

М.Ю. Полторацький, А.С. Воляннюк

ФОРМАЛЬНА МОДЕЛЬ ВЕРИФІКАЦІЇ ПЕРСОНАЛІЗОВАНИХ ОСВІТНІХ ТРАЄКТОРІЙ НА ОСНОВІ ALLOY

У статті розглянуто проблему верифікації персоналізованих освітніх траєкторій у сучасній освітній інженерії в умовах цифровізації освітнього процесу. Обґрунтовано необхідність перевірки коректності навчальних маршрутів, сформованих з урахуванням індивідуальних освітніх потреб, попереднього досвіду, рівня підготовки та професійних цілей здобувачів освіти. Акцентовано увагу на тому, що ефективність персоналізованого навчання визначається не лише якістю проектування індивідуальної траєкторії, а й можливістю її формальної перевірки на узгодженість, повноту та досяжність результатів. Запропоновано формальну модель, реалізовану засобами мови специфікації Alloy, яка дозволяє перевіряти відповідність набутих навичок вимогам кар'єрної мети. У межах моделі визначено ключові сутності, зокрема здобувача освіти, навчальні дисципліни, набуті та необхідні навички, а також професійні орієнтації, і формалізовано зв'язки між ними. Запроваджено систему інваріантів і обмежень, що забезпечують перевірку коректності освітніх траєкторій, включаючи наявність визначеної кар'єрної мети, змістовність навчальних компонентів і відповідність результатів навчання вимогам професійної діяльності. Модель забезпечує динамічну перевірку досяжності освітніх результатів шляхом аналізу змін у наборі набутих навичок на різних етапах навчання. Це дає змогу виявляти потенційні помилки у формуванні траєкторій, оцінювати ефективність алгоритмів рекомендації навчальних дисциплін і підтверджувати досяжність визначених цілей. Отримані результати засвідчують, що застосування формального підходу сприяє підвищенню валідності персоналізованого навчання, обґрунтованості освітніх рішень та ефективності адаптивних освітніх систем. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням системи обмежень, урахуванням невизначеності даних і вдосконаленням механізмів адаптації освітніх траєкторій.

Ключові слова: персоналізоване навчання, освітня траєкторія, верифікація, освітня інженерія, адаптивність, навички, кар'єрна мета, алгоритм, модель, навчальний курс

М. Poltoratskyi, A. Volianiuk

FORMAL MODEL FOR VERIFICATION OF PERSONALIZED EDUCATIONAL TRAJECTORIES BASED ON ALLOY

The article addresses the problem of verification of personalized educational trajectories in modern educational engineering under the conditions of digitalization of the educational process. The necessity of verifying the correctness of learning pathways formed with regard to individual educational needs, prior experience, level of training, and professional goals of learners is substantiated. It is emphasized that the effectiveness of personalized learning is determined not only by the quality of individual trajectory design but also by the possibility of its formal verification in terms of consistency, completeness, and attainability of results.

A formal model implemented using the Alloy specification language is proposed, which enables verification of the correspondence between acquired skills and the requirements of a career goal. Within the model, key entities are defined, including the learner, educational subjects, acquired and required skills, as well as professional aspirations, and the relationships between them are formalized. A system of invariants and constraints is introduced to ensure the correctness of educational trajectories, including the presence of a defined career goal, the meaningfulness of educational components, and the alignment of learning outcomes with professional requirements. The model provides dynamic verification of the attainability of educational results through the analysis of changes in the set of acquired skills at different stages of learning. This makes it possible to identify potential errors in trajectory construction, evaluate the effectiveness of course recommendation algorithms, and confirm the attainability of defined goals. The obtained results demonstrate that the application of a formal approach contributes to increasing the validity of personalized learning, the soundness of educational decisions, and the efficiency of adaptive educational systems. Prospects for further research are related to extending the system of constraints, taking into account data uncertainty, and improving mechanisms for adapting educational trajectories.

Key words: personalized learning, educational trajectory, verification, educational engineering, adaptability, skills, career goal, algorithm, model, course

Вступ

Постановка проблеми. Персоналізоване навчання стало однією з провідних тенденцій сучасної освіти, набуваючи особливої актуальності в контексті цифровізації освітнього процесу. Його сутність полягає в адаптації навчання до індивідуальних потреб, інтересів, здібностей та цілей кожного учня. Такий підхід дозволяє відійти від стандартизованих моделей і створити умови для реалізації потенціалу кожного здобувача освіти. Розвиток інформаційно-комунікаційних технологій значною мірою сприяв поширенню персоналізації, зробивши її досяжною навіть у масштабних онлайн- або змішаних формах навчання.

