

УСАЧОВ ВОЛОДИМИР

Харківський національний університет радіоелектроніки

<https://orcid.org/0009-0001-6264-2039>e-mail: volodymyr.usachov1@nure.ua**ТІТОВ ГЕОРГІЙ**

Харківський національний університет радіоелектроніки

<https://orcid.org/0009-0008-6962-5048>e-mail: heorhii.titov@nure.ua

МЕТОДИ СТРУКТУРИЗАЦІЇ ТА ПЕРСОНАЛІЗАЦІЇ КОНТЕНТУ В СИСТЕМАХ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ НА ОСНОВІ АВТОМАТНО-ГРАФОВОЇ МОДЕЛІ

Сучасна дистанційна освіта стикається з подвійним викликом: необхідністю ефективної інтеграції різноманітних за форматом та змістом навчально-методичних матеріалів та гострою потребою в глибокій персоналізації навчального процесу для кожного окремого суб'єкта навчання. Відсутність єдиних стандартів та обмеженість статичних традиційних методів навчання суттєво знижують його якість та ефективність, що вимагає розробки нових, гнучких та інтелектуальних методологічних підходів. У контексті окреслених проблем, ця робота зосереджена на розробленні математичного забезпечення для створення універсальних інструментальних засобів адаптивного навчання. Запропонована методологія надає потужний інструментарій для формалізації структури навчального контенту, організовуючи його у вигляді гнучких, керованих освітніх курсів, що подаються як орієнтовані графи. Вузлами цих графів слугують спеціалізовані дидактичні одиниці – слайди, а ребрами – керовані переходи між ними. Ядром адаптивного механізму є індивідуальна модель суб'єкта навчання, представлена у вигляді нечіткого недетермінованого автомата. Модель будується на основі експертних оцінок викладача та аналізу даних про успішність суб'єктів навчання. Такий автомат, керований шляхом розв'язання спеціальних композиційних рівнянь, дозволяє системі приймати обґрунтовані рішення щодо подальшої траєкторії навчання, динамічно формуючи та коригуючи оптимальні стратегії навчання на основі індивідуальних особливостей та прогресу суб'єкта навчання. Основним результатом роботи є створення комплексного математичного апарату, що дозволяє ефективно управляти нелінійними та динамічними аспектами індивідуального навчального процесу. Використання інструментарію нечіткої логіки дозволяє системі успішно оперувати з властивою освітньому процесу невизначеністю та враховувати суб'єктивні оцінки суб'єктом навчання таких параметрів, як складність навчального завдання чи привабливість певного способу його засвоєння, а також інтегрувати його попередній навчальний досвід. Важливим результатом є також те, що запропонований підхід до структурування контенту у вигляді графів пропонує уніфікований спосіб представлення різноманітних матеріалів, що є першим кроком до розробки універсальних форматів обміну та вирішення проблеми відсутності стандартів. Практична реалізація розроблених положень відкриває шлях до створення інструментальних систем, що функціонують як інтелектуальні тьютори та забезпечують індивідуалізоване навчання в режимі реального часу. Такі системи здатні проактивно конструювати оптимальні навчальні шляхи, ідентифікувати та трансформувати потенційно неефективні навчальні стратегії, а також інтегрувати нюансоване педагогічне розуміння викладача у комп'ютерне середовище. Застосування цього підходу покликане суттєво підвищити якість, гнучкість та загальну ефективність дистанційної освіти.

Ключові слова: адаптивне навчання, нечіткий недетермінований автомат, персоналізація навчання, інтеграція навчальних матеріалів, стандартизація контенту, автоматно-графова модель.

USACHOV VOLODYMYR**TITOV GEORGIY**

Kharkiv National University of Radio Electronics

METHODS OF CONTENT STRUCTURING AND PERSONALIZATION IN DISTANCE LEARNING SYSTEMS BASED ON AN AUTOMATIC-GRAPH'S MODEL

Modern distance education faces a dual challenge: the necessity for effective integration of heterogeneous learning materials, diverse in format and content, and the acute need for deep personalization of the learning process for each individual student. The absence of unified standards and the limitations of static traditional teaching methods significantly reduce its quality and effectiveness, which necessitates the development of new, flexible, and intelligent methodological approaches. In the context of the outlined problems of integrating heterogeneous learning materials and the need for deep personalization, this work is focused on the development of mathematical software for creating universal instrumental tools for adaptive learning. The proposed methodology provides a powerful toolkit for the formalization of learning content structure, organizing it as flexible, managed educational courses presented as directed graphs. The nodes of these graphs serve as specialized didactic units – slides, while the edges represent controlled transitions between them. Informational slides contain objects for displaying textual, graphical, audio, and video information, whereas interactive slides additionally include test tasks to provide feedback. The core of the adaptive mechanism is the individual student model, represented as a fuzzy non-deterministic automaton. The model is built upon the instructor's expert evaluations and is continuously refined by analyzing student performance data obtained through statistical processing of their test results. Such an automaton, governed by solving special compositional equations, allows the system to make well-founded decisions regarding the subsequent learning trajectory, dynamically forming and correcting optimal learning strategies based on the individual characteristics and progress of the student. The main result of this work is the creation of a comprehensive mathematical apparatus that allows for the adequate representation and effective management of the complex, non-linear, and dynamic aspects of the individual learning process. The use of fuzzy logic tools within the student model enables the system to successfully operate with the uncertainty inherent in the educational process, taking into account the student's subjective assessments of parameters such as task difficulty or the appeal of a particular learning method, as well as integrating their prior experience. Another important result is that the proposed graph-based approach to content structuring essentially offers a unified method for representing learning materials regardless of their original format. Such structuring serves as a first step towards the

development of universal exchange formats, which will allow for the seamless integration of educational resources from diverse sources and contribute to solving the problem of lacking unified standards. The practical implementation of the developed provisions opens the way to creating instrumental systems capable of functioning as intelligent tutors that proactively construct and correct optimal learning paths. A key functional advantage is the system's ability to identify potentially ineffective learning strategies and initiate their timely and pedagogically sound transformation or a transition to mixed strategies to guarantee the achievement of educational goals. The practical consequence of the developed approach is the creation of an instrumental system that provides truly individualized and adaptive learning in real-time by promptly reacting to student results. This allows the system to automatically recommend and correct learning strategies, considering the student's individual style and performance. Such a system is designed to significantly improve the quality, flexibility, and overall efficiency of distance education through timely content adjustments, the acceleration of the transition to more unified information formats, and the creation of an interactive educational environment that maximally corresponds to the student's individual needs.

