

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХЕРСОНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет комп'ютерних наук, фізики та математики  
Кафедра комп'ютерних наук та програмної інженерії**

**ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ АЛГЕБРАЇЧНОГО ПРОГРАМУВАННЯ  
ДЛЯ АНАЛІЗУ МОДЕЛЕЙ ТОКЕНІЗАЦІ ОСВІТИ**

Кваліфікаційна робота (проект)  
на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

Виконала: здобувачка 4 курсу 441 групи

Спеціальності 121 Інженерія  
програмного забезпечення

Освітньо-професійної (наукової)  
програми Інженерія програмного  
забезпечення

Коннова Ольга Владиславівна

Керівник: кандидат педагогічних наук,  
доцент Вінник Максим Олександрович

Співкерівник: доктор педагогічних наук,  
професор Співаковський Олександр  
Володимирович

Рецензент: доцент кафедри алгебри,  
геометрії та математичного аналізу ХДУ  
Плоткін Яків Давидович

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ</b> .....	<b>3</b>
<b>ВСТУП</b> .....	<b>4</b>
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ</b> .....	<b>7</b>
1.1 Поняття токеноміки та токеномічної моделі.....	7
1.2 Огляд моделей токеноміки в освіті.....	12
1.3 Огляд методів та інструментів для аналізу моделей токеноміки.....	17
<b>РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ МОДЕЛІ ТОКЕНІЗАЦІЇ ОСВІТИ</b> .....	<b>24</b>
2.1 Модель токенізації освіти.....	24
2.2 Формалізація моделі токеноміки.....	32
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	<b>40</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	<b>41</b>

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

ABM – агентне моделювання (Agent Based Modelling )

APS – система алгебраїчного програмування (Algebraic Programming System)

IMS – система інсерційного моделювання (Insertion Modeling System)

## ВСТУП

**Актуальність дослідження.** Освіта була фундаментальною опорою нашого суспільства протягом багатьох десятиліть. Адже саме вона грає вирішальну роль у технологічному розвитку країни та прищеплює корисні навички та цінності людям. Не дивно, що сьогодні освіта є великою галуззю та головним пріоритетом для багатьох урядів у всьому світі. Тому її розвиток безперервний і має відповідати вимогам часу. Однак наразі освіта не встигає за темпами інновацій, і в останні роки практично не спостерігається якихось помітних покращень. Саме використання інноваційних технологій допоможе змінити ситуацію, що склалася. Однією з таких технологій є блокчейн. Поява блокчейну та інших технологій розподіленого реєстру може стати початком руйнівної хвилі змін у освітній галузі.

Використання блокчейну в освіті все ще знаходиться в зародковому стані, і лише невелика кількість установ впроваджують цю технологію. Але блокчейн в освітніх закладах відкриває величезні можливості для ефективного використання та може допомогти у вирішенні багатьох проблем. Впровадження революційної технології блокчейн в освіту може зламати традиційні бар'єри та оновити галузь.

У даний час навчальні установи, які впровадили блокчейн, переважно використовують його для зберігання та обміну академічними записами та обліковими даними, у той час як реальна підривна сила часто полягає у створенні нових бізнес-моделей. Саме технологія блокчейн дозволяє ефективно реалізувати нову освітню парадигму шляхом створення активів чи токенів, які стануть основою нової системи стимулів для студентів та викладачів.

Токенізація у сфері освіти — це революційна альтернатива традиційним неефективним підходам до навчання. Вона передає контроль до рук учнів і

надає їм інноваційну техніку придбання навичок, необхідних для прискорення професійного розвитку. Блокчейн дозволяє викладачам і учням легко взаємодіяти без участі посередників. Таким чином, освіта стає доступнішою для всіх, хто хоче отримати нові знання.

Різні варіанти використання токенизації демонструють її перспективний потенціал для революційної зміни бізнес-операцій у різних галузях. Але для того, щоб модель токеноміки була ефективною важливо вміти правильно аналізувати, перевіряти та тестувати її за допомогою спеціальних інструментів. Це дасть змогу перевірити життєздатність моделі, знайти вразливості, які можуть представляти небезпеку для системи та її користувачів у майбутньому. Також ми можемо робити прогнози та шукати найбільш ефективні сценарії роботи системи.

**Мета дослідження** – дослідити використання методів алгебраїчного програмування для аналізу та верифікації моделей токенизації освіти. Зробити формалізацію моделі та дослідити її основні властивості.

Досягнення мети дослідження передбачає розв’язання таких завдань:

1. Дослідити існуючі інструменти для моделювання токеноміки, проаналізувати переваги та недоліки кожного з них;
2. Спроекувати модель токеноміки, визначити основних агентів та їх дії в рамках моделі;
3. Зробити формалізацію моделі токеноміки;
4. Дослідити основні властивості моделі, перевірити модель на наявність можливих протиріч.

**Об’єкт дослідження** – інструменти для аналізу та тестування моделей токеноміки.

**Предмет дослідження** – алгебраїчне програмування та інсерційне моделювання як інструмент для аналізу моделей токенизації освіти.

**Структура дослідження.** Дипломна робота складається з переліку умовних скорочень, вступу, двох розділів, висновків та списку використаних джерел.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

#### 1.1 Поняття токеноміки та токеномічної моделі

Технологія блокчейна є рушійною силою Інтернету наступного покоління, яке багато хто називає Web3 - назва, прийнята для децентралізованого інтернету, що працює на крипто-токенах. Саме блокчейн сприяв створенню штучної економіки на основі токенів та криптовалют. Вона отримала назву токеноміка. Токеноміка, або економіка токенів, вивчає економічні інститути та політику виробництва й розподілу товарів та послуг, які були токенозовані.

Вперше ідея токен-економіки була висунута у 1972 році гарвардський психолог Б.Ф. Скіннером. За його припущеннями, подібна економічна модель може допомогти контролювати поведінку людей. Модель економіки токена в основному зосереджена на пропозиції певних одиниць відомої цінності для стимулювання дій і навпаки.

Токеноміка включає концепцію вивчення, проектування та реалізації економічної системи для стимулювання певної поведінки разом з використанням токенів для створення спеціальної міні-економіки. Вона визначає роль, яку токен грає в певній екосистемі (системі економічних відносин між користувачами продукту проекту, власниками токенів та токенами проекту – як засобу доступу або отримання певних бонусів, прописаних у матриці такої екосистеми проекту), і те, як він накопичує цінність. Токеноміка включає теорію ігор, проектування механізмів та грошово-кредитну економіку. Вивчення економіки токенів — досить велика область, де кожен день отримують визнання нові тенденції і принципи.

Сьогодні «економіка токенів» найчастіше відноситься до вивчення, розробки та впровадження економічних систем, що базуються на криптовалютах. На криптовалютних ринках економіка токенів реалізується за допомогою цифрових активів - токенів, а система правил, які описують бажане поведінка, реалізується за допомогою смарт-контрактів.

Токенізація — це перетворення фізичних активів на цифрові токени. Це можливо і широко поширене завдяки блокчейнам смарт-контрактів, таким як Ethereum. Все, що має економічну цінність, наприклад, нерухомість, товари, валюта, може бути токенизовано. Це, в свою чергу, призводить до безлічі потенційних економік токенів.

Токен (з англійської – знак, символ, жетон) – це матеріальне вираження певної цінності у межах певної екосистеми. Токени існували задовго до того, як блокчейн став популярним. Традиційно токени є будь-якою формою економічної цінності. Прикладом токена є ваучер, бонусні бали у програмі лояльності, сертифікати акцій, облигації, членство у клубі або навіть бронювання вечері. Криптографічні токени представляють програмовані активи або права доступу, керовані смарт-контрактом та базовим розподіленим реєстром, таким як мережа блокчейнів. Ці токени часто випускаються за допомогою декількох рядків коду з використанням простого смарт-контракту, що працює в розподіленому реєстрі.