Однією з ключових передумов ефективної персоналізації є створення повного профілю здобувача освіти, який враховує його індивідуальні особливості, зокрема попередній досвід, рівень знань, ставлення до навчання та інтереси [1]. Такий профіль слугує основою для формування унікальної освітньої траєкторії, яка постійно оновлюється у відповідь на зміни в навчальних досягненнях і мотивації здобувача. У цьому контексті важливою складовою персоналізованого підходу є адаптивність, що реалізується через динамічне коригування змісту, темпу та форм подачі матеріалу [2, с. 872-875]. Саме адаптивні навчальні траєкторії дозволяють забезпечити релевантність навчального досвіду на кожному етапі навчання, водночас підтримуючи інтерес та розвиток самостійності здобувача освіти.

Важливою умовою реалізації персоналізації є створення гнучких освітніх середовищ, які забезпечують здобувачам можливість самостійно обирати темп, формат і зміст навчання відповідно до власних потреб і переваг. Це не лише сприяє підвищенню мотивації та залученості, а й формує навички саморегуляції та відповідальності за результати власного навчання [3, с.501].

Однак, попри очевидні переваги, персоналізоване навчання стикається з рядом проблем, серед яких особливо актуальною є проблема перевірки коректності побудови індивідуальних освітніх траєкторій. Оскільки траєкторія формується автоматизовано на основі аналізу великої кількості да-

них, існує ризик виникнення помилок у її конструюванні або у надмірному покладанні на алгоритми, що не завжди здатні адекватно врахувати складну мотиваційно-особистісну структуру здобувача. Тоді постає завдання забезпечити не лише технологічну точність, а й валідність запропонованих шляхів навчання. Це потребує розробки інструментів для верифікації освітніх траєкторій з урахуванням педагогічної доцільності, гнучкості системи адаптації та ефективного зворотного зв'язку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Персоналізована освітня траєкторія на сьогодні є одним із ключових концептів сучасної освіти, що передбачає створення унікального шляху навчання для кожного учня, побудованого відповідно до його здібностей, потреб, інтересів та цілей. У центрі цього підходу - особистість здобувача освіти, його активна участь у власному навчанні, а також створення умов для гнучкості та самостійності в здобутті знань.

Науковиця Алексєєва С. підкреслює, що «індивідуальна освітня траєкторія має стати дидактичною системою, в якій навчання здійснюється за індивідуальними програмами, змістом, формами, засобами, темпом та відповідними формами контролю і оцінювання» [4, с. 5]. За її словами, головною метою такого підходу є максимальний розвиток потенціалу кожного здобувача освіти через формування самостійності, ініціативності, дослідницького стилю, творчості, впевненості та відповідального ставлення до праці. Особливої ваги індивідуальний підхід набуває в умовах нестабільності, як-от воєнний стан чи період післявоєнного відновлення, адже «цінність дидактичного алгоритму розроблення індивідуальної освітньої траєкторії... у тому, що він підвищує мотивацію, розвиває вміння вчитися та допомагає учням досягати кращих результатів навчання» [4, с.6].

У контексті освітньої реформи в Україні індивідуалізація навчання розглядається як необхідний крок до оновлення системи освіти. Науковці Лавренова М., Лаллак Н., Молнар Т. та Фенчак Л. зазначають, що «одним із найважливіших аспектів реформування системи освіти в Україні є цілеспрямована та системна робота педагогів

над створенням індивідуальної освітньої траєкторії розвитку здобувача освіти як персонального шляху реалізації його особистісного потенціалу» [5, с.131]. Для втілення цього підходу необхідно переосмислити не лише зміст навчання, а й способи його організації, форми контролю та критерії оцінювання. Групою науковців під керівництвом Співаковського О. доведено, що використання ІКТ у збалансованій системі (фундаментальна, інваріантна та варіантна складові здобуття освіти) впливає на конкурентоспроможність випускників, що приводить до капіталізації студентів як майбутніх спеціалістів, здатних інтегрувати свої знання в умовах мінливого соціального та кооперативного середовища [6].

Реалізація персоналізованої освітньої траєкторії вимагає створення умов, за яких здобувачі освіти отримають можливість самостійно визначати зміст навчання, обирати індивідуальні цілі, підбирати методи та темпи засвоєння матеріалу, а також усвідомлювати та оцінювати власний поступ. Як зазначають дослідники, «учень зможе просуватись індивідуальною траєкторією в тому випадку, якщо йому надаватимуть такі можливості: визначати індивідуальний зміст вивчення навчальних предметів; ставити власні цілі у вивченні конкретної теми або розділу; вибирати оптимальні форми та темпи навчання; застосовувати ті способи навчання, що найбільш відповідають його індивідуальним особливостям; рефлексивно усвідомлювати отримані результати, оцінювати і коригувати свою діяльність» [5, с.137].