Keywords: adaptive learning, fuzzy non-deterministic automaton, learning personalization, integration of learning materials, content standardization, automatic-graph's model.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.08.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасні тенденції розвитку дистанційного навчання створюють численні виклики, пов'язані з інтеграцією різноманітних навчально-методичних матеріалів у єдину цифрову екосистему, що є ключовим завданням для забезпечення високої ефективності освітнього процесу в умовах стрімкого технологічного прогресу. Зі зростанням кількості онлайн-курсів, електронних підручників, відеолекцій, інтерактивних симуляцій та спеціалізованих платформ виникає нагальна потреба у розробці нових методологічних підходів, які дозволять не лише організувати, але й оперативного адаптувати навчальний контент до вимог сучасного цифрового середовища. Традиційні методи розробки навчальних систем, орієнтовані на статичне подання інформації, часто не передбачають можливості швидкої модифікації матеріалів з урахуванням змін у навчальних технологіях та актуальних потреб суб'єктів навчання, що призводить до зниження ефективності засвоєння знань і обмежує практичне застосування дистанційного навчання. Водночас, швидкий розвиток цифрових технологій, зокрема засобів комунікації, аналітичних інструментів і платформ для спільної роботи, вимагає інтеграції різноманітного освітнього контенту в єдину систему, яка б дозволяла безперешкодно оновлювати, зберігати та передавати інформацію, а також забезпечувати її доступність для великого кола користувачів. Необхідність у високій адаптивності освітніх матеріалів до індивідуальних потреб кожного суб'єкта навчання робить процес розробки сучасних навчальних систем ще більш складним, адже традиційні підходи не завжди дозволяють врахувати різницю в рівнях підготовки, стилях навчання та індивідуальних характеристиках користувачів. У результаті, сучасні освітні системи стикаються з проблемою ефективної інтеграції великого обсягу різнопланового контенту, що потребує впровадження інноваційних рішень для управління, адаптації та стандартизації навчальних матеріалів, з метою забезпечення їхньої високої якості та своєчасного оновлення у відповідності до актуальних вимог дистанційного навчання.

Вищенаведена проблема загострюється тим, що більшість сучасних навчальних систем використовують різні стандарти для подачі матеріалу, що створює серйозні труднощі при спробі інтеграції різних платформ і систем управління навчанням. Різноманіття форматів, якими представлені освітні матеріали — від текстових та графічних ресурсів до аудіо- та відеофрагментів, інтерактивних симуляцій — створює значні труднощі у їх узгодженому використанні, оскільки кожен формат вимагає окремих підходів до збереження, подачі та обробки даних. Відсутність єдиних стандартів для організації і систематизації цих матеріалів призводить до фрагментації інформації, що суттєво ускладнює забезпечення зручного доступу до неї, знижує ефективність навчального процесу та призводить до невідповідності між різними освітніми платформами. Даний виклик має як практичне, так і наукове значення, оскільки потребує створення нових методологічних підходів та впровадження інноваційних технологічних рішень для уніфікації даних у межах однієї навчальної системи. Це включає розробку універсальних форматів обміну та збереження контенту, які дозволять безперешкодно інтегрувати ресурси з різних джерел.

Також важливим аспектом є необхідність персоналізації навчання для кожного суб'єкта навчання, оскільки сучасні системи дистанційного навчання мають задовольняти індивідуальні потреби кожного суб'єкта навчання, що включає врахування рівня його підготовки, власного стилю навчання, а також індивідуальних особливостей, які впливають на засвоєння матеріалу. Сучасні дослідження [1] демонструють, що стандартні методи підготовки контенту не завжди здатні забезпечити оперативну адаптацію навчальних матеріалів в режимі реального часу, що призводить до зниження ефективності навчання та створює додаткові труднощі для суб'єктів навчання, які потребують гнучких та індивідуалізованих підходів. В зв'язку з цим існує нагальна потреба розробити спеціалізовані механізми, які дозволять аналізувати успішність суб'єкта навчання, а також автоматично коригувати навчальний процес, виходячи з отриманих даних про його досягнення. Такий механізм повинен включати інструменти збору даних, аналізу навчальних результатів та алгоритми, що дозволяють модифікувати шляхи і темпи подачі інформації, щоб навчальний контент максимально відповідав індивідуальним можливостям та потребам суб'єкта навчання. Інтеграція таких адаптивних

технологій сприятиме не лише підвищенню мотивації та зацікавленості суб'єктів навчання, але й стимулюватиме розвитку критичного мислення і самостійності у процесі навчання, що має як практичне, так і наукове значення, забезпечуючи основу для подальших інноваційних досліджень у галузі адаптивних освітніх технологій і зміцнення конкурентоспроможності сучасних систем дистанційної освіти.

Таким чином, інтеграція різномірних навчальних матеріалів у єдину цифрову екосистему, а також персоналізація навчання, є складними та багатограними проблемами, вирішення яких має велике значення для підвищення ефективності дистанційного навчання. Розробка нових технологічних та методологічних підходів дозволяє не лише стандартизувати та адаптувати контент, забезпечуючи його узгоджене представлення незалежно від формату, але й створити можливості для персоналізації навчального процесу, що є критичним фактором у контексті швидкоплинних інформаційних технологій. Рішення цих проблем вимагає комплексного підходу, що буде включати розробку нових інструментів для управління навчальними ресурсами. Впровадження таких інструментів сприятимуть підвищенню якості навчання за рахунок своєчасної корекції, оптимізації подачі матеріалів, а також створюватиме гнучке освітнє середовище, в якому інтерактивність, швидкість адаптації та підтримка в режимі реального часу стають запорукою успішного навчального процесу.

Аналіз досліджень

Побудова інтелектуального освітнього середовища адаптивного дистанційного навчання є темою численних досліджень, адже з розвитком технологій виникає потреба в адаптації існуючих навчальних ресурсів до нових умов. У роботах, зокрема в дослідженні [2], акцентується увага на тому, як інтеграція різномірних матеріалів може сприяти підвищенню якості освіти в умовах онлайн-навчання. Автори відзначають, що інтеграція повинна передбачати не лише технічні можливості платформи, а й методичні особливості, здатні забезпечити ефективне засвоєння матеріалу суб'єктами навчання. Вони описують практичні приклади, коли за допомогою інтерактивних методів, таких як відеолекції, тестування в реальному часі і робота в групах, суб'єкти навчання мають можливість глибше зануритися в тему. Ключовим моментом є використання адаптивних технологій, що дозволяють матеріалу автоматично коригуватися відповідно до потреб і темпу суб'єкта навчання. Це дає змогу забезпечити індивідуальний підхід та створити умови для успішного засвоєння знань у різних категорій суб'єктів навчання, що є важливим аспектом дистанційного навчання.

