УДК 004.89:681.581:378

Максим Полторацький
доктор філософії з 121 Інженерія програмного забезпечення, доцент
доцент кафедри комп'ютерних наук та програмної інженерії
Херсонський державний університет, м. Херсон, Україна
ORCID ID 0000-0001-9861-4438
mpoltoratskyi@ksu.ks.ua

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРСОНАЛІЗОВАНОЇ ОСВІТНЬОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ SEMANTIC WEB

Анотація. У статті аналізуються принципи побудови персоналізованих систем з використанням технології Semantic Web, наведено досвід застосування даної технології для створення сучасних систем, що підтримують підходи персоналізованого навчання.
У ході роботи було розроблено освітню RDF-модель за допомогою мови Notation 3. Представлена в статті модель репрезентує не тільки питання персоналізованої освіти, а й враховує концепцію Skills-Based Model, яка орієнтується саме на навички (skills), яких набуває здобувач під час навчання, а також подальше відображення результатів навчання у вигляді сертифікатів, які підтверджують набуті навички та рівень їх володіння. Варто також зазначити, що модель враховує важливі питання управління авторським правом на освітні об'єкти, які використовуються під час навчання.
У моделі використано рекомендації навчально-методичних матеріалів шляхом встановлення відповідності між навчальними дисциплінами та різного роду навчально-методичними матеріалами. Застосування такого підходу дозволяє своєю чергою рекомендувати здобувачеві не лише навчальні дисципліни, а й матеріали, необхідні для їх опанування.
Окрім моделі в статті також описані принципи побудови системи, рекомендовані дисципліни на основі семантичних даних з використанням мови логічного виводу N3 Logic Rules. У цьому дослідженні було описано досвід застосування N3 для побудови сучасної персоналізованої системи, рекомендовані навчальні дисципліни на основі індивідуальних та кар'єрних уподобань здобувача. Запропоновані в статті модель та система рекомендованих дисциплін можуть бути застосовані як для університетських LMS (Learning Management System) дистанційного навчання, так і для комерційних MOOC-систем. Впровадження систем, що підтримують парадигму персоналізованої освіти, може якісно вплинути на сучасний стан освіти. Застосування технологій Semantic Web забезпечить гнучкі підходи до навчання, дасть змогу здобувачам отримувати освітні послуги відповідно до їх індивідуальних потреб та кар'єрних уподобаннь.

Ключові слова: персоналізована освіта; освітні моделі; Semantic Web; онтології; Notation3; N3 Logic Rules.

1. ВСТУП

Постановка проблеми. Розвиток технологій впливає не лише на різні аспекти людського життя, а й трансформує сучасну освіту. Розвиток таких технологій, як Semantic Web, ШІ та блокчейн, може докорінно змінити принципи сучасної освіти шляхом інтеграції цих технологій в освітній процес. Одним з основних напрямків розвитку сучасної освіти є впровадження принципів персоналізованого навчання. Персоналізація навчання надає можливість забезпечити адаптацію навчального процесу до індивідуальних характеристик та кар'єрних уподобань кожного здобувача.

Впровадження систем персоналізованого навчання вплине на якість освіти, зробить її більш доступною та ефективною з точки зору кар'єрних цілей здобувача. Застосування принципів персоналізованої освіти є ключовим не тільки в підготовці, а й у перепідготовці кваліфікованих спеціалістів, здатних адаптуватися до швидких змін у професійній сфері.

© Максим Полторацький, 2025.

Запровадження технології Semantic Web в освітній менеджмент дасть змогу вирішити велику кількість сучасних проблем персоналізованої освіти. На наш погляд, сучасна персоналізована освіта має вирішувати наступні задачі:

1. Розробляти персоналізовану освітню траєкторію здобувача на основі його кар'єрних уподобань.

Система має відштовхуватися від кар'єрних уподобань здобувача, а також враховувати освітні стандарти для побудови його персоналізованої освітньої траєкторії.

2. Систематизувати та пріоритезувати навчальні дисципліни. Здобувач отримує доступ до навчальних дисциплін у визначеній послідовності.

У такий спосіб усувається проблема непослідовності, коли здобувач не має змоги крок за кроком набувати необхідних навичок для подальшого успішного вивчення дисциплін.

3. Доступ до ШІ-помічників та консультаційних ботів.

Доступ до консультаційних ботів, які допоможуть вирішити питання адаптивного та інтелектуального тестування.

4. Створити каталоги освітніх матеріалів, необхідних для отримання запланованих результатів навчання:

- підручники, методичні матеріали;
- різного роду наочні засоби VR/AR (розумні бібліотеки).

Вбудована система рекомендацій повинна пропонувати здобувачеві тільки ті матеріали, які необхідні для освоєння поточних навчальних дисциплін.

5. Інтегрувати з електронними освітніми платформами, такими як Coursera, Udemy тощо.

Можливість перезарахування дисциплін з сучасних MOOC-платформ. Система може порекомендувати дисципліни, якщо в університеті зараз недоступна дисципліна відповідного напряму. Але, на наш погляд, це можливо лише за умови використання одного стандарту для опису та специфікації дисциплін.

6. Стандартизувати дисципліни для відкритої освіти, яка спрямована на створення єдиного підходу.

Впровадження уніфікованого стандарту, що спрощує обмін та управління освітньою інформацією в межах відкритої моделі.

7. Валідувати освітні системи.

Використання методології валідації RDF-моделей для аналізу освітніх моделей, виявлення структурно-логічних помилок та невідповідностей освітнім стандартам і рамкам.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Організація дисциплін на основі Semantic Web може бути ефективною не тільки для побудови освітніх моделей в університетах, а й для створення комерційних LMS та MOOC-платформ. Проблема персоналізації освіти та використання технології Semantic Web у контексті відкритої та персоналізованої освіти висвітлена у багатьох наукових роботах. У пошуках більш ефективних методів навчання існує досить велика кількість підходів до моделювання персоналізованої освіти з використанням технології Semantic Web.

У статті [1] висвітлена ідея «Освіта 4.0». Автори даної статті стверджують, що сучасна освіта має відповідати на виклики навчання, пов'язані з динамічними освітніми потребами сучасного суспільства, а також наголошують на тому, що учні повинні стати архітекторами своєї освіти, а навчальні заклади повинні адаптуватися до індивідуальних потреб. Запропонована модель має залучати всі зацікавлені сторони у загальний семантичний простір, дозволяючи здобувачам набувати компетенцій, а викладачам – розробляти навчальні ресурси, які точно відповідають потребам нашого суспільства. Результати дослідження використовуються для розробки програми ISA NUM,

французької ініціативи з підготовки інженерів у галузі інформатики. Основу складає онтологічна модель компетенцій, узгоджена зі стандартами ACM Computing Curricula 2020 [2]. Автори статті стверджують, що ця модель є основою для інтелектуальної системи кіберфізичної освіти, яка об'єднує віртуальні та фізичні навчальні середовища, у які інтегруються такі передові технології, як віртуалізація, штучний інтелект , IoT та семантична мережа.

У дослідженні [3] представлено досвід побудови рекомендаційних систем в контексті електронного навчання. Автори статті стверджують, що використання рекомендаційних систем покращує навчання здобувачів шляхом надання індивідуальних рекомендацій та побудови персональних траєкторій. У своїй роботі автори пропонують підхід до побудови персоналізованих систем на основі онтологій. Така персоналізована система містить:

- персоналізовані шляхи траєкторії навчання, об'єкти (наприклад, дисциплін чи підручники) і відгуки;
- персоналізовану систему зворотного зв'язку.