Таким чином, персоналізована освітня траєкторія не лише сприяє розвитку особистості здобувача, а й трансформує саму логіку освітнього процесу до особистісно орієнтованого, гнучкого і динамічного підходу, здатного відповідати викликам сучасності.

На основі аналізу наукових джерел ми притримуємось думки, що персоналізоване навчання як інноваційна педагогічна парадигма вимагає не лише створення, а й постійної перевірки коректності індивідуальних освітніх траєкторій, що формуються для кожного здобувача освіти.

Сучасні дослідження пропонують низку технологічних рішень цієї проблеми. Наприклад, у статті З. Папамітцоу [7] розглядається два підходи до формування та верифікації індивідуальних освітніх маршрутів у цифрових середовищах. Перший з них передбачає використання генетичних алгоритмів, які дозволяють знайти оптимальні шляхи навчання, враховуючи індивідуальні освітні потреби. Цей підхід виявився ефективним у генерації динамічних і релевантних траєкторій, особливо в умовах онлайн-навчання, де гнучкість та адаптивність є критично важливими. Другий підхід базується на застосуванні нейронних мереж, що формують рекомендації щодо подальших кроків у навчанні, адаптуючи траєкторії на основі аналізу освітньої поведінки учня. Обидва підходи підтримують автоматизоване ухвалення рішень, однак потребують постійного оновлення даних і уточнення моделей, аби гарантувати їхню педагогічну валідність [7].

Інший важливий напрям досліджень представлений у роботі Ковалюк Т., Кобець Н. та Дворник В. [8, с.115-128], де основний акцент зроблено на аналізі мотиваційних факторів як передумови формування індивідуального освітнього шляху. Авторки розробили інформаційну технологію, що дозволяє формувати траєкторії на основі латентно-семантичного аналізу мотиваційних листів здобувачів освіти, результатів опитувань щодо професійних інтересів та оцінки поточного рівня знань. Отримані дані використовуються для побудови онтологій предметних галузей у вигляді тезаурусів, які виступають концептуальними моделями змісту навчання. У результаті створюється індивідуальний навчальний план, що поєднує особистісну мотивацію, професійну спрямованість і рівень підготовки здобувача вищої освіти.

Загалом розроблені алгоритмічні підходи та аналітичні інструменти значно розширюють можливості перевірки й адаптації освітніх траєкторій, однак їхня ефективність залежить від якості вхідних даних та здатності моделей адекватно відображати складну структуру мотиваційно-ціннісної сфери учня. Тому подальший розвиток персоналізованого навчання потребує

інтеграції технологічної точності з педагогічною доцільністю, а також створення механізмів зворотного зв'язку, що дозволять коригувати траєкторії відповідно до змін в особистісному розвитку учня. Успішна реалізація цих завдань може забезпечити високу ефективність персоналізованого підходу та його стійку інтеграцію в освітні системи майбутнього.

Мета дослідження. Метою статті є обґрунтування можливості ефективного застосування формальної мови моделювання Alloy для перевірки досяжності під час формування персоналізованих освітніх траєкторій.

Методологія дослідження. У попередніх публікаціях було запропоновано модель побудови персоналізованих освітніх траєкторій із використанням технологій Semantic Web [9], розроблено RDF-модель [10] персоналізованого освітнього середовища за допомогою мови Notation3 [11], а також систему імплікаційних правил за допомогою мови N3 Logic Rules [12].

У статті Полторацького М. та Конної О. [13] представлено опис методів валідації освітніх моделей на основі RDF і мови опису обмежень SHACL [14] та мови запитів SPARQL [15] для оцінки їхньої відповідності сучасним вимогам ринку праці.

На основі попередніх (зазначених вище) досліджень було вдосконалено модель сучасного персоналізованого освітнього середовища, а також розроблено алгоритми рекомендації курсів відповідно до кар'єрних уподобань здобувача вищої освіти.

У цій статті основну увагу зосереджено на розробці формальної моделі та перевірці коректності запропонованого підходу до побудови персоналізованих освітніх траєкторій із використанням мови специфікації Alloy [16].

Результати дослідження. Опис моделі.

У цьому розділі статті увагу зосереджено на розробці формальної моделі та перевірці коректності запропонованого підходу в статті [16] за допомогою мови специфікації Alloy.