Під час випуску токена кожен проект може наділити його унікальною корисністю за рахунок прив'язки до нього ряду наперед визначених смислових, економічних та технічно гарантованих функцій, що використовуються в екосистемі проекту.

Токени мають кілька варіантів використання, але найчастіше виділяють наступні типи токенів [1]:



- utility tokens (службові токени):

Ці токени призначені для використання з певною метою, зазвичай, в рамках програми або платформи, для якої вони розроблені. Найчастіше службовий токен використовується як спосіб оплати покупок на платформі.

Даний тип токенів випускається компанією, щоб надати своїм користувачам механізм оплати нового продукту або послуги компанії, який, швидше за все, розроблено на основі технології блокчейн.

- security/equity tokens (токени безпеки/токени акцій):

Токени безпеки працюють так само, як і традиційні цінні папери. Також звані токенами акцій, вони діють як акція або частка компанії, яка надається покупцеві після завершення первинної пропозиції монет.

Токени безпеки відрізняються від службових токенів тим, що вони обмежені певними законами та правилами торгівлі акціями. Токени капіталу за своєю природою також можуть бути доступні за межами платформи, де вони були розроблені. Вартість токенів безпеки може збільшуватися або зменшуватися залежно від продуктивності проекту, аналогічно до запасів, чого не можна сказати про службові токени.

- asset-backed tokens (токени активів):

Токени, забезпечені реальними активами, такими як золото, нерухомість чи облігації, називаються токенами активів. Ці токени являють собою вартість реальних активів і можуть використовуватися для купівлі/продажу активів, які вони повертають. Це покращує торгівлю фізичними активами на цифрових платформах.

Як і звичайна економіка, токеноміка має два основні напрямки: мікротокеноміка та макротокеноміка.

Завдання макро- та мікротокеноміки описуються в дослідженні Стіліаноса Кампакіса [2].

- Мікротокеноміку можна розглядати як особливості, що управляють функціями окремих учасників в економіці блокчейну.
- Макротокеноміка складається з функцій, які відносяться до взаємодії з ширшою економікою блокчейна, і вони, як правило, включають управління (наприклад, хто вирішує, яка наступна нова функція), взаємодія учасників усередині екосистеми, а також зовнішні фактори зростання та волатильності токенів. (Наприклад, корисність токена і ліквідність на біржах). Саме взаємодія всіх цих змінних створює так звану економіку токенів.

Важливу роль в токеноміці грає алгоритм консенсусу. Він вирішує найбільшу проблему, з якою стикається розподілена чи багатоагентна система - забезпечує досягнення консенсусу з мінімальними ресурсами, зберігаючи цілісність і прозорість прийнятих рішень.

Існує безліч типів алгоритмів консенсусу. Далі ми розглянемо лише найпопулярніші з них:

- Підтвердження роботи (Proof-of-Work) – найпопулярніший алгоритм консенсусу. Його використовують Біткойн, Лайткойн та Ефіріум. Відповідно до алгоритму PoW, майнери перевіряють транзакції для забезпечення безпеки мережі за допомогою вирішення криптографічних головоломок у блоках. Однак це також найбільш неефективніший спосіб досягнення консенсусу в блокчейні, оскільки він потребує значних обчислювальних потужностей.
- Proof-of-Stake – інший відомий тип алгоритму консенсусу. Він працює шляхом розміщення монет у гаманці. Користувачі, які

поставили свої монети, стають валідатором у мережі. Валідатор перевіряє правильність транзакцій у блоці. Якщо вони вірні, тоді валідатори додають блок у ланцюжок блоків та отримують криптонагороди за свій внесок. Однак, якщо валідатор пропонує додати блок з неточною інформацією, він втрачає частину своїх стейкінгових активів як штраф. Плюс PoS у тому, що він не потребує обчислювальної потужності. Витратним ресурсом у разі є самі токени [3-4].

Правильний алгоритм консенсусу може допомогти розробити ефективну модель економіки токенів. Обидві моделі PoS та PoW для досягнення консенсусу використовують стимули для заохочення членів мережі. Алгоритми консенсусу можуть збільшити участь користувачів у мережі при одночасному підвищенні безпеки.

Отже, кожен проект може створити власну модель обігу токена в екосистемі. Головне при цьому - збереження логіки обороту та використання токенів. Тому виникає можливість для токенизації (часткової токенизації) практично будь-якого бізнесу.

Модель токеноміки - це формалізований опис різних економічних явищ та процесів, що забезпечують функціонування економіки проекту, який базується на токенах. У процесі створення моделі токеноміки розробляються принципи її функціонування, створюється функціональний опис смарт-контрактів для роботи з токенами проекту.

## 1.2 Огляд моделей токеноміки в освіті

У цій роботі ми наводимо огляд найбільш популярних освітніх платформ, які створюють системи платежів та винагород у системі освіти за рахунок використання криптовалют та токеноміки.

**Tutellus** – це децентралізована та токенизована платформа в іспаномовному світі, яка заснована на блокчейні NEM і є найбільшою онлайн-платформою для співпраці у сфері освіти [5]. Це нова освітня модель, яка створює нову систему стимулів, за допомогою якої всі користувачі одержують винагороду безпосередньо в залежності від цінності, яку вони приносять спільноті.

У моделі використовуються два різні типи токенів: TUT і Smart TUT (також відомий як STUT).

- TUT використовується як валюта платформи і для взаємодії з іншими платформами та валютами.
- Smart TUT або STUT не підлягають прямій торгівлі у фіаті, і видається як винагорода користувачів, які роблять внесок в освітню цінність платформи і як показник якості їхньої роботи або навчання. Користувач не може купити STUT будь-якої миті: його потрібно заробити, виконуючи дії всередині платформи. Кількість токенів STUT, якими володіє користувач, дозволяє оцінити ефективність та важливість цього користувача для платформи.

Зацікавлені сторони та організації в екосистемі Tutellus:

1. Студенти: вони платять за навчання та заробляють токени залежно від двох факторів:
  - a. Гроші, які вони вклали;

- в. Взаємодія та внесок, який вони роблять усередині платформи (користувачі можуть бути винагороджені, якщо вони виконують позитивні дії для платформи та спільноти);
2. Вчителі: вони заробляють гроші, продаючи свої курси на платформі.
  3. FC2 (Фонд для творців контенту): банк, до якого постачальники контенту можуть звертатися для отримання платежів. Він дозволяє творцям контенту з хорошою репутацією на платформі отримати кредит, щоб створювати кращий контент.
  4. Стартапи: проекти, народжені навколо Tutellus, яким потрібно зібрати кошти.
  5. Постачальники ліквідності: утримувачі, які посилюють протокол, додаючи ліквідність у фармінг пул [6].

Нижче графічно представлені бізнес-процеси даної платформи (Рис. 1.1).



Рис. 1.1 – Екосистема Tutellus

Детальний опис принципу роботи платформи, її бізнес-модель і токеноміка представлені в [6-7].

**LETSTUDY** – це платформа децентралізованих освітніх послуг на основі блокчейна, основною спеціалізацією якої є розробка та проведення масових відкритих онлайн-курсів (MOOC) [8]. Основна мета LetStudy – створити екосистему для покращення освітньої сфери.