Описаний підхід базується на використанні системи на основі правил, яка інтегрується в архітектуру профілю учнів, представлену за допомогою онтологій.

Ще один підхід до побудови сучасної персоналізованої системи представлено в статті [4]. Автори роботи представляють архітектуру системи персоналізованої підтримки під час навчання здобувачів та стверджують, що система може бути застосована до будь-якої системи віртуальної освіти. Дана система базується на основі інформації, яка представлена за допомогою онтологій та системи правил для міркувань. Щоб інтегрувати штучний інтелект у віртуальну освітню систему, спочатку необхідно створити базу даних знань або план уроку. Така база даних необхідна як для відстеження успішності учнів з різних тем, так і для системи рекомендацій. Так штучний інтелект вирішує задачу рекомендацій освітнього контенту. Автори статті стверджують, що використання даного підходу дає можливість більш ефективно взаємодіяти зі здобувачами, формулювати їхні пошукові запити та використовувати вбудовані ШІ-асистенти для підтримки процесу навчання, допомагати вирішувати більшість незрозумілих питань, які можуть виникнути у здобувача під час навчання.

Так у статті [5] представлено дослідження – проєктування системи управління навчанням за допомогою семантичних технологій. Описана LMS є великим навчальним середовищем, до якого можуть мати доступ різні університети через інтерфейс своєї власної системи управління навчанням. У LMS визначені такі групи користувачів: адміністратор, локальні адміністратори, викладачі та здобувачі. Адміністратори порталу та локальні адміністратори відповідають за управління центральним сервером, який регулює метадані LMS, описані LOM стандартом для кожного університету. Здобувачі реєструються в LMS свого університету та приєднуються до дисциплін в інших університетах, сплативши за нього вартість навчання. Викладачі стають частиною LMS після того, як вони зареєструвались у LMS свого університету. Вони можуть навчати здобувачів з інших університетів. Крім того, викладачі можуть створювати нові навчальні матеріали. Автори статті зазначають, що важливим аспектом побудови сучасної LMS є інтероперабельність освітньої моделі, що, своєю чергою, дасть змогу вирішити наступні проблеми:

- спільне використання даних різними комп'ютерними системами та програмами;
- створення ефективного наукомісткого та відкритого навчального середовища.

Основною метою стандарту LOM (Learning Object Metadata) є визначення шляхів стандартизації навчальних об'єктів, а також полегшення спільного використання та обміну навчальними об'єктами шляхом створення пріоритезованих каталогів, із врахуванням різноманіття культурних і мовних контекстів, у яких будуть

використовуватись навчальні об’єкти та їхні метадані [6]. Використання стандартів для представлення освітніх моделей у LMS дасть змогу створювати ефективні відкриті навчальні середовища.

Досвід, представлений у статті [7], охоплює дослідження використання стандарту LOM для опису навчальних об’єктів спільного використання в освітніх репозиторіях. Автори відзначають, що серед 29 проаналізованих репозиторіїв 17% застосовують LOM як стандарт для моделювання даних. Автори статті рекомендують використовувати стандарт LOM для опису навчальних об’єктів в освітніх репозиторіях, оскільки це має кілька переваг, наприклад, полегшення об’єднання репозиторіїв і підвищення доступності до них.

Крім LOM існують і інші стандарти для організації та узгодження дисциплін у LMS. Прикладом ще одного стандарту електронного навчання є SCORM (Sharable Content Object Reference Model). Багато авторів визначають ефективність даної технології в контексті проєктування архітектури дисциплін у сучасних LMS.

Модель, описану в статті [8], розроблено на основі SCORM. Дана модель представляє навчальні об’єкти в структурованій формі для системи навчального призначення, у якій використовуються принципи мультимедіа для представлення освітнього контенту. Розроблена система навчального призначення базується на основі онтології знань.

Автори статті [9] зазначають, що одним з найважливіших компонентів сучасної LMS є навчальний зміст, функціонал персоналізованого навчання та інтерактивні моделі електронного навчання. Дослідження зосереджене на розробці архітектури LMS з використанням стандарту SCORM для підвищення сумісності та ефективного керування змістом платформи.

У роботі [10] авторами представлено досвід створення системи керування сховищем спільного вмісту на основі технології SCORM для керування освітньою моделлю для учнів 1-9 класів. Модель містить опис об’єктів для всіх розділів навчальної програми.

Наразі існує декілька версії SCORM, а прикладом наступного покоління SCORM є xAPI (Experience API) та cmi5. Так у 2016 році з’явилася специфікація CMI5 (Computer Managed Instruction) [11]. Дана специфікація оптимізована для використання в LMS, яка увібрала в себе найкращі практики SCORM.

У статті [12] автором аналізуються відмінності нового стандарту cmi5 від його попередників SCORM та xAPI. Представлено порівняльний аналіз вмісту пакетів SCORM, xAPI та cmi5. Крім того, наведено огляд плагінів для роботи з SCORM, xAPI та cmi5 в контексті однієї з найпопулярніших LMS Moodle. Провівши аналіз, автор стверджує, що новий стандарт cmi5 здатен замінити застарілий SCORM та відкрити принципово нові можливості для засобів е-навчання.

Також варто відмітити Competency frameworks [13] для LMS Moodle. У статтях[14,15] представлено досвід застосування даного фреймворку для управління компетентностями в системі Moodle. Дана надбудова доступна починаючи з Moodle 3.1 та дає можливість реалізовувати дистанційні курси, застосовуючи компетентнісний підхід. Викладач як адміністратор може керувати компетентностями: створювати, імпортувати, експортувати, а також визначати зв’язки, що пов’язують компетентності та дисципліни.

Після визначення списку компетентностей вони додаються до шаблонів та планів навчання. Далі розроблені плани навчання призначаються студентам або відповідним групам студентів.

Надбудова Competency frameworks є потужним інструментом для формування освітньої траєкторії, однак вона не передбачає можливості зміни професійних уподобань

здобувача впродовж навчального процесу, а також динамічної перебудови персональних траєкторій відповідно до змін та набутих компетенцій. На наш погляд, така можливість є критично важливою складовою сучасної освітньої інженерії.

Ще одним підходом до представлення освітніх моделей є використання OBA (Ontology-Based Architecture for Learning Systems) для представлення моделей навчання. Так у статті [16] представлено онтологічну модель процесу навчання. Автори даної роботи стверджують, що модель охоплює весь процес навчання. Онтологію прототипу було створено в Protégé. Модель складається з декількох рівнів, верхній рівень визначає загальну структуру процесу навчання. Структура має чотири основні компоненти:

1. Блок знань, що охоплює визначення, методи, активності, правила та техніки навчання.
2. Презентаційний блок, який містить приклади, пояснення, вправи, завдання та проєкти.
3. Формат подання матеріалу, що містить текст, відео та аудіоматеріали.
4. Оцінювальна частина, яка передбачає використання вікторин та тестових питань з кількома варіантами відповідей.

