

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

**АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ
УПРАВЛІННЯ ТА ПРИЛАДИ
АВТОМАТИКИ**

Всеукраїнський міжвідомчий
науково-технічний збірник

Заснований у 1965 р.

Випуск 180

Харків
2024

У збірнику наведено результати досліджень, що стосуються використання моделей і методів штучного інтелекту в автоматизованих та автоматичних інформаційних системах різного призначення. Запропоновано нові підходи та рішення в галузі управління ІТ-компаніями та їхніми ІТ-проектами, управління послугами, управління гуманітарними організаціями та спортивною діяльністю.

Для викладачів університетів, науковців, фахівців, аспірантів.

The collection contains research results related to the use of models and methods of artificial intelligence in automated and automatic information systems for various purposes. New approaches and solutions are proposed in the field of management of IT companies and their IT projects, management of services, management of humanitarian organizations and sports activities.

For university professors, researchers, specialists, graduate students.

Редакційна колегія:

В.В. Семенець, д-р техн. наук, проф. (гол. ред.), *В.М. Левикін*, д-р техн. наук, проф. (відпов. ред.), *М.В. Євланов*, д-р техн. наук, проф. (відпов. секр.), *Є.В. Бодяньський*, д-р техн. наук, проф., *І.В. Гребеннік*, д-р техн. наук, проф., *А.Л. Єрохін*, д-р техн. наук, проф., *А.О. Каргін*, д-р техн. наук, проф., *Б.І. Мороз*, д-р техн. наук, проф., *І.Ш. Невлюдов*, д-р техн. наук, проф., *К.Е. Петров*, д-р техн. наук, проф., *І.В. Рубан*, д-р техн. наук, проф., *С.Г. Удовенко*, д-р техн. наук, проф., *О.Є. Федорович*, д-р техн. наук, проф., *В.О. Філатов*, д-р техн. наук, проф., *Г.З. Халімов*, д-р техн. наук, проф.

Рішення Національної ради про реєстрацію
Ідентифікатор медіа

№ 1410 від 25.04.2024 р.
R30-03874

Адреса редакційної колегії: Україна, 61166, Харків, просп. Науки, 14, Харківський національний університет радіоелектроніки, кімн. 254, тел. (057) 70-21-451

© Харківський національний університет
радіоелектроніки, 2024

ЗМІСТ

ЧАЛИЙ С.Ф., ЛЕЩИНСЬКИЙ В.О. ПОБУДОВА ПОЯСНЕНЬ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ ФОРМУВАННЯ КАУЗАЛЬНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ.....	4
ГРЕБЕННИК І.В., КОВАЛЕНКО О.А. НЕЧІТКА МОДЕЛЬ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОЇ СОРТУВАЛЬНОЇ ЛІНІЇ ПОШТИ.....	16
ПАНФЬОРОВА І.Ю., ШУТЬКО В.В. РОЗРОБКА МЕТОДУ ПАРАМЕТРИЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ ТРИВАЛОСТІ ОПЕРАЦІЙ ІТ-ПРОЄКТУ МІГРАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДО ХМАРНОЇ ПЛАТФОРМИ.....	27
БІЛОВА Т.Г., ДЬОМІНА В.М., ПОБІЖЕНКО І.О., ОСТАПЕНКО О.О. МЕТОД МІРКУВАНЬ НА ПРЕЦЕДЕНТАХ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В ГУМАНІТАРНОМУ РЕАГУВАННІ.....	36
ЯРМАК В.В. РОЗРОБКА БІЗНЕС-МОДЕЛІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НАЙМУ НОВИХ СПІВРОБІТНИКІВ ДО ІТ-КОМПАНІЙ.....	45
ЛЕВИКІН В.М., ДІДЕНКО Д.О., АЛЬОШКІН О.А. МЕТОД ФОРМУВАННЯ ЗАЯВОК ПРИРОДНОЮ МОВОЮ НА ОСНОВІ ВДОСКОНАЛЕНОЇ МОДЕЛІ VERT.....	55
ЄВЛАНОВ М.В., ВАСИЛЬЦОВА Н.В., УВАРОВА В.О. РОЗРОБКА МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИСТУПІВ СПОРТСМЕНІВ ТА КОМАНД У СПОРТИВНИХ ЗМАГАННЯХ.....	72
УДОВЕНКО С.Г., ЗАТХЕЙ В.А., ТЕСЛЕНКО О.В. МОДУЛЬНА СИСТЕМА ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ БАГАТОЗВ'ЯЗНИМИ ПРОЦЕСАМИ ЗА НАЯВНОСТІ СТРУКТУРНИХ ЗБУРЕНЬ.....	88
РЕФЕРАТИ.....	104

*С.Ф. ЧАЛИЙ, В.О. ЛЕЩИНСЬКИЙ***ПОБУДОВА ПОЯСНЕНЬ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ ФОРМУВАННЯ КАУЗАЛЬНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ**

Розглянуто задачі побудови пояснень в інтелектуальних інформаційних системах, представлених у вигляді «чорного ящика». Розроблено узагальнену каузальну модель пояснення, яка об'єднує темпоральну, причинно-наслідкову та цільову складові. Модель забезпечує побудову багатоаспектного пояснення, що може бути використано не лише після реалізації рішення, а й до початку його імплементації. Запропоновано узагальнений каузальний метод формування пояснення на основі побудови та уточнення каузальних залежностей між вхідними даними та результатом інтелектуальної системи. Метод орієнтований на автоматизацію побудови та уточнення пояснень як для розробників, так і для кінцевих користувачів.

1. Вступ

Інтелектуальні інформаційні системи призначені для збору, аналізу та обробки інформації та знань при вирішенні задач підтримки прийняття рішень. Характерна особливість сучасних інтелектуальних систем полягає у здатності адаптуватися до змін зовнішнього середовища та вчитися на минулому досвіді. Такі системи використовують підходи, засновані на знаннях, а також машинне навчання при формуванні рішень. Вони дають можливість кінцевим користувачам приймати обґрунтовані рішення при вирішенні складних проблем у сферах охорони здоров'я, фінансів, маркетингу, освіти тощо [1]. Внаслідок використання машинного навчання на даних, що відображають практичні рішення актуальних задач в заданій предметній області, алгоритми прийняття рішень в інтелектуальних системах зазвичай є непрозорими і, отже, незрозумілими для користувачів. Відсутність інформації щодо логіки формування результату в інтелектуальних системах знижує довіру користувачів до цих рішень і, відповідно, не забезпечує умов для ефективного їх використання.

Для вирішення даної проблеми використовуються пояснення [2, 3]. Мета побудови пояснень полягає у представленні процесу прийняття рішення у зрозумілому для користувача вигляді шляхом визначення причинно-наслідкових залежностей, що призвели до конкретних рішень інтелектуальної системи. Пояснення відображають зв'язки між значеннями вхідних даних, поточних даних, що виникають у процесі прийняття рішення, а також отриманим результатом [4]. Завдяки поясненням користувачі отримують можливість оцінити дії, які призвели до певного результату, та критично оцінити рішення інтелектуальної системи [5]. Ефективні пояснення мають виділяти ключові причинно-наслідкові зв'язки, з можливостями деталізації в залежності від кваліфікації користувача. Такий підхід дає можливість зробити пояснення зрозумілим та інтерактивно його адаптувати. Зазначене свідчить про актуальність проблеми побудови пояснень в інтелектуальних системах з можливостями виділення ключових каузальних залежностей на різних рівнях представлення процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми дослідження

Сучасні дослідження щодо побудови пояснювального штучного інтелекту [6-9] розглядають побудову систем, алгоритми роботи яких можуть бути безпосередньо

інтерпретовані [6]. Можливість такої інтерпретації забезпечує прозорість процесу прийняття рішення [7]. Однак такі пояснення в загальному вигляді не враховують рівень знань та культурні особливості користувачів. Тому для побудови зрозумілих пояснень ключовою умовою є індивідуалізація пояснень з можливістю їх інтерактивного уточнення [8]. Така індивідуалізація формується згідно з ментальною моделлю користувача [9]. Проте побудова інтерактивних пояснень потребує великих витрат ресурсів, оскільки останні мають використовувати деталізовані знання щодо предметної області для узгодження пояснень. Пояснення має також оновлюватись при коригуванні алгоритму роботи інтелектуальної системи [8], що потребує враховувати його темпоральний аспект при визначенні причин отриманих рішень. Виконання наведених вимог дає можливість перейти від забезпечення прозорості процесу прийняття рішень до його зрозумілості [10].

Темпоральні аспекти пояснення розглянуто в [4, 11]. В [4] представлено підхід до моделювання альтернативних причин рішення на основі темпоральної упорядкованості подій процесу прийняття рішення. В [11] обґрунтовано можливість формування каузальних залежностей на основі темпоральної упорядкованості подій процесу прийняття рішення при побудові пояснення в інтелектуальній системі. Темпоральна упорядкованість щодо процесу прийняття рішення задається в рамках відносного представлення часу [12], що дає можливість представити елементи процесу прийняття рішення у вигляді множини темпоральних правил [13] та в подальшому сформувані з цих правил можливі альтернативи такого процесу [14]. Представлений в [14] підхід обумовлює можливість побудови темпорально-каузального представлення процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі як основи для пояснення щодо отриманих в такій системі результатів.

В розглянутих результатах досліджень визначено необхідні умови для побудови узагальненого опису пояснення, що містить каузальні залежності з різним ступенем деталізації для урахування рівня знань та потреб користувача. Однак побудові комплексної моделі пояснення, орієнтованої не лише на зрозуміле представлення пояснення, а й на його адаптацію згідно з потребами користувача, не приділялось достатньо уваги, що й свідчить про важливість задач, які вирішуються в даному дослідженні.

3. Мета і задачі дослідження

Метою даного дослідження є розробка каузального підходу до формування пояснень в інтелектуальних інформаційних системах, що створює умови для автоматизованого уточнення пояснень з тим, щоб зробити їх зрозумілими для користувачів з урахуванням їх цілей та потреб.

Для досягнення поставленої мети у статті вирішуються такі задачі:

- структуризація задач побудови пояснень в системах пояснювального штучного інтелекту;
- розробка каузальної моделі пояснення в інтелектуальній інформаційній системі;
- розробка методу побудови пояснень в інтелектуальній інформаційній системі з використанням каузальних залежностей.

4. Задачі побудови пояснень в системах пояснювального штучного інтелекту

Пояснювальний штучний інтелект орієнтований на підтримку розуміння користувачами процесу прийняття рішення в інтелектуальній інформаційній системі з урахуванням контексту застосування цих рішень. Узагальнено, пояснювальний штучний інтелект забезпечує зрозумілість рішень та процесу їх прийняття для всіх зацікавлених сторін, що використовують результати роботи інтелектуальної системи.

Пояснення має такі базові властивості, що забезпечують зрозумілість рішень системи штучного інтелекту:

- «прозорість» алгоритму роботи інтелектуальної системи, що зазвичай має вигляд «чорного ящика» для користувачів;
- зрозумілість для користувачів результату й процесу прийняття рішення в інтелектуальній інформаційній системі;
- відповідність пояснення цілям та потребам користувачів системи штучного інтелекту.

Згідно з наведеними властивостями, при побудові пояснення необхідно вирішити такі задачі:

- представлення у прозорому вигляді алгоритму прийняття рішень в інтелектуальній системі з тим, щоб були явно відображені темпоральні та/або причинно-наслідкові зв'язки між вхідними, проміжними даними, діями процесу, а також отриманим в системі результатом;
- представлення у зрозумілому для користувачів вигляді процесу прийняття рішення таким чином, щоб пояснення користувача відповідало його знанням щодо предметної області;
- узгодження пояснення із цілями та потребами користувачів з тим, щоб останні могли ефективно використовувати рішення інтелектуальної інформаційної системи для вирішення своїх практичних задач.

Непрозорість для користувачів систем штучного інтелекту, що мають вигляд «чорного ящика», пов'язана із використанням неявних знань у процесі прийняття рішень. Неявні знання є некодифікованими знаннями, тобто вони не відображені у доступній для людини формі.

Задача представлення у прозорому вигляді алгоритму прийняття рішень в інтелектуальній системі базується на екстерналізації знань щодо вказаного процесу. Екстерналізація полягає у перетворенні неявних знань у явну форму [15].

Першим кроком екстерналізації є ідентифікація знань, тобто виділення підмножини знань, які мають бути пояснені користувачеві. Другий крок екстерналізації полягає у кодифікації знань, тобто їх перетворенні в явну форму. Знання в явній формі можуть бути безпосередньо інтерпретовані людьми. За результатами цих двох кроків знання щодо процесу прийняття рішення можуть бути представлені цільовій аудиторії.

Таким чином, для вирішення задачі формування прозорого представлення алгоритму роботи інтелектуальної системи необхідно зробити таку систему інтерпретованою. В інтерпретованій системі опис процесу прийняття рішень є самопояснюваним, оскільки модель прийняття рішень містить явні, кодифіковані залежності. Для того, щоб система штучного інтелекту була інтерпретованою, алгоритм її роботи зазвичай представляють через інтеграцію зважених темпоральних або каузальних правил. Наприклад, використовуються дерева рішень, продукційні правила тощо. Однак вимога побудови інтерпретованих систем може привести до використання простіших моделей для прийняття рішень і, відповідно, до зниження ефективності імплементації отриманих результатів. Використання інтерпретованих пояснень дає можливість подолати цей недолік.