У документації [9] проєкта описується, що Платформа LetStudy включає:

- **E-Learning Platform:** дозволяє учням проходити навчання завдяки відеокурсам (подібно до Udemy, Coursera, Pluralsight...) або брати участь у відеоконференціях 1 на 1 з викладачем у режимі реального часу.
- **LetLearn:** це платформа, яка дозволяє викладачам створювати онлайн-курси з цікавих для них тем. Викладачі можуть створювати курси на LetLearn, завантажуючи відео, PDF-файли та аудіо за допомогою інструментів для створення курсів. Інструктори також можуть взаємодіяти з користувачами через онлайн-форуми.
- **Токен NFT для представлення навчального відеокурсу:** екосистема LetStudy використовуватиме NFT для представлення навчальних відеокурсів для вчителя. Токен NFT містить інформацію для ідентифікації змісту курсу, творця та власника курсу.
- **LetTutor:** глобальна платформа для обміну ресурсами з викладачами (платформа для однорангового особистого навчання через відеоконференції зі взаємодією між вчителями та учнями). Її можна використовувати, щоб знайти репетиторів, вчителів, тренерів та експертів з багатьох країн
- **LetStarter:** децентралізований проєкт, який допомагає стартапам/проєктам/стипендіальним фондам дешево та швидко залучати та обмінювати капітал.

LetStudy випускає криптовалюту під назвою LSC (LetStudy Payment Token), яка працює як еталонна валюта для потоку капіталу у всій екосистемі (LetLearn, LetTutor, LetStarter, LetExchange).

- Основна корисність токена LSC полягає в тому, що він використовується як валюта для оплати навчання на платформі електронного навчання (LetStudy та LetTutor).
- Другою основною корисністю LSC є опція стейкінгу, яка створюватиме пасивний дохід від прибутку від роботи екосистеми LetStudy. Ставлячи LSC, інвестори отримуватимуть частину доходу, отриманого від платформи електронного навчання, торгівлі LetExchange та краудфандингу LetStarter.
- Третьою перевагою токена LSC є управління екосистемою: утримуючи LSC, інвестори можуть голосувати за розробку проекту та надавати найцікавіші проекти, побудовані в екосистемі LSC.

**Metis** - децентралізована освітня платформа на блокчейні. Використовуючи платформу MetisEdu, студенти можуть заробляти під час навчання [10]. MetisEdu забезпечує це завдяки алгоритму Proof of work (доказу роботи) для майнінгу нових токенів MTS.

В системі використовується токен MTS. Він має декілька варіантів використання:

- Токен управління:
  - власники токенів MTS можуть створювати пропозиції щодо управління та голосувати за пропозиції, які безпосередньо впливатимуть на протокол MetisEdu;
  - власники токенів MTS можуть проголосувати за кандидатів на репетиторів MetisEdu, переглянувши їх зразки лекцій;

- **Стейкінг навчальних закладів:**
  - навчальний заклад, який претендує на представлення своїх курсів на MetisEdu, має поставити певну кількість токенив MTS;
  - заклади можуть отримати знижки на комісію платформи;
- **Стейкінг студентів для збільшення заохочувальних винагород:**
  - Користувачі можуть поставити певну кількість MTS токенив на знак своєї прихильності до завершення курсу. Після завершення вони можуть отримати нагороду, яка буде в декілька разів більше;
- Токени MTS можна використовувати як валюту для оплати занять або для отримання винагород за свою роботу з їх проходження.

Щоб отримати токени MTS, користувачам необхідно пройти основні етапи онлайн-курсів. За кожен пройдений етап користувачі отримують відповідну кількість токенив MTS як винагороду за їхню роботу. Нагороди, отримані користувачами, можна порівняти з їхньою активністю під час навчання. Metis-edu надає студентам сертифікати про закінчення курсу у вигляді Non-Fungible Token (NFT). Бізнес-модель платформи Metis представлена на малюнку Рис.1.2.

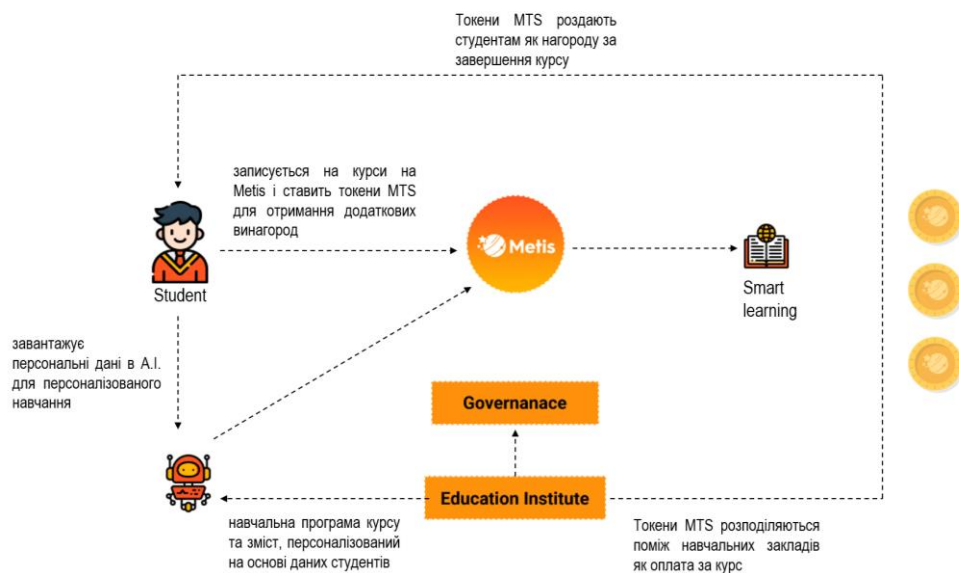


Рис.1.2 – Бізнес-модель платформи Metis



Повний опис системи Metis представлено в [11].

Проаналізувавши різні моделі токеноміки, можемо дійти висновку, що важливою характеристикою кожної моделі економіки токенів є її надійність. Правильно створена модель може забезпечити довгострокову життєздатність блокчейн стартапу та може допомогти уникнути багатьох критичних проблем, тоді як погана модель токеноміки може серйозно вплинути на зростання та інвестиційний потенціал бізнесу. Саме тому важливо вміти аналізувати ефективність моделі економіки токенів, розуміти її динаміку та проблеми.

### **1.3 Огляд методів та інструментів для аналізу моделей токеноміки**

Найкращим підходом до аналізу моделей економіки токенів є використання агентного моделювання. Агентне моделювання (Agent Based Modelling) - це метод імітаційного моделювання, що досліджує поведінку децентралізованих агентів та те, як така поведінка визначає поведінку всієї системи загалом. Даний метод є досить потужним та гнучким. Це робить його особливо ефективним при моделюванні складних систем, наприклад, економічних.

Людська поведінка нелінійна і уривчаста, вона може різко змінюватися. Зазвичай легше описати поведінку окремої людини, ніж динаміку всієї системи. Агентне моделювання дозволяє нам спостерігати глобальну динаміку системи на основі індивідуальної поведінки.

Стіліанос Кампакіс у своїй роботі [12] відмічає, що основна ідея АВМ – моделювання систем шляхом моделювання їх окремих частин. Ця ідея відрізняється від стандартного математичного моделювання, що фокусується на поведінці системи на вищому рівні.

Перевагами даного методу є:

- АВМ може моделювати нелінійну та хаотичну поведінку систем, яку дуже важко відобразити за допомогою інших типів моделей.
- АВМ дозволяє зробити природний опис системи.
- АВМ є гнучким та інтуїтивно зрозумілим.

АВМ пропонує майже безмежні можливості для реалістичного моделювання фактів та областей реального світу і відображення досить складних систем. Модель на основі агента дозволяє досліджувати взаємодію різних параметрів аж до окремих подій.

Для АВМ доступний широкий спектр програмного забезпечення. У даній роботі надається короткий опис технології, а також методів та інструментів, розроблених для моделювання економіки токена, а також для аналізу та вивчення її властивостей.

**cadCAD** (Computer Aided Design of Complex Agent-based Decision System) [13] - середовище моделювання для дослідження, перевірки та автоматизованого проектування складних систем, розроблене командою BlockScience. cadCAD підтримує різні підходи до системного моделювання та може бути легко інтегрований із звичайними робочими процесами емпіричного аналізу даних.

cadCAD використовує стек Python, зручний для аналізу даних, щоб допомогти проектам тестувати, моделювати та перевіряти очікувану поведінку системи. Це движок диференціальних ігор зі складним агентним моделюванням, що включає А/В-тестування, аналіз параметрів та аналіз Монте-Карло – цілий набір інструментів для складного системного аналізу.