Сутності в Alloy розглядаються як сигнатури. Отож Student - це сигнатура, яка має певний набір відношень, що можуть зв'язувати кожну сутність з іншими. Давайте розглянемо сигнатуру Student детальніше:

```
abstract sig Student {
    acquiredSkills: set Skill,
    aspiresTo: set careerAspir,
    enrollTo: set Subject
}
```

Сутність Student - це абстрактна сигнатура, яка має три відношення, що зв'язуються з множиною інших сутностей, а саме:

- **acquiredSkills** — відношення, яке пов'язує здобувача освіти з множиною навичок, які він уже здобув. Це ті навички, які необхідні для запису на іншу дисципліну (освітню компоненту). Прикладом можуть бути "Основи програмної інженерії" та "Формальні методи програмного забезпечення";
- **aspiresTo** — відношення, яке вказує на множину професійних цілей здобувача вищої освіти;
- **enrollTo** — відношення, яке вказує на множину навчальних дисциплін (курсів), на які зареєстрований здобувач вищої освіти.

Створимо конкретний інстанс сигнатури Student, що успадковує всі задані вище відношення, а також через оператора fact визначимо початковий набір базових навичок, інваріантів, які завжди мають бути істинними в усіх допустимих випадках моделі. Нижче наведено фрагмент такого формалізму:

```
one sig Alice extends Student {},

fact CareerAssignments {
    Alice.acquiredSkills = A2 +
    Microsoft_Access
    Alice.aspiresTo =
    Business_Analyst
}
```

Як уже згадувалося, сутність Student через відношення enrollTo пов'язана з сутністю Subject. Створення такого типу відношення дозволить нам проаналізувати досяжність побудованих траєкторій згідно із

заданими обмеженнями та початковими інваріантами, заданими вище. Розглянемо сигнатуру(сутність) типу Subject та його набір відношень:

```
abstract sig Subject {
  provide: set Skill,
  requires: set Skill
}
```

Фактично ми маємо два відношення provide та requires із множиною навичок:

- **provide** - відношення, що визначає множину навичок, яка дана дисципліна надає після прослуховування;
- **requires** - відношення, що визначає множину навичок, необхідних як базові для успішного засвоєння матеріалу курсу. Варто зазначити, що деякі дисципліни можуть мати значення none для цього поля, якщо така дисципліна не потребує специфічних попередньо засвоєних навичок.

Створення конкретних інстансів типу Skill є аналогічним до інстансів типу Student, тому приклад даного формалізму не наводимо. Розглянемо фрагмент інваріанту SubjectProvide, що описує формальний зв'язок між навчальними дисциплінами (Subject) та навичками (Skill):

```
fact SubjectProvide {
  English.requires = A2
  English.provide = B1
  BusinessProcessModeling.requires
= none
  BusinessProcessModeling.provide
= Business_Process_Modeling
  SQLFundamentals.requires =
Microsoft_Access
  SQLFundamentals.provide =
SQL_Knowledge
  ....
}
```

Фактично ми вказуємо, що базовий курс “English” надає рівень B1, але потребує початкових навичок рівня A2. Аналогічно дисципліна “Основи SQL” передбачає опанування навичкою Microsoft Access. Водночас дисципліна “Моделювання бізнес-процесів” надає навичку Business_Process_Modeling, але не вимагає попередніх знань.

Аналогічною є сигнатура careerAspir, пов'язана зі Student через відно-

шення aspiresTo, а також інваріант, який визначає необхідні навички, актуальні на ринку праці.

```
abstract sig careerAspir {
  necessary: set Skill
}

fact CareerAssignmentsNecessary {
  Business_Analyst.necessary = B1 +
  Business_Process_Modeling +
  SQL_Knowledge + ArchiMate_Language
  ...
}
```

Обмеження та перевірка досяжності.

Обмеження в Alloy використовуються для формальної перевірки інваріантів, тобто властивостей, які мають виконуватись у будь-якому валідному стані моделі. Для побудови коректних персоналізованих траєкторій треба визначити, що кожен здобувач вищої освіти повинен мати конкретно сформульовану кар'єрну мету. Цей факт можна визначити наступним чином:

```
assert EachStudentHasCareerAspir {
  all b: Student | some b.aspiresTo
}
```

Застосування обмеження EachStudentHasCareerAspir дозволяє Alloy Evaluator [17] знайти множину контрприкладів (якщо це досяжно). У цьому випадку контрприкладом може бути ситуація, коли буде знайдено хоча б один здобувач вищої освіти, для якого не встановлено кар'єрні цілі. Аналогічно, не менш важливою для валідації є перевірка відсутності дисциплін, які не забезпечують хоча б однієї навички. Цей формалізм можна виразити наступним чином:

```
assert EachSubjectHasSkill {
  all s: Subject | some s.provide
}
```

Перевірка відсутності контрприкладів лише частково свідчить про коректність побудованої мети. Важливо також перевірити, чи дійсно виконується умова:

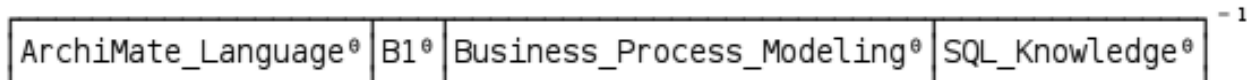
$$\exists s \in \text{Student } s.\text{aspiresTo.necessary} \subseteq s.\text{enrollTo.provide} \quad (1)$$