Інша ключова особливість інтерпретованих систем штучного інтелекту полягає в тому, що така система може бути зрозумілою лише для користувачів з певним рівнем підготовки та знань щодо процесів функціонування таких систем. Тому властивість інтерпретованості системи штучного інтелекту є важливою для налагодження алгоритмів їх роботи.

Цільовою аудиторією інтерпретованих систем штучного інтелекту є спеціалісти-розробники.

Задача побудови зрозумілого для кінцевого користувача опису процесу прийняття рішення полягає у формуванні множини каузальних залежностей, що визначають вплив вхідних та проміжних даних на отриманий в інтелектуальній системі результат.

Прозорість алгоритму роботи інтелектуальної системи для користувача є необхідною, але не є достатньою умовою для того, щоб користувач зрозумів процес та результат прийняття рішення в такій системі. Користувачі мають різний рівень підготовки і розуміння технологій та моделей, які використовує система штучного інтелекту.

Зрозуміле пояснення має містити ключові залежності в рамках прозорого алгоритму роботи інтелектуальної системи у відповідності до рівня знань користувача. Виділення ключових пояснень виконується з використанням показника чутливості [16]. Оскільки пояснення містить спрощену модель процесу прийняття рішень, чутливість визначає діапазон вхідних даних, для яких надаються однотипні або однакові пояснення. Використання даного показника дає можливість узагальнити пояснення для підмножин вхідних даних і таким чином виділити підмножину базових, найсуттєвіших пояснень.

Задача узгодження пояснення полягає у виборі такої підмножини причинно-наслідкових залежностей, яка відповідає вимогам користувачів.

Для вирішення цієї задачі можуть бути використані два підходи:

- орієнтований на особливості предметної області;
- орієнтований на безпосередню оцінку потреб користувачів.

Перший підхід може бути реалізований на основі онтології предметної області або з використанням векторного пошуку. Слід зазначити, що з урахуванням стрімкого розвитку великих та локальних мовних моделей використання векторного пошуку для узгодження знань має суттєві переваги. В даному випадку використовується база документів щодо запитів клієнтів, які відображають їхні цілі та вимоги. Запит перетворюється на вектор і за схожістю векторів виконується пошук відповіді (пояснення) у векторній базі даних.

Однак даний підхід має суттєвий недолік, пов'язаний зі значними витратами на створення онтологій та спеціалізованих векторних баз даних для кожної предметної області.

Другий підхід полягає у визначенні обмежень щодо відповідності пояснення цілям та потребам користувача. Такі обмеження можуть бути сформовані з використанням теорії можливостей [17] на основі показників можливості та необхідності для кожної причинно-наслідкової залежності, що входить до складу пояснення.

В цілому вирішення задач представлення за допомогою пояснення процесу прийняття рішення та його результатів у прозорому та зрозумілому вигляді у відповідності до цілей та потреб користувача інтелектуальної інформаційної системи забезпечує вирішення глобальнішої задачі підвищення довіри користувачів до рішень інтелектуальної системи.

5. Узагальнена каузальна модель пояснення в інтелектуальній інформаційній системі

Відповідно до розглянутих задач побудови пояснень, пропонується узагальнена модель пояснення, що визначає пояснення у таких аспектах: темпоральному, каузальному, цільовому.

Ключові особливості вказаних аспектів пояснення, які відображають інтеграцію темпорального опису процесу прийняття рішення та каузальних залежностей, що представляють причини прийняття отриманого рішення, наведено в табл. 1.

Пояснення у темпоральному аспекті представляється як упорядкований у часі спрощений опис процесу прийняття рішень в інтелектуальній інформаційній системі. На даному рівні

Таблиця 1

Характеристика складових узагальненої моделі пояснення

Рівень	Властивості
Темпоральний	– упорядкований у часі інтерпретований опис процесу прийняття рішень; – критерій оцінки: коректність пояснення.
Каузальний	– множина причинно-наслідкових залежностей, що відображають значення вхідних та проміжних даних як причин визначеного рішення інтелектуальної інформаційної системи; – критерій оцінки: чутливість пояснення.
Цільовий	– підмножина каузальних залежностей, що відображають найсуттєвіші для користувача причини рішення інтелектуальної системи; – критерій оцінки: складність пояснення.

пояснення P_i представляється множинами темпоральних та причинно-наслідкових залежностей, що описують послідовність дій з прийняття рішень $S = \langle S_0, S_1, \dots, S_i, \dots, S_I \rangle$.

Кожен i -й елемент цієї послідовності характеризується набором значень змінних $v_{i,j}$, що відображають вхідні (S_0), проміжні (S_i) дані та результуюче рішення (S_I): $S_i = \{v_{i,j}\}$.

Між цими даними існують темпоральні залежності f_{j+n}^i , що задають попарну упорядкованість наборів даних $\langle S_i, \dots, S_{i+n} \rangle$ у часі:

$$f_{i+n}^i : S_i \rightarrow S_{i+n}, 1 < n \leq I - 1. \quad (1)$$

Згідно з (1), темпоральні залежності задають зв'язок як між послідовними у часі кроками з прийняття рішень $\langle S_i, S_{i+1} \rangle$, так і між віддаленими кроками, між якими є n проміжних кроків. Кількість проміжних кроків у загальному випадку залежить від рівня деталізації процесу прийняття рішення. На верхньому рівні, коли інтелектуальна система є повністю непрозорою для пояснення, $I = 1$ і ми отримуємо темпоральну залежність f_1^0 між вхідними даними та результуючим рішенням системи.

Кожна причинно-наслідкова залежність $r_{i+n}^{i,j}$ базується на відповідній темпоральній залежності f_{i+n}^i та має задовольняти критерію коректності. Оцінка коректності пояснення виконується на основі виявлення необхідності використання цільового значення кожної вхідної змінної з урахуванням вибору альтернативних значень змінних [18].

Порівняння альтернативних значень дає можливість визначити пояснення з урахуванням контрфактів [19]. Необхідність вибраного для пояснення значення змінної у поясненні має бути вище заданого порогу ε :

$$r_{j+n}^{i,j} : v_{i,j} \rightarrow S_{i+n} \mid N(v_{i,j}) > \varepsilon. \quad (2)$$

Зокрема, перевищення порогу $\varepsilon > 0,5$ свідчить, що змінна зі значенням $v_{i,j}$ має більший вплив на результат вибраної дії процесу у порівнянні з альтернативними значеннями змінних. Тобто значення $v_{i,j}$ є необхідним для отримання результату, і тому пояснення на основі залежності $r_{j+n}^{i,j}$ є коректним.

Залежності для підмножини вхідних значень $v_{i,j}$ визначаються аналогічно виразу (2). Такі залежності із підмножиною $V_k = \{v_{i,j}\}, V_k \subseteq S_i$ значень вхідних змінних позначимо r_{j+n}^{i,V_k} .

Таким чином, модель пояснення у темпоральному аспекті складається з причинно-наслідкових залежностей $r_{i+n}^{i,j}$, кожна з яких базується на темпоральній залежності f_{j+n}^i та задовольняє обмеженню щодо необхідності вибору саме значення $v_{i,j}$ вхідної змінної як причини на поточному кроці результату:

$$P_t = \left\{ r_{i+n}^{i,j} : (\forall i \forall n) \exists f_{i+n}^i, N(v_{i,j}) > \varepsilon \right\}. \quad (3)$$

Пояснення у каузальному аспекті P_c представляється як сукупність причинно-наслідкових залежностей, що визначають вплив вхідних і проміжних даних на отриманий в інтелектуальній інформаційній системі результат. Ці залежності становлять підмножину залежностей (3), елементи якої задовольняють критерію чутливості. Чутливість дає можливість оцінити зміни пояснення при відхиленнях у вхідних даних. Ключова ідея використання даного критерія полягає в тому, щоб об'єднати однотипні пояснення для незначних змін у вхідних або проміжних даних. Як однотипні розглядаються такі залежності $r_{i+n}^{i,j}$ та $r_{i+n}^{i,l}$, які мають близькі можливості використання $\Pi(r_{i+n}^{i,j})$ та $\Pi(r_{i+n}^{i,l})$ для пояснення одного й того ж результату S_{i+n} , тобто :

$$\Pi(r_{i+n}^{i,j}) \approx \Pi(r_{i+n}^{i,l}). \quad (4)$$

Тому пояснення у каузальному аспекті містить підмножину правил $r_{i+n}^{i,j}$, для яких виконується умова $\Pi(r_{i+n}^{i,j}) \neq \Pi(r_{i+n}^{i,l})$:

$$P_c = \left\{ r_{i+n}^{i,j} : (\forall j \forall l) \Pi(r_{i+n}^{i,j}) \neq \Pi(r_{i+n}^{i,l}) \right\}. \quad (5)$$

Такий підхід дає можливість упорядкувати пояснення щодо результату S_{i+n} за значенням можливості. В подальшому пояснення можна ітеративно уточнювати для представлення користувачеві, на кожній наступній ітерації представляючи йому пояснення із все меншим значенням можливості причинно-наслідкового зв'язку $r_{i+n}^{i,j}$ для обґрунтування поточного або фінального результату у процесі прийняття рішення в інтелектуальній інформаційній системі.

Пояснення у цільовому аспекті P_a представляється у вигляді упорядкованої підмножини

каузальних залежностей r_{j+n}^{i,V_k} з мінімальною складністю, тобто таких залежностей, які містять лише найсуттєвіші для формування рішення значення вхідних та проміжних змінних. Критерій мінімальної складності задається як кількість змінних, що є необхідними для формування пояснення, тобто V_k . Необхідність включення значень вхідних змінних у поясненні визначається через показник можливості використання пояснення $\Pi(r_{j+n}^{i,V_k})$. Тобто несуттєве зниження можливості використання залежності $\Pi(r_{j+n}^{i,V_k}) \approx \Pi(r_{j+n}^{i,V_m})$ у складі пояснення для підмножини V_k з видаленою змінною у порівнянні з аналогічними підмножинами V_m , що містять цю змінну, свідчить про те, що видалене значення змінної є несуттєвим для обґрунтування отриманого поточного або цільового результату.

Згідно з наведеним обґрунтуванням, формальне представлення пояснення у цільовому аспекті має вигляд:

$$P_a = \left\{ r_{j+n}^{i,V_k} : (\forall k) |V_k| = \min_m (|V_m|) \mid \Pi(r_{j+n}^{i,V_k}) \approx \Pi(r_{j+n}^{i,V_m}) \right\}. \quad (6)$$

Використання можливостей $\Pi(r_{j+n}^{i,V_k})$ для виділення найважливіших змінних у каузальній залежності для пояснення обумовлює відповідність пояснення задачам користувача.

Дійсно, можливість в теорії можливостей обумовлює найбільшу вірогідність виникнення певної події. Можливість розраховується на основі відомої інформації щодо використання рішення інтелектуальної системи, яке було сформовано на основі відомих вхідних даних.

Прикладом можуть бути вибір та покупка споживачем рекомендованого товару із заданими технічними характеристиками в системі електронної комерції. Висока вірогідність покупки товару свідчить про узгодженість його рекомендованих властивостей з потребами споживача.

Зазначена причина обумовлює високе значення можливості для залежності r_{j+n}^{i,V_k} бути включеною у пояснення для користувача.

Представлена узагальнена модель P пояснення охоплює всі три наведені аспекти і має вигляд:

$$P = \{P_t, P_c, P_a : P_t \subset P_c, P_c \subseteq P_a\}. \quad (7)$$

Модель (7) у темпоральному аспекті призначена для представлення пояснень розробникам інтелектуальної системи з метою підвищити ефективність удосконалення алгоритму прийняття рішень в інтелектуальній системі.

Узагальнена модель пояснення у каузальному аспекті орієнтована на кваліфікованого користувача і призначена для підтримки адаптації процесу прийняття рішення згідно з вимогами користувача.

Модель у цільовому аспекті призначена для підтримки вибору рішення кінцевим користувачем.

6. Метод побудови пояснень в інтелектуальній інформаційній системі з використанням каузальних залежностей

6.1. Основні етапи методу

Запропонований узагальнений метод побудови пояснень з урахуванням темпорального, каузального та цільового аспектів процесу прийняття рішення враховує розглянуті особливості задач представлення даного процесу у прозорому та зрозумілому вигляді, а також задачі узгодження пояснення із потребами користувача.

Вхідна інформація для метода представлена такими множинами значень даних, що використовуються у процесі прийняття рішення:

- вхідні дані, що зазвичай є доступними для користувача;
- проміжні дані, що відображають виконання дій процесу прийняття рішення, або дій користувача; такі дані зазвичай є частково доступними;
- результуючі дані, що складають опис отриманого рішення.

Метод містить етапи побудови темпорального, каузального та цільового представлення пояснення:

Етап 1. Побудова темпорального представлення пояснення P_t .

Крок 1.1. Формування набору із темпоральних правил f_{i+n}^i , що описують упорядкованість у часі (1) даних щодо процесу прийняття рішення.

Крок 1.2. Розрахунок значення необхідності $N(v_{i,j})$ для вхідних змінних отриманих темпоральних залежностей.

Крок 1.3. Відбір множини каузальних залежностей. Дана множина включає правила $r_{j+n}^{i,j}$, для яких значення необхідності перевищує заданий поріг.

Результатом даного етапу є множина правил $r_{j+n}^{i,j}$, що відображають ключові закономірності процесу прийняття рішення. Сукупність правил визначає спрощену модель даного процесу, зокрема, з тієї причини, що проміжні дані зазвичай є лише частково доступними.