Враховуючи модель системи, cadCAD дозволяє моделювати вплив, який може мати на неї набір певних дій. Це допомагає користувачам приймати

обґрунтовані, ретельно перевірені рішення про те, як найкраще модифікувати систему або взаємодіяти з нею для досягнення своїх цілей.

Приклад використання даного інструменту для моделювання токеніки детально описано у роботі [14]. У роботі [15] описують процес використання cadCAD для роботи з розробки економічної системи токенів швейцарського блокчейн-стартапу Insolar.

**Tokesim** [16] – агентно-орієнтований симулятор економіки токенів, розроблений на мові програмування Python. Даний інструмент агентного моделювання спрощує тестування економічних моделей токенів. Він створений з використанням інфраструктури Mesa ABM та OpenRPC.

Мета даного проекту полягає в тому, щоб створити спільно використовувані, розширювані та повторно використовувані компоненти моделювання, які дозволять розробникам моделювати взаємодію зі своїми смарт-контрактами.

Розробники виділяють наступні особливості даного інструменту:

- Наявність підказок типів, які дозволяють зробити агентів та моделі розширюваними;
- Можливість працювати зі смарт-контрактами користувача та імітувати їх;
- Інтеграція з бібліотекою ChartJS для візуалізації даних з фреймворку Mesa;
- Підтримка тестування смарт-контрактів на основі Ethereum.

**R** [17] - мова програмування та середовище для статистичних обчислень та графічного представлення й звітності; інтегрований набір програмних засобів для обробки даних, обчислень та графічного відображення. Це проект GNU, схожий на мову та середовище S, розроблений у Bell Laboratories Джоном Чемберсом та його колегами.

R надає широкий спектр статистичних (лінійне та нелінійне моделювання, класичні статистичні тести, аналіз тимчасових рядів, класифікація, кластеризація і т. д.) і графічних методів та має високу розширюваність. Можемо виділити наступні особливості даної мови програмування:

- R має ефективний засіб обробки та зберігання даних.
- R надає набір операторів для обчислень з масивами, списками, векторами та матрицями.
- R надає великий, узгоджений та інтегрований набір інструментів для аналізу даних.
- R надає графічні можливості для аналізу даних і відображення безпосередньо на комп'ютері, або для друку на папері.

У статті [18] Ravshan S. K описує процес побудови універсальної економічної моделі службових токенів та показує можливості мови R для аналізу токеномічних моделей.

**TokenSPICE** [19] – це інструмент, який моделює токеномізовані екосистеми за допомогою агентно-орієнтованого підходу. Він може використовувати EVM (Ethereum Virtual Machine) у циклі або просто агентів на основі Python. Це може допомогти у проектуванні, налаштуванні та верифікації токеномізованих систем.

Основна ідея полягає в тому, що TokenSPICE моделює простим запуском циклу. На кожній ітерації кожен агент у списку з'єднань робить крок. Список з'єднань пов'язує набір агентів для взаємодії певним чином. Кожен агент – це клас. Він має гаманець Ethereum, і він працює, щоб заробляти гроші. Агенти можуть бути написані на чистому Python або з бекендом на основі EVM. TokenSPICE можна використовувати як у процесі проектування токена, і для перевірки токеномізованих систем.

**IMS.** У даній роботі пропонується використовувати алгебраїчний підхід до моделювання токеноміки, що реалізується в рамках системи інсерційного моделювання (IMS) [20]. Інсерційне моделювання фокусується на побудові моделей та вивченні взаємодії агентів та середовищ у складних розподілених багатоагентних системах [21].

Система інсерційного моделювання (IMS) є розширенням APS (система програмування алгебри). Інсерційне моделювання - це підхід до моделювання складних розподілених систем на основі теорії взаємодії агентів та середовищ. Інсерційна модель системи представляє цю систему як композицію середовища та занурених в неї агентів.

Говорячи про агентів та середовища, мають на увазі як технічні, так і реальні системи – фізичні, біологічні та соціальні, а взаємодії, що цікавлять, – це насамперед інформаційні взаємодії, абстраговані від фізичних процесів, якими вони супроводжуються. Якщо переходити до математичних уточнень, то як поняття агента вибирають найбільш абстрактне математичне поняття, що моделює системи, які еволюціонують у часі. Таким чином, агент – це розмічена транзиційна система, стан якої визначається з точністю до бісимуляційної або трасової еквівалентності [22].

Середовище — це агент, який має функцію занурення. Точніше, середовище - це множина  $\langle E, C, A, \text{Ins} \rangle$ , де  $E$  - набір станів середовища (ототожнених поведінкою),  $C$  - це сукупність дій середовища,  $A$  - множина дій агентів, занурених у середовище,  $\text{Ins}: E \times F(A) \rightarrow E$  - функція занурення. Тут  $F(A)$  - це повна алгебра поведінки агентів з набором дій  $A$ . Таким чином, кожне середовище  $E$  допускає занурення будь-якого агента з набором дій  $A$ .

Поведінка агентів описується алгеброю поведінки. У цій алгебрі є дві операції: префікс  $a.u$  та недетермінований вибір поведінки  $u + v$ , де  $a$  – дія,  $u$  та

$v$  - поведінка. Є також три термінальні константи: успішне завершення  $\Delta$ , тупикова ситуація  $0$  та дивергентна поведінка  $\perp$  [22].

Взаємодія між агентами здійснюється із використанням базових протоколів. Вони застосовуються для представлення інсерційних моделей. Загальні відомості про базові протоколи представлені в [23].

Кожен базовий протокол є трійкою Хоара  $\alpha \rightarrow \langle P \rangle \beta$ , де  $P$  — процес,  $\alpha$  і  $\beta$  — передумова та постумова процесу  $P$  відповідно.  $\alpha$  та  $\beta$  представлені логічними виразами базової мови та визначають умови на множині станів системи. Кожен базовий протокол визначає властивості системи і може розумітися як твердження темпоральної логіки: якщо передумова істинна, то процес протоколу може розпочатися, і після його успішного завершення постумова має бути істинною [22].

Даний підхід дозволяє використовувати конкретне та символічне моделювання. Конкретне моделювання – це тип моделювання, у якому значення моделі ініціалізується певними значеннями. У свою чергу, це дає нам змоделювати ситуацію і зробити візуалізацію на основі отриманих результатів. Символьне моделювання, на відміну від конкретного, виражається з допомогою формул. Такий підхід до моделювання ефективніший, тому що він дозволяє максимально охопити всі стани моделі, що, у свою чергу, дозволяє продуктивніше тестувати різні її властивості.

Методи алгебричного програмування та інсерційного моделювання можуть бути використані для формалізації та аналізу властивостей моделі токеноміки [24-25], юридичних [26] та економічних моделей.

## **Висновки до розділу**

У даному розділі нами було розглянуто поняття токену, токеноміки, токенизації та токеномічної моделі. Описано основні типи токенів та їх призначення.

Ми зробили огляд найбільш популярних освітніх платформ у світі, які створюють системи платежів та винагород у системі освіти за рахунок використання криптовалют та токеноміки. А саме, Tutellus, LetStudy, Metis. Описали особливості кожної з них.

Ми дійшли висновку, що найкращим підходом до моделювання токеноміки є агентне моделювання. Нами було розглянуто інструменти, які використовуються для аналізу та тестування моделей токеноміки, а саме cadCAD, Tokesim, R та TokenSPICE. Проаналізували можливості кожного з цих інструментів і дійшли висновку, що вони не надають достатньо можливостей для моделювання економіки токенів. Саме тому, нами було обрано систему інсерційного моделювання (IMS) у якості інструменту для аналізу токеномічних моделей.