У дослідженні [3] розглядається використання алгоритмів машинного навчання для автоматизації створення адаптивних навчальних шляхів для кожного суб'єкта навчання. Автори пропонують нові підходи до формування курсів, орієнтуючись не тільки на рівень знань, а й на типи навчальних стилів. Вони підкреслюють важливість застосування технологій, здатних аналізувати поведінку суб'єктів навчання під час навчання, що дозволяє в реальному часі змінювати підхід до навчання в залежності від того, чи суб'єкти навчання мають складнощі з матеріалом, чи ж навпаки — йдуть вперед. Такий підхід, на їхню думку, дозволить максимально ефективно використовувати ресурси і допомогти суб'єктам навчання досягти кращих результатів.

Також, одним із важливих аспектів є розгляд уніфікації та персоналізації контенту в онлайн-освіті з погляду інклюзивності. У роботі [4] автори пропонують інноваційні підходи до створення доступних навчальних матеріалів для суб'єктів навчання з обмеженими можливостями. Вони зосереджують увагу на створенні матеріалів, що забезпечують гнучкість в доступі до навчального контенту, особливо для суб'єктів навчання з порушеннями слуху, зору або іншими фізичними обмеженнями. Розглядаються способи адаптації текстових матеріалів, відео та аудіо-ресурсів, використовуючи спеціалізовані програми та технології, які забезпечують інтеграцію субтитрів, озвучування тексту, а також синтезування інформації в доступних для суб'єктів навчання форматах. Автори зазначають, що такі підходи не тільки сприяють створенню інклюзивного освітнього середовища, але й дозволяють досягти більш високих результатів у процесі навчання для суб'єктів навчання з різними потребами.

Важливою темою в аналізі досліджень є також питання інтеграції гейміфікаційних елементів, які набувають все більшого поширення в освітніх технологіях. Автори дослідження [5] підкреслюють, що використання ігрових механік, таких як рейтинги, рівні та нагороди, не лише покращує мотивацію суб'єктів навчання, але й стимулює їх активну участь у навчальному процесі. Вони зазначають, що ці елементи гейміфікації допомагають перетворити навчання на більш захоплюючий і інтерактивний процес, що дозволяє суб'єктам навчання відчувати себе частиною певної спільноти та змагатися за досягнення найвищих результатів. Дослідження також вказує на те, що застосування таких методик може суттєво покращити успішність суб'єктів навчання та їх здатність до розв'язання проблем. Встановлено, що суб'єкти навчання, які навчаються з елементами гейміфікації, демонструють кращі результати як у розумінні теоретичних аспектів, так і у практичному застосуванні отриманих знань, що доводить ефективність цього підходу для підвищення рівня навчальної мотивації та залученості.

У роботі [6] розглядаються потенційні недоліки, які можуть виникнути через неадекватну інтеграцію мультимедійних та електронних матеріалів у навчальний процес. Автори наголошують, що, хоча технології можуть значно покращити навчання, їхнє впровадження потребує ретельного планування і стратегічного підходу, оскільки без нього можна потрапити в так звану пастку

«технологічного перевантаження». Використання великої кількості інтерактивних ресурсів, відео, симуляцій і віртуальних середовищ без належної педагогічної підтримки та адаптації до потреб суб'єктів навчання може призвести до перевантаження інформацією, що, у свою чергу, може знизити ефективність навчання. Важливо, щоб інтеграція новітніх технологій супроводжувалася змінами в організації навчального процесу, зокрема адаптацією програм навчання до нових умов, з урахуванням вікових особливостей суб'єктів навчання, їхнього рівня технічної підготовленості, а також навчальних потреб. Без врахування цих аспектів навіть найсучасніші технології можуть не принести бажаного результату, а навпаки — створити додаткове навантаження на суб'єктів навчання, що може негативно позначитись на їхній мотивації та результатах навчання. Таким чином, автори зазначають, що успішна інтеграція технологій має базуватися не тільки на технічному забезпеченні, але й на глибокому розумінні педагогічних принципів і здатності адаптувати навчальний процес до нових викликів цифрової ери.

В роботі [7] досліджується вплив хмарних технологій, вказуючи на значні переваги, які вони надають як суб'єктам навчання, так і викладачам. Автори підкреслюють, що хмарні платформи дають змогу забезпечити не лише швидкий доступ до навчальних матеріалів, але й їхнє оперативне оновлення в реальному часі, що особливо важливо в умовах швидко змінюваних освітніх вимог. Така інтеграція дозволяє суб'єктам навчання працювати з матеріалами без прив'язки до конкретного місця чи часу, використовуючи будь-який пристрій, що значно підвищує гнучкість навчального процесу та підтримує мобільність користувачів. Крім того, хмарні сервіси значно полегшують спільну роботу суб'єктів навчання і викладачів, дозволяючи легко обмінюватися документами, проектами та коментарями, що сприяє інтерактивному навчальному процесу та колективному розвитку. Такий підхід дозволяє знизити технічні обмеження і створює нові можливості для організації динамічного та ефективного навчання в будь-яких умовах, підвищуючи рівень доступності освіти для широкого кола користувачів.

Таким чином, на основі вищенаведених досліджень можна зробити висновок, що побудова інтелектуального освітнього середовища для адаптивного дистанційного навчання є складним і багатогранним процесом, який має охоплювати як технічні, так і методологічні та педагогічні складові. Успіх такої системи залежить не лише від вибору та інтеграції сучасних технологій — хмарних платформ, інструментів штучного інтелекту, аналітичних сервісів і гейміфікаційних модулів — а й від здатності динамічно адаптувати навчальний контент до індивідуальних потреб суб'єктів навчання, спираючись на дані моніторингу їх успішності та стилю навчання. Відтак важливо забезпечити не просто подачу матеріалу, а створення середовища, в якому контент автоматично коригується, доповнюється та персоналізується в реальному часі, гарантуючи оптимальне співвідношення між складністю завдань та рівнем підготовки користувача. Лише поєднання усіх цих складових — технологічної потужності, педагогічної грамотності та безперервної адаптації — дозволить створити справді стимулююче, гнучке й результативне освітнє середовище, здатне відповідати викликам сучасної цифрової ери.