Використання онтологій може бути ефективним у контексті створення контрольованих словників, таксономій, тезаурусів, класифікацій та подібних систем для організації та індексування інформації як пов’язаних елементів даних у семантичній мережі [17]. Використання такого підходу дає можливість створювати різного роду розумні бібліотеки, організовувати ієрархію класів, а також моделювати взаємозалежні дисципліни та освітні об’єкти. Використання технології SKOS (Simple Knowledge Organisation System) для організації ієрархії дисциплін дасть змогу покращити якість систем персоналізованого навчання. Так, наприклад, у статті [18] описано підхід з використанням SKOS для моделювання предметних онтологій розробки адаптивного пошуку ресурсів та підтримки функцій персоналізації та адаптації для навчання.

Крім розробки персоналізованих систем, використання онтологій може допомогти вирішити проблему, пов’язану з дотриманням законодавства, наприклад, юридичне моделювання профілів учнів, а також забезпечення захисту прав інтелектуальної власності на авторські дисципліни [19].

З огляду на проведений аналіз літератури можна зробити висновок, що використання технологій Semantic Web може вирішити ряд питань та зробити сучасну освіту більш ефективною в контексті персоналізованої освіти. Важливо зазначити, що персоналізована освіта – це не тільки побудова освітніх траєкторій, а й можливість для здобувачів здійснювати адаптивний пошук матеріалів. Вирішити ці питання можна шляхом інтеграції ефективної та зручної інтелектуальної системи пошуку та рекомендацій як частини середовища електронного навчання, організувавши відповідний семантичний опис доступних ресурсів та інтелектуальних програмних засобів для підтримки учня в процесі пошуку та вибору ресурсів [20].

Спираючись на результати огляду літератури, можна зазначити, що більшість представлених моделей відображають лише окремі елементи освітнього процесу, що, на нашу думку, є недостатнім для розробки сучасних систем персоналізованої освіти.

Представлені в цьому розділі моделі не охоплюють цілісну підтримку навчального процесу – від формування індивідуальної освітньої траєкторії до відображення здобутих результатів навчання у вигляді сертифікатів навчання. Також критично важливим є можливість рекомендувати під кожну дисципліну релевантну літературу. Серед переваг використання технологій Semantic Web – можливість розробки алгоритмів рекомендації навчальних дисциплін, які враховують динамічну зміну професійних уподобань здобувачів освіти, а також набуті здобувачем навички під час перебудови нової персоналізованої освітньої траєкторії.

У підсумку хочеться зазначити, що використання технологій Semantic Web допоможе створити гнучку та масштабовану платформу для інтелектуальної автоматизації навчального процесу та забезпечити адаптивність системи до різних викликів сучасності.

Мета дослідження – розробка освітньої моделі на основі технологій Semantic Web та мови N3 Logic Rules[21], яка формує індивідуальні освітні траєкторії відповідно до кар'єрних вподобань здобувача, враховує необхідні навчальні матеріали для опанування дисциплін, а також забезпечує відображення здобутих результатів навчання у вигляді сертифікатів.

2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У цьому розділі буде представлено RDF-модель персоналізованої освіти, що відображає ключові сутності освітнього процесу. Основна сутність – здобувач освіти (Student), який записується на навчальні дисципліни, опановує їх і отримує відповідні сертифікати (BadgeClass).

Дисципліни забезпечують набуття певних навичок (Skill), які є необхідними для відповідних вакансій (JobOffer). Сутність LearningObject репрезентує навчальну дисципліну. Інформація про перелік дисциплін та відповідні навички формується автоматично з корпоративної системи університету KSU24[22], що забезпечує регулярне оновлення моделі.

Кожен LearningObject пов'язаний з обов'язковими для його опанування навчальними матеріалами (BibliographicResource), а також із відповідними Skill, які формуються в процесі навчання. Дисципліни можуть мати спеціальний тип зв'язку Prerequisite, що унеможливлює їх непослідовне проходження.

Викладачі (Teacher) як підклас сутності Contributor є авторами дисциплін і можуть виконувати ролі головного автора (Lead Author) або співавтора (Co-Author). Вони пов'язані з відповідними кафедрами та факультетами, які, своєю чергою, виступають як суб'єкти, що видають сертифікати про завершення навчальних дисциплін і підтверджують набуті навички.

У порівнянні з моделями, розглянутими у попередньому розділі, запропонована модель має більш широкий функціонал. Нижче розглянемо деталі реалізації.

Для розробки RDF-моделі використаємо мову Notation3 (далі N3) [23]. Використання мови N3 дозволяє не тільки представити освітні дані у вигляді семантичних зв'язків, а розробити систему міркувань на основі N3 Logic Rules. Використання N3 Logic Rules надає можливість розробити системи міркувань, що може бути основою для системи рекомендації дисциплін у контексті персоналізованої освіти.

Розроблена освітня модель містить різні сутності, зокрема: викладачів, студентів, дисципліни, навчальні матеріали, оцінки та інше. У моделі також представлені різного роду зв'язки, що моделюють взаємодію між цими вузлами. Наприклад, учитель викладає дисципліну, а учень проходить навчання.

Далі розглянемо розроблену модель більш детально.

Здобувача розглядаємо як певну сутність, яка має визначені кар'єрні вподобання, відповідно до яких система має побудувати персональну траєкторію із списком дисциплін. Розглянемо модель сутності здобувача в синтаксисі N3:

```
ex:std a foaf:Person, ex:Student ;
       foaf:name "John" ;
       foaf:mbox <mailto:john@example.org> ;
       foaf:depiction <http://example.org/images/JohnPic.jpg> ;
       foaf:accountName "1M 100" ;
```

```
ex:enrolDate [
       a ex:EnrollmentDate ;
       ex:day 15 ;
       ex:month 1 ;
       ex:year 2025
] ;
ex:careerAspiration ex:RequirementsEngineer .
```

Розглянемо більш детально наведені властивості:

- `foaf:name` – повне ім'я здобувача;
- `foaf:mbox` – електронна пошта здобувача;
- `foaf:depiction` – URL-адреса зображення (фото профілю здобувача);
- `foaf:accountName` – унікальний ідентифікатор облікового запису здобувача;
- `ex:enrolDate` – дата зарахування здобувача на дисципліну (день, місяць, рік);
- `ex:careerAspiration` – кар'єрні прагнення здобувача.

Варто зазначити, що наведений список властивостей сутності здобувача є фрагментом, однак цілком придатний для демонстрації підходу до побудови персоналізованих освітніх траєкторій. Далі розглянемо представлення дисципліни в синтаксисі Notation3:

```
ex:FormalMethodsSpecVerOpt a ex:Subject ;
       ex:title "Formal Methods of Specification, Verification, and Optimization of
Programs" ;
       ex:description "A subject focused on formal methods for specifying, verifying,
and optimizing software systems." ;
       ex:created "2024-06-14"^^xsd:date ;
       ex:language "uk/en" ;
       ex:numberHours 30 ;
       ex:isAvailable true ;
       skos:broader ex:TLAPlus, ex:IMS .
```

Опис дисципліни можна також розшири при необхідності. Властивості даного класу є зрозумілі тому, на наш погляд, пояснення не потребують. Далі розглянемо зв'язки, які показують залежність між класами в моделі, що розробляється.

