно-онтологічний метод побудови персоналізованих ментальних моделей рішень інтелектуальних систем

Харківський національний університет радіоелектроніки

Предметом дослідження є побудова персоналізованих ментальних моделей рішень інтелектуальних систем шляхом інтеграції нейромережного та символічного підходів для адаптації складності пояснень до рівня експертності користувачів. Метою є підвищення зрозумілості пояснень та довіри користувачів до рекомендацій інтелектуальних систем у критичних, в тому числі авіаційній, предметних областях. Завдання, що потребують вирішення: провести аналіз підходів до побудови пояснень щодо рішень інтелектуальних систем; розробити нейросимвольно-онтологічний метод побудови персоналізованих ментальних моделей рішень інтелектуальних систем; провести експериментальне дослідження ефективності розробленого методу. У ході дослідження було розроблено нейросимвольно-онтологічний метод побудови персоналізованих ментальних моделей рішень інтелектуальних систем на основі інтеграції нейромережної класифікації рівня експертності користувачів з онтологічним представлення знань предметної області та каузальними правилами виведення для автоматизованої адаптації складності пояснень до рівня підготовки користувачів, з узгодженням пояснень з внутрішніми ментальними моделями користувачів. Результати експериментальної перевірки з використанням даних системи електронної комерції засвідчили підвищення рівня релевантності пояснень.

Ключові слова: персоналізована ментальна модель, нейросимвольно-онтологічний метод, пояснювальний штучний інтелект, онтологічна модель, каузальні правила виведення, класифікація рівня експертності, поведінкова траєкторія, індукція дерев рішень, релевантність пояснень.

1. Вступ

Ментальні моделі користувачів інтелектуальних систем (ІС) відображають внутрішнє представлення людини про те, як система приймає рішення. Ці моделі сформовані на основі досвіду взаємодії користувача з ІС й знань предметної області, деталізують інформацію відповідно до рівня експертності користувача та забезпечують можливість побудови персоналізованих пояснень рішень інтелектуальних систем. Побудова таких персоналізованих пояснень є важливою задачею для впровадження систем штучного інтелекту у критичних предметних областях, таких як медична діагностика, фінансові рекомендації, кримінальна юстиція. Методи пояснювального штучного інтелекту генерують типові пояснення щодо внеску вхідних даних у рішення ІС. Ці методи не враховують індивідуальні особливості сприйняття інформації користувачами, відображені в ментальних моделях, які відображають причинно-наслідкові зв'язки у предметній області. Тому традиційні методи не забезпечують зрозумілості пояснень для широкого кола користувачів, від осіб без знань предметної області до експертів. З іншого боку, традиційні методи побудови пояснень не надають достатньої деталізації пояснень для висококваліфікованих спеціалістів, які потребують опису залежностей у процесі міркування для перевірки коректності рішень системи. Відсутність методів автоматизованого виявлення індивідуальних ментальних моделей користувачів через аналіз їхньої поведінкової взаємодії з системою

призводить до когнітивних проблем, пов'язаних із сприйняттям пояснень. Неможливість перетворення прихованих нейромережних представлень у персоналізовані інтерпретовані пояснення через символні каузальні правила обмежує ефективність використання рішень інтелектуальних систем. Це знижує довіру до ІС та обмежує практичне застосування рішень таких систем у критичних сферах діяльності.

Таким чином, актуальною є розробка нейросимвольних методів побудови персоналізованих ментальних моделей рішень інтелектуальних систем. Такі методи інтегрують нейромережні та символні підходи. Нейромережна компонента забезпечує автоматичне виявлення поведінкових патернів користувачів. Символьна компонента формалізує експертні знання предметної області у вигляді онтологій класів рішень та каузальних правил виведення.