Мета статті

Метою роботи є розробка математичного забезпечення для створення універсальних компонентів підтримки управління навчанням (КПУН), що є складовими інтелектуальної адаптивної інструментальної системи інтеграції навчально-методичних матеріалів. Всі навчальні матеріали в рамках КПУН організуються в вигляді курсів, які в свою чергу подаються у вигляді спрямованого графа, у якому вузлами слугують документи спеціального виду - слайди, а ребрами - переходи між ними. З кожного вузла суб'єкт навчання може потрапити в один із кількох інших вузлів, безпосередньо пов'язаних із ним ребрами. Переходи між слайдами вибираються на основі даних про суб'єкт навчання і стан навчання, що дозволяє системі оперативно реагувати на результати і коригувати навчання. Використання такого підходу дає змогу досягти таких цілей: реалізувати індивідуальний підхід до кожного суб'єкта навчання, що дозволяє інтегрованим навчальним системам адаптуватися до конкретних потреб та особливостей кожного суб'єкта навчання, враховуючи його рівень знань, стиль навчання та інші фактори, які можуть впливати на процес навчання. В рамках цього підходу використовуються механізми, які дають можливість визначити найефективнішу стратегію та тактику навчання, враховуючи особливості кожного суб'єкта навчання. Окрім того, такий підхід забезпечує проведення навчання в режимі реального часу, з можливістю швидкого реагування на будь-які зміни або запитання з боку суб'єктів навчання, завдяки чому зменшується ймовірність відхилень від оптимального процесу навчання. Зокрема, використання технологій, що забезпечують швидку адаптацію, дозволяє своєчасно коригувати матеріали та стратегії, уникаючи затримок, які можуть спричинити погіршення якості навчання.

Виклад основного матеріалу

Інформація у вузлах курсу навчання має бути розбита на невеликі смислові частини слайди. Слайди можуть бути двох типів: інтерактивні та інформаційні. Інформаційні слайди складаються тільки з об'єктів відображення текстової та графічної інформації, відтворення аудіо- та відеофрагментів і кнопок керування ходом навчального процесу. Інтерактивні слайди, крім перелічених об'єктів, можуть також містити об'єкти, що реалізують різні види тестових завдань для організації зворотного зв'язку з суб'єктом навчання і оперативного контролю засвоєння знань, а також для набуття суб'єктом навчання

необхідних навичок. У поточній версії розроблюваної системи стосовно інтерактивних слайдів використовується біноміальна модель педагогічного тесту [8]. У рамках цієї моделі результат виконання кожного завдання оцінюють за бінарною шкалою: 1, якщо суб'єкт навчання успішно виконав завдання, що містяться в даному інтерактивному слайді; 0 - в іншому випадку. Таким чином, у навчальному курсі кожен інтерактивний слайд має щонайменше два вихідних ребра: одне відповідає успішному виконанню тестового завдання, друге - неправильному вирішенню завдання. За такого підходу, кількість інтерактивних слайдів у блоці інтерактивного навчання, а також кількість запитань у блоці заключного тестування визначають такі параметри: N - шукана кількість інтерактивних слайдів; p - імовірність успішного виконання тестового завдання (істинний бал суб'єкта навчання, що характеризує істинний рівень навченості); d - надійність визначення параметра p ; Φ_0 - інтеграл імовірностей (функція Лапласа); ε - точність визначення істинного бала суб'єкта навчання p .

Задаючи значення величин точності (ε), надійності (d) і, з огляду на поточний рівень навченості (p), за допомогою формул можна визначити необхідну кількість інтерактивних слайдів у підготовлюваному курсі навчання. У разі виникнення необхідності проведення комплексної об'єктивної атестації з високим ступенем точності ($\varepsilon = 0,04$) і надійності ($d = 0,7$), для суб'єктів навчання з істинним рівнем навченості $p = 0,7$ буде потрібно підготувати $N = 224$ інтерактивних слайдів. Однак для визначення якості засвоєння матеріалів навчального курсу не потрібна надзвичайно висока точність педагогічного вимірювання [9]. Для цієї мети цілком підійде середня точність і надійність, тому величини ε і d можна обрати такими, що дорівнюють 0,1 і 0,8 відповідно. У цьому випадку, для визначення істинного бала $p = 0,6$ достатньо підготувати 40 інтерактивних слайдів.

Під час особистих контактів зі суб'єктом навчання викладач має можливість визначити його особистісні якості та індивідуальні особливості. Це дає йому змогу адекватно коригувати процес навчання, змінюючи форму і зміст матеріалу, тактику і стратегію навчання, а іноді й методологію викладання. Для цього викладач використовує суб'єктивно усвідомлену модель суб'єкта навчання. У разі комп'ютерного (дистанційного) навчання такої можливості у викладача практично немає [10].

Таку форму навчання цілком логічно розглядати як людино-машинну систему, в якій суб'єкт навчання, і викладач виступають у ролі людини-оператора. Якщо суб'єкт навчання, керує системою набуття знань, то викладач опосередковано керує процесом навчання. Як і під час проектування людино-машинної системи, при створенні інтелектуальної комп'ютерної навчальної системи слід вирішувати питання перерозподілу функцій між людиною та обчислювальними засобами.

З цією метою пропонується використовувати в процесі навчання індивідуальну модель суб'єкта навчання, яка будується на основі експертних оцінок [11]. При цьому передбачається, що процес навчання являє собою послідовну сукупність освоєння окремих розділів навчального матеріалу. Кожен етап навчання закінчується тестуванням. Суб'єкт навчання може керувати процесом свого навчання за допомогою вибору способів освоєння навчального матеріалу.

Під моделлю суб'єкта навчання, будемо розуміти нечіткий недетермінований автомат виду [12]:

$$A = \langle U, X, Y, s_0, \delta, \sigma \rangle, \quad (1)$$

де $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$ - скінченна множина входів, m - кількість входів автомата; $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ - скінченна множина станів, n - кількість станів автомата; $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_p\}$ - скінченна множина виходів, p - кількість виходів автомата; $\delta: X \times U \times X \rightarrow [0, 1]$ - функція переходів; $\sigma: X \times Y \rightarrow L$ - функція виходів; s_0 - початковий стан.

Функція δ породжує множину нечітких матриць переходу:

$$T = \{\delta_{X_i, X_j}(U)\}, 1 \leq i \leq j \leq n. \quad (2)$$

Серед множини станів автомата виокремлено множину фінальних (заклучних) станів X_n . Нас цікавитиме такий тип автомата, для якого кожен стан X_i ($i = 1, \dots, n$) залежить від попереднього стану X_{i-1} . Подібна залежність може визначатися послідовністю реалізації підцілей, пріоритетом виконання тощо.

Отже, в цьому випадку автомат можна задати як нечіткий граф [13]:

$$G = \{\mu_G(X_{i-1}, X_i) \in M\}, \quad (3)$$

де M - множина приналежностей елементів $X_{i-1} \times X$.

При такому розгляді мета навчання декомпозитується на i послідовних (за часом освоєння матеріалу) підзадач. Будемо інтерпретувати X_i як множину результатів i -го тесту, Y_j ($j = 1, \dots, p$) - як множину інтервалів часу на навчання, L - як множину доходів, пов'язаних із реалізацією обраного способу навчання (освоєння матеріалу) $u \in U$ на інтервалі часу Y_j .