## РОЗДІЛ 2

## АНАЛІЗ МОДЕЛІ ТОКЕНІЗАЦІЇ ОСВІТИ

## 2.1 Модель токенізації освіти

У загальному вигляді модель токеноміки є описом руху токенів за періодами та розподілу між агентами. Агентами є зацікавлені сторони, тобто особи, які мають законний інтерес у продуктивності економіки токенів. Це можуть бути, наприклад, інвестори чи спекулянти, користувачі чи сама організація.

У цій роботі описується модель економіки токенів у межах одного вищого навчального закладу. Список сутностей у моделі та основні дії між ними представлені на діаграмі взаємодії агентів.

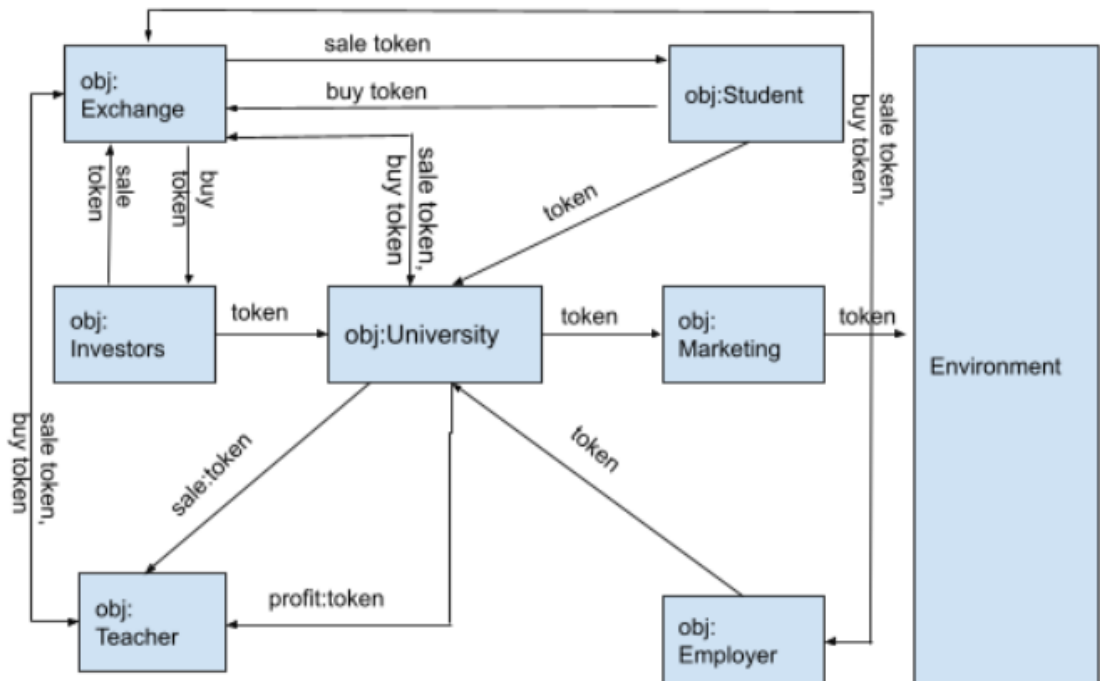


Рис. 2.1- Діаграма взаємодії агентів у даній моделі токеноміки



Далі розглянемо більш детально кожен тип агентів та його дії в рамках даної моделі:

**1. Викладач (obj:Teacher).** Викладачі створюють та розміщують курси на платформах університету.

У цій моделі викладачі отримують основну оплату від університету за роботу та доплату у вигляді бонусів, розмір якої визначається залежно від активності викладача. Розмір доплати формується на основі:

- результатів наукової діяльності: місце в рейтингу Publications [27] за індексом Хірша, кількістю документів та цитувань у наукометричних базах даних Scopus, WoS, Google Scholar та Semantic Scholar.

- відгуків студентів про викладача: результати анонімних опитувань студентів, які проводяться за допомогою KSU Feedback [28].

Студенти мають можливість оцінити викладача за багатьма критеріями, основні з яких:

- Викладач подає матеріал доступно і зрозуміло та пояснює головні моменти (або складні питання);
  - Чітко формулює завдання для самостійної роботи;
  - Впродовж вивчення дисципліни застосовуються навчально-методичні посібники або рекомендації, розроблені викладачем;
  - Об'єктивність в оцінюванні знань, умінь та навичок студентів та інше.
- навантаження: Tutor [29].
  - розроблених курсів.

Розподіл доплат за результати наукової діяльності між викладачами відбуватиметься відповідно до їхнього місця у рейтингу в системі Publications. Для кожної наукометричної бази буде виділено певну кількість токенів.

Наприклад:

- Scopus - 200 токенів,
- WoS - 150 токенів,
- Semantic Scholar - 100 токенів,
- Google Scholar - 50 токенів.

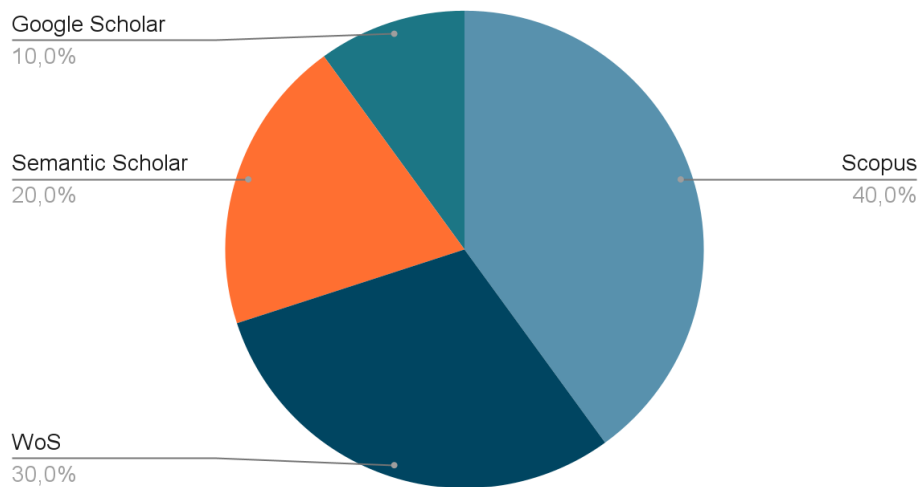


Рис 2.2 - Розподіл токенів для премій

Викладач, який посідає перше місце у рейтингу, отримує 10% від загальної суми доплати, кожен наступний отримує 10% від залишку суми.

Приклад розподілу токенів на основі рейтингу викладачів за кількістю документів у Scopus (всього виділено 200 токенів):

Таблиця 2.1

## Розподіл бонусів серед викладачів

<b>Місце у рейтингу</b>	<b>Прізвище, Ім'я</b>	<b>Сума доплати в токенах</b>
1	Teacher_1	20,000
2	Teacher_2	18,000
3	Teacher_3	16,200
4	Teacher_4	14,580
5	Teacher_5	13,122
6	Teacher_6	11,810
7	Teacher_7	10,629
8	Teacher_8	9,566
9	Teacher_9	8,609
10	Teacher_10	7,748

Ще одним визначальним фактором під час розподілу токенів є тривалість, насиченість курсів, а також кількість студентів, які на них записалися. Курс має бути насичений матеріалом: тексти лекцій, відео/аудіо-матеріали, інтерактивні завдання, тести.

Чим більша тривалість курсу, чим більша кількість студентів, які на нього зареєструвалися, і чим кращі результати, які вони продемонстрували під час навчання, тим більше токенів отримує викладач.

Цей підхід дозволяє стимулювати викладачів, оскільки активність їх діяльність безпосередньо впливає їх винагороди. Це підвищує мотивацію, впливаючи якість курсів, а водночас і якість навчання, одержуваного студентами.