1. Формулювання наукової задачі та обґрунтування наукової новизни дослідження

Наукова задача дослідження полягає в розробці нейросимвольно-онтологічного методу побудови персоналізованих ментальних моделей рішень ІС на основі виявлення поведінкових патернів користувачів, що створює умови для формування індивідуальних профілів користувачів, а також формалізації експертних знань предметної області у вигляді онтологій класів рішень та каузальних правил виведення. Вирішення даної задачі забезпечує адаптацію складності та деталізації пояснень до рівня експертизи користувача через вертикальну композицію шарів ментальної моделі, що узгоджує пояснення з внутрішніми представленням користувачів про логіку прийняття рішень ІС.

2. Аналіз публікацій та теоретичне підґрунтя дослідження

Сучасні підходи до підвищення ефективності використання ІС шляхом побудови пояснень представлені у дослідженнях з пояснювального штучного інтелекту (XAI) [1]. Побудова ментальних моделей користувачів досліджується в роботах з когнітивної психології [2]. У цих дослідженнях розглядається внутрішнє представлення людини щодо того, як інформаційна система приймає рішення. Проте, методи XAI зазвичай формують універсальні пояснення без урахування індивідуальних особливостей сприйняття інформації користувачами, що обмежує їхнє безпосереднє застосування для формування персоналізованих пояснень відповідно до рівня експертності користувачів та відповідних ментальних моделей. Виявлення поведінкових патернів користувачів інтелектуальних систем представлено в дослідженнях з аналізу траєкторій взаємодії користувача з ІС [3], де запропоновано підходи до конструювання персоналізованих профілів користувачів. Такий підхід забезпечує можливість формування індивідуальних пояснень. Нейросимвольні архітектури досліджуються в роботах з інтеграції нейромережних та символних підходів [4], де показано можливість інтеграції неявних патернів у даних з формальними логічними правилами з тим, щоб можна було інтерпретувати ці патерни.

Таким чином, методи пояснювального штучного інтелекту орієнтовані на формування узагальнених пояснень без врахування когнітивних представлень користувачів, що свідчить про важливість завдання розробки нейросимвольно-онтологічного методу побудови персоналізованих ментальних моделей рішень інтелектуальних систем.

Теоретичне підґрунтя дослідження базується на концепції побудови ментальних моделей користувачів як представлення, що визначає очікування користувача щодо поведінки системи та впливає на довіру до пояснень щодо рішень ІС. Використання нейросимвольних архітектур при вирішенні цієї задачі дає можливість виявити приховані патерни у даних та інтегрувати їх із символьним представленням для забезпечення інтерпретованості роботи ІС. Для перетворення нейромережних репрезентацій у символьні правила застосовується метод індукції дерев рішень [5]. Даний метод дає можливість виявити групи користувачів зі схожими когнітивними моделями та побудувати для кожної групи персоналізовані правила пояснення. Класифікація рівня експертизи користувача здійснюється через функцію багатокласової класифікації, що визначає належність користувача до однієї з груп експертності на основі аналізу вектора ознак поведінкової траєкторії.

Онтологічне представлення доменних знань [6] є формальним описом класів рішень системи. Цей опис визначає ієрархію концептів, їхні властивості та відношення між ними на основі експертних знань про структуру предметної області та типові сценарії прийняття рішень. Використання каузальних правил виведення дозволяє визначити причинно-наслідкові зв'язки між характеристиками вхідних даних та рішеннями системи для забезпечення прозорості механізмів міркування. Повна онтологія предметної області формується як система каузальних правил для всіх класів рішень та різних рівнів деталізації пояснень. В сукупності ці правила задають формальну специфікацію персоналізованих пояснень, тобто забезпечують вибір деталізації відповідно до профілю користувача з використанням процедури вертикальної композиції шарів ментальної моделі. Вертикальна композиція шарів полягає в динамічному формуванні багаторівневої структури пояснень через інтеграцію онтологічних правил різної складності згідно з рівнем експертності користувача. Формально, вибір рівня пояснення lv^* для користувача u визначається через максимізацію функції корисності $lv^* = \underset{lv \in L}{\operatorname{argmax}} U(u, lv) = \underset{lv \in L}{\operatorname{argmax}} [w_1 C(u, lv) - w_2 S(lv)]$, де

$L = \{lv_1, lv_2, \dots, lv_M\}$ – множина доступних шарів пояснень, $C(u, l) \in [0, 1]$ – функція зрозумілості шару lv для користувача u , обчислена на основі відстані між векторним представленням користувача та центроїдом кластера шару, $S(l)$ – обчислювальна складність генерації пояснення шару lv , w_1, w_2 – вагові коефіцієнти балансування зрозумілості та обчислювальної ефективності.