Стани підзадач і управлінські рішення, що протікають у часі, будемо трактувати як нечіткі події на інтервалі Y_k ($1 \leq k \leq p$). За такого підходу функція переходів може задаватися експертним шляхом і відображати вже наявний досвід навчання, виходячи з практичного досвіду подання навчального матеріалу. При цьому, не враховується результат навчання залежно від часу його реалізації, а також особистісні особливості набуття знань конкретним індивідом. Для врахування цієї обставини необхідно побудувати індивідуалізовану функцію переходів. Із цією метою використовують вихідну інформацію від суб'єкта навчання, яка містить прогноз застосування того чи іншого способу

засвоєння матеріалу залежно від можливих результатів тестування у вигляді функції $\mu: X_i \times U_l \rightarrow [0,1]$, де $l = 1, \dots, m$, m – це загальна кількість доступних способів навчання, а також прогноз переходу керованого процесу навчання з вихідного стану S_0 на першому кроці розв'язання в залежності від обмежень на наявні ресурси. На основі цієї інформації програмується автоматна модель. Для цього на кожному кроці розв'язується система композиційних рівнянь виду [14]:

$$\begin{cases} \mu(X_i)/U_l = \mu(X_{i-1})/U_{l-1} \circ \delta(X_{i-1}, X_i)/U_l \\ \mu(U_l) = \mu(X_{i-1}) \circ \mu(X_{i-1}, X_i)/U_l \end{cases}, \quad (4)$$

де "о" - знак операції "композиція"; $\mu(X_i)/U_l, \mu(X_{i-1})/U_{l-1}$ - нечіткі оцінки можливості керованого процесу перебувати у станах X_i, X_{i-1} , у разі застосування способів освоєння навчального матеріалу U_l і U_{l-1} , відповідно; $\mu(U_l)$ - нечітка оцінка вибору суб'єктом навчання способу освоєння матеріалу U_l .

Отримані оцінки групують попарно, виходячи з такої умови:

$$\mu(U_l) \leq \mu(X_i)/U_l, \quad (5)$$

Формування пар за таким принципом узгоджується з реальним вибором рішення: результату тесту з максимальною оцінкою можливості має відповідати спосіб засвоєння навчального матеріалу також з максимальною оцінкою застосування його суб'єктом навчання. Виділення пар дає змогу виявити найімовірніші зв'язки за способами засвоєння матеріалу між результатами тестування кожного етапу навчання. При цьому кожен спосіб засвоєння, що маркує зв'язок, характеризується нечіткою оцінкою використання його суб'єктом навчання, і нечіткою оцінкою ціни навчання (нормований дохід), суб'єктивно усвідомлюваної суб'єктом навчання, залежно, наприклад, від часу або складності освоєння навчального матеріалу.

З вихідного стану в стани першого кроку ухвалення рішень проводять дуги, марковані тими способами опанування навчального матеріалу, використання яких, відповідно до прогнозу, дає змогу домогтися результатів проміжного тестування на першому етапі навчання, що характеризуються найбільшою оцінкою. Залежно від означування цих дуг і на основі сформованих пар "спосіб освоєння матеріалу" - "результати тестування" проводяться означені дуги від першого до n -го етапу навчання.

У результаті побудов отримуємо нечіткий недетермінований автомат, що моделює поведінку суб'єкта навчання, за різних результатів проміжного тестування. Застосовуючи підхід, що використовується в динамічному програмуванні, можна виділити класи стратегій суб'єкта навчання. Насамперед той клас, стратегії якого дають змогу досягти мети навчання і характеризуються максимальними оцінками зв'язків між результатами тестів [15]. Для виокремлення таких стратегій на множині фінальних результатів тестування визначають результати, що відповідають меті навчання. Далі виокремлюються результати тестування на $(n-1)$ -му кроці, перехід з яких у цільові стани n -го кроку характеризується способами освоєння навчального матеріалу з оцінкою, що дорівнює:

$$\alpha(U_{n-1}) = \max_{Y_{n-1}} (\min(\mu U_{n-1}), \sigma_{X_{n-1}, U_{n-1}}), \quad (6)$$

Подібну процедуру здійснюють для кожного кроку рішення, аж до стану S_0 . Використання процедури дає змогу виокремити можливі стратегії навчання, що являють собою зважені шляхи на графі від вершини S_0 до вершин із множини X_n . Кожен q -й шлях являє собою зважену щодо способів освоєння навчального матеріалу послідовність вигляду:

$$S_q = (S_0, U_0, X_1^{r_1}, U_1, \dots, X_{n-1}^{r_{n-1}}, U_{n-1}, X_n^{r_n}), \quad (7)$$

де $r_t, t \in \{1, \dots, n\}$ - кількість результатів t -го тесту. Елементи (результати підсумкового тестування) множини X_n можуть становити для суб'єкта навчання, різну цінність, що відображається завданням на X_n нечіткої мети з функцією належності:

$$\mu(g) = \{\mu(X_n^1, \dots, X_n^h)\}, \quad (8)$$

де h - розмірність множини X_n ; $\mu(X_n^\pi), \pi \in \{1, \dots, h\}$ - функція належності результату тестування нечіткої мети g .

У цьому випадку кожен стратегію з класу π можна оцінити таким чином:

$$\beta(S_q^\pi) = \min(\alpha(U_0), \alpha(U_1), \dots, \alpha(U_{n-1}), \mu(X_n^\pi)), \quad (9)$$

Стратегія, яка має оцінку:

$$\max_q (\beta(S_q^\pi)), \quad (10)$$

найбільше відповідає індивідуальному стилю набуття знань суб'єктом навчання, але не завжди може відповідати максимальній функції приналежності результату тестування щодо мети g . Отриманого протиріччя під час побудови моделі навчання можна уникнути, використовуючи такі способи: використання такої організації супроводу навчання, яка б враховувала тільки кінцеву мету, тобто стан нечіткої мети з максимальною функцією належності; зміна вихідних матриць переходів і виходів; зміна вподобань суб'єктом навчання.