Побудова моделі процесу прийняття рішення може бути виконана методом [14], оскільки каузальні правила $r_{j+n}^{i,j}$ були сформовані на основі відповідних темпоральних правил f_{i+n}^i .

Етап 2. Побудова каузального представлення пояснення P_c .

Крок 2.1. Розрахунок показника чутливості для елементів множини P_t .

Крок 2.2. Відбір підмножин каузальних залежностей, для яких виконується умова (4).

Крок 2.3. Формування множини P_c шляхом об'єднання залежностей, для яких виконується умова (4).

Результатом даного етапу є множина каузальних правил, які відображують суттєві причини отриманого рішення згідно з критерієм чутливості. Іншими словами, при використанні отриманих на поточному етапі правил значення пояснення буде змінено лише при суттєвих (можливісних) змінах у вхідних даних.

Етап 3. Формування цільового представлення пояснення P_a .

Крок 3.1. Розрахунок складності пояснень за показником $|V_k|$.

Крок 3.2. Відбір підмножини значень вхідних змінних згідно з (6) із ітеративним уточненням показника складності.

Крок 3.3. Формування підмножини P_a із каузальних залежностей, для яких виконано

умову (6).

Крок 3.4. Упорядкування підмножини P_a за значенням можливості каузальних правил.

Особливість даного етапу полягає в тому, що узгодження пояснення виконується без урахування специфіки предметної області.

Розроблений метод дає можливість сформулювати пояснення у відповідності до потреб користувачів у заданій предметній області з урахуванням наявної інформації про вибір цих користувачів у минулому.

6.2. Приклад використання методу

Розглянемо приклад застосування методу побудови пояснень для рекомендаційної системи. Як вхідні дані виступає інформація про вибір користувачів, що є схожими за інтересами із цільовим користувачем. Ці користувачі вибирали товари певної групи, наприклад, комп'ютери з певними технічними характеристиками процесора, пам'яті, екрану, жорсткого диску тощо. Рекомендаційна система на основі інформації про вибір схожих користувачів запропонує цільовому користувачеві комп'ютери із аналогічними характеристиками. Як пояснення користувач має отримати інформацію про те, які характеристики комп'ютера були ключовими при формуванні рекомендацій. В даному прикладі інтелектуальна система має вигляд «чорного ящика», тобто проміжні дані відсутні.

На першому етапі методу формуються необхідні каузальні залежності виду «модель процесора – марка комп'ютера», «об'єм пам'яті – марка комп'ютера» тощо. Тобто представлені в цих залежностях значення вхідних змінних (конкретна модель процесора, конкретне значення об'єму пам'яті) є необхідними при побудові рекомендацій щодо вибору комп'ютера. На другому етапі із множини необхідних каузальних залежностей відбираються унікальні правила. Розглянемо випадок, коли значення об'єму пам'яті та об'єму жорсткого диску, які розглядаються як причина для рекомендації комп'ютера, мають близьке значення показника можливості. В такому випадку відбирається одне зі значень цих змінних. Відбір може бути виконано на основі порівняння значень можливості, а також з урахуванням додаткових критеріїв, зокрема, критерію складності або ж специфічних для предметної області показників. Результатом етапу є множина правил, що визначають вірогідні й необхідні причини рекомендації певної моделі комп'ютера в рекомендаційній системі. На третьому етапі методу порівнюється складність правил. Якщо видалення однієї з причин (одного зі значень змінної) для правила не зменшує можливість вибору пояснення, то вказана змінна є неважливою для потреб користувача і правило спрощується. В результаті кожне каузальне правило має містити мінімальну кількість значень вхідних змінних, які вказують на найвірогідніші причини отримано рекомендації з урахуванням потреб користувача.

Детальніші приклади використання розрахунку коректності, чутливості та складності на трьох етапах методу наведено в публікаціях авторів [16, 18, 20].

7. Обговорення результатів дослідження

В рамках експериментальної перевірки запропонованих теоретичних результатів розглядається побудова пояснень для задачі аналізу поведінки покупців – користувачів сайту електронної комерції. Сутність даної задачі полягає в тому, щоб на основі інформації про послідовність дій користувача на сторінках сайту оцінити його намір здійснити покупку, або ж покинути інтернет-магазин. Як вхідні дані для прогнозування намірів користувача використовується інформація про переглянуті сторінки, а також про сеанси взаємодії з системою електронної комерції. Задача вирішується з використанням штучних нейронних

мереж – багат шарового перцептрон та LSTM (long short-term memory) [21].

Набір даних для експериментальної перевірки містить інформацію про підмножину сеансів взаємодії користувачів із системою електронної комерції. Кожен сеанс містить інформацію лише про одного користувача та характеризується значеннями таких змінних:

- клас сеансу, який визначається наявністю або відсутністю покупки (змінна «Revenue»);
- кількість різномісних сторінок, які відвідав користувач, а також час перебування на цих сторінках (змінні «Administrative», «Administrative Duration», «Informational», «Informational Duration», «Product Related» and «Product Related Duration»);
- оцінки поведінки користувача на сторінках сайту, виміряні з використанням «Google Analytics» (змінні «Bounce Rate», «Exit Rate» and «Page Value»);
- технічні дані щодо операційної системи та браузера на комп'ютері відвідувача, інформація про регіон, з якого направив запит користувач, а також тип трафіку, тип відвідувача (новий чи вже зареєстрований користувач) та інформація про відповідність дати відвідування святковим або вихідним дням (змінні «Operating system», «Browser», «Region», «Visitor type», «Weekend»).

Задача експерименту полягає в тому, щоб встановити змінні, які визначають ключові причини вибору користувача, тобто покупки або завершення сеансу роботи в системі електронної комерції. В подальшому встановлені змінні порівнювались з відфільтрованими для прогнозування поведінки змінними [21]. Результати порівняння для 5 ключових змінних наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Змінні, що відображають поведінку користувача системи електронної комерції

Оцінка поведінки користувача		Пояснення	
Рейтинг	Змінна	Можливість	Необхідність
1	Page Value	0,198	0,114
2	Exit Rate	0,087	0,068
3	Product Related	0,193	0,09
4	Product Related Duration	0,187	0,098
5	Bounce Rate	0,141	0,101

Наведені змінні мають найбільші значення показника можливості і відображають основні причини рішення щодо прогнозованих намірів користувача, що відповідає оцінці змінних в [21]. Ці змінні можуть бути використані для побудови каузальних залежностей виду «значення вхідної змінної – рішення системи» при формуванні пояснення. Проте слід врахувати, що змінні «Page Value», «Product Related», «Product Related Duration» мають близькі значення можливості. Максимальне значення необхідності має змінна «Page Value». У відповідності до (4), із трьох змінних для побудови пояснення доцільно використовувати в першу чергу «Page Value». Змінні «Exit Rate» та «Bounce Rate» мають менші значення можливості і тому можуть бути використані лише як додаткові залежності при деталізації пояснення.

Запропоновані модель та метод побудови пояснень орієнтовані на підтримку задач удосконалення, адаптації під потреби користувача та ефективного використання рішення інтелектуальної інформаційної системи, представлені у вигляді «чорного ящика». Пояснення у формі темпоральних та каузальних правил дає можливість побудувати спрощену інтерпретовану модель процесу прийняття рішення в інтелектуальній інформаційній системі, що

створює умови підтримки та удосконалення алгоритмів роботи розробником такої системи. Пояснення у формі найвірогідніших каузальних залежностей забезпечує умови для представлення кваліфікованому користувачеві множини можливих причин прийнятого рішення. Аналіз цих причини дає можливість адаптувати процес прийняття рішення, змінивши, наприклад, підмножину вхідних даних. Пояснення у формі найпростіших каузальних залежностей дає можливість виділити ключові причини отриманого рішення і представити таке спрощене пояснення кінцевому користувачеві. Обмеження на використання запропонованого підходу пов'язані із необхідністю отримати вхідні, проміжні та результуючі дані за суттєвий проміжок часу для обрахунку показників можливості та необхідності. Подальший розвиток даного підходу пов'язаний із комбінуванням можливих каузальних залежностей із існуючими підходами до побудови спрощених моделей прийняття рішень в системах штучного інтелекту.

8. Висновки

В рамках дослідження виділено та структуровано ключові задачі побудови пояснень: представлення алгоритму формування рішення в інтелектуальній системі у інтерпретованій формі; представлення зрозумілих для користувача каузальних залежностей щодо причин прийнятого рішення як основи для пояснень; узгодження каузальних залежностей у складі пояснення із потребами користувача.

Розроблено узагальнену каузальну модель пояснення, яка об'єднує темпоральну, причинно-наслідкову та цільову складові. Темпоральна складова орієнтована на представлення пояснення як інтерпретованого опису алгоритму прийняття рішення в інтелектуальній інформаційній системі. Причинно-наслідкова складова орієнтована на формування зрозумілого опису причин дій процесу та результуючого рішення. Цільова складова орієнтована на формування пояснення у вигляді набору ключових причин рішення згідно з потребами користувача. Модель забезпечує побудову багатоаспектного пояснення, що може бути використано не лише після реалізації рішення, а й до початку його імплементації.

Запропоновано узагальнений метод побудови пояснення на основі каузальних залежностей, що містить етапи формування темпорального, причинно-наслідкового та цільового опису пояснення, які передбачають послідовне виділення найсуттєвіших причин прийнятого в інтелектуальній інформаційній системі рішення. Метод забезпечує можливість автоматизованої побудови та ітеративного уточнення пояснень як для розробників, так і для кінцевих користувачів з тим, щоб підвищити ефективність використання рішень інтелектуальних інформаційних систем.

Перелік посилань:

1. Kordon A. (2016). Intelligent Systems in Industry. *Innovative Issues in Intelligent Systems. Studies in Computational Intelligence/ Sgurev, V., Yager, R., Kacprzyk, J., Jotsov, V. (eds). Springer, Cham. 2016. Vol 623. P. 1-31* https://doi.org/10.1007/978-3-319-27267-2_1.
2. Miller T. Explanation in artificial intelligence: Insights from the social sciences. *Artificial Intelligence*, 2019. Vol. 267. P. 1-38. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2018.07.007>
3. Bodria F., Giannotti F., Guidotti R., Naretto F., Pedreschi D., Rinzivillo S. (2021) Benchmarking and survey of explanation methods for black box models. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2102.13076>.
4. Чалий С. Ф., Лещинський В. О., Лещинська І. О. Контрфактуальна темпоральна модель причинно-наслідкових зв'язків для побудови пояснень в інтелектуальних системах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології = Bulletin of the National Technical University «KhPI». Ser. System analysis, control and information technology : зб. наук. пр.* Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (6). С. 41-46.
5. Gunning D., Aha D. DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program. *AI Magazine*. 2019. Vol. 40 (2). P. 44-58. <https://doi.org/10.1609/aimag.v40i2.2850>.

6. Tjoa E., Guan C. A Survey on Explainable Artificial Intelligence (XAI): Toward Medical XAI. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2021. Vol. 32 (11). P. 4793-4813. <https://doi.org/10.1109/tnnls.2020.3027314>. PMID: 33079674.
7. Hanif A. et al. A Comprehensive Survey of Explainable Artificial Intelligence (XAI) Methods: Exploring Transparency and Interpretability. *Web Information Systems Engineering – WISE 2023. Lecture Notes in Computer Science/* Zhang F., Wang H., Barhamgi M., Chen L., Zhou R. (eds). Springer, Singapore. 2023. Vol. 14306. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7254-8_71
8. Yang W., Wei, Y., Wei H. et al. Survey on Explainable AI: From Approaches, Limitations and Applications Aspects. *Human-Centric Intelligent Systems*. 2023. Vol. 3. P. 161–188. <https://doi.org/10.1007/s44230-023-00038-y>.
9. Чалий С., Лещинська І. Концептуальна ментальна модель пояснення в системі штучного інтелекту. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. 2023. № 1 (9). С. 70–75. <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2023.01>.
10. Arrieta A. B., Díaz-Rodríguez N., Del Ser J., Bennetot A., Tabik S., Barbado A., Garcia S., Gil-Lopez S., Molina D., Benjamins R., Chatila R., Herrera F. Explainable artificial intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. *Information Fusion*. 2020. Vol. 58. P. 82-115.
11. Chalyi S., Leshchynskiy V. Temporal representation of causality in the construction of explanations in intelligent systems. *Advanced Information Systems*. 2020. Vol. 4(3). P 113–117. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.3.16>.
12. Chala O. Models of temporal dependencies for a probabilistic knowledge base. *Econtechmod. An International Quarterly Journal*. 2018. Vol. 7, No. 3. P. 53 – 58.
13. Чала О. В. Модель узагальненого представлення темпоральних знань для задач підтримки управлінських рішень. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Системний аналіз, управління та інформаційні технології. 2020. № 1(3). С. 14-18. <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2020.01.03>.
14. Levykin V., Chala O. Development of a method of probabilistic inference of sequences of business process activities to support business process management. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 5/3(95). P. 16-24. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142664>.
15. Nonaka I., Hirotaka T.. The knowledge-creating company: How Japanese companies create the dynamics of innovation. Oxford University Press, 1995. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195092691.001.0001>
16. Chalyi S., Leshchynskiy V. Оцінка чутливості пояснень в інтелектуальній інформаційній системі. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Збірник наукових праць. 2023. Т. 2. С. 165-169. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.2.165>.
17. Dubois D., Prade H. Possibility Theory. *The Palgrave Encyclopedia of the Possible* / Glăveanu, V.P. (eds). Palgrave Macmillan, Cham. 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90913-0_175.
18. Chalyi S., Leshchynskiy V. Інформаційна технологія оцінки пояснень в інтелектуальній інформаційній системі. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Збірник наукових праць. 2023. Т. 4. С. 120-124. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.4.120>.
19. Byrne R.M.J. Counterfactuals in explainable artificial intelligence (XAI): evidence from human reasoning. *Proceedings of the twenty-eighth international joint conference on artificial intelligence, IJCAI 2019*, Macao, China, August 10–16, 2019. Survey track. P. 6276-6282. <https://doi.org/10.24963/ijcai.2019/876>.
20. Чалий С.Ф., Лещинський В.О. Метод можливісного оцінювання пояснення в системі штучного інтелекту/ *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. Сер. : Системний аналіз, управління та інформаційні технології = *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Ser. : *System analysis, control and information technology* : зб. наук. пр. Харків : НТУ "ХПІ", 2023. № 2 (10). С. 95-101.
21. Baati, K., & Mohsil, M. Real-Time Prediction of Online Shoppers' Purchasing Intention Using Random Forest. *Artificial Intelligence Applications and Innovations*. 2020. Vol. 583. P. 43 - 51.