Виразити це в синтаксисі Alloy можна наступним чином:

```
some {
  std:Student| std.aspiresTo.necessary in
  std.enrollTo.provide
} (2)
```

Якщо ми хочемо окремо переглянути список набутих навичок для певного

Alice.aspiresTo.necessary



Alice.enrollTo.provide

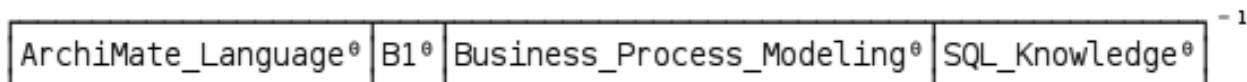


Рис. 1. Alloy Evaluator. Список набутих і необхідних навичок відповідно до професійних уподобань здобувача вищої освіти

Як видно з Рис. 1, список навичок є еквівалентним, що загалом свідчить про коректність роботи моделі та відсутність порушень. Перевіримо умову (1), яка буде

здобувача освіти або список необхідних навичок для визначеної кар'єрної мети, можемо застосувати відповідні команди в Alloy Evaluator:

- Alice.aspiresTo.necessary
- Alice.enrollTo.provide

Результат роботи представлений на рис. 1.

дійсно свідчити, про те що існує хоча б один здобувач вищої освіти, який має потрібний набір навичок. На Рис. 2 представлено відображення цього факту.

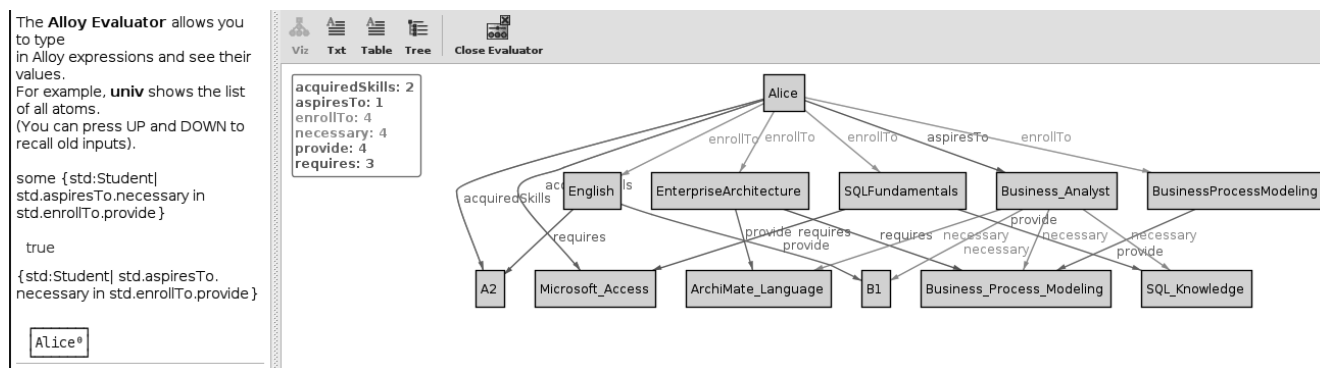


Рис. 2. Перевірка досяжності професійної мети здобувачем вищої освіти відповідно до алгоритму рекомендації курсів засобами Alloy

У цьому випадку ми бачимо, що справді існує один здобувач вищої освіти, який досяг необхідної кількості навичок, що свідчить про досяжність кар'єрної мети та правильність побудови персоналізованої освітньої траєкторії.

Наступним нашим кроком є демонстрація працездатності та правильності по-

будованого підходу відповідно до запропонованого алгоритму рекомендацій в роботі [18]. У Таблиці 1 представлено початкові навички та набуті після навчання на запропонованих алгоритмом курсів в синтаксисі мови Notation 3 [11].

Таблиця 1.

Навички здобувача вищої освіти до та після застосування алгоритму рекомендації

До застосування алгоритму рекомендації	Після застосування алгоритму рекомендації
<pre> ex:Alice a ex:Student ; ex:acquiredSkills ex:A2, ex:Business_Process_Modeling, ex:Microsoft_Access, ex:Python_Language ; ex:careerAspir ex:Business_Analyst, ex:Software_Architect . </pre>	<pre> ex:Alice a ex:Student ; ex:careerAspir ex:Business_Analyst; ex:acquiredSkills ex:A2, ex:ArchiMate_Language, ex:B1, ex:B2, ex:Business_Process_Modeling, ex:Communication_Advanced_English_Sk ills, ex:Communication_English_Skills, ex:Data_Modeling, ex:ETL_Processes, ex:Microsoft_Access, ex:PowerBI, ex:Python_For_Data, ex:Python_Language, ex:Requirement_Engineering, ex:SQL_Knowledge, ex:UML_Modeling ; </pre>