В першому випадку слід використовувати змішані стратегії, утворені частинами стратегій із класів π . Необхідність у формуванні змішаної стратегії визначає трансформацію стратегії з деякого класу, обрану, виходячи з критерію (9), у стратегію з іншого класу, виходячи з наступного критерію:

$$\max_\pi (\mu(X_n^\pi)), \quad (11)$$

Очевидно, що необхідність у трансформації виникає в тих випадках, коли обрана вихідна стратегія перестає бути ефективною щодо нечітко заданої мети. При цьому важливо визначити ті просторово-часові точки графа (вершини), де подібна трансформація можлива. Із цією метою введемо поняття коефіцієнта свободи вибору суб'єкта навчання [16], під яким розумітимемо відношення числа допустимих стратегій із класу: S_q^π з $\beta(S_q^\pi) \geq \varepsilon$ до загальної кількості стратегій із цього ж класу. Тут ε означає поріг можливостей суб'єкта навчання, у досягненні поставленої ним мети, за умови використання індивідуального стилю освоєння навчального матеріалу. Чим менше значення коефіцієнта свободи вибору, тим менше у суб'єкта навчання варіантів у досягненні поставленої мети без зміни індивідуальної стратегії. Тому навчальна система, побудована на основі моделі поведінки суб'єкта навчання, має: рекомендувати після отримання кожного результату тестування ті способи опанування матеріалу, які є складовими частинами допустимих стратегій і не роблять значення коефіцієнта свободи вибору рівним або близьким до нуля; у разі неможливості виконання попереднього пункту трансформувати індивідуальну стратегію суб'єкта навчання, переходячи на змішану стратегію навчання; перепрограмувати модель навчання в ситуаціях переходу від одного результату тестування до іншого в межах одного й того самого етапу навчання.

В останньому випадку необхідність у перепрограмуванні моделі навчання визначається зміною функції доходів. Використання розглянутої моделі дає змогу окреслити шляхи автоматичної корекції індивідуальних стратегій суб'єкта навчання. Особливість пропонованого підходу полягає в можливості перенесення моделі суб'єкта навчання, сформованої викладачем під час особистих контактів, в освітнє середовище комп'ютерного (дистанційного) навчання.

Висновки й перспективи подальшого розвитку

У даній науковій праці представлено комплексне дослідження спрямоване на розробку теоретичних засад та відповідного математичного забезпечення для створення універсальних інструментальних засобів для побудови та управління адаптивним навчанням. Ці засоби розглядаються як фундаментальні елементи інструментальної системи, головне призначення якої полягає в забезпеченні глибокої індивідуалізації освітнього процесу, а також у вирішенні однієї з найгостріших та найскладніших проблем сучасної цифрової освіти – проблеми ефективної інтеграції, узгодженого використання та управління величезними масивами навчально-методичних матеріалів, що характеризуються значною різноманітністю за своєю структурою, форматами подання та дидактичним призначенням.

Результати проведеного теоретичного дослідження та всебічного моделювання переконливо засвідчують, що запропонований математичний апарат, зокрема індивідуальна модель суб'єкта навчання у формі нечіткого недетермінованого автомата, володіє значним потенціалом для адекватного відображення та ефективного управління складними, нелінійними та динамічними аспектами індивідуального навчального процесу. Використання інструментарію нечіткої логіки в межах моделі суб'єкта навчання дозволяє системі успішно оперувати з властивою освітньому процесу невизначеністю, враховувати суб'єктивні оцінки суб'єктом навчання таких параметрів, як складність навчального завдання чи привабливість певного способу його засвоєння, а також інтегрувати його попередній навчальний досвід. Механізм динамічного програмування автоматної моделі через розв'язання систем відповідних композиційних рівнянь забезпечує її неперервну актуалізацію та чутливу адаптацію до поточного стану знань, потреб та цілей суб'єкта навчання. Одночасно, застосування обґрунтованої біноміальної моделі для оцінювання результатів виконання тестових завдань надає системі об'єктивні та надійні дані, необхідні для прийняття зважених педагогічних рішень щодо подальшого навчального маршруту. Таке поєднання глибокого, формалізованого моделювання індивідуальних когнітивних та особистісних якостей суб'єкта навчання з об'єктивним контролем рівня його знань створює міцну науково обґрунтовану платформу для реалізації нового покоління адаптивних навчальних систем, які здатні значно перевершити можливості традиційних, переважно статичних та уніфікованих, підходів, що часто виявляються неспроможними задовольнити різноманітні та мінливі потреби сучасних суб'єктів навчання, особливо в контексті дистанційних форм здобуття освіти.

Окрім можливостей глибокої персоналізації, важливим результатом роботи є те, що запропонований підхід до структурування та управління навчальним контентом сприяє вирішенню проблеми відсутності єдиних стандартів в освітньому просторі. Різноманіття форматів представлення освітніх матеріалів – від текстових документів та графічних ілюстрацій до аудіо- та відеофрагментів й інтерактивних симуляцій – створює значні труднощі у їх узгодженому використанні, оскільки кожен формат вимагає окремих підходів до збереження, подання та обробки даних. Відсутність єдиних стандартів для організації і систематизації цих матеріалів призводить до небажаної фрагментації інформації, що суттєво ускладнює забезпечення зручного доступу до неї, знижує ефективність навчального процесу та спричиняє невідповідності між різними освітніми платформами. Запропонована в роботі модель організації навчальних матеріалів у вигляді курсів, що подаються як спрямовані графи, по суті, пропонує уніфікований спосіб представлення навчального контенту незалежно від його вихідного формату. Така структуризація та формалізація є першим кроком до розробки універсальних форматів обміну та збереження контенту, які дозволять безперешкодно

інтегрувати освітні ресурси з найрізноманітніших джерел. Таким чином, розроблене математичне забезпечення та інструментальні засоби не лише забезпечують адаптацію, але й закладають підвалини для стандартизації подання навчальних матеріалів, що є викликом як практичного, так і наукового значення, і потребує створення нових методологічних підходів та впровадження інноваційних технологічних рішень для уніфікації даних у межах єдиної навчальної системи.

Практична реалізація та впровадження розроблених теоретичних положень та математичних моделей дозволять створити інструментальні системи, які здатні не просто пасивно надавати навчальний матеріал, а й проактивно конструювати, пропонувати та динамічно коригувати оптимальні навчальні шляхи. Важливою функціональною перевагою є здатність системи ідентифікувати потенційно неефективні для конкретного суб'єкта навчання навчальні стратегії та ініціювати їх своєчасну та педагогічно обґрунтовану трансформацію або плавний перехід до більш ефективних змішаних стратегій, спрямованих на гарантоване досягнення поставлених освітніх цілей. Передбачено також можливість гнучкого перепрограмування моделі навчання у випадках кардинальної зміни навчальних преференцій суб'єкта навчання або стратегічних освітніх цілей. Окрім переваг персоналізації, потенціал для стандартизації, закладений у запропонованому підході, може призвести до значного полегшення обміну навчальними курсами та окремими модулями між різними освітніми установами, зниження витрат на розробку та адаптацію контенту, а також до підвищення загальної узгодженості та якості освітніх програм у цифровому просторі.