1. Student –(mustEnrolTo)→ LearningObject

Система має побудувати здобувачеві персоналізовану освітню траєкторію відповідно до його індивідуальних та кар'єрних уподобань. Цей список дисциплін повинен бути пріоритезований. Зв'язок вказує на дисципліни, на які записався здобувач. Даний зв'язок можна представити у синтаксисі N3 у такий спосіб:

```
ex:mustEnrolTo a rdf:Property ;
       rdfs:label "Enrol to courses" ;
       rdfs:domain ex:Student ;
       rdfs:range lom:LearningObject .
```

Наступні зв'язки в форматі N3 не наводжу, оскільки вони є досить схожими.

2. BadgeClass –(confirmsCompletion)→ LearningObject

Зв'язок, який відображає, що під час завершення дисципліни генерується відповідний сертифікат з рівнем оволодіння набутими навичками. Тож кожна освоєна дисципліна супроводжується спеціально згенерованим сертифікатом з результатми навчання.

3. Student –(hasCompleted)→ BadgeClass

Зв’язок, що встановлює залежність між завершенням дисципліни та сертифікатом із зазначенням рівня сформованих навичок. Надалі ця інформація може бути використана для автоматичної генерації додатка з оцінками та набутими навичками по закінченню навчання.

4. LearningObject –(toProvide)→ Skill

Зв’язок, що визначає навички, які здобувач опановує після завершення дисципліни. Це один з основних зв’язків для побудови персоналізованої траєкторії. Завдяки цьому зв’язку система може рекомендувати релевантні дисципліни відповідно до кар’єрних уподобань та вимог вакансій.

5. JobOffer –(necessary)→ Skill

Цей зв’язок визначає навички, необхідні для певної вакансії.

6. Department –(issuedBy)→ BadgeClass

Вказує, яка кафедра видає сертифікати, що підтверджують закінчення дисципліни та оволодіння певними навичками здобувача. Система на основі N3 Logic Rule автоматично виводить, яка кафедра є бенефіціаром, на основі інформації про те, який викладач читає навчальну дисципліну та на якій кафедрі він викладає.

7. Teacher –(teaches)→ LearningObject

Зв’язок, що визначає дисципліну, яку викладає відповідний викладач. Здобувачеві надсилається інформація про викладача, включно з його контактними даними: корпоративна пошта, покликання на месенджер. При необхідності здобувач з легкістю може зв’язатися з викладачем.

8. Teacher –(worksIn)→ Department

Вказує, що викладач працює на певній кафедрі. Ця інформація нам потрібна для інформування здобувача, на якій кафедрі працює викладач. Оскільки персоналізовану освітню траєкторію складають дисципліни різних факультетів та кафедр, а можливо, навіть і університетів, якщо розглядати модель з різними університетами.

9. LearningObject –(leadAuthor)→ Contributor

10. LearningObject –(coAuthor)→ Contributor

Зв’язки leadAuthor та coAuthor вказують на основного автора та співавторів навчального матеріалу. Також варто зазначити, що класс Contributor містить у собі інформацію про авторський внесок, що надалі може бути використано для врегулювання питань права власності, а також для підрахунку заробітної плати викладачів, виходячи з авторського внеску та вартості навчальної дисципліни.

11. LearningObject –(prerequisite)→ LearningObject

Цей зв’язок вказує на обов’язковість проходження попередньої дисципліни як передумови для вивчення поточної. Зв’язок є надзвичайно важливим з точки зору побудови ієрархії навчальних дисциплін. Система має будувати детерміновану персоналізовану траєкторію, де кожна наступна дисципліна базується на попередній.

12. BibliographicResource –(requiredForCourse)→ LearningObject

Даний зв’язок вказує на певний навчальний матеріал, необхідний для освоєння дисципліни. Цей зв’язок є також важливим, оскільки має на меті надати матеріали, необхідні для освоєння тієї чи іншої дисципліни. Під такими матеріалами ми розуміємо підручники, посібники, електронні ресурси, різного роду наочні засоби, які необхідні для поглибленого вивчення дисципліни.

Описана вище схема моделює навчальний процес з урахуванням індивідуальних та кар'єрних уподобань здобувача. Даний гетерогенний граф наведений на Рис. 1.

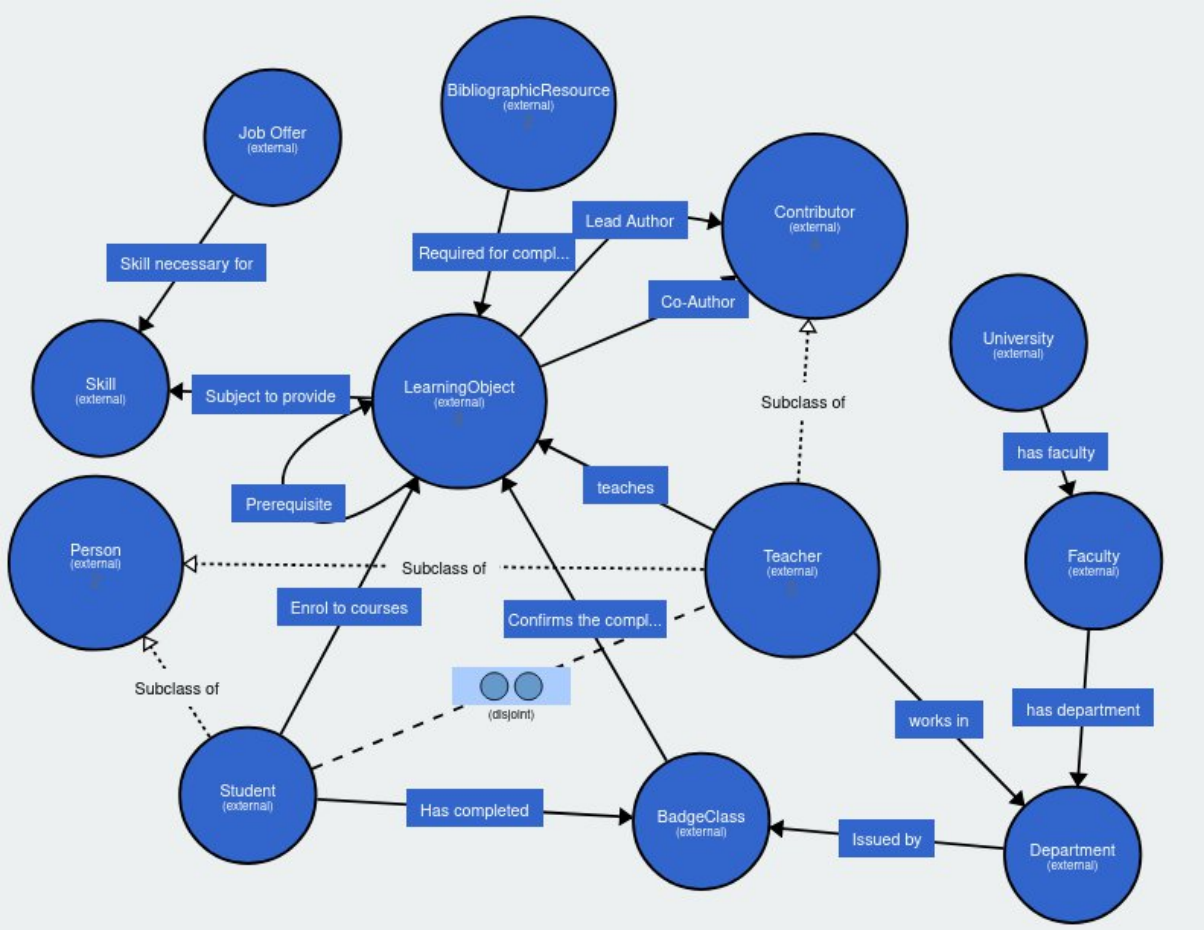

Рис. 1. Візуалізація графа освітньої моделі в сервісі WebVOWL[24]