Основні дії агенту **obj:Teacher** у рамках моделі:

- отримання основної зарплати від університету за навчання студентів (у токенах).
- одержання доплати від університету (у токенах).
- покупка токенів на біржі (купівля здійснюється за фіатні гроші за курсом біржі).
- продаж токенів на біржі (продаж токенів здійснюється за курсом біржі, отримує фіатні гроші).

**2. Студент (obj:Student).** Студенти можуть обирати курси, на які вони хочуть записатися, та платити університету за доступ до них. Студенти також нагороджуються токенами за виконання певних дій.

Дії студентів, які винагороджуються токенами:

- успішність. Успішність студента безпосередньо впливає на кількість токенів, яку він отримує. Чим краща успішність, тим більша винагорода.
- наукова діяльність. Написання наукових статей, участь у конференціях також будуть винагородженні.

- соціально-гуманітарна діяльність (спортивні досягнення, волонтерська діяльність, участь у культурному, громадському житті факультету/університету).
- інші дії, які необхідно стимулювати: проходження опитувань (KSU Feedback).

Основні дії агента obj:Student:

- покупка токенів на біржі.
- продаж токенів на біржу.
- отримання токенів від університету за активну діяльність.
- оплата університету за навчання (оплата здійснюється токенами).

Для студентів такий підхід дає переваги, оскільки тепер вони мають можливість обрати курси, які їх найбільше цікавлять, а також вони можуть вирішити, з якими викладачами вони б хотіли працювати. Студенти зацікавлені в активній науковій та громадській діяльності, оскільки всі їхні дії будуть винагороджені.

**3. Роботодавець (obj:Employer).** Роботодавцями є компанії, фірми або підприємства, які потребують кваліфікованих співробітників та зацікавлені у співпраці з університетами для пошуку потенційних кандидатів серед студентів.

Університет надає роботодавцям доступ до результатів навчання студентів.

Основні дії агенту obj:Employer:

- плата університету за доступ до результатів та анкет студентів.
- покупка токенів на біржі.
- продаж токенів на біржу.

Роботодавець може отримати доступ тільки до даних усієї групи, при цьому оплата залежить від показників середньої успішності студентів: чим вищий загальний середній бал усіх студентів цієї групи, тим більше токенів платить роботодавець.

Наприклад, група зі значенням середнього балу 3 - 15 токенів,

3,5 - 20 токенів,

4 - 25 токенів,

4,5 - 30 токенів,

5 – 35 токенів.

Роботодавці мають можливість визначати студентів яких спеціальностей вони хочуть профінансувати. Наприклад, ІТ-компанії можуть зарезервувати частину своїх токенів у загальному резерві для нагородження студентів ІТ-спеціальностей.

#### **4. obj:Marketing**

Університет витрачає токени на залучення нових студентів. Це включає рекламну кампанію, організацію зустрічей з абітурієнтами, таких як дні відкритих дверей та ярмарки вакансій.

#### **5. obj:Investor**

Основні дії:

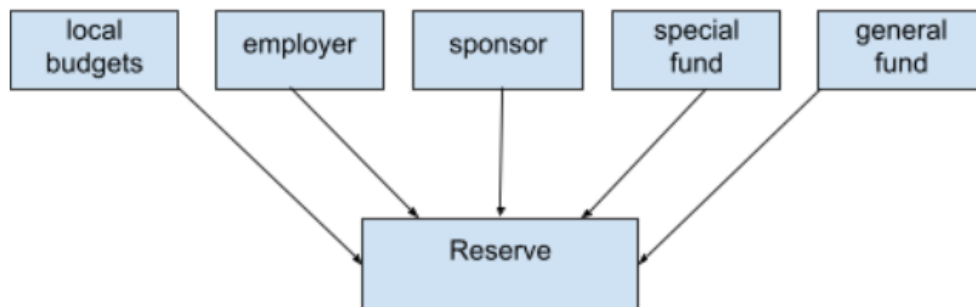
- інвестиції в університет.
- покупка токенів на біржі.
- продаж токенів на біржу.

**6. Університет (obj:University).** Саме університет є центральною сутністю даної моделі. Він є своєрідною платформою для взаємодії викладачів та студентів.

Основні дії агенту obj:University в рамках моделі:

- платить заробітну плату та доплати викладачам (у токенах).
- отримує токени від роботодавців (компаній) за доступ до анкет та результатів студентів.
- витрачає токени на залучення нових студентів (реклама, проведення заходів).
- витрачає токени на інші витрати.
- отримує токени від інвесторів.
- отримує оплату за навчання від студентів (у токенах).
- продає токени на біржу.
- покує токени на біржі.

Фінансування в резерв університету надходить від держави (загальний фонд), від студентів як оплата за навчання (спеціальний фонд), від спонсорів,



роботодавців та від місцевих бюджетів (міських, обласних).

Рис. 2.3 – Джерела надходження фінансів в резерв

У даному розділі було представлено теоретичний опис моделі. Наша мета полягала в тому, щоб визначити агентів та їхні дії в рамках моделі, а також розробити діаграму життєвого циклу токена. Далі ми представимо фрагмент формалізації токенизації елементів освітньої моделі з використанням методів алгебраїчного та інерційного моделювання.

## 2.2 Формалізація моделі токеноміки

Токеноміку ми розглядаємо як середовище, набір агентів та дій. Агенти можуть взаємодіяти з іншими агентами за допомогою дій у середовищі. Середовище також може бути агентом і може бути занурено в середовище вищого рівня абстракції. Під час симуляції агенти взаємодіють із середовищем, впливають на нього та інших агентів, а також на самих себе.

Таким чином, токеноміку університету ми розглядаємо як багаторівневу архітектуру з агентами, які взаємодіють за допомогою внутрішніх бізнес-правил університету.

Процес створення моделі складається з наступних етапів:

- визначення та опис основних агентів моделі;
- опис ключових атрибутів вибраних агентів;
- опис основних протоколів моделі;
- дизайн поведінки агента.

Прикладом агента у цій моделі може бути викладач чи студент, а прикладом середовища може бути університет, у якому ці агенти взаємодіють. Усі агенти нашої моделі представлені у попередньому розділі.

У системі IMS агентів можна представити наступним чином. Нижче наведено фрагмент формалізації агента *Teacher* у синтаксисі інерційного моделювання.

```
Teacher : obj(
    token : real,
    type : TypeTeacher,
```



```

    coefWork : real,
    scientificActivity : obj(
        rankSCOPUS : int,
        rankWOS: int,
        rankGOOGLE_SHOLAR : int,
        rankSEMANTIC : int,
        .....
    ),
    teachingActivity : obj(
        rankQualityLectures : int,
        .....
    )
)
)

```

Введемо перерахований тип який вказуватиме на поточну посаду даного викладача.

```

TypeTeacher: (ASSISTANT, LECTURER, SENIOR_LECTURER,
ASSISTANT_PROFESSOR, PROFESSOR);

```

Розглянемо детальніше атрибути агента типу Teacher:

- token -атрибут типу int, показує поточну кількість токенів у агента типу Teacher;
- type – атрибут типу TypeTeacher, що вказує на поточну посаду викладача;
- coefWork – атрибут типу real, показник поточного навантаження даного викладача;
- rankSCOPUS - атрибут типу int, що вказує на поточну позицію у рейтинговій системі Publication щодо показників наукометричної бази даних Scopus;

- rankWOS - атрибут типу int, що вказує на поточну позицію в рейтинговій системі Publication щодо показників наукометричної бази даних Web of Science;
- rankGOOGLE\_SHOLAR атрибут типу int, що вказує на поточну позицію в рейтинговій системі Publication щодо показників наукометричної бази даних Google Scholar;
- rankSEMANTIC атрибут типу int, що вказує на поточну позицію в рейтинговій системі Publication щодо показників наукометричної бази даних Semantic Scholar;
- rankQualityLectures - атрибут типу int, що вказує на поточну позицію цього викладача. Рейтинг створюється за показниками системи зворотного зв'язку KSU Feedback.