Варто зазначити, що наша модель стає з n-ітераціями. Прикладом таких ітерацій може бути послідовність запису на курс {English -> Advanced_English}, фактично нам треба acquiredSkills оновлювати динамічно, але рекурсія в Alloy має серйозні обмеження [19], тому введемо оновлення в код - стан для моделювання динаміки.

```

sig Student {
  acquired: State -> set Skill,
  aspiresTo: set careerAspir,
  enrollTo: set Subject
}
                    
```

Застосувавши розроблену модель специфікації до даного набору початкових навичок та відповідного списку дисциплін отримаємо набір навичок у розрізі кожного стану. Приклад роботи зображено на Рис.3. Як бачимо, в State0 (початковий стан) еквівалентний з RDF-моделлю до застосування алгоритму.

Alice ⁰	State ⁰	A2 ⁰	Business_Analyst ⁰
		Business_Process_Modeling ⁰	
		Microsoft_Access ⁰	
	Python_Language ⁰		
	State ¹	A2 ⁰	
		ArchiMate_Language ⁰	
		B1 ⁰	
		Business_Process_Modeling ⁰	
		Communication_English_Skills ⁰	
		ETL_Processes ⁰	
		Microsoft_Access ⁰	
		PowerBI ⁰	
		Python_For_Data ⁰	
		Python_Language ⁰	
Requirement_Engineering ⁰			
SQL_Knowledge ⁰			

Рис. 3. Набуті навички здобувача освіти до станів (1-2)

Для перевірки досяжності набору навичок у кінцевому стані треба модифікувати умови (2) відповідно до нашого оновлення. Тому для перевірки вимоги, чи існує хоча б один здобувач освіти, який досяг кар'єрної мети, використано оновлену вимогу:

The **Alloy Evaluator** allows you to type in Alloy expressions and see their values. For example, **univ** shows the list of all atoms. (You can press UP and DOWN to recall old inputs).

```
some {s:Student | s.aspiresTo.necessary in s.acquiredSkill[last]}
```

```
true
```

```
some {s:Student|
s.aspiresTo.necessary in s.acquiredSkill[last]
}
```

(3)

Перевіряємо умови (3) за допомогою Alloy Evaluator. Результат роботи представлено на Рис. 4.

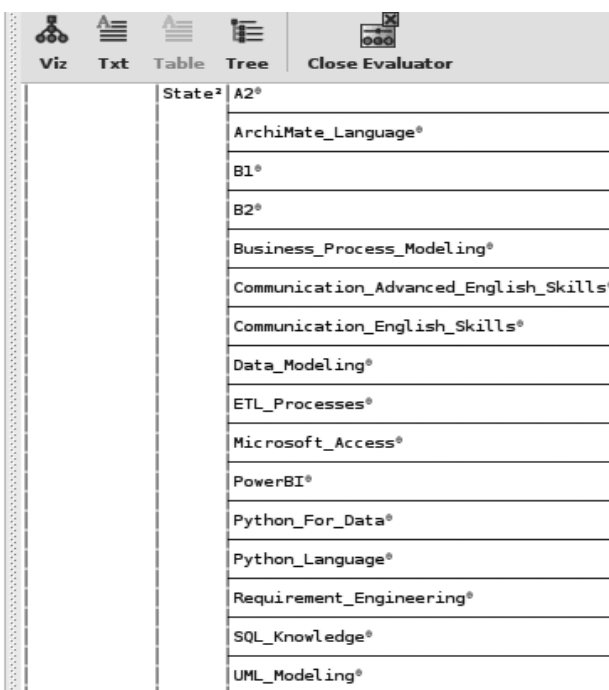


Рис. 4. Перевірка досяжності кар'єрної мети здобувача освіти

Якщо уважно переглянути результат роботи на Рис. 4, то можна побачити еквівалентний набір навичок у стані last=3 та в Таблиці №1 з RDF-моделлю після застосування алгоритму рекомендації. Даний факт демонструє правильність роботи алгоритму, представленого в роботі.

Висновки

У процесі дослідження було проаналізовано теоретичні засади та практичні підходи до перевірки коректності персоналізованих освітніх траєкторій у межах сучасної освітньої інженерії. З'ясовано, що персоналізоване навчання як інноваційна педагогічна парадигма потребує не лише розроблення індивідуального маршруту здобувача освіти, а й впровадження механізмів його верифікації, які забезпечують педагогічну доцільність, адаптивність і відпо-

відність реальним цілям та потребам здобувача освіти.