Далі, за допомогою зв’язку toProvide, поєднаємо навички та компетентності, які формує у здобувача кожна дисципліна. Представимо навички у вигляді класів N3. Нижче наведено фрагмент відповідного коду:

```
ex:Skill a rdfs:Class ;
      rdfs:label "Skill" ;
      rdfs:comment "A class representing skills acquired by
students." .

ex:Verification a ex:Skill ;
      rdfs:label "Verification Standards" ;
      rdfs:comment "A method for verification using formal
techniques." .
```

Зв’яжемо дисципліни та навички за допомогою зв’язку *toProvide*:

```
ex:SoftwareDesign ex:toProvide ex:RequirementsAnalysis,
                               ex:UML , ex:SysML .
```

```
ex:FormalMethodsSpecVerOpt ex:toProvide ex:Verification ,
                           ex:SoftwareSpecification, ….
```

Отже, стверджуємо, що дисципліна “Проєктування програмного забезпечення” забезпечує набуття навичок проєктування з використанням технологій UML, SysML, а також навичок аналізу вимог до програмного забезпечення. Своєю чергою, дисципліна “Формальні методи специфікації, верифікації та оптимізації ПЗ” надає навички верифікації та специфікації ПЗ. Далі, провівши аналіз вакансій, через зв’язок necessary створюємо аналогічну модель, вказавши відповідну вакансію та необхідні навички для цієї вакансії.

Для побудови більш ефективної системи рекомендації дисциплін використаємо технологію SKOS для встановлення ієрархічних зв’язків між дисциплінами. Розглянемо невеликий приклад. Мови формальної верифікації та специфікації, такі як Insertion Modeling System (IMS)[25], TLA+[26] можуть бути застосовані як інструментарій для специфікації та верифікації ПЗ, а також для формальної перевірки вимог. Виразити цей факт можемо через властивість broader в онтології SKOS у такий спосіб:

```
ex:FormalMethodsSpecVerOpt skos:broader ex:ex:IMS , ex:TLAPlus .
```

Далі для розробки системи правил використовуємо онлайн-сервіс Notation3 Editor[27], який підтримує EYE (Euler Yet another proof Engine) [28]. Технологія EYE – це механізм виведення (reasoning engine), який підтримує логічне міркування на основі Notation3 (N3) – розширення RDF із підтримкою правил і логічних умов. Тож наступним завданням є побудова правил N3 Logic Rules, які в цілому і будуть ядром системи, яка рекомендує відповідні дисципліни та будує персоналізовану освітню траєкторію. З теорією та описом N3 Logic Rules можна ознайомитись на офіційному сайті [29].

Нижче наведено правило, яке на основі побудованої N3-моделі рекомендує здобувачеві дисципліни відповідно до його кар’єрних уподобань. Варто зазначити, що правило застосовується до всіх здобувачів, які представлені в списку listStudents.

```
:listStudents :lt ( ex:std1 ex:std2 ex:std3 ex:std4 … ) .
  {
    :listStudents :lt ?list . ?list list:iterate (?i ?el) .
       ?el ex:hasName ?std_name .
       ?el ex:careerAspiration ?job . ?job ex:necessary ?skill .
       ?subj ex:toProvide ?skill .
       ?subj rdfs:label ?sub_name .
  } => {
       ?std_name ex:mustEnrolTo ?sub_name .
  }.
```

Зазначене вище правило базується на основі RDF-моделі. N3 Logic використовує дані моделі як систему фактів у вигляді семантичних зв’язків. Механізм дедукції використовує для виводу нових знань гетерогенний граф:

```
Subject-(toProvide)-->Skills<--(necessary)--JobOffer
```

Даний граф виступає як підграф основного графа, що представляє повну модель. Застосувати правило можна в сервісі Notation3 Editor (Рис.2). Варто зазначити, що сервіс Notation3 Editor не підтримує конструкції правил з використання forAll на відміну від сервісу N3 Logic Rule Reasoner [30], тому під час розробки власної моделі слід врахувати дане обмеження.

Рис. 2. Рекомендовані дисципліни

У вкладці Derivations представлено результат рекомендацій на основі побудованої моделі у синтаксисі N3. Варто зазначити, що на Рис. 2 представлено лише фрагмент з метою забезпечення якості ілюстрації. Розглянемо більш детально отриманий результат:

```
"John" ex:mustEnrolTo "Formal Methods of Specification, Verification, and
Optimization of Programs".
"Andry" ex:mustEnrolTo "Internet of Things Development".
"John" ex:recEnrolTo "TLA+".
"John" ex:recEnrolTo "Insertion Modeling System".
```

Як бачимо, система на основі побудованої RDF-моделі та правил надає рекомендації здобувачу John щодо обов'язкового додання дисципліни "Formal Methods of Specification, Verification, and Optimization of Programs" в дисципліни для вивчення. Крім цього система надає свої додаткові рекомендації, що здобувачу варто також звернути увагу на дисципліни: TLA+ та Insertion Modeling System, які розширять можливості застосування його навичок та сформують його конкурентоспроможність на ринку праці серед інших інженерів та бізнес-аналітиків.

Крім того, система на основі RDF-моделі та логічних правила утворює зв'язок issuedBy для конкретизації того, хто видає сертифікат про опанування навчальної дисципліни. Отже, після завершення дисципліни система видає сертифікат, що містить інформацію про набуті компетентності, рівень їх засвоєння (оцінка), а також назву кафедри, яка видала цей сертифікат. Приклад роботи представлений на Рис. 3. Система використовує логіку, аналогічну до дисциплін, де RDF-модель використовується в якості бази фактів.