Надійшла до редколегії 25.03.2024 р.

Чалий Сергій Федорович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри ІУС ХНУРЕ, м. Харків, Україна, e-mail: serhii.chalyi@nure.ua; ORCID: 0000-0002-9982-9091
Лещинський Володимир Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмної інженерії ХНУРЕ, м. Харків, Україна, e-mail: volodymyr.leshchynskiy@nure.ua; ORCID: 0000-0002-8690-5702

*І.В. ГРЕБЕННИК, О.А. КОВАЛЕНКО***НЕЧІТКА МОДЕЛЬ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОЇ СОРТУВАЛЬНОЇ ЛІНІЇ ПОШТИ**

Для зменшення часу обробки об'єктів поштових відправлень використовуються автоматичні сортувальні лінії зі стрічковими конвеєрами, які здійснюють транспортування до заданих пунктів завантаження. Головним недоліком застосування таких систем автоматизації є обмеження моделі прийняття рішень, пов'язаних з невизначеністю умов сортування.

Для реалізації управління автоматичною лінією із заданою логікою сортування в умовах невизначеності формалізовано нечітку модель прийняття рішень. Розроблена модель дозволяє реалізувати нечітку класифікацію вантажів за їхніми параметрами і визначити пункти завантаження для кожного класу. На основі нечіткої класифікації модель здійснює одночасне сортування за трьома критеріями: за оціночною вартістю, за вагою, за вагою і габаритами. За результатами перевірки моделі з використанням пакету Fuzzy Logic Toolbox Matlab підтверджено її працездатність. Розроблена нечітка модель прийняття рішень може бути використана в автоматичних сортувальних лініях різного призначення з невизначеністю умов визначення параметрів ваги і габаритів транспортованих вантажів.

1. Вступ

Глобальний розвиток електронної комерції обумовлює складність та різноманітність логістичних завдань, зв'язаних з доставкою пошти. Одним зі шляхів підвищення ефективності обробки об'єктів поштових відправлень (ОПВ) є використання промислової автоматизації у вигляді автоматичних сортувальних ліній (АСЛ) зі стрічковими конвеєрами-транспортерами. Такими лініями оснащуються центри обробки поштових відправлень аеропортів США, Японії, Китаю та Європи.

Сортувальні лінії виробляються у вигляді окремих стрічок-конвеєрів, автоматичних сортувальних машин [1-6], а також як елементи інтелектуальних автоматизованих систем [7].

Класифікація АСЛ ведеться за декількома ключовими параметрами, основними з яких є: напрямок переміщення об'єктів; вид вантажу, що транспортується; виконувана функція; розміщення сортувальної лінії та деталей; тип тягового органу; тип вантажонесучої конструкції; розташування робочого місця працівника. АСЛ не вимагає контролю з боку людини.

Об'єктами управління сучасної АСЛ є комплекс апаратних засобів, за допомогою яких здійснюється управління транспортуванням, а саме: засоби управління роликami конвеєра; пневматичні затвори, що регулюють потоки повітря; засоби зміни нахилу окремих секційних стрічок; засоби управління рухом конвеєрів на кожній секції; засоби управління швидкістю транспортування вантажів; засоби вимірювання ваги вантажів, якими обладнані платформи їх подачі на стрічки тощо.

Процес управління АСЛ здійснюється за допомогою системи прийняття рішень. Для управління сортуванням модель системи прийняття рішень (далі за текстом – модель прийняття рішень) АСЛ може отримувати дані за допомогою таких апаратних засобів: датчиків пневматичних затворів [1]; веб-камер визначення 2D-розмірів [2]; сканерів штрих-коду [3]; датчиків наближення [4]; датчиків двигунів конвеєрних стрічок [5]; датчиків механізму зважування [6] тощо.

Головним недоліком застосування АСЛ є обмеження моделі прийняття рішень, пов'язаних з невизначеністю умов сортування. Ця невизначеність обумовлена відсутністю стандартів, що визначають типи (категорії) об'єктів поштових відправлень. Класифікації за типами ОПВ у різних логістичних компаніях можуть не співпадати. У зв'язку з цим визначені завдання, що не вирішуються моделлю прийняття рішень АСЛ під час управління сортуванням та переміщенням ОПВ до пунктів завантаження (ПЗ) терміналів:

- налаштування параметрів моделі прийняття рішень з управління логікою сортування оператором АСЛ незалежно від різних стандартів класифікації ОПВ;

- реалізація визначеної логіки сортування з урахуванням порядку завантаження автомобілів об'єктами поштових відправлень. Цей порядок повинен визначатися параметрами ОПВ (габаритів, ваги тощо) з метою збереження їхньої цілісності під час завантаження й доставки;

- сортування з урахуванням габаритів кузова (контейнера) та вантажопідйомності різних типів вантажного автомобільного транспорту для їх завантаження з пунктів терміналу;

- визначення порядку завантаження кузова (контейнера) об'єктами поштових відправлень з врахуванням порядку їх вивантаження та завантаження на проміжних пунктах доставки.

Для усунення вказаних недоліків модель прийняття рішень АСЛ потребує модифікації управління сортуванням ОПВ на принципах нечіткої логіки. Такий підхід узгоджується з логічною системою, що застосовується в нечітких регуляторах.

2. Постановка задачі дослідження

Метою даного дослідження є вирішення завдання нечіткої класифікації й сортування з урахуванням параметрів ОПВ (габаритів, ваги, оціночної вартості). Досягнення цієї мети дозволить зберегти цілісність ОПВ.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- розробка нечіткої моделі прийняття рішень для АСЛ;
- тестування розробленої нечіткої моделі.

Нечітка модель прийняття рішень повинна реалізувати задану логіку сортування за такими умовами:

а) ОПВ розвантажуються й сортируються АСЛ, тобто оброблюються в потоці. Модель прийняття рішень АСЛ отримує параметри ОПВ за штрих-кодом або за даними інших засобів (датчиків). Кінцева мета сортування – доставити ОПВ до ПЗ одного з терміналів. Кожен термінал має декілька ПЗ з числовими найменуваннями «1», «2», «3», ..., «N». За адресою доставки визначається термінал, який задалегідь відомий (вказується у штрих-кодi ярлику ОПВ);

б) ПЗ терміналу призначені для прийому ОПВ за визначеною класифікацією. Завдання моделі – провести класифікацію за параметрами ОПВ (вага, габарити, оціночна вартість) і розподілити їх за ПЗ;

в) проведення сортування ОПВ повинно реалізувати заданий порядок завантаження автомобілів за ПЗ терміналу, враховуючи такі умови:

1) «на важкий ОПВ можна покласти об'єкт із меншою вагою, але не навпаки». Ця умова також пов'язана з рішенням задачі сортування за габаритами. Для вирішення завдання сортування за цими умовами використовується декілька ПЗ одного терміналу, які поділяються

за діапазонами габаритів і ваги ОПВ. Спочатку йде завантаження ОПВ великої важкості й габаритів, а далі, на іншому пункті, – легших за вагою;

2) ОПВ із великою оціночною вартістю незалежно від габаритів і ваги повинні завантажуватися на окремому пункті й доставлятися під охороною.

3. Розробка нечіткої моделі прийняття рішень

Архітектура нечіткого управління заснована на використанні нечіткої моделі прийняття рішень (моделі нечіткого виведення). У цьому випадку модель прийняття рішень (рис. 1) будується з урахуванням необхідності реалізації всіх етапів нечіткого виведення.

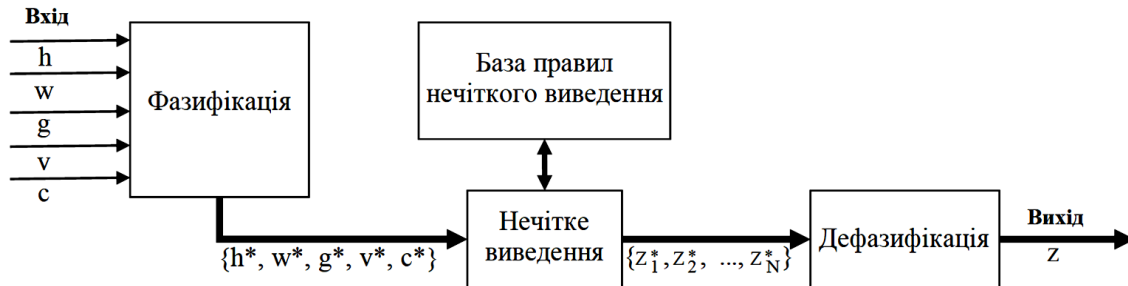


Рис. 1. Нечітка модель прийняття рішень АСЛ

Для здійснення сортування нечітка модель прийняття рішень повинна провести класифікацію ОПВ за його параметрами й визначити ПЗ, на який він буде транспортований. Процес класифікації реалізується на основі алгоритму нечіткого виведення Такагі-Сугено-Канга.

Нечітка модель прийняття рішень (рис. 1) має п'ять входів і один вихід. Вхідними чіткими параметрами ОПВ є: h – висота, w – ширина, g – глибина, v – вага, c – вартість. Вихідним чітким параметром моделі є номер ПЗ, визначений за проведеною нечіткою класифікацією.

Формалізуємо нечітку модель прийняття рішень (рис. 1) у вигляді бази правил нечіткого виведення. Для цього необхідно визначити лінгвістичні змінні на вході та виході моделі і самі правила.

Поставимо у відповідність ПЗ АСЛ з індексами $n=1, 2, \dots, N$ терм-множину $R=\{\langle 1 \rangle, \langle 2 \rangle, \dots, \langle N \rangle\}$. Елементи терм-множини R відповідають числовим найменуванням ПЗ.

Визначимо нечіткі змінні для чітких вхідних $\{h, w, g, v, c\}$ і вихідної z змінних моделі (рис. 1). Цю задачу розглянемо в узагальненому вигляді.

Для вхідної чіткої змінної x визначимо на універсумі U нечіткі множини $\{X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_N\} \in U, i=1, 2, \dots, N, \exists i \neq j: X_i \cap X_j \neq \emptyset$, кожна з яких відповідає терму з множини R . Нечіткі змінні $\{x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*\}$ визначаються кортежем:

$$\langle x_i^*, U, X_i \rangle = \langle "R_{X_i}", \{x_i^* | (\min x_i < x < \max x_i) \}, X_i \in U, X_i = (\mu_{X_i}(x), x) \rangle, \quad (1)$$

де x – будь-яка вхідна змінна з $\{h, w, g, v, c\}$; $\mu_{X_i}(x)$ – функція приналежності (ФП) чіткої змінної x до нечіткої множини X_i ; " R_{X_i} " – найменування нечіткої змінної x_i^* , що співпадає з термом множини R .

За допомогою ФП $\mu_{X_i}(x)$ здійснюється фазифікація (приведення до нечіткості) вхідної чіткої змінної x . За виразом $x_i^* = \mu_{X_i}(x)$, $i=1,2,\dots,N$, знаходиться N значень ступенів приналежності чіткої x до нечітких змінних x_i^* (до нечітких множин X_i). Ступень приналежності визначається в інтервалі $[0,1]$.

Значення нечітких змінних x_i^* приймає лінгвістична змінна X^* . Визначимо нечітку лінгвістичну змінну $X^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*\}$ у вигляді кортежу

$$X^* = \langle I, R(X^*), U \rangle, \quad (2)$$

де X^* – будь-яка лінгвістична змінна з переліку $\{H^*, W^*, G^*, V^*, C^*\}$; I – найменування нечіткої лінгвістичної змінної X^* : «Пункт завантаження за параметром x »; $R(X^*) = R = \{\langle 1 \rangle, \langle 2 \rangle, \dots, \langle N \rangle\}$ – терм-множина лінгвістичної змінної X^* , що містить терми найменувань ПЗ АСЛ, визначених змінними x_i^* .