Перспективи подальшого наукового пошуку та інженерної розробки на базі представлених результатів є надзвичайно широкими та можуть розвиватися у таких напрямках, що поглиблюють як адаптивні, так і стандартизаційні аспекти:

1. Застосування генеративно-змагальних мереж (GAN) для створення адаптивних тестових завдань. Для підвищення якості та різноманітності оцінювання на інтерактивних слайдах можна застосувати генеративно-змагальні нейронні мережі. У такій архітектурі одна мережа, "Генератор", навчається створювати нові тестові завдання, включаючи правильні відповіді та реалістичні неправильні варіанти-дистрактори, на основі змісту навчального матеріалу слайда. Інша мережа, "Дискримінатор", навчається відрізняти завдання, створені людиною (викладачем), від завдань, згенерованих штучним інтелектом. У процесі цього "змагання" Генератор поступово вдосконалюється до такого рівня, що може створювати потік унікальних, якісних та педагогічно коректних тестових завдань, складність яких також може динамічно адаптуватися до поточного рівня суб'єкта навчання, сприяючи більш глибокій перевірці знань.

2. Впровадження розмовного штучного інтелекту для взаємодії з системою. Майбутнє адаптивних систем лежить у більш природній та інтуїтивній взаємодії. Замість взаємодії виключно через кліки та введення тексту, можна розробити розмовний інтерфейс, де суб'єкт навчання спілкується з системою за допомогою голосу або чату. Віртуальний тьютор на базі ШІ міг би вести суб'єкт навчання по графу курсу, відповідаючи на його запитання, наприклад: "Чому мені було запропоновано саме цей слайд?", "Поясни це поняття простішими словами" або "Який практичний приклад до цієї теорії?". Відповіді тьютора були б глибоко персоналізовані, оскільки він мав би доступ до індивідуальної моделі суб'єкта навчання.

3. Розширення системи за рахунок автоматизованої генерації контенту. Створення навчального контенту є трудомістким процесом. Перспективним є напрямок, пов'язаний з автоматизацією цього процесу. Система могла б використовувати сучасні великі мовні моделі (LLM) та інші технології генеративного ШІ для автоматичного створення тестових завдань різного типу на основі наданого теоретичного матеріалу, генерації коротких анотацій до інформаційних слайдів, або навіть створення альтернативних пояснень складних тем. Також система могла б здійснювати автоматизований пошук та рекомендувати релевантні зовнішні освітні ресурси (статті, відео, симуляції), автоматично оцінюючи їхню якість та відповідність поточній темі та рівню суб'єкта навчання, і інтегрувати посилання на них у відповідні місця навчального графа. Це значно прискорить процес наповнення курсів та забезпечить їх постійну актуальність.

4. Поглиблення та розширення індивідуальної моделі суб'єкта навчання за допомогою передових методів машинного навчання. Хоча запропонована модель на основі нечіткого недетермінованого автомата є потужною, її можливості можуть бути значно розширені шляхом інтеграції передових методів машинного навчання. Перспективним є використання рекурентних нейронних мереж (RNN, LSTM) для аналізу послідовностей дій суб'єкта навчання та більш точного прогнозування його майбутньої успішності. Також можуть бути застосовані методи навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning) для автоматичної оптимізації та пошуку найефективніших навчальних стратегій у довгостроковій перспективі, де система сама навчатиметься, яка послідовність матеріалів та завдань приносить найкращий результат для певного типу суб'єктів навчання. Інтеграція алгоритмів кластеризації дозволить автоматично ідентифікувати групи суб'єктів навчання зі схожими стилями навчання та когнітивними патернами, що дасть змогу застосовувати до них групові адаптивні стратегії, а потім уточнювати їх на індивідуальному рівні. Це дозволить перейти від моделі, що програмується переважно на основі експертних знань, до моделі, що здатна до самонавчання та постійного самовдосконалення на основі аналізу великих даних.

5. Дослідження та впровадження гейміфікаційних елементів та ігрових механік, інтегрованих у стандартизовану структуру адаптивних курсів, з метою підвищення мотивації, залученості та формування позитивного ставлення до навчального процесу у суб'єктів навчання різних вікових категорій та з різними навчальними цілями.

Підсумовуючи, слід зазначити, що результати даної наукової роботи, роблять значний внесок у розвиток теорії та практики створення передових інтелектуальних освітніх систем. Запропонований підхід, що ґрунтується на гармонійному поєднанні принципів чіткої структуризації навчального контенту з глибоким та всебічним моделюванням індивідуальних когнітивних і особистісних характеристик суб'єктів навчання, закладає міцний науковий фундамент для побудови освітніх рішень нового покоління – по-справжньому персоналізованих, гнучких та високоефективних. Подальше вдосконалення, розвиток та широке впровадження цих інноваційних розробок має значний потенціал не лише для кардинального підвищення якості та доступності освітніх послуг, але й для сприяння формуванню освітнього середовища, здатного ефективно реагувати на динамічні виклики сучасного інформаційного суспільства та забезпечувати підготовку висококваліфікованих, конкурентоспроможних фахівців для потреб економіки знань.