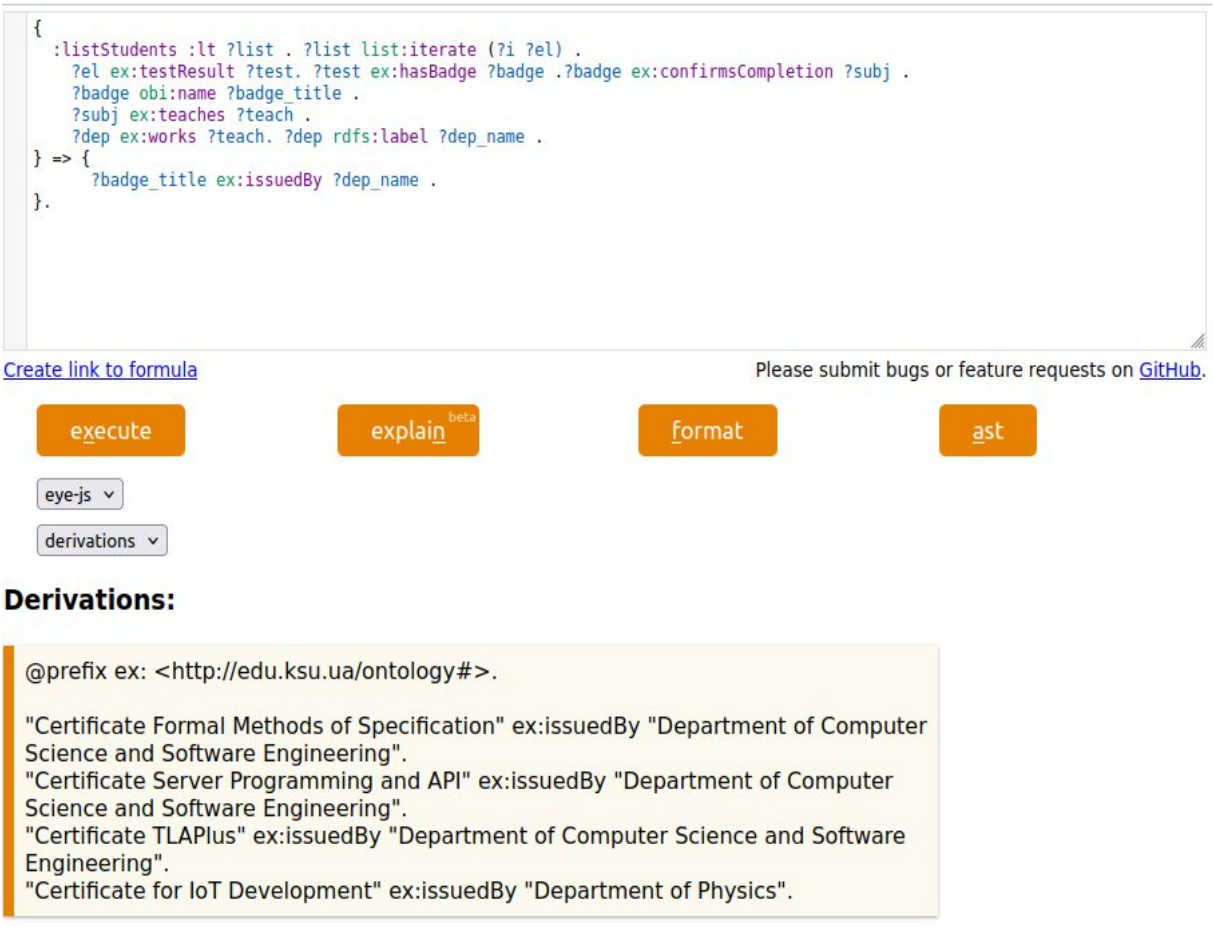

Рис. 3. Генерація сертифікатів про результати навчання

Система використовує інформацію про викладача, зокрема семантичний зв'язок між викладачем та кафедрою, на якій він працює. Але утворення зв'язку та створення сертифікату можливе тільки в тому випадку, коли здобувач склав тест на достатній бал (критерії оцінювання зазначені в моделі заздалегідь). На основі цієї інформації будується логіка виводу. Нижче наведено результат роботи:

```
"Certificate Formal Methods of Specification Certificate" ex:issuedBy "Department of Computer Science and Software Engineering".
"Certificate Server Programming and API" ex:issuedBy "Department of Computer Science and Software Engineering".
"Certificate TLAPlus" ex:issuedBy "Department of Computer Science and Software Engineering".
"Certificate for IoT Development" ex:issuedBy "Department of Physics".
```

У результаті бачимо, що "Certificate Formal Methods of Specification Certificate" видає Department of Computer Science and Software Engineering. Даний сертифікат підтверджує результати закінчення навчальної дисципліни "Formal Methods of Specification, Verification, and Optimization of Programs" на відповідному рівні.

Мова N3 в поєднанні з N3 Logic Rules є ефективним інструментом для побудови систем персоналізованої освіти. Поєднання цих двох технологій дає можливість будувати моделі на основі семантичних зв'язків, а також використовувати механізми правил виводу та автоматичну дедукцію для створення нових знань. Це, своєю чергою, дасть змогу застосувати дані технології для створення онтологічно керованих систем у контексті персоналізованої освіти.

3. ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У даній роботі представлено перспективи використання технології Semantic Web у контексті створення сучасної персоналізованої системи навчання. Використання даної технології відкриває величезні можливості не тільки для систем, які застосовуються в університеті, а для різного роду комерційних LMS. Варто зазначити, що більшість розглянутих статей представляють моделі з урахуванням тільки освітнього процесу, що, на наш погляд, замало для сучасної персоналізованої системи.

У ході роботи було проаналізовано сучасні підходи та технології створення персоналізованих систем та платформ. Було розроблено освітню модель засобами мови Notation3. У даній моделі враховано не тільки освітній процес, а й розглянуто наступні аспекти:

1. Сертифікація здобувачів, що може бути застосована для підтвердження набутих навичок та рівня їх володіння.
2. Питання права власності на навчальну дисципліну, враховується авторський внесок кожного з авторів.
3. Створення розумної бібліотеки ресурсів (підручники, наочності, різного роду освітні об'єкти) для здобувачів, що полегшить процес пошуку освітніх ресурсів для опанування відповідної навчальної дисципліни.

Важливо зазначити, що розроблена модель забезпечує цілісну підтримку навчального процесу – від формування індивідуальної освітньої траєкторії до відображення здобутих результатів навчання, що раніше не висвітлювалось у такому комплексному вигляді.

Надалі планується розглянути наступні питання, які, на наш погляд, мають бути враховані в сучасних персоналізованих системах:

1. Розширення системи рекомендацій навчальних дисциплін.
2. Представлення розширеної моделі, використовуючи ESCO для стандартизації опису вакансій та необхідних навичок.
3. Специфікація профайлу здобувача з використання одного зі світових стандартів.
4. Використання LOM як основного стандарту специфікації освітніх об’єктів. Зазначені вище пункти сприяють спрощенню та формуванню уніфікованого освітнього середовища.
5. Розширення моделі за допомогою стандарту SKOS. SKOS дозволяє організувати навчальні дисципліни у вигляді ієрархії, встановити концептуальні зв’язки між ними, а також створити впорядковані списки, що сприяє підвищенню ефективності рекомендацій навчальних дисицплін.
6. Опис можливостей збереження результатів навчання: сертифікатів та дипломів за допомогою технологій блокчейн та протокол IPFS. Впровадження децентралізованих мереж IPFS вирішує питання цифрової ідентичності та гарантує незмінність результатів навчання, а також засвідчує права власності на навчальні матеріали.

На наш погляд, зазначені вище аспекти сприятимуть удосконаленню не лише аспектів персоналізованого навчання, а й дозволять забезпечити надійне зберігання результатів навчання та зроблять неможливою підробку таких даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] N. Evain, E. Exposito, M. L. Gueye, and P. Arnould, "Ontology-driven approach for competency-oriented and student-centered engineering education," 2024 IEEE *Global Engineering Education Conference* (EDUCON), May 2024, pp. 1–10, doi: 10.1109/EDUCON60312.2024.10578793.

[2] T. Force, Computing curricula 2020: Paradigms for global computing education. New York, NY, USA: *Association for Computing Machinery*, 2020. doi: 10.1145/3467967.

[3] Y. H. Alfaifi, "Towards an Ontology-Based E-Learning Recommendation System," *2023 3rd International Conference on Computing and Information Technology* (ICCIT), Sept. 2023, pp. 652–656, IEEE, doi: 10.1109/ICCIT58132.2023.10273903.

[4] R. Hare and Y. Tang, "Ontology-driven Reinforcement Learning for Personalized Student Support," *2024 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (SMC), Oct. 2024, pp. 2555–2560, IEEE.