Визначимо особливості завдання лінгвістичних змінних $\{H^*, W^*, G^*, V^*, C^*\}$. Будемо вважати, що для кожного ПЗ з індексом $n=1, 2, \dots, N-1$ задаються діапазони значень ваги, висоти, ширини і глибини у вигляді нечітких множин $\{H_j, W_m, G_s, V_q\}$ з співпадаючими термами $R(H^*) = R(W^*) = R(G^*) = R(V^*) = \{\langle 1 \rangle, \langle 2 \rangle, \langle 3 \rangle, \dots, \langle N-1 \rangle\} \in R$ і індексами $n=j=m=s=q=1, 2, \dots, N-1$. ПЗ з індексом $n=N$ призначений для прийому ОПВ, оціночна вартість яких перевищила граничну. Тому для C^* визначаються дві нечітких змінних c_1^* і c_2^* на множинах C_1 і C_2 . Нечітка змінна c_1^* приймає значення терму з назвою $\langle 1-2-\dots-(N-1) \rangle$, що відповідає термам $\{\langle 1 \rangle, \langle 2 \rangle, \dots, \langle N-1 \rangle\} \in R$, а для змінної c_2^* визначений терм з назвою $\langle N \rangle \in R$.

Формалізуємо базу правил системи нечіткого виведення моделі (рис. 1), що описує взаємозв'язок між нечіткими змінними $\{h^*, w^*, g^*, v^*, c^*\}$ та чітким виходом z . Алгоритм Такагі-Сугено-Канга передбачає використання як вихідної продукції лінійної функції. Однак для нечіткої класифікації ОПВ визначається тільки один терм. Тому нечітка база правил є сингтонною [8]. Для сингтонної нечіткої бази правил замість лінійних функцій використовуються чіткі числові значення лінгвістичної змінної Z^* , що визначаються виразом

$$Z^* = \langle I_Z, R(Z^*), U \rangle = \{ \langle z_1^*, U, 1 \rangle, \langle z_2^*, U, 2 \rangle, \dots, \langle z_N^*, U, N \rangle \}, \quad (3)$$

де I_Z – найменування нечіткої лінгвістичної змінної Z^* ; $R(Z^*) = \{ "1", "2", \dots, "N" \} \in R$ – терм-множина змінної Z^* , що містить найменування ПЗ АСЛ; $\langle z_i^*, U, i \rangle$ – кортежі чітких змінних, значення яких відповідають чисельним значенням ПЗ $\{z_1^*, z_2^*, \dots, z_N^*\} = \{1, 2, \dots, N\}$.

Представимо базу правил системи нечіткого виведення моделі (рис. 1) у вигляді K правил (rule) з п'ятьма умовами для кожного:

$$[\text{Rule } k] : \text{IF}(h \in H_j) \text{ and } \text{IF}(w \in W_m) \text{ and } \text{IF}(g \in G_s) \text{ and } \text{and } \text{IF}(v \in V_q) \text{ and } \text{IF}(c \in C_i) \rightarrow z = z_k^* \quad (4)$$

де $k=1, 2, \dots, K$ – індекс правила. Всього може бути задано $K=2 \cdot N^4$ правил.

Під операцією визначення приналежності чіткої вхідної змінної x до нечіткої множини X_i в умовах правил (4) розуміється знаходження значення ФП $\mu_{X_i}(x)$. Для нечітких множин операція «AND» (« \wedge ») відповідає операції знаходження перетину « \cap » або мінімізації. Перепишемо правила (4) в іншому вигляді

$$[\text{Rule } k] : \min_{k=1}^K (\mu_{H_j}(h), \mu_{W_m}(w), \mu_{G_s}(g), \mu_{V_q}(v), \mu_{C_i}^{i=\{1,2\}}(c)) \rightarrow z = z_k^* \quad (5)$$

або $[\text{Rule}] : \mu_{Z_k}(z_k^*) \rightarrow z = z_k^*,$
 $k=1$

де $\mu_{Z_k}(z_k^*)$ – узагальнене позначення результату активізації k -го правила, яка зводиться до вибору мінімального значення зі значень функцій приналежності $\mu_{V_q}(v)$, $\mu_{H_j}(h)$, $\mu_{W_m}(w)$, $\mu_{G_s}(g)$, $\mu_{C_i}(c)$.

Антецедент j -го правила з (5) складається з п'яти умов. Для нечітких множин H_j , W_m , G_s , V_q індекси j , m , s , q вибираються зі значень $\{1, 2, \dots, N-1\}$, незалежно від індексу правила k . Для нечітких множин C_i індекси вибираються зі значень $\{1, 2\}$. Консеквент правил з формули (5) визначається за чіткими числовими значеннями лінгвістичної змінної Z^* , які відповідають ПЗ.

Для реалізації логіки сортування визначено три критерії сортування, яких треба дотримуватися згідно з правилами (4), (5).

Згідно з першим критерієм, сортування за ПЗ проводиться за оцінкою оціночної вартості ОПВ. Для цього використовується ФП $\mu_{C_2}^{i=2}(c)$, що відповідає умові $c \in C_2$ в правилах (4), із завданням консеквенту $z=N$. Для умови $c \in C_1$, що відповідає ФП $\mu_{C_1}^{i=1}(c)$, використовуються другий та третій критерії, при цьому вплив ФП на розподіл ОПВ за ПЗ не враховується.

Згідно з другим критерієм, сортування за ПЗ проводиться за оцінкою ваги. Для цього використовується ФП $\mu_{V_q}(v)$ (умова $v \in V_q$) з визначення відповідного q -го терму з $R(V^*) = \{\langle 1 \rangle, \langle 2 \rangle, \dots, \langle N-1 \rangle\}$, а консеквент z дорівнює значенню терму з $R(V^*)$, незалежно від інших умов.

Згідно з третім критерієм, сортування проводиться за нечіткою класифікацією приналежності ОПВ визначеним ПЗ. Класифікація ведеться за сумісною оцінкою ваги і габаритів ОПВ, кожен з яких поділяється за збільшенням на $(N-1)$ діапазонів, визначених термами $\{\langle 1 \rangle, \langle 2 \rangle, \dots, \langle N-1 \rangle\}$ відповідних лінгвістичних змінних.

На етапі активізації правил проводиться визначення ступеня (міри) істинності висновків z_k^* кожного k -го правила за формулою (5). Для дефазифікації (зведення до чіткості) вихідних значень z_k^* використовується вираз, що визначає центр ваги для синглетонних множин

$$z = \frac{\sum_{k=1}^K z_k^* \cdot \mu_{zk}(z_k^*)}{\sum_{k=1}^K \mu_{zk}(z_k^*)}. \quad (6)$$

4. Тестування створеної нечіткої моделі

4.1. Реалізація нечіткої моделі прийняття рішень

Розглянемо АСЛ, що містить чотири ПЗ. За логікою сортування, необхідно забезпечити такі умови:

- сортування ОПВ здійснюється за чотирма ПЗ з номерами «1», «2», «3», «4»;
- за параметрами габаритів ОПВ визначаються три терми «1», «2», «3», що позначають номер ПЗ. Для цих термів визначаються розміри габаритів ОПВ – «маленькі», «середні» та «великі» відповідно;
- за параметром ваги ОПВ визначаються три терми «1», «2», «3». Для цих термів визначаються граничні значення ваги ОПВ – «малих», «середніх» та «великих» відповідно;
- за параметром оціночної вартості визначаються два терми. Перший терм «1-2-3» відповідає номерам ПЗ «1», «2», «3», а другий терм «4» – ПЗ з номером «4». Для цих термів визначаються граничні значення оціночної вартості ОПВ: для терму «1-2-3» – «незначна», а для терму «4» – «значна».

Для тестування розробленої моделі використовувалось програмне забезпечення середовища Matlab (версія R2016a-9.0.0.341360). Розроблено модель з п'ятьма входами (рис. 2), які відповідають чітким значенням параметрів ОПВ {h, w, g, v, c}, і одним виходом – чітким значенням ПЗ z.

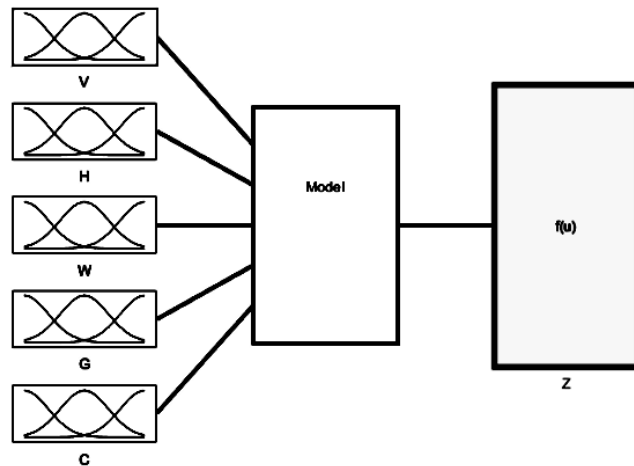


Рис. 2. Нечітка модель прийняття рішень АСЛ

Для реалізації бази правил нечіткого виведення обраний алгоритм Такагі-Сугено-Канга, для якого на етапі дефазифікації використовується метод «wtsum», що відповідає формулі (6).

4.2. Визначення вхідних і вихідних лінгвістичних змінних

Вхідними чіткими змінними нечіткої моделі (рис. 2) є параметри ОПВ {v, h, w, g, c}. Для реалізації моделі визначені вхідні нечіткі лінгвістичні змінні {H*, W*, G*, V*} з

трапецієвидними функціями приналежності, діапазони значень нечітких множин $\{H_j, W_m, G_s, V_q\}$, $j=m=s=q=1, 2, 3$ та терми $R(H)=R(W)=R(G)=R(V)=R=\{ "1", "2", "3" \}$, що відповідають найменуванням ПЗ.

Розглянемо приклад визначення нечітких змінних вхідної лінгвістичної змінної V^* для нечітких дискретних множин V_1, V_2, V_3 , що визначаються параметром ваги ОПВ. У відповідності до (1), нечіткі змінні v_1^*, v_2^*, v_3^* можуть бути представлені у вигляді кортежів:

$$\begin{aligned} \langle v_1^*, U, V_1 \rangle &= \langle "1", v_1^* \mid 0 < v < 30 \text{ кг}, X_i \in U, V_1 = (\mu_{V_1}(v), v) \rangle, \\ \langle v_2^*, U, V_2 \rangle &= \langle "2", v_2^* \mid 15 < v < 45 \text{ кг}, X_i \in U, V_2 = (\mu_{V_2}(v), v) \rangle, \\ \langle v_3^*, U, V_3 \rangle &= \langle "3", v_3^* \mid 30 < v < 60 \text{ кг}, X_i \in U, V_3 = (\mu_{V_3}(v), v) \rangle, \end{aligned}$$

де $\mu_{v_i}(v)$ – трапецієвидна ФП нечіткої змінної v_i^* до нечіткої множини V_q .

Значення нечітких змінних приймає лінгвістична змінна. Визначимо лінгвістичну змінну ваги за формулою (2)

$$V^* = \langle I, R(V^*), U \rangle,$$

де $R(V^*)$ – терм-множина лінгвістичної змінної V^* , $R(V^*) = \{ \langle "1" \rangle, \langle "2" \rangle, \langle "3" \rangle \}$; $I = \langle \text{пункт завантаження за вагою} \rangle$ – найменування нечіткої лінгвістичної змінної V^* .

Аналогічно до V^* , визначаються лінгвістичні змінні H^*, W^*, G^*

$$\begin{aligned} H^* &= \langle I, R(H^*), U \rangle = \{ \langle h_1^*, U, H_1 \rangle, \langle h_2^*, U, H_2 \rangle, \langle h_3^*, U, H_3 \rangle \}, \\ W^* &= \langle I, R(W^*), U \rangle = \{ \langle w_1^*, U, W_1 \rangle, \langle w_2^*, U, W_2 \rangle, \langle w_3^*, U, W_3 \rangle \}, \\ G^* &= \langle I, R(G^*), U \rangle = \{ \langle g_1^*, U, G_1 \rangle, \langle g_2^*, U, G_2 \rangle, \langle g_3^*, U, G_3 \rangle \}. \end{aligned}$$

Визначимо лінгвістичну змінну для оціночної вартості з двома термами

$$\begin{aligned} C^* &= \langle I, R(C^*), U \rangle = \{ \langle c_1^*, U, C_1 \rangle, \langle c_2^*, U, C_2 \rangle \}, \\ \langle c_1^*, U, C_1 \rangle &= \langle "1-2-3", c_1^* \mid 0 < c < 65000 \text{ грн.}, C_1 = (\mu_{C_1}(c), c) \rangle, \\ \langle c_2^*, U, C_2 \rangle &= \langle "4", c_2^* \mid 60000 < c < 100000 \text{ грн.}, C_2 = (\mu_{C_2}(c), c) \rangle, \end{aligned}$$

де $R(C^*)$ терм-множина лінгвістичної змінної C^* , $R(C^*) = \{ \langle "1-2-3" \rangle, \langle "4" \rangle \}$, $\mu_{v_i}(v)$ – трапецієвидна ФП нечіткої змінної v_i^* до нечіткої множини V_i .

У відповідності до алгоритма Такагі-Сугено-Канга, для чітких значень вихідної лінгвістичної змінної Z^* сингтонної бази знань ФП не задаються. Для лінгвістичної змінної Z^* визначені чотири терми $R(Z^*) = \{ \langle "1" \rangle, \langle "2" \rangle, \langle "3" \rangle, \langle "4" \rangle \}$ і набір з чотирьох чітких дискретних значень номерів ПЗ $\{ z_1^*, z_2^*, z_3^*, z_4^* \} = \{ 1, 2, 3, 4 \}$, що подаються у такому вигляді

$$Z^* = \langle I, R(Z^*), U \rangle = \{ \langle z_1^*, U, 1 \rangle, \langle z_2^*, U, 2 \rangle, \langle z_3^*, U, 3 \rangle, \langle z_4^*, U, 4 \rangle \}.$$

Для проведення моделювання визначені такі данні (табл.2): найменування вхідних $\{H^*, W^*, G^*, V^*, C^*\}$ та вихідної Z^* лінгвістичних змінних; терми нечітких змінних; діапазони значень нечітких множин $\{H_j, W_m, G_s, V_q\}$; параметри трапецієвидної ФП для нечітких множин.