Література

1. Karataiev, O., Sitnikov, D., Sharonova, N. "A Method for Investigating Links between Discrete Data Features in Knowledge Bases in the Form of Predicate Equations", CEUR Workshop Proceedings, 2023, P. 224–235. available at: <https://eurws.org/Vol-3387/paper17.pdf>
2. Dudar, Z., Litvin, S. (2024), "Ontological description method for building service-oriented distributed learning systems". Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2024. No. 1 (27). P. 39–53. DOI: 10.30837/itssi.2024.27.039
3. Yang T., Wang Y., Sha L., Engelbrecht, J. Knowledgebra: An Algebraic Learning Framework for Knowledge Graph. Machine Learning and Knowledge Extraction. 2022. Vol. 4, No. 2. P. 432–445. DOI: <https://doi.org/10.3390/make4020019>
4. Pellissier-Tanon, T., Weikum, G., Suchanek, F. (2020), "F. YAGO 4: A Reasonable Knowledge Base", 17th International Conference, ESWC 2020, Heraklion, Crete, Greece, May 31–June 4. P. 583–596. DOI:10.1007/978-3-030-49461-2_34
5. Svato, M., Schockaert, S., Davis, J. "STRiKE: Rule-Driven Relational Learning Using Stratified k-Entailment", in: ECAI, 2020. available at: <https://ida.fel.cvut.cz/~kuzelka/pubs/ecai2020.pdf>
6. Williams, P. (2005), "E-learning: what the literature tells us about distance education". An overview. Aslib Proceedings. Vol. 57. P 109–122. DOI: <https://doi.org/10.1108/00012530510589083>
7. He L., P. Jiang, P-SaaS: knowledge service-oriented manufacturing workflow model for knowledge collaboration and reuse. IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Hong Kong, China, 2020, P. 570–575. DOI: <http://doi.org/10.1109/CASE48305.2020.9216974>
8. Shubin I., Kozyriev A., Liashik V., Chetverykov G. Methods of adaptive knowledge testing based on the theory of logical networks. CEUR Workshop Proceedings. 2021. P. 1184–1193. URL: <https://eurws.org/Vol-2870/paper86.pdf> (дата звернення: 12.03.2024)
9. Shubin I., Snisar S., Litvin S., Formalization and Application of Algebraic Methods in Automated Intelligent Systems. IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, 2021, P. 67–70. DOI: <http://doi.org/10.1109/PICST54195.2021.9772174>
10. Каратаєв О., Шубін І. Проблеми повторного використання знань у процесі проектування програмних систем. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2023. No 2(24). С. 62–71. DOI: <http://doi.org/10.30837/itssi.2023.24.062>
11. Karataiev, O., Shubin, I. (2023), "Formal model of multi-agent architecture of a software system based on knowledge interpretation". Radioelectronic and Computer Systems. 2023. No. 4. P. 53–64. DOI: 10.32620/reks.2023.4.05
12. Kyrychenko, I., Malikin, D. "Research of Methods for Practical Educational Tasks Generation Based on Various Difficulty Levels" 6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2022), May 12–13, 2022, Gliwice, Poland. CEUR Workshop Proceedings 3171, Volume I: Main, 2022. P. 1030–1042. available at: <https://eurws.org/Vol-3171/paper74.pdf>
13. Omran, P. G., Wang, K., Wang, Z. (2021), "An Embedding-based Approach to Rule Learning in Knowledge Graphs", IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. Vol. 33(4). P. 1348–1359. DOI: 10.1109/TKDE.2019.2941685
14. Каратаєв О., Ситніков Д. Метод повторного використання знань у формі логічних рівнянь. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості, No. 3(25). 2023. С.15–26. DOI: <http://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.25.015>
15. Kamide N., Sequential Fuzzy Description Logic: Reasoning for Fuzzy Knowledge Bases with Sequential Information. 2020 IEEE 50th International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL), Miyazaki, Japan, 2020, P. 218–223. DOI: <http://doi.org/10.1109/ISMVL49045.2020.000-2>

16. Dudar Z., Shubin I., Kozyriev A. Individual Training Technology in Distributed Virtual University. Lecture Notes in Networks and Systems. 2021, 212 LNNS, P. 379–399. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-030-76343-5_20

References

1. Karataiev, O., Sitnikov, D., Sharonova, N. "A Method for Investigating Links between Discrete Data Features in Knowledge Bases in the Form of Predicate Equations", CEUR Workshop Proceedings, 2023, P. 224–235. available at: <https://eurws.org/Vol-3387/paper17.pdf>
2. Dudar, Z., Litvin, S. (2024), "Ontological description method for building service-oriented distributed learning systems". Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2024. No. 1 (27). P. 39–53. DOI: 10.30837/itssi.2024.27.039
3. Yang T., Wang Y., Sha L., Engelbrecht, J. Knowledgebra: An Algebraic Learning Framework for Knowledge Graph. Machine Learning and Knowledge Extraction. 2022. Vol. 4, No. 2. P. 432–445. DOI: <https://doi.org/10.3390/make4020019>
4. Pellissier-Tanon, T., Weikum, G., Suchanek, F. (2020), "F. YAGO 4: A Reasonable Knowledge Base", 17th International Conference, ESWC 2020, Heraklion, Crete, Greece, May 31–June 4. P. 583–596. DOI:10.1007/978-3-030-49461-2_34
5. Svato, M., Schockaert, S., Davis, J. "STRiKE: Rule-Driven Relational Learning Using Stratified k-Entailment", in: ECAI, 2020. available at: <https://ida.fel.cvut.cz/~kuzelka/pubs/ecai2020.pdf>
6. Williams, P. (2005), "E-learning: what the literature tells us about distance education". An overview. Aslib Proceedings. Vol. 57. P 109–122. DOI: <https://doi.org/10.1108/00012530510589083>
7. He L., P. Jiang, P-SaaS: knowledge service-oriented manufacturing workflow model for knowledge collaboration and reuse. IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Hong Kong, China, 2020, P. 570–575. DOI: <http://doi.org/10.1109/CASE48305.2020.9216974>
8. Shubin I., Kozyriev A., Liashik V., Chetverikov G. Methods of adaptive knowledge testing based on the theory of logical networks. CEUR Workshop Proceedings. 2021. P. 1184–1193. URL: <https://eurws.org/Vol-2870/paper86.pdf> (дата звернення: 12.03.2024)
9. Shubin I., Snisar S., Litvin S., Formalization and Application of Algebraic Methods in Automated Intelligent Systems. IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, 2021, P. 67–70. DOI: <http://doi.org/10.1109/PICST54195.2021.9772174>
10. Shubin, I., & Karataiev, O. (2023). REUSE OF INFORMATION BASED ON THE INTERPRETATION OF KNOWLEDGE. INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND SCIENTIFIC SOLUTIONS FOR INDUSTRIES, (2 (24), 62–71. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.24.062>
11. Karataiev, O., Shubin, I. (2023), "Formal model of multi-agent architecture of a software system based on knowledge interpretation". Radioelectronic and Computer Systems. 2023. No. 4. P. 53–64. DOI: 10.32620/reks.2023.4.05
12. Kyrychenko, I., Malikin, D. "Research of Methods for Practical Educational Tasks Generation Based on Various Difficulty Levels" 6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2022), May 12–13, 2022, Gliwice, Poland. CEUR Workshop Proceedings 3171, Volume I: Main, 2022. P. 1030–1042. available at: <https://eurws.org/Vol-3171/paper74.pdf>
13. Omran, P. G., Wang, K., Wang, Z. (2021), "An Embedding-based Approach to Rule Learning in Knowledge Graphs", IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. Vol. 33(4). P. 1348–1359. DOI: 10.1109/TKDE.2019.2941685
14. Karataiev, O., & Sytnikov, D. (2023). The method of reuse of knowledge in the form of logical equations. INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND SCIENTIFIC SOLUTIONS FOR INDUSTRIES, (3(25), 15–26. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.25.015>
15. Kamide N., Sequential Fuzzy Description Logic: Reasoning for Fuzzy Knowledge Bases with Sequential Information. 2020 IEEE 50th International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL), Miyazaki, Japan, 2020, P. 218–223. DOI: <http://doi.org/10.1109/ISMVL49045.2020.000-2>
16. Dudar Z., Shubin I., Kozyriev A. Individual Training Technology in Distributed Virtual University. Lecture Notes in Networks and Systems. 2021, 212 LNNS, P. 379–399. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-030-76343-5_20