Аналіз наукових джерел і прикладів застосування цифрових технологій дав змогу виокремити сучасні напрями у верифікації персоналізованих траєкторій. Розглянуто застосування алгоритмічних підходів, зокрема генетичних алгоритмів і нейронних мереж, які дають змогу формувати та перевіряти навчальні маршрути з урахуванням освітніх досягнень, мотивації та індивідуального прогресу здобувача. Досліджено використання семантичного аналізу мотиваційних і професійних даних, що забезпечує глибше розуміння мотиваційно-ціннісної сфери учня та підвищує валідність індивідуального навчального плану.

Під час нашого дослідження було розроблено формальну модель алгоритму побудови персоналізованих освітніх траєкторій засобами мови специфікації Alloy. В

результаті роботи було доведено коректність і досяжність розробленого алгоритму.

У подальших дослідженнях планується розширити список обмежень та перевірити правильність побудови персоналізованих освітніх траєкторій відповідно до цих обмежень, а також перевірити траєкторії за відсутності недетермінованої поведінки.

Література

- Peng H., Spector J. Personalized adaptive learning: an emerging pedagogical approach enabled by a smart learning environment. *Smart Learning Environments*. 2019. Vol. 6. URL: <https://doi.org/10.1186/s40561-019-0089-y>
- Tetzlaff L., Schmiedek F., Brod G. Developing personalized education: a dynamic framework. *Educational Psychology Review*. 2020. Vol. 33. С. 863–882. URL: <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09570-w>
- Shemshack A., Spector J. A comprehensive analysis of personalized learning components. *Journal of Computers in Education*. 2021. Vol. 8. С. 485–503. URL: <https://doi.org/10.1007/s40692-021-00188-7>
- Алексеева С. Дидактичний алгоритм розроблення індивідуальної освітньої траєкторії. *Вісник педагогічної майстерності*. 2023. Вип. 32. С. 5–9. DOI: <https://doi.org/10.33989/2075-146x.2023.32.292607>
- Лавренова М., Лалак Н., Молнар Т., Фенчак Л. Траєкторія розвитку здобувача початкової освіти: від теорії до практики. *Вісник Львівського університету. Серія педагогічна*. 2021. Вип. 35. С. 130–138. ISSN 2078-5526. URL: <http://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/pedagogics/article/view/11314>
- Spivakovsky A., Petukhova L., Anisimova O., Horlova A., Kotkova V., Volianiuk A. ICT as a Key Instrument for a Balanced System of Pedagogical Education. *ICTERI*. 2020. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85096419582&origin=AuthorNamesList&txGid=cff8324efb62ed78a72d9cda35befe10>
- Papamitsiou Z. Development and research of algorithms for the formation the individual educational trajectories of students in the digital educational platform. 2019. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Development-and-Research-of-Algorithms-for-the-the-Papamitsiou/be314ade46c3232508961eebf2b6e692527fa508>
- Kovaliuk T., Kobets N., Dvornyk V. Information technology for constructing individual educational trajectories based on latent-semantic analysis of motivational letters and professional achievements of students. 2020. С. 115–128. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Information-Technology-for-Constructing-Individual-Kovaliuk-Kobets/89c1e0bb06dcea223278d1f07fbec89a822917b7>
- W3C Semantic Web Wiki. URL: https://www.w3.org/2001/sw/wiki/Main_Page
- RDF 1.1 Primer [Електронний ресурс]. W3C. 2014. URL: <https://www.w3.org/RDF/>
- Notation3 (N3): A readable RDF syntax. URL: <https://notation3.org/>
- Berners-Lee T. N3Logic: A logical framework for the World Wide Web. W3C. 2008. URL: <https://www.w3.org/DesignIssues/N3Logic>
- Poltoratskyi M., Konnova O. Use of semantic web technologies for validation of educational models. *Information Technologies and Learning Tools*. 2025. Вип. 106(2). С. 94–106. URL: <https://doi.org/10.33407/itlt.v106i2.5985>
- Shapes Constraint Language (SHACL) W3C Recommendation. 20 July 2017. URL: <https://www.w3.org/TR/shacl/>
- SPARQL 1.1 Query Language. W3C Recommendation. 21 March 2013. URL: <https://www.w3.org/TR/sparql11-query/>
- Alloy: A language and analyzer for software modeling URL: <https://alloytools.org/>
- Alloy Analyzer – User Guide. URL: <https://alloy.readthedocs.io/en/latest/tooling/analyzer.html>
- Полторацький М. Один з підходів до створення персоналізованого освітнього середовища. *Measuring and computing devices in technological processes*, 2026. Вип. 1, с. 77–86. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2026-85-10>
- Alloy Documentation. Analyzer. URL: <https://alloy.readthedocs.io/en/latest/tooling/analyzer.html>