Таблиця 1

Дані, визначені для нечітких лінгвістичних змінних

Тип, найменування, діапазон значень лінгвістичної змінної	Терм нечіткої змінної	Діапазон значень нечітких множин	Параметри трапецієвидної функції приналежності $\mu_{X_i}(x) - \text{Trape} [a \ b \ c \ d]$
V^* , вхідна, «Пункт завантаження за вагою», [0,60]	$v_1^* - \langle 1 \rangle$	$V_1 \in [0,30]$ кг	[0 0 20 30]
	$v_2^* - \langle 2 \rangle$	$V_2 \in [15,45]$ кг	[15 25 35 45]
	$v_3^* - \langle 3 \rangle$	$V_3 \in [30,60]$ кг	[30 40 60 60]
H^* , вхідна, «Пункт завантаження за висотою», [0,150]	$h_1^* - \langle 1 \rangle$	$H_1 \in [0,20]$ см	[0 0 10 20]
	$h_2^* - \langle 2 \rangle$	$H_2 \in [15,105]$ см	[15 25 75 105]
	$h_3^* - \langle 3 \rangle$	$H_3 \in [85,150]$ см	[85 105 150 150]
W^* , вхідна, «Пункт завантаження за шириною», [0,150]	$w_1^* - \langle 1 \rangle$	$W_1 \in [0,20]$ см	[0 0 10 20]
	$w_2^* - \langle 2 \rangle$	$W_2 \in [15,105]$ см	[15 25 75 105]
	$w_3^* - \langle 3 \rangle$	$W_3 \in [85,150]$ см	[85 105 150 150]
G^* , вхідна, «Пункт завантаження за глибиною», [0,150]	$g_1^* - \langle 1 \rangle$	$G_1 \in [0,20]$ см	[0 0 10 20]
	$g_2^* - \langle 2 \rangle$	$G_2 \in [15,105]$ см	[15 25 75 105]
	$g_3^* - \langle 3 \rangle$	$G_3 \in [85,150]$ см	[85 105 150 150]
C^* , вхідна, «ПЗ за вартістю», [0, 1E+05]	$c_1^* - \langle \text{ПЗ-1-2-3} \rangle$	$C_1 \in [0, 6.5E+4]$	[0 0 6E+4 6.5E+4]
	$c_2^* - \langle \text{ПЗ-4} \rangle$	$C_2 \in [6E+4, 1E+5]$	[6E+4 6.5E+4 1E+5 1E+5]
Z^* , вихідна, «Пункт завантаження», {1, 2, 3, 4}	$z_1^* - \langle 1 \rangle$	$Z_1=1$	За алгоритмом Такагі-Сугено-Канга, для сингтонної нечіткої бази знань функції приналежності не визначаються
	$z_2^* - \langle 2 \rangle$	$Z_2=2$	
	$z_3^* - \langle 3 \rangle$	$Z_3=3$	
	$z_4^* - \langle 4 \rangle$	$Z_4=4$	

4.3. Завдання бази правил системи нечіткого виведення моделі

База правил системи нечіткого виведення моделі, задана у відповідності до виразів (4) і (5), подається в табл. 2. Для зменшення обсягів опису задані тільки десять правил. Для кожного правила задається антецедент, що містить п'ять умов.

Рядки 1-3 і 9-10 табл. 2 задають правила для реалізації третього критерію, за яким ОПВ розподіляються за трьома ПЗ в залежності від трьох значень нечітких змінних, що визначають нечіткі діапазони (множини) ваги і габаритів за збільшенням.

База правил системи нечіткого виведення

№	Умови антецеденту									Консеквент
	Умова 1	\wedge	Умова 2	\wedge	Умова 3	\wedge	Умова 4	\wedge	Умова 5	
1	IF(v*is V ₁)	\wedge	IF(h*is H ₁)	\wedge	IF(w*is W ₁)	\wedge	IF(g*is G ₁)	\wedge	IF(c*is C ₁)	z ₁ =1
2	IF(v*is V ₂)	\wedge	IF(h*is H ₂)	\wedge	IF(w*is W ₂)	\wedge	IF(g*is G ₂)	\wedge	IF(c*is C ₁)	z ₂ =2
3	IF(v*is V ₃)	\wedge	IF(h*is H ₃)	\wedge	IF(w*is W ₃)	\wedge	IF(g*is G ₃)	\wedge	IF(c*is C ₁)	z ₃ =3
4	IF(v*is V ₂)	\wedge	IF(h*is H ₁)	\wedge	IF(w*is W ₁)	\wedge	IF(g*is G ₁)	\wedge	IF(c*is C ₁)	z ₂ =2
5	IF(v*is V ₃)	\wedge	IF(h*is H ₂)	\wedge	IF(w*is W ₂)	\wedge	IF(g*is G ₂)	\wedge	IF(c*is C ₁)	z ₃ =3
6	IF(v*is V ₁)	\wedge	IF(h*is H ₁)	\wedge	IF(w*is W ₁)	\wedge	IF(g*is G ₁)	\wedge	IF(c*is C ₂)	z ₄ =4
7	IF(v*is V ₂)	\wedge	IF(h*is H ₂)	\wedge	IF(w*is W ₂)	\wedge	IF(g*is G ₂)	\wedge	IF(c*is C ₂)	z ₄ =4
8	IF(v*is V ₃)	\wedge	IF(h*is H ₃)	\wedge	IF(w*is W ₃)	\wedge	IF(g*is G ₃)	\wedge	IF(c*is C ₂)	z ₄ =4
9	IF(v*is V ₁)	\wedge	IF(h*is H ₂)	\wedge	IF(w*is W ₂)	\wedge	IF(g*is G ₂)	\wedge	IF(c*is C ₁)	z ₁ =2
10	IF(v*is V ₁)	\wedge	IF(h*is H ₃)	\wedge	IF(w*is W ₃)	\wedge	IF(g*is G ₃)	\wedge	IF(c*is C ₁)	z ₃ =3

Рядки 4-5 табл. 2 задають правила для реалізації другого критерію, за яким ОПВ розподіляються за ПЗ в залежності від трьох значень нечітких змінних ваги, незалежно від габаритів ОПВ.

Рядки 6-8 табл. 2 задають правила для реалізації першого критерію, якщо значення оціночної вартості буде належати нечіткій змінній $c_2 \in C_2$, то незалежно від ваги і габаритів ОПВ розподіляються до одного (4-го) ПЗ.

4.4. Тестування нечіткої системи виведення моделі

Тестування нечіткої системи виведення моделі проводилось за допомогою системи перегляду правил «Rule Viewer». Система «Rule Viewer» дозволяє візуально подати весь процес нечіткого виведення з відображенням залежності значень вхідних і вихідних змінних (рис. 3).

На рис. 3 візуально подається один з варіантів процесу нечіткого виведення з реалізацією оцінки значень вхідних і вихідних змінних нечіткої моделі, а також вплив кожного з десяти правил (табл. 2) на результат нечіткого виведення. Для кожного пронумерованого правила за горизонталлю подаються графічні зображення ФП для вхідних {v, h, w, g, c} змінних. Графічні зображення, що розташовані праворуч за вертикаллю (рис. 3), демонструють процес активізації правил та розрахунку дійсного значення вихідного параметра z за виразом (6). Для видачі команди управління нечітка модель прийняття рішень визначає номер ПЗ шляхом округлення дійсного значення z за правилами математики.

5. Обговорення результатів тестування моделі

У процесі тестування моделі перевірялась можливість здійснення нечіткої класифікації ОПВ за їхніми параметрами у відповідності до заданих правил системи нечіткого виведення для реалізації заданої логіки сортування ОПВ за ПЗ АСЛ. Перевірялись три критерії нечіткої класифікації: перший – за оцінкою параметра вартості ОПВ c; другий – за оцінкою параметра ваги ОПВ v; третій – за сумісною оцінкою параметрів ваги v і габаритів ОПВ h, w, g.

Візуальне моделювання підтвердило працездатність визначених правил. Поданий на рис. 3 результат візуального моделювання підтверджує умову сортування за другим критерієм – для габаритів ОПВ за нечіткими значеннями повинен обиратися перший пункт завантаження, але для ваги – другий. За результатом обраний другий ПЗ.

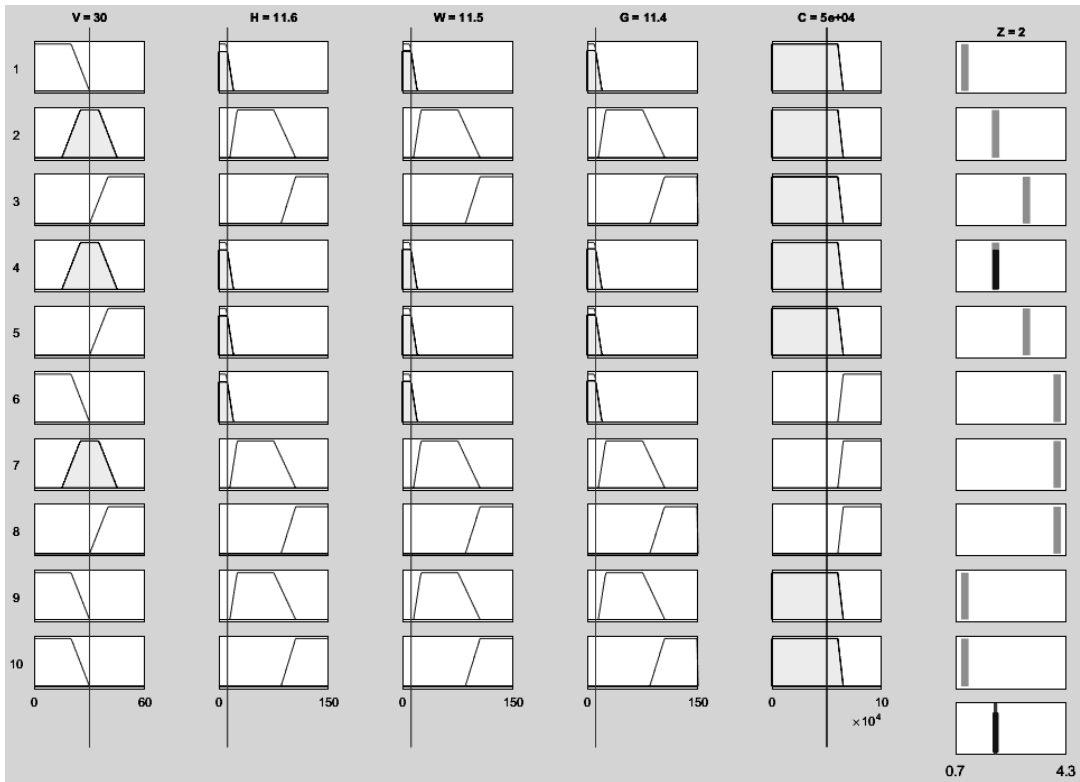
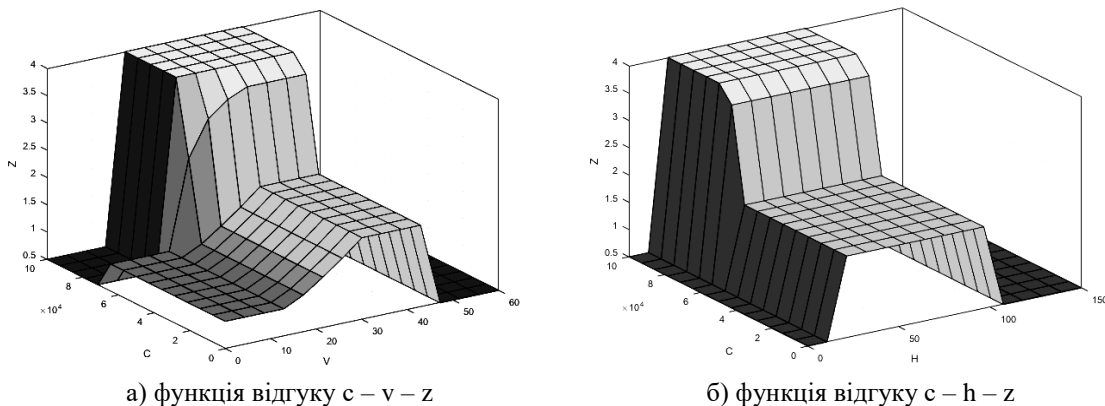


Рис. 3. Процес нечіткого виведення моделі прийняття рішень

Узагальнені результати тестування отримані у вигляді 3D-відгуків системи нечіткого виведення моделі. На рис. 4 подається функція відгуку нечіткої системи виведення моделі для двох варіантів. Для першого варіанта (рис. 4, а) подається функція 3D-відгуку для двох вхідних параметрів: оціночної вартості c , ваги v і вихідного ПЗ z . Для другого варіанта (рис. 4, б) – для оціночної вартості c , висоти h і вихідного ПЗ z .



а) функція відгуку $c - v - z$

б) функція відгуку $c - h - z$

Рис. 4. Функція відгуку нечіткої системи виведення розробленої моделі

Аналіз отриманих функцій відгуку нечіткої системи виведення моделі дозволяє зробити висновок, що усі критерії сортування реалізовані. Розроблена нечітка модель прийняття

рішень АСЛ повністю відповідає поставленій задачі нечіткої класифікації ОПВ та управлінню їх транспортуванням до ПЗ за трьома критеріями.