Точність класифікації обчислюється як відношення кількості коректно класифікованих користувачів до загальної кількості користувачів в тестовій вибірці. Реалізація задачі персоналізації ментальної моделі здійснюється на основі визначення функції втрат для навчання класифікатора рівня експертизи та генератора персоналізованих пояснень:

$$V(\bar{\theta}, \bar{\omega}) = \sum_{n \in N} \left[V_1 \left(y_i, \hat{y}_i \mid \bar{\theta} \right) + \alpha V_2 \left(e_i, lv_{y_i}^* \mid \bar{\omega} \right) \right],$$

де V – кількість користувачів у навчальній вибірці, V_1 – функція втрат крос-ентропії для задачі класифікації рівня експертизи, y_i – справжній рівень експертності i - користувача, \hat{y}_i – передбачений рівень експертності i - користувача, $\bar{\theta}$ – параметри класифікатора, V_2 – функція втрат генерації індивідуального пояснення, що вимірює відповідність згенерованого пояснення

e_i оптимальному шару $lv_{y_i}^*$ для рівня експертизи y_i , $\bar{\omega}$ – параметри генератора пояснень, α – ваговий коефіцієнт балансування задач класифікації та генерації пояснень.

3. Метод побудови персоналізованих ментальних моделей рішень інтелектуальних систем

Нейросимвольно-онтологічний метод використовує нейромережну класифікацію рівня експертизи користувачів та символні онтологічні правила виведення для побудови персоналізованих ментальних моделей. Вхідними даними методу є траєкторії взаємодії користувачів з ІС, які, наприклад, можуть містити наступну інформацію, розбиту по інтервалам часу: кількість кліків користувача, час перебування на сторінці, швидкість переміщення миші, швидкість набору тексту з клавіатури тощо. Метод включає такі етапи.

Етап 1. Збір інформації про траєкторії взаємодії користувачів з інтелектуальною системою. При виконанні етапу структуруються дані про послідовність дій користувача під час взаємодії з ІС для формування векторного опису поведінки користувача.

Етап 2. Класифікація рівня експертності користувача ІС на основі аналізу патернів його поведінки. На даному етапі визначається належність користувача до однієї з груп експертності в результаті нейромережної класифікації вектору поведінки користувача.

Етап 3. Побудова онтологічної моделі предметної області з каузальними правилами виведення. На даному етапі формуються знання щодо предметної області шляхом визначення ієрархії концептів класів рішень системи, їхніх властивостей та причинно-наслідкових зв'язків між характеристиками вхідних даних та рішеннями. Онтологічна модель забезпечує прозорість механізмів міркування ІС з можливістю різнорівневої деталізації пояснень.

Етап 4. Трансформація нейромережних представлень у символні правила пояснення. На даному етапі здійснюється формування дерев рішень з прихованих представлень нейромережного класифікатора щодо рівня експертизи для виявлення груп користувачів зі схожими ментальними моделями та побудови інтерпретованих символних правил. Останні визначають відповідність оведінкових патернів та рівня складності пояснень.

Етап 5. Вертикальна композиція шарів ментальної моделі відповідно до рівня експертизи користувача. На даному етапі виконується динамічне формування багаторівневої структури пояснень рішень системи на основі максимізації функції корисності. Остання враховує зрозумілість шару пояснення для користувача.