Всі дані про агентів та можливий прогнозований та початковий розподіл токенів записуються у файл опису середовища. Кожен агент у певний час виконує якусь дію та змінює середовище, а саме розподіл токенів. Дії виконуються відповідно до поведінки, представленої у формальному вигляді у файлі поведінки. За допомогою цього опису можна змоделювати рух токенів та вивчити властивості всього проекту.

Задано наступні початкові значення:

```
t1.token == 0 &&
```

```
t1.type == LECTURER &&
```

```
t1.coefWork == 1.1 &&
```

```
t1.scientificActivity.rankSCOPUS == 3 &&
```

```
t1.scientificActivity.rankWOS == 5 &&
```

```
t1.scientificActivity.rankGOOGLE_SHOLAR == 7 &&
```

```
t1.teachingActivity.rankQualityLectures == 1.
```

Взаємодія між агентами здійснюється за допомогою базових протоколів. Приклади кількох з них наведені нижче.

Зарплата викладача у даній моделі розраховується так:

$$t1.token = salary + premium.$$

- **salary** - фіксована зарплата викладача (у токенах), яка залежить від посади викладача та від показника його поточного навантаження. Протокол Salary описує процес нарахування зарплати викладачам.

```
Salary = (forall (teacher:Teacher, p:Period)
  (month>=SalaryStartPeriod(p) && month<=SalaryEndPeriod(p)) -
  >"Salary payment for teachers"
  (teacher.token = teacher.token +
  teacher.coefWork*coefSalary(teacher.type)/tokenPrice)).
```

Розглянемо атрибути формалізації дій детальніше:

- token - атрибут типу int, що показує поточну кількість токенів у певного агента типу Teachers;
- coefWork - атрибут типу real, що показує робоче навантаження викладача;
- coefSalary – функціональний атрибут coefSalary:(TypeTeacher)->real повертає відповідну фіксовану заробітну плату, яка залежить тільки від посади викладача. Приймає аргумент типу TypeTeacher і повертає значення дійсного типу.

Наприклад, *coefSalary (LECTURER) == 14 000*;

- SalaryStartPeriod – функціональний атрибут, який показує початок періоду виплати заробітної плати;
- SalaryEndPeriod – функціональний атрибут, який показує кінець періоду виплати заробітної плати.

- **premium** – надбавки, які формуються на основі рейтингів. Враховується поточна позиція викладача у рейтинговій системі Publication щодо показників наукометричних баз даних Scopus, Web of Science, Google Scholar та Semantic Scholar.

Протокол Premium:

```
Premium = Forall(teacher:Teacher, p:Period) (1)->"Salary payment premium"

    (teacher.token = teacher.token +
PREMIUM(SCOPUS,teacher.scientificActivity.rankSCOPUS) +
PREMIUM(WOS,teacher.scientificActivity.rankWOS) +
PREMIUM(GOOGLE_SCHOLAR,teacher.scientificActivity.rankGOOGLE_SHOLAR
) + PREMIUM(SEMANTIC_SCHOLAR,
teacher.scientificActivity.rankSEMANTIC) + PREMIUM(Feedback,
teacher.teachingActivity.rankQualityLectures);
),
```

де PREMIUM - функціональний атрибут, який у якості параметрів приймає назву наукометричної бази даних та рейтингове місце викладача в таблиці, а повертає розмір доплати в токенах. PREMIUM(type,int)-> real.

Наприклад:

```
PREMIUM(SCOPUS,1) == 20
PREMIUM(SCOPUS,2) == 18
....
PREMIUM(WoS,1) == 18.
```

Тоді розподіл бонусів серед викладачів можна встановити наступним чином:

```
Forall(i:int) (1<i<=countTeachers (
```

```

    PREMIUM(SCOPUS,i) ==
totalTokenPremiumScopus*coefDistrbutionPremium &&

    totalTokenPremiumScopus = totalTokenPremiumScopus -
totalTokenPremiumScopus*coefDistrbutionPremium
),

```

де:

- totalTokenPremiumScopus - загальна сума токенів, яка була виділена на доплати в рамках конкретної наукометричної бази;
- coefDistrbutionPremium - коефіцієнт розподілу (у нашій моделі дорівнює 10%);
- countTeachers - загальна кількість викладачів.

Нижче наведено формалізацію дії продажу токенів на біржу у графічному форматі MSC (Рис.2.4).

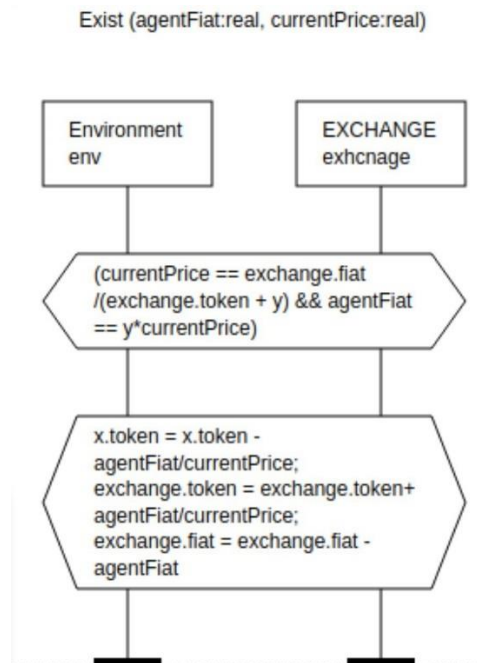


Рис. 2.4 - Графічне представлення протоколу sellExchangeToken

Протокол продажу токенів – протокол з параметрами  $x$  та  $y$ . Протоколи з параметрами використовуються у випадку, коли є два або більше агентів одного типу і щоб не повторювати основний протокол для кожного агента окремо, необхідно ввести параметр протоколу, що містить назву агента. Конкретні назви агентів-учасників повинні бути визначені в описі середовища (у нашому випадку: `student` та `teacher`).

Наприклад:

```
.sellExchangeToken(student, student.token*student.sale)
```

```
.sellExchangeToken(teacher, teacher.token*teacher.sale).
```

Поведінку агентів задали у вигляді алгебри поведінки. Вона може бути представлена, як послідовна і паралельна композиція поведінки в наступному вигляді:

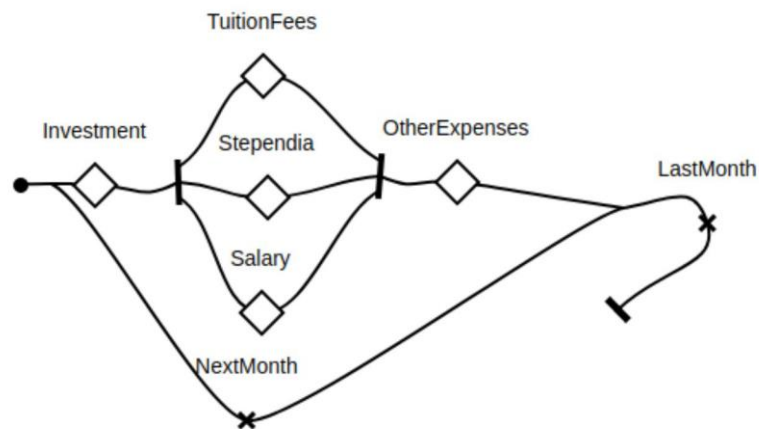


Рис. 2.5 – UCM-діаграма

Кожна з цих поведінок, у свою чергу, є кінцевою послідовністю протоколів. Розглянемо фрагмент алгебри поведінки SALARY. Нарахування зарплати представимо наступним чином:

$$SALARY = Salary.Premium.b1 + not\_Salary.b1$$

$$b1 = \dots$$

- Salary – дія нарахування заробітної плати.
- Premium – дія нарахування доплати до основної зарплати.

Слід зазначити, що дії Salary і not\_Salary взаємно виключають одна одну: якщо буде застосований Salary, тоді not\_Salary буде не застосований.