[5] Y. Anistyasari, R. Sarno, and N. Rochmawati, "Designing learning management system interoperability in semantic web," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 296, no. 1, p. 012034, IOP Publishing, 2018.

[6] IEEE Standard for Learning Object Metadata, IEEE Standard 1484.12.1-2020, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9262118.

[7] M. Abdel-Qader, A. Saleh, and K. Tochtermann, "On the experience of federating open educational repositories using the learning object metadata standard," *EDULEARN21 Proceedings*, IATED, 2021, pp. 4819–4825, doi: 10.21125/edulearn.2021.0998.

[8] X. H. Zhu, T. J. Wu, and H. C. Chen, "An interoperable model for the intelligent content object based on a knowledge ontology and the SCORM specification," *Journal of Educational Computing Research*, vol. 56, no. 5, pp. 723–749, 2018, doi: 10.1177/073563311772576.

[9] D. Purbohadi, "Designing Interactive E-Learning Architecture: Leveraging SCORM Standards," *Educational Research (IJMCER*), vol. 6, no. 3, pp. 01–07, 2024.

[10] Y. C. Hsu, Y. C. Liu, and S. S. Chang, "A study of SCORM-based Sharable Content Repository Management System," *2010 2nd IEEE International Conference on Information Management and Engineering (ICIME)*, Apr. 2010, pp. 110–114, IEEE, doi: 10.1109/ICIME.2010.5477433.

[11] "Evolution of SCORM" [Електронний ресурс]. Доступно:https://scorm.com/scorm-explained/business-of-scorm/scorm-versions/?utm_source=google&utm_medium=natural_search. Дата звернення: 22 лютого 2025.

[12] O. A. Shcherbyna, "CMI5 - New Standard for E-Learning Tools Integration," *ITLT*, vol. 77, no. 3, pp. 355–368, Jun. 2020, doi: 10.33407/itlt.v77i3.2989.

[13] "Competency frameworks," *Moodle Documentation,* last edited Dec. 12, 2024. [Електронний ресурс]. Доступно: https://docs.moodle.org/500/en/Competency_frameworks

[14] K. Rezgui, H. Mhiri, and K. Ghédira, "Extending Moodle functionalities with ontology-based competency management," *Procedia Computer Science*, vol. 35, pp. 570–579, 2014.

[15] K. Hadullo, "Online competency based education framework using Moodle LMS: A case of HEIs in Kenya," *International Journal of Education and Development using Information and Communication Technology (IJEDICT*), vol. 17, no. 1, pp. 193–206, 2021

[16] G. H. A. Ahmed and L. Kovács, "Development of ontology-based model to support learning process in LMS," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 24, no. 1, pp. 507–518, 2021, doi: 10.11591/ijeecs.v24.i1.pp507-518.

[17] A. Smith, "Simple knowledge organization system (SKOS)," *KO Knowledge Organization*, vol. 49, no. 5, pp. 371–384, 2022.

[18] S. Miranda, F. Orciuoli, and D. G. Sampson, "A SKOS-based framework for Subject Ontologies to improve learning experiences," *Computers in Human Behavior*, vol. 61, pp. 609–621, 2016, doi: 10.1016/j.chb.2016.03.066.

[19] N. T. H. Giang, N. M. Duc, and N. D. H. Cuong, "Towards Legal Ontology for Education," Hue *University Journal of Science: Techniques and Technology*, vol. 130, no. 2B, pp. 5–14, 2021, doi: 10.26459/hueunijtt.v130i2B.6345.

[20] T. Ivanova, "Personalized and Self-Regulated Learning and Ontology-Based Knowledge Models in the Cloud," ICERI2022 Proceedings, IATED, 2022, pp. 2737–2746, doi: 10.21125/iceri.2022.0677.

[21] "Notation 3 Logic" [Електронний ресурс]. Доступно: https://www.w3.org/DesignIssues/N3Logic. Дата звернення: 22 лютого 2025.

[22] "ХДУ24: Херсонського державного університету, [Електронний ресурс]. Доступно: https://ksu24.kspu.edu/

[23] "Notation3: Knowledge Graph Language for the Semantic Web" [Електронний ресурс]. Доступно: https://notation3.org/. Дата звернення: 22 лютого 2025.

[24] “WebVOWL” [Електронний ресурс]. Доступно: https://service.tib.eu/webvowl/. Дата звернення: 22 лютого 2025.
[25] O. A. Letychevskyi, V. Peschanenko, M. Poltoratskiy, and Y. Tarasich, "Platform for Modeling of Algebraic Behavior: Experience and Conclusions," in ICTERI Workshops, 2020, pp. 42–57.
[26] K. Chaudhuri, D. Doligez, L. Lamport, and S. Merz, "Verifying safety properties with the TLA+ proof system," *in Automated Reasoning: 5th International Joint Conference, IJCAR 2010, Edinburgh*, UK, July 16-19, 2010. Proceedings 5, Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 142–148.
[27] “Notation3 Editor” [Електронний ресурс]. Доступно: https://editor.notation3.org/. Дата звернення: 22 лютого 2025.
[28] J. Wright, J. D. Roo, and I. Smessaert, "EYE JS: A client-side reasoning engine supporting Notation3, RDF Surfaces and RDF Lingua," in Posters, Demos, and Industry Tracks: From Novel Ideas to Industrial Practice, co-located with *23rd International Semantic Web Conference* (ISWC 2024), 2024.
[29] D. Arndt, R. Verborgh, J. De Roo, H. Sun, E. Mannens, and R. Van de Walle, "Semantics of Notation3 logic: A solution for implicit quantification," in Rule Technologies: Foundations, Tools, and Applications: 9th International Symposium, RuleML 2015, Berlin, Germany, August 2-5, 2015, Proceedings 9, Springer International Publishing, 2015, pp. 127–143.
[30] “N3 Logic Rule Reasoner” [Електронний ресурс]. Доступно: https://www.ldf.fi/service/n3-reasoner. Дата звернення: 22 лютого 2025.

Матеріал надійшов до редакції 22.02.2025р.

MODELING A PERSONALIZED EDUCATIONAL SYSTEM BASED ON SEMANTIC WEB TECHNOLOGIES

Maksym Poltoratskyi
PhD in Information Technologies, Associate Professor
Associate Professor at the Department of Computer Science and Software Engineering
Kherson State University, Kherson, Ukraine
ORCID ID 0000-0001-9861-4438
mpoltoratskyi@ksu.ks.ua

Abstract. The article analyzes the principles of building personalized systems using Semantic Web technology, and presents the experience of using this technology to create modern systems that support personalized learning standards.
In the course of the work, an educational RDF model was developed using the Notation 3 language. The model presented in the article represents not only the issue of personalized education, but also takes into account the concept of Skills-Based Model, which focuses specifically on the skills that a student acquires in the learning process, as well as the further expression of learning outcomes in the form of certificates confirming the acquired skills and the level of their mastery. It is also worth noting that the model also takes into account important issues of management, copyright for educational objects used in the learning process.
The model includes the principles of using recommendations for educational materials by establishing properties between the educational course and various types of educational materials. Using this approach makes it possible to lay down the principles of building intelligent recommendation systems, which makes it possible to recommend to the student not only educational courses, but also materials that are needed to study a particular course.
In addition to the model, the article describes the principles of building a course recommendation system based on semantic data using the N3 Logic Rules logical inference language. As part of this experiment, the experience of using N3 to build a modern personalized course recommendation system based on the student's individual and career preferences was described. The model and course recommendation system proposed in the article can be applied both to university LMS distance learning and to commercial MOOC systems. The implementation of systems that support the paradigm of personalized education can qualitatively affect the current state of education. The use of Semantic Web technologies will provide flexible approaches to learning, allowing students to receive educational services according to their individual needs and career preferences.