Етап 6. Генерація персоналізованих пояснень рішень системи з адаптацією складності представлення. На даному етапі здійснюється генерація текстових пояснень рішень інтелектуальної системи з використанням обраного шару онтологічних правил виведення, що дає можливість адаптувати глибину причинно-наслідкових ланцюжків до визначеного рівня експертності користувача

Таким чином, за рахунок адаптації пояснень відповідно до ментальної моделі рішення забезпечується підвищення довіри до рішень системи.

4. Експериментальна перевірка результатів дослідження

Експериментальна перевірка орієнтована на визначення ефективності

розробленого нейросимвольно-онтологічного методу для системи електронної комерції. Проаналізовано траєкторії трьох категорій користувачів: покупці з мінімальним досвідом онлайн-покупок, досвідчені покупці з регулярною активністю та спеціалісти з корпоративних закупівель.

Використано показники: точність ідентифікації рівня експертності користувача (відношення правильно визначених категорій користувачів до загальної кількості); релевантність пояснень (частка ключових понять з пошукового запиту користувача, що присутні в згенерованому поясненні щодо рекомендації системи електронної комерції). Результати вимірювань для трьох категорій користувачів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Оцінка пояснень на основі персоналізованої ментальної моделі користувача

Категорія користувачів	Ментальна модель	Точність визначення рівня експертності, %	Релевантність пояснень, %
Початкові покупці	Базова	72,3	58,4
Початкові покупці	Персоналізована	87,9	81,6
Досвідчені покупці	Базова	75,8	62,1
Досвідчені покупці	Персоналізована	90,2	84,3
Корпоративні закупівельники	Базова	69,4	55,7
Корпоративні закупівельники	Персоналізована	85,6	79,2

Аналіз експериментальних даних демонструє зростання показників для кожної категорії користувачів після активації персоналізованих ментальних моделей. Для категорії початкових покупців релевантність пояснень зросла на 23,2%, для категорії досвідчених покупців релевантність пояснень збільшилась на 22,2%, а для категорії професійних закупівельників – на 23,5%.

5. Обговорення результатів дослідження

Ключовою перевагою запропонованого нейросимвольно-онтологічного методу є можливість адаптації складності пояснень щодо рішень інтелектуальної системи до рівня експертності користувача, що забезпечує узгодження ментальних моделей користувачів з процесом міркування в ІС. Це суттєво підвищує зрозумілість пояснень та довіру користувачів до рекомендацій системи і, як наслідок, визначає рівень конверсії ІС електронної комерції. Інтеграція нейромережних та символьних підходів у розробленому методі дає можливість поєднати переваги точної класифікації рівня експертності користувачів з використанням онтологічних правил виведення для генерації пояснень. Обмеження розробленого методу пов'язано із необхідністю використання знань експертів для побудови онтології предметної області. Перспективним напрямком вдосконалення методу є застосування механізмів активного навчання для доповнення онтологічної моделі на основі зворотного зв'язку від користувачів щодо зрозумілості отриманих персоналізованих пояснень.

Висновки

У дослідженні представлено вирішення актуального науково-прикладного завдання побудови персоналізованих ментальних моделей рішень

інтелектуальних систем на основі нейросимвольного підходу для автоматизованої адаптації складності пояснень до рівня підготовки користувачів, з тим, щоб забезпечити довіру користувачів до рішень інтелектуальної системи.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розробці нейросимвольно-онтологічного методу побудови персоналізованих ментальних моделей рішень інтелектуальних систем, який поєднує нейромережну класифікацію рівня експертності користувачів на основі аналізу поведінкових траєкторій взаємодії з системою, перетворення нейромережних репрезентацій у символічні правила через індукцію дерев рішень, формалізацію онтологічної моделі предметної області з каузальними правилами виведення та вертикальну композицію шарів ментальної моделі для адаптації складності пояснень відповідно до рівня експертності користувача. Метод дає можливість підвищити релевантність пояснень на основі персоналізованої ментальної моделі, що відображає представлення користувача про рішення інтелектуальної системи.

Refereces

1. Ribeiro M.T., Singh S., Guestrin C. "Why Should I Trust You?" Explaining the Predictions of Any Classifier // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2016. P. 1135–1144. DOI: 10.1145/2939672.2939778.