References

- H. Peng, J. Spector, Personalized adaptive learning: an emerging pedagogical approach enabled by a smart learning environment, in: *Smart Learning Environments*, 2019. doi: 10.1186/s40561-019-0089-y.
- L. Tetzlaff, F. Schmiedek, G. Brod, Developing personalized education: a dynamic framework, in: *Educational Psychology Review*, 33 (2020) 863–882. doi: 10.1007/s10648-020-09570-w.
- A. Shemshack, J. Spector, A comprehensive analysis of personalized learning components,

- in: Journal of Computers in Education, 8 (2021) 485–503. doi: 10.1007/s40692-021-00188-7.
4. S. Alekseeva, Didactic algorithm for designing an individual educational trajectory, in: Origins of Pedagogical Mastery, 32 (2023) 5–9. doi: 10.33989/2075-146x.2023.32.292607. [in Ukrainian]
 5. M. Lavrenova, N. Lalak, T. Molnar, L. Fenchak, Development trajectory of primary education students: from theory to practice, in: Visnyk of Lviv University. Pedagogical Series, 35 (2021) 130–138. URL: <http://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/pedagogics/article/view/11314>
 6. A. Spivakovsky, L. Petukhova, O. Anisimova, A. Horlova, V. Kotkova, A. Volianiuk, ICT as a key instrument for a balanced system of pedagogical education, in: ICTERI, 2020. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85096419582&origin=AuthorNamesList&txId=cff8324efb62ed78a72d9cda35befe10>
 7. Z. Papamitsiou, Development and research of algorithms for the formation of individual educational trajectories of students in the digital educational platform, 2019. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Development-and-Research-of-Algorithms-for-the-the-Papamitsiou/be314ade46c3232508961eebf2b6e692527fa508>
 8. T. Kovaliuk, N. Kobets, V. Dvornyk, Information technology for constructing individual educational trajectories based on latent-semantic analysis of motivational letters and professional achievements of students, 2020, pp. 115–128. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Information-Technology-for-Constructing-Individual-Kovaliuk-Kobets/89c1e0bb06dcea223278d1f07fbec89a822917b7>
 9. W3C Semantic Web Wiki, 2001. URL: https://www.w3.org/2001/sw/wiki/Main_Page
 10. RDF 1.1 Primer [Electronic resource], W3C, 2014. URL: <https://www.w3.org/RDF/>
 11. Notation3 (N3): A readable RDF syntax, URL: <https://notation3.org/>
 12. T. Berners-Lee, N3Logic: A logical framework for the World Wide Web, W3C, 2008. URL: <https://www.w3.org/DesignIssues/N3Logic>
 13. M. Poltoratskyi, O. Konnova, Use of semantic web technologies for validation of educational models, in: Information Technologies and Learning Tools, 106(2) (2025) 94–106. doi: 10.33407/itlt.v106i2.5985.
 14. Shapes Constraint Language (SHACL) W3C Recommendation, 2017. URL: <https://www.w3.org/TR/shacl/>
 15. SPARQL 1.1 Query Language. W3C Recommendation, 2013. URL: <https://www.w3.org/TR/sparql11-query/>
 16. Alloy: A language and analyzer for software modeling, URL: <https://alloytools.org/>
 17. Alloy Analyzer – User Guide, URL: <https://alloy.readthedocs.io/en/latest/tooling/analyzer.html>
 18. M. Poltoratskyi, One approach to creating a personalized educational environment, in: Measuring and Computing Devices in Technological Processes, 1 (2026) 77–86. doi: 10.31891/2219-9365-2026-85-10.
 19. Alloy Documentation. Analyzer. URL: <https://alloy.readthedocs.io/en/latest/tooling/analyzer.html>
- Дата першого надходження до видання: 30.03.2026
 Внутрішня рецензія отримана: 19.04.2026
 Зовнішня рецензія отримана: 25.04.2026
 Дата прийняття статті до друку: 05.06.2026
 Дата публікації: 29.06.2026
- Про авторів:**
- Полторацький Максим Юрійович*,
 доктор філософії (інформаційні технології),
 доцент
Poltoratskyi Maxym,
 Ph.D. (information technology),
 associate professor
<https://orcid.org/0000-0001-9861-4438>
- Воляннюк Анастасія Сергіївна*,
 викладачка кафедри педагогіки та
 психології дошкільної та початкової освіти
Volianiuk Anastasiya,
 instructor, department of pedagogy and psychology
<https://orcid.org/0000-0002-2890-4787>
- Місце роботи авторів:**
- Херсонський державний університет,
 Kherson State University
 тел. +380963102636,
 E-mail: mpoltoratskyi@ksu.ks.ua
avolianiuk@ksu.ks.ua