Keywords: personalized education; educational models; Semantic Web; Notation3; N3 Logic Rules.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

[1] N. Evain, E. Exposito, M. L. Gueye, and P. Arnould, "Ontology-driven approach for competency-oriented and student-centered engineering education," *2024 IEEE Global Engineering Education Conference* (EDUCON), May 2024, pp. 1–10, doi: 10.1109/EDUCON60312.2024.10578793. (in English).

[2] T. Force, Computing curricula 2020: *Paradigms for global computing education. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery*, 2020. doi: 10.1145/3467967. (in English).

[3] Y. H. Alfaifi, "Towards an Ontology-Based E-Learning Recommendation System," *2023 3rd International Conference on Computing and Information Technology* (ICCIT), Sept. 2023, pp. 652–656, IEEE, doi: 10.1109/ICCIT58132.2023.10273903. (in English).

[4] R. Hare and Y. Tang, "Ontology-driven Reinforcement Learning for Personalized Student Support," *2024 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (SMC), Oct. 2024, pp. 2555–2560, IEEE (in English).

[5] Y. Anistyasari, R. Sarno, and N. Rochmawati, "Designing learning management system interoperability in semantic web," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 296, no. 1, p. 012034, IOP Publishing, 2018 (in English).

[6] IEEE Standard for Learning Object Metadata, IEEE Standard 1484.12.1-2020, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9262118. (in English).

[7] M. Abdel-Qader, A. Saleh, and K. Tochtermann, "On the experience of federating open educational repositories using the learning object metadata standard," *EDULEARN21 Proceedings*, IATED, 2021, pp. 4819–4825, doi: 10.21125/edulearn.2021.0998 (in English).

[8] X. H. Zhu, T. J. Wu, and H. C. Chen, "An interoperable model for the intelligent content object based on a knowledge ontology and the SCORM specification," *Journal of Educational Computing Research*, vol. 56, no. 5, pp. 723–749, 2018, doi: 10.1177/073563311772576 (in English).

[9] D. Purbohadi, "Designing Interactive E-Learning Architecture: Leveraging SCORM Standards," *Educational Research* (IJMCER), vol. 6, no. 3, pp. 01–07, 2024 (in English).

[10] Y. C. Hsu, Y. C. Liu, and S. S. Chang, "A study of SCORM-based Sharable Content Repository Management System," *2010 2nd IEEE International Conference on Information Management and Engineering* (ICIME), Apr. 2010, pp. 110–114, IEEE, doi: 10.1109/ICIME.2010.5477433 (in English).

[11] "Evolution of SCORM" [Online]. Available: https://scorm.com/scorm-explained/business-of-scorm/scorm-versions/?utm_source=google&utm_medium=natural_search (in English).

[12] O. A. Shcherbyna, "CMI5 - New Standard for E-Learning Tools Integration," *ITLT*, vol. 77, no. 3, pp. 355–368, Jun. 2020, doi: 10.33407/itlt.v77i3.2989. (in Ukrainian).

[13] "Competency frameworks," *Moodle Documentation*, last edited Dec. 12, 2024. [Online]. Available: https://docs.moodle.org/500/en/Competency_frameworks. (in English).

[14] K. Rezgui, H. Mhiri, and K. Ghédira, "Extending Moodle functionalities with ontology-based competency management," *Procedia Computer Science*, vol. 35, pp. 570–579, 2014. (in English).

[15] K. Hadullo, "Online competency based education framework using Moodle LMS: A case of HEIs in Kenya," *International Journal of Education and Development using Information and Communication Technology* (IJEDICT), vol. 17, no. 1, pp. 193–206, 2021. (in English).

[16] G. H. A. Ahmed and L. Kovács, "Development of ontology-based model to support learning process in LMS," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 24, no. 1, pp. 507–518, 2021, doi: 10.11591/ijeecs.v24.i1.pp507-518 (in English). (in English).

[17] A. Smith, "Simple knowledge organization system (SKOS)," *KO Knowledge Organization*, vol. 49, no. 5, pp. 371–384, 2022 (in English).

[18] S. Miranda, F. Orciuoli, and D. G. Sampson, "A SKOS-based framework for Subject Ontologies to improve learning experiences," *Computers in Human Behavior*, vol. 61, pp. 609–621, 2016, doi: 10.1016/j.chb.2016.03.066. (in English).

[19] N. T. H. Giang, N. M. Duc, and N. D. H. Cuong, "Towards Legal Ontology for Education," Hue *University Journal of Science: Techniques and Technology*, vol. 130, no. 2B, pp. 5–14, 2021, doi: 10.26459/hueunijtt.v130i2B.6345 (in English).

[20] T. Ivanova, "Personalized and Self-Regulated Learning and Ontology-Based Knowledge Models in the Cloud," ICERI2022 Proceedings, IATED, 2022, pp. 2737–2746, doi: 10.21125/iceri.2022.0677 (in English).

[21] "Notation 3 Logic" [Online]. Available: https://www.w3.org/DesignIssues/N3Logic (in English).

[22] "KSU24: Kherson state university, [Online]. Available: https://ksu24.kspu.edu/ (in Ukrainian).

[23] "Notation3: Knowledge Graph Language for the Semantic Web" [Online]. Available: https://notation3.org/ (in English).

[24] “WebVOWL” [Online]. Available: https://service.tib.eu/webvowl/ (in English).
[25] O. A. Letychevskyi, V. Peschanenko, M. Poltoratskiy, and Y. Tarasich, "Platform for Modeling of Algebraic Behavior: Experience and Conclusions," in *ICTERI Workshops, 2020*, pp. 42–57 (in English).
[26] K. Chaudhuri, D. Doligez, L. Lamport, and S. Merz, "Verifying safety properties with the TLA+ proof system," in Automated Reasoning: *5th International Joint Conference, IJCAR 2010*, Edinburgh, UK, July 16-19, 2010. Proceedings 5, Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 142–148 (in English).
[27] “Notation3 Editor” [Online]. Available: https://editor.notation3.org/ (in English).
[28] J. Wright, J. D. Roo, and I. Smessaert, "EYE JS: A client-side reasoning engine supporting Notation3, RDF Surfaces and RDF Lingua," in Posters, Demos, and Industry Tracks: From Novel Ideas to Industrial Practice, co-located with *23rd International Semantic Web Conference* (ISWC 2024), 2024 (in English).
[29] D. Arndt, R. Verborgh, J. De Roo, H. Sun, E. Mannens, and R. Van de Walle, "Semantics of Notation3 logic: A solution for implicit quantification," in *Rule Technologies: Foundations, Tools, and Applications: 9th International Symposium,* RuleML 2015, Berlin, Germany, August 2-5, 2015, Proceedings 9, Springer International Publishing, 2015, pp. 127–143 (in English).
[30] “N3 Logic Rule Reasoner” [Online]. Available: https://www.ldf.fi/service/n3-reasoner (in English).

(cc) BY-NC-SA

This work is licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.