### **Висновки до розділу**

У даному розділі нами було описано моделі економіки токенів у межах одного вищого навчального закладу. Ми визначили основних агентів та їхні дії в рамках моделі, а також розробити діаграму життєвого циклу токена. Нами також було представлено фрагмент формалізації токенізації елементів освітньої моделі з використанням методів алгебраїчного та інерційного моделювання.

Основною метою формалізації є пошук помилок моделювання, недоліків або можливих протиріч; пошук ефективних сценаріїв роботи системи.

## ВИСНОВКИ

Токеноміка є досить новою галуззю, яка стрімко розвивається та представляє великий інтерес для науковців та розробників по всьому світу. У цій роботі нами було розглянуто поняття токеноміки, токену та токеномічного моделювання.

Ми представили огляд найбільш популярних освітніх платформ у світі, які створюють системи платежів та винагород у системі освіти за рахунок використання криптовалют та токеноміки. Серед них Tutellus, LetStudy, Metis.

Проаналізувавши основні етапи розробки моделі токеноміки, ми дійшли висновку, що для успішного функціонування такої моделі у реальному житті, важливо мати можливість аналізувати та тестувати її ще на етапі проектування. Дана задача потребує використання спеціальних інструментів. Нами були розглянуті системи, що використовуються для аналізу, верифікації та тестування моделей токеноміки. Проаналізовано сильні та слабкі сторони кожної з представлених технологій.

Нами було запропоновано використання методів алгебраїчного програмування та інерційного моделювання для аналізу моделей токеноміки. Даний підхід до моделювання є більш ефективним, оскільки він дозволяє максимально охопити всі стани моделі, це, у свою чергу, дозволяє більш продуктивно тестувати різні її властивості.

У ході роботи була розроблена модель токенизації елементів фінансової моделі, описано її основних агентів та їх дії в рамках моделі.

Нами була представлена формалізація основних сутностей цієї моделі. Основною метою формалізації є пошук помилок моделювання, недоліків або можливих протиріч; пошук ефективних сценаріїв роботи системи.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. The Various types of Crypto Tokens [Електронний ресурс] // Medipedia - [сайт]. 2018. – Режим доступу: <https://medium.com/@medipedia/the-various-types-of-crypto-tokens-26bab8f6622c> (дата звернення: 07.12.2021)
2. Kampakis, Stylianos. Three case studies in tokenomics. The Journal of The British Blockchain Association. 2018. 1.2: 6325.
3. Tokenomics – The Beginner’s Guide [Електронний ресурс] // 101 Blockchains [сайт]. 2021. – Режим доступу: <https://101blockchains.com/tokenomics/>
4. Beginner’s Guide: What Is Consensus Algorithm? [Електронний ресурс] // 101 Blockchains [сайт]. 2021. – Режим доступу: <https://101blockchains.com/what-is-consensus-algorithm/>
5. Tutellus [Електронний ресурс] // Tutellus [сайт]. 2021. – Режим доступу: <https://www.tutellus.io/>
6. Whitepaper [Електронний ресурс] // Tutellus [сайт]. 2022. – Режим доступу: <https://docs.tutellus.com/tutellus/whitepaper>
7. Empowering people through education [Електронний ресурс] // Tutellus [сайт]. 2018. – Режим доступу: [https://lib.tutellus.com/ico/pdf/tutellus.io\\_whitepaper\\_v3.25\\_en.pdf](https://lib.tutellus.com/ico/pdf/tutellus.io_whitepaper_v3.25_en.pdf)
8. LetStudy [Електронний ресурс] // LetStudy [сайт]. 2021. – Режим доступу: <https://letstudy.io/>
9. Letstudy. Blockchain-Based Online Education Platform [Електронний ресурс]. 2020. – Режим доступу: <https://letstudy.io/whitepaper.pdf>

10. Decentralised Massive Open Online Courses [Электронный ресурс] // Metis [сайт]. 2020. – Режим доступа: <https://www.wemetis.com/>
11. MetisEdu Whitepaper [Электронный ресурс] // Metis [сайт]. 2020. – Режим доступа: [https://www.wemetis.com/wp-content/uploads/2021/11/211122\\_metis\\_whitepaper\\_en.pdf](https://www.wemetis.com/wp-content/uploads/2021/11/211122_metis_whitepaper_en.pdf)
12. Is agent-based modelling the best tool for tokenomics? [Электронный ресурс] // TheDataScientist [сайт]. 2018. – Режим доступа: <https://thedata scientist.com/agent-based-modelling-tokenomics/>
13. cadCAD [Электронный ресурс] // cadCAD [сайт]. 2022. – Режим доступа: <https://cadcad.org/>
14. ZHANG, Zixuan. Engineering Token Economy with System Modeling. arXiv preprint arXiv:1907.00899, 2019.
15. KIM, Henry M., et al. Token Economics in Real Life: Cryptocurrency and Incentives Design for Insolar's Blockchain Network. Computer, 2021, 54.1: 70-80.
16. Tokesim [Электронный ресурс] // GitHub [сайт]. 2020. – Режим доступа: <https://github.com/tokesim/tokesim#about-the-project>
17. What is R? [Электронный ресурс] // R [сайт]. 2022. – Режим доступа: <https://www.r-project.org/about.html>
18. Ravshan S. K. Utility tokens: discussion, economic model and simulation in R [Электронный ресурс] // Hackernoon [сайт]. 2018. – Режим доступа: <https://hackernoon.com/utility-tokens-discussion-economic-model-and-simulation-in-r-798c0ff3d26c>
19. TokenSPICE [Электронный ресурс] // GitHub [сайт]. 2021. – Режим доступа: <https://github.com/tokenspice/tokenspice>

20. Letichevsky, A., Letychevskiy, O., Peschanenko, V.: Insertion Modeling and Its Applications. *Computer Science Journal of Moldova* 24 (3), 357-370 (2016).
21. Letichevsky, A., Gilbert, D.: A model for interaction of agents and environments. In: *International Workshop on Algebraic Development Techniques*, pp. 311-328. Springer, Berlin, Heidelberg (1999).
22. Letichevsky, Alexander A.; Kapitonova, Julia V. Algebraic programming in the APS system. In: *Proceedings of the international symposium on Symbolic and algebraic computation*. 1990. p. 68-75.
23. Letichevsky, A., Kapitonova, J., Letichevsky Jr, A., Volkov, V., Baranov, S., Weigert, T.: Basic protocols, message sequence charts, and the verification of requirements specifications. *Computer Networks* 49(5), 661-675 (2005).
24. Letychevsky, O., Peschanenko, V., Radchenko, V., Poltoratzkyi, M., Kovalenko, P., & Mogylo, S. (2019, May). Formal Verification of Token Economy Models. In *2019 IEEE International Conference on Blockchain and Cryptocurrency (ICBC)* (pp. 201-204). IEEE.
25. Letychevskiy, O., Peschanenko, V., Poltoratskyi, M., & Tarasich, Y. (2019, June). Our Approach to Formal Verification of Token Economy Models. In *International Conference on Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications* (pp. 348-363). Springer, Cham
26. Letichevsky, A., Letychevskiy, O., Peschanenko, V., & Poltorackij, M. (2017, September). An Algebraic Approach for Analyzing of Legal Requirements. In *2017 IEEE 25th International Requirements Engineering Conference Workshops (REW)* (pp. 209-212). IEEE.

27. Херсонський державний університет [Електронний ресурс] // Publication [сайт]. 2022. – Режим доступу: <http://publication.kspu.edu>
28. KSU Feedback [Електронний ресурс] // KSU Feedback [сайт]. 2022. – Режим доступу: <http://feedback.ksu.ks.ua/>
29. Tutor [Електронний ресурс] // Tutor [сайт]. 2022. – Режим доступу: <http://tutor-net.kspu.edu/swagger/ui/index>