2. Norman D.A. Some Observations on Mental Models // Mental Models / D. Gentner, A.L. Stevens (eds.). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, 1983. P. 7–14.

3. Chalyi S., Leshchynskiy V. Method of constructing explanations for recommender systems based on the temporal dynamics of user preferences // EUREKA: Physics and Engineering. 2020. Vol. 3. P. 43--50. DOI: 10.21303/2461-4262.2020.001228.

4. Garcez A.S., Gori M., Lamb L.C., Serafini L., Spranger M., Tran S.N. Neural-Symbolic Computing: An Effective Methodology for Principled Integration of Machine Learning and Reasoning // Journal of Applied Logics. 2019. Vol. 6, No. 4. P. 611–632.

5. Quinlan J.R. Induction of Decision Trees // Machine Learning. 1986. Vol. 1, No. 1. P. 81–106. DOI: 10.1007/BF00116251.

6. Gruber T.R. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications // Knowledge Acquisition. 1993. Vol. 5, No. 2. P. 199–220. DOI: 10.1006/knac.1993.1008.

Надійшла до редакції 16.02.2026, розглянута на редколегії 17.02.2026

Ontology-Driven Neurosymbolic Method for Building Personalized Mental Models of Intelligent System Decisions

The subject of the research is the construction of personalized mental models of intelligent system decisions based on the integration of neural network and symbolic approaches for adapting the complexity of explanations to the level of user expertise. The goal is to increase the comprehensibility of explanations and user trust in the recommendations of intelligent systems in critical domains, including aviation, by developing an ontology-driven neurosymbolic method for building personalized mental models. Tasks to be solved: to conduct a critical analysis of approaches to building explanations for intelligent system decisions, to develop an ontology-driven

neurosymbolic method for building personalized mental models of intelligent system decisions. The following results were obtained. The practical advantage of the developed method lies in the ability to automatically adapt the complexity and level of detail of explanations to the user's mental model, and ensure alignment of generated explanations with the internal representations of users about the logic of system decision-making, without involving domain experts in the process of generating personalized explanations. Conclusions. During the study, an ontology-driven neurosymbolic method for building personalized mental models of intelligent system decisions was developed based on the integration of neural network classification of user expertise levels with ontological formalization of domain knowledge and causal inference rules for automated adaptation of explanation complexity to the cognitive capabilities of users. The scientific novelty of the obtained results lies in the development of an ontology-driven neurosymbolic method for building personalized mental models of intelligent system decisions, which combines neural network classification of user expertise levels based on analysis of behavioral interaction trajectories, automatic transformation of neural network representations into symbolic rules through decision tree induction, formalization of an ontological domain model with causal inference rules, and vertical composition of mental model layers to adapt explanation complexity according to the determined user expertise level. The method enables an increase in the relevance of explanations based on personalized mental models that reflect user representations about intelligent system decisions. The results of experimental verification on e-commerce system data have demonstrated the effectiveness of the developed method through an increase in explanation relevance.

Keywords: personalized mental model, ontology-driven neurosymbolic method, explainable artificial intelligence, ontological model, causal inference rules, expertise level classification, behavioral trajectory, decision tree induction, explanation relevance, mental model adaptation, neural-symbolic integration.

Відомості про авторів:

Чалий Сергій Федорович – професор, доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних управляючих систем Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків, Україна, e-mail: serhii.chalyi@nure.ua, ORCID: 0000-0002-9982-9091

Лещинська Ірина Олександрівна – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри програмної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків, Україна, e-mail: iryna.leshchynska@nure.ua, ORCID: 0000-0002-8737-4595

About the authors:

Serhii CHALYI – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Control Systems, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine, e-mail: serhii.chalyi@nure.ua, ORCID: 0000-0002-9982-9091

Iryna LESHCHYNSKA – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Software Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine, e-mail: iryna.leshchynska@nure.ua, ORCID: 0000-0002-8737-4595