6. Висновки

У роботі розроблено нечітку модель прийняття рішень, що дозволяє за визначеними умовами реалізувати задану логіку сортування ОПВ за ПЗ. Для цього формалізовано систему нечіткого виведення для проведення нечіткої класифікації ОПВ за параметрами ваги і габаритів. Розподіл ОПВ за ПЗ здійснюється за трьома критеріями оцінки вартості, оцінки ваги та оцінки ваги й габаритів. Проведене моделювання за допомогою середовища Matlab підтвердило працездатність визначених критеріїв управління сортуванням ОПВ за ПЗ.

Перелік посилань:

1. Aashika Prasad, Gowtham M., Mohanraman S., Suresh, M. Automatic Sorting Machine. *International research journal of multidisciplinary technovation (IRJMT)*, 2020. 2(1). P.7-12. DOI: <https://doi.org/10.34256/irjmt2102>.
2. Riky Tri Yunardi, Winarno, Pujiyanto. Contour-based object detection in Automatic Sorting System for a parcel boxes. *International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation (ICAMIMIA)*. 2015. P. 38-41. <https://doi.org/10.1109/ICAMIMIA.2015.7507998>.
3. Ahamed M., Gu H. Package sorting control system based on barcode detection. *2022 7th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE)*. Xi'an, China. 2022. P. 148-152. <https://doi.org/10.1109/CACRE54574.2022.9834212>.
4. Oladapo B.I., Balogun V.A., Adeoye A.O.M., Ijagbemi C.O., Oluwole A.S., Daniyan I.A., et al. Model design and simulation of automatic sorting machine using proximity sensor. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2016. Vol. 19. P. 1452-1456. <https://doi.org/10.1016/J.JESTCH.2016.04.007>.
5. Sheth S., Kher R., Shah R., Dudhat P., Jani P. Automatic sorting system using machine vision. *Multi-Disciplinary International Symposium on Control, Automation & Robotics*. Nadiad, India. 2010. Vol. 1. P. 1-6. <https://doi.org/10.13140/2.1.1432.1448>.
6. Kannaki S, Karthigai Lakshmi S, Harish V, Manikandan R, Saktheeswaran G. Development of Advanced Automatic Sorting Machine using Weighing Mechanism. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2019. Vol. 8 (3). P. 1703-1707. <https://doi.org/10.35940/ijrte.C4451.098319>.
7. Modular Belt Intelligent Sorting System Product model specification. URL: <https://www.iconveytech.com/download/modular-belt-intelligent-sorting-system-product-model-specification/> (дата звернення: 01.02.2024).
8. Штовба С.Д., Панкевич О. Д., Мазуренко В. В. Залежність точності ідентифікації від обсягу нечіткої синглтонної бази знань. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2011. № 1. С. 73-78. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Itki_2011_1_12 (дата звернення: 01.02.2024).

Надійшла до редколегії 06.02.2024 р.

Гребеннік Ігор Валерійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри системотехніки ХНУРЕ, м. Харків, Україна, e-mail: igor.grebennik@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3716-9638>.

Коваленко Олексій Андрійович, аспірант кафедри системотехніки ХНУРЕ, м. Харків, Україна, e-mail: oleksii.kovalenko3@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4779-6161>.

*І.Ю. ПАНФЬОРОВА, В.В. ШУТЬКО***РОЗРОБКА МЕТОДУ ПАРАМЕТРИЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ ТРИВАЛОСТІ ОПЕРАЦІЙ ІТ-ПРОЄКТУ МІГРАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДО ХМАРНОЇ ПЛАТФОРМИ**

Розглянуто проблему підтримки локально розгорнутих інформаційних систем (ІС). Розглянуто міграцію ІС до хмари як один зі способів вирішення проблеми підтримки локально розгорнутих ІС. Представлено ІТ-проект як реалізацію процесу міграції ІС до хмари. Основну увагу зосереджено на методах оцінки тривалості операцій при виконанні ІТ-проекту міграції ІС до хмари. Виконано аналіз існуючих методів оцінювання тривалості операцій. Запропоновано метод параметричного оцінювання на основі одного з провідних методів оцінки тривалості операцій – методу PERT. Порівняно точність оцінювання методу PERT та розробленого методу параметричного оцінювання на основі методу PERT.

1. Вступ

В епоху цифрової трансформації міграція ІС до хмарних платформ (також званих далі хмарами) відокремлюється як один з ключових аспектів стратегічного розвитку для багатьох організацій. Це пояснюється тим, що хмари пропонують ряд переваг, які можуть значно покращити ефективність, гнучкість, безпеку та економічну ефективність ІТ-інфраструктури.

Міграція ІС до хмари – це процес, при якому цифрові активи, такі як дані, застосунки, переносяться до інфраструктури обраного хмарного провайдера. Традиційно організації розгортали ІС на самостійно керованій ІТ-інфраструктурі, яка підтримувалася в локальному дата-центрі. Такий підхід має свої переваги. Організації мають повний контроль над ІТ-інфраструктурою – над програмною та апаратною частинами – та можуть адаптувати їх під свої специфічні потреби. Крім того, при локально розгорнутих ІС організації мають безпосередній доступ до даних та незалежні від сторонніх систем, де ці дані могли б зберігатися. Однак такий підхід має й свої недоліки. При розгортанні ІС локально витрати на обладнання, його супровід, забезпечення необхідного рівня безпеки покладені безпосередньо на організацію. Крім того, з'являються проблеми масштабованості апаратного забезпечення, захисту від кібератак, резервного копіювання, плану відновлення при виникненні екстрених обставин (природного або штучного характеру) [1].

Міграція до хмари дозволяє усунути зазначені вище недоліки локального розгортання: хмарні провайдери забезпечують готову інфраструктуру, що включає сервери, мережеве обладнання та інші ресурси, а обслуговування може бути оплачене за різними моделями, такими як pay-as-you-go, pay-more-with-less, fixed/prepaid subscriptions та багатьма іншими [2]. Переважна більшість хмарних платформ надає інструменти для шифрування, аутентифікації та контролю доступу, що допомагає зменшити ризик витоку чутливої інформації. Хмарні платформи надають можливість легко масштабувати інфраструктурні ресурси (віртуальні машини, кластери) відповідно до потреб організації, що забезпечує ефективне функціонування навіть при стрімкому збільшенні обсягів даних чи підвищенні використання апаратних ресурсів. Провідні хмарні провайдери мають великий досвід у сфері кібербезпеки та використовують сучасні технології для виявлення та запобігання кібератакам. Вони також надають інструменти для моніторингу та відстеження подій у режимі реального часу. Багато

хмарних платформ автоматизують процеси резервного копіювання та відновлення даних, що дозволяє ефективно зберігати та відновлювати інформацію в разі виникнення проблем.

2. Аналіз літературних джерел та визначення проблеми дослідження

Міграція ІС до хмарної платформи виконується в межах спеціально організованих ІТ-проектів. Основними особливостями ІТ-проєкту міграції ІС до хмари та головною відмінністю від ІТ-проєкту створення нової системи з нуля є необхідність переносу усіх даних зі «старої» системи до «нової» та виконання детального регресійного аналізу для переконання, що нова система є функціонально ідентичною старій та виключено будь-яку втрату наявних даних, особливо для великих підприємств.

ІТ-проєкти міграції ІС до хмари, як і усі інші проєкти, потребують ретельного планування усіх видів ресурсів – часових, кадрових та фінансових. Планування часових ресурсів проєкту включає в себе оцінку тривалості виконання проєкту. Оцінка тривалості виконання проєкту, в свою чергу, складається з оцінок тривалості усіх операцій проєкту. Таким чином формується задача оцінки тривалості операцій ІТ-проєкту міграції ІС до хмари.

Крім задачі оцінки тривалості операцій для ІТ-проєкту міграції ІС до хмари можна виділити такі специфічні задачі, як розробка та реалізація шаблону міграції ІС до хмари, аналіз та оцінка сумісності існуючої системи з наявними хмарними рішеннями. Перелічені задачі наразі не мають єдиного підходу до вирішення та потребують детального вивчення та аналізу для кожного специфічного проєкту міграції даних.

На противагу цьому, для вирішення задачі оцінки тривалості операцій ІТ-проєкту були розроблені спеціальні методи оцінювання [3]. Найвідомішими класичними методами є: метод експертної оцінки (Expert Judgment), метод оцінювання за аналогами (Analogous Estimation) та метод аналізу та перегляду сценаріїв (Program Evaluation and Review Technique – PERT) [4].

Експертне оцінювання використовується для ситуацій, які вимагають звернення до експертного судження задля перевірки, інтерпретації та інтеграції наявних даних, оцінки впливу змін, прогнозування виникнення майбутніх подій і наслідків прийняття того чи іншого рішення, базуючись на думці експертів у відповідній галузі [5].

Метод оцінювання за аналогами у більшості проєктів використовується для первинного оцінювання на стадіях ініціації та планування. Рівень точності такого оцінювання залежить від ступеня подібності між оцінюваним проєктом та аналогічним проєктом/результатом, який оцінювався раніше [6].

Метод PERT використовується для комплексних проєктів, для яких поставлено такі задачі: оцінювання кількості часу, необхідного для завершення проєкту; відображення залежностей між операціями проєкту; визначення критичного шляху проєкту; визначення ймовірності того, що проєкт буде завершено в заданий термін [7].

Для управління сучасними ІТ-проєктами зазвичай використовують цілі фреймворки – заздалегідь визначені та структуровані правила, процеси, в межах яких відбувається діяльність, пов'язана з управлінням проєктом. Найвідомішими представниками таких фреймворків є Scrum та Kanban. Обидва фреймворки є втіленнями Agile-методології управління ІТ-проєктами.

Фреймворк Scrum використовує спеціальні сесії Product Backlog Refinement, під час яких розробники виконують перегляд та оцінку наявних задач. Основним методом оцінки тривалості виконання операції у Scrum є комбінація методу експертної оцінки та методу оцінювання за аналогами [8].

Фреймворк Kanban, в свою чергу, не передбачає спеціально відведених сесій для перегляду і оцінки задач та орієнтований на змінні пріоритети і візуалізацію виконання операцій. Оцінка тривалості виконання операції має лише приблизний характер, тобто точність оцінювання не є пріоритетом [9].

В реальних проєктах міграції ІС до хмари завжди має місце деякий ступінь невизначеності (потенційні проблеми при міграції даних, застосунків, проблеми з сумісністю). Найкраще адаптованими до невизначеності є Scrum та Kanban. Проте, ці фреймворки не надають єдиного механізму консолідації експертних висновків. Відсутність такого механізму не притаманна методу PERT, в якому вплив невизначеності на кінцеву оцінку частково нівелюється завдяки використанню середньозваженої оцінки експертних висновків. Досягається це завдяки застосуванню середньозваженого оптимістичного, найімовірнішого та песимістичного часу виконання операції. Ця особливість методу PERT робить його привабливішим в контексті менеджменту проєктів на фоні інших методів та краще підходить для комплексних, масштабних ІТ-проєктів [10].

Метод PERT використовує для розрахунку тривалості виконання операції три можливі сценарії, причому найбільшу перевагу віддано найімовірнішому сценарію. Такий підхід дозволяє врахувати невизначеність та ризики, пов'язані з тривалістю операцій: кожен сценарій репрезентує різні умови чи обставини, що впливають на тривалість операції. Крім цього, використання трьох сценаріїв дає змогу мінімізувати вплив недооцінки/переоцінки обставин для запобігання формування фіктивних оцінок за рахунок усереднення підсумкової оцінки. Використання кількох сценаріїв сприяє формуванню реалістичніших та адекватніших оцінок (за умови адекватності формування сценаріїв), що дозволяє виконувати ретельніше та точніше планування розкладу усього ІТ-проєкту.

Такий спосіб оцінювання має й свої недоліки. По-перше, адекватність оцінки тривалості операції залежить від адекватності формування кожного сценарію. Неадекватні оцінки сприяють неадекватному результату, на який не можна орієнтуватися. Для формування адекватних сценаріїв необхідно витратити додатковий час, якщо порівнювати з методами експертного оцінювання або оцінювання за аналогами, адже тут експертам необхідно врахувати три можливі сценарії розвитку подій (або залучити більше експертів, що призведе до збільшення витрат). По-друге, адекватність оцінки залежить не тільки від адекватності сформованих сценаріїв, а й від коефіцієнтів, які визначають вплив кожного сценарію на кінцевий результат. Тобто орієнтованість на найімовірніший сценарій з мінімальним урахуванням впливу інших сценаріїв може не відображати усі можливі випадки при оцінюванні тривалості операцій ІТ-проєктів.

Існує кілька модифікацій методу PERT, проте лише в одній з них (Modified PERT) втілено можливість регулювати вплив найімовірнішого сценарію на кінцеву оцінку тривалості операцій [11].

3. Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є підвищення точності оцінювання витрат часу на виконання ІТ-проєкту міграції ІС до хмари. Досягнення поставленої мети сприятиме покращенню планування часових ресурсів проєкту, що дозволить будувати точніші прогнози щодо строків виконання як окремих операцій проєкту, так і усього проєкту в цілому. В свою чергу, точніші прогнози часових витрат можуть позитивно вплинути на інші ресурси проєкту – зокрема, матеріальні, адже що ретельніше виконується планування часових ресурсів, тим більші

надаються можливості для ефективного розподілу матеріальних ресурсів, необхідних для виконання операцій проекту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- виконати аналіз існуючої модифікації методу PERT (Modified PERT);
- розробити метод параметричного оцінювання на базі методу PERT для оцінки тривалості виконання операцій ІТ-проекту міграції ІС до хмари, що надає можливість визначати вплив кожного з можливих сценаріїв на кінцеву оцінку;
- виконати оцінку тривалості операцій ІТ-проекту міграції ІС до хмари з використанням розробленої модифікації методу PERT;
- провести порівняльний аналіз точності оцінок тривалості операцій оригінальним методом PERT та розробленим методом параметричного оцінювання на базі методу PERT.

4. Матеріали і методи дослідження

Для виконання оцінки тривалості операції в методі PERT використовується формула

$$T = \frac{a + 4b + c}{6}, \quad (1)$$

де T – середньозважений час виконання операції; a – оптимістичний час виконання операції; b – найімовірніший час виконання операції; c – песимістичний час виконання операції.

Метод PERT заснований на припущенні, що час виконання будь-якої операції проекту є випадковою величиною і найкраще описується бета-розподілом [10]. Функція розподілу часу виконання операції має вигляд

$$f(t) = \frac{(t-a)^{\alpha-1} (c-t)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)(c-a)^{\alpha+\beta-1}}, \quad (2)$$

де $f(t)$ – функція розподілу часу виконання операції; t – найімовірніший час виконання операції; $B(\alpha, \beta)$ – бета-функція; α, β – параметри бета-розподілу; a – оптимістичний час виконання операції; b – найімовірніший час виконання операції; c – песимістичний час виконання операції.

Параметри бета-розподілу α та β розраховуються за формулами [12]:

$$\alpha = \frac{4b + c - 5a}{c - a} = 1 + 4 \frac{b - a}{c - a}, \quad (3)$$

$$\beta = \frac{5c - a - 4b}{c - b} = 1 + 4 \frac{c - b}{c - a}, \quad (4)$$

де a – оптимістичний час виконання операції; b – найімовірніший час виконання операції; c – песимістичний час виконання операції.

Таким чином, можна зробити висновок, що розрахунок параметрів бета-розподілу α та β базується значною мірою на значенні найімовірнішого сценарію і в меншій мірі – на значеннях оптимістичного та песимістичного сценаріїв.

Функція розподілу ймовірності Modified PERT описується формулою (2). Розрахунок параметрів бета-розподілу α та β у Modified PERT виконується за формулами [11].

$$\alpha = 1 + \gamma \frac{b-a}{c-a}, \quad (5)$$

$$\beta = 1 + \gamma \frac{c-b}{c-a}, \quad (6)$$

де γ – параметр для керування ступенем невизначеності (ваговий коефіцієнт); a – оптимістичний час виконання операції; b – найімовірніший час виконання операції; c – песимістичний час виконання операції.

Для розрахунку середнього значення часу виконання операції у модифікованому методі PERT використовується формула:

$$\mu = \frac{a + \gamma b + c}{\gamma + 2}, \quad (7)$$

де μ – середнє значення часу виконання операції; a – оптимістичний час виконання операції; γ – параметр для керування ступенем невизначеності (ваговий коефіцієнт); b – найімовірніший час виконання операції; c – песимістичний час виконання операції.

Перевагою даної модифікації є можливість керування ступенем невизначеності при розрахунку середнього часу виконання операції шляхом коригування значення параметра γ . Графік кривої розподілу часу виконання операції з урахуванням змін значень параметра γ наведено на рис. 1 [11].

Рис. 1 демонструє, що при значенні параметра $\gamma = 4$ графік є аналогічним графіку в оригінальному методі PERT. В свою чергу, збільшення параметра γ призводить до зменшення ступеня невизначеності часу виконання операції та збільшення ймовірності розвитку подій за найімовірнішим сценарієм. Навпаки, зменшення параметра γ призводить до збільшення ступеня невизначеності часу виконання операції та майже

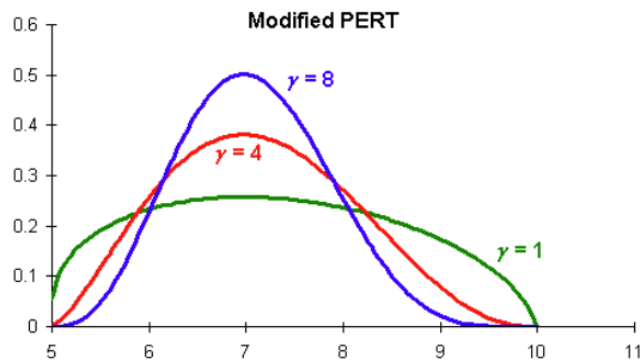


Рис. 1. Зміна форми графіка кривої бета-розподілу в залежності від параметра γ

рівномірного розподілу ймовірності розвитку подій за кожним з можливих сценаріїв. Найкращим у випадку використання Modified PERT є значення параметру γ у діапазоні $2 \leq \gamma \leq 3$. Такий вибір значення параметру γ надає змогу збалансувати ступінь невизначеності при розрахунках середнього значення часу тривалості операції [11].

Проте дана модифікація методу PERT має значний недолік. Підхід, запропонований у Modified PERT, дозволяє впливати лише на найімовірніше значення завдяки зміні параметру γ , а оптимістичні та песимістичні значення автоматично підлаштовуються під зміну цього параметру. Тобто значною мірою буде змінюватися значення ймовірності сценарію b (найімовірнішого), при зменшенні ймовірності настання оптимістичного та песимістичного сценаріїв.

5. Результати дослідження

5.1 Розробка методу параметричного оцінювання на базі методу PERT

Для вирішення проблеми орієнтованості на найімовірніший сценарій, яка наявна в оригінальному методі PERT, середнє значення часу виконання операції пропонується розраховувати за модифікованою формулою

$$\mu = \frac{\chi a + \delta b + \varepsilon c}{\chi + \delta + \varepsilon}, \quad (8)$$

де μ – середнє значення часу виконання операції; χ – ваговий коефіцієнт оптимістичного сценарію; a – час виконання операції за оптимістичним сценарієм; δ – ваговий коефіцієнт найімовірнішого сценарію; b – час виконання операції за найімовірнішим сценарієм; ε – ваговий коефіцієнт песимістичного сценарію; c – час виконання операції за песимістичним сценарієм.

У формулі (8) можливим сценаріям часу виконання операції a , b та c призначено деякі вагові коефіцієнти χ , δ та ε , що визначаються експертами, виходячи з вимоги $\chi, \delta, \varepsilon \in R$.

Дана модифікація дає змогу призначати можливим сценаріям виконання тієї чи іншої операції проекту такі вагові коефіцієнти, які, на думку експертів, будуть найрелевантнішими в контексті виконання специфічної операції.

Виходячи з формули (8), параметри бета-розподілу α та β розраховуються за формулами

$$\alpha = (\chi + \delta + \varepsilon) \frac{\mu - a}{c - a}, \quad (9)$$

$$\beta = (\chi + \delta + \varepsilon) \frac{c - \mu}{c - a}, \quad (10)$$

де χ – ваговий коефіцієнт оптимістичного сценарію; δ – ваговий коефіцієнт найімовірнішого сценарію; ε – ваговий коефіцієнт песимістичного сценарію; де μ – середнє значення часу виконання операції; a – час виконання операції за оптимістичним сценарієм; c – час виконання операції за песимістичним сценарієм.

5.2 Оцінка тривалості операцій оригінальним методом PERT та розробленим методом параметричного оцінювання на базі методу PERT

Виконано порівняння точності оцінки тривалості операцій з використанням оригінального методу PERT та розробленого методу параметричного оцінювання на базі методу PERT на практичному прикладі з реального ІТ-проекту міграції ІС до Google Cloud Platform. Розглянуто три задачі, що виконувалися розробником програмного забезпечення рівня junior без наявності попереднього досвіду виконання подібних задач та за умови, що задачі мають бути виконані у відведений термін – 10 робочих днів.

Задача 1. Створити кодову базу (репозиторій) для розміщення хмарних конфігурацій модулів ІС, налаштувати базові шаблонні конвеєри CI/CD (за допомогою DevOps спеціалістів).

Задача 2. Проаналізувати сервіс Google Cloud Storage в контексті організації збереження та версіювання даних. Надати інформацію щодо квот та лімітів на зберігання. Результати аналізу оформити як документ та презентувати результати команді розробників.

Задача 3. Проаналізувати існуючі готові рішення щодо конфігураційного серверу, порівняння альтернатив за параметрами «сумісність з Google Cloud Run» та «швидкодія». Розробити мінімальний доказ концепції (Proof of Concept, POC) та презентувати команді.

Нижче наведено оцінки тривалості операцій за оригінальним методом PERT (табл. 1) та розробленим методом параметричного оцінювання на базі методу PERT (табл. 2). Деталі розрахунків коефіцієнтів χ , δ та ε було опущено. Реальну тривалість виконання розробником трьох задач наведено в табл. 3.

Таблиця 1

Результати розрахунків часу виконання операцій за методом PERT

Задача	<i>a</i> , дні	<i>b</i> , дні	<i>c</i> , дні	μ , дні
1	1	2	3	2
2	2	3	4	3
3	4	5	6	5
Всього, дні	10			

Таблиця 2

Результати розрахунків часу виконання операцій за розробленим методом параметричного оцінювання на базі методу PERT

Задача	<i>a</i> , дні	χ	<i>b</i> , дні	δ	<i>c</i> , дні	ε	μ , дні
1	1	1	2	1	3	2,75	2,36
2	2	1	3	1	4	2,75	3,36
3	4	1	5	1	6	2,75	5,36
Всього, дні	11,10						

Дані про точність оцінки оригінальним та розробленим методами наведено в табл. 4.

Згідно з табл. 4, метод параметричного оцінювання на базі методу PERT в контексті вирішення поставленої задачі показав точність оцінки у 97,36%. На противагу цьому, оригінальний метод PERT показав точність у 87,71%, що свідчить про кращу адаптованість розробленого методу

Спостережувана (реальна) тривалість виконання операцій

Задача	Тривалість
1	2,3
2	3,5
3	5,6
Всього, дні	11,4

параметричного оцінювання для задач, де неможливо однозначно спиратися на найімовірніший сценарій тривалості операції.

Для прикладу наведено графік функції розподілу ймовірності (Probability Distribution Function, PDF) часу виконання задачі 1 для оригінального методу PERT (рис. 2) та розробленого методу (рис. 3).

Таблиця 4
Дані про точність оцінки оригінальним та модифікованим методами PERT

Метод	Точність оцінки, %
PERT	87,71
Параметричного оцінювання на базі методу PERT	97,36

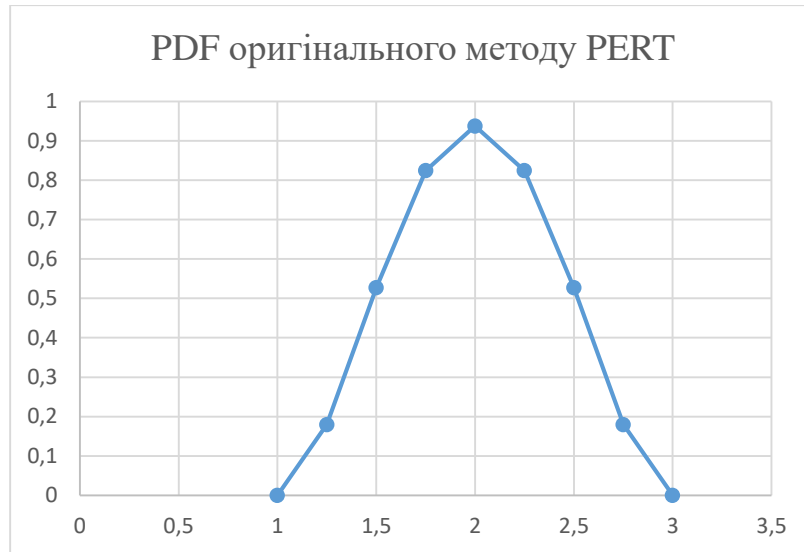


Рис.2 Розподіл ймовірності часу виконання задачі 1 для оригінального методу PERT

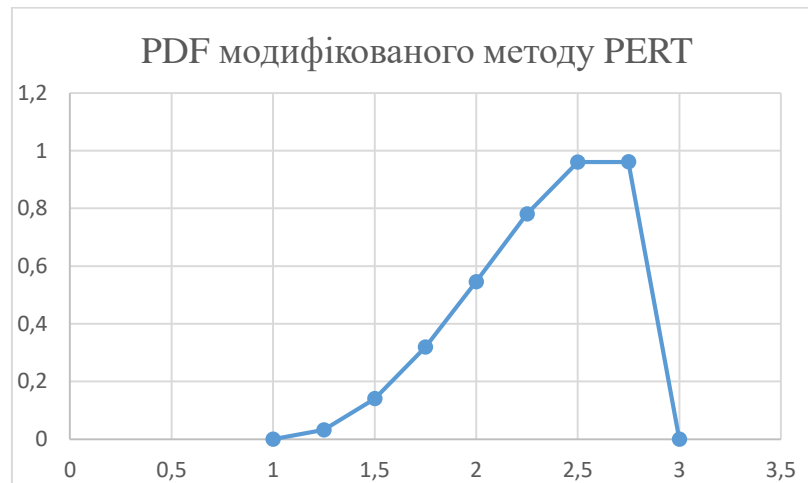


Рис.3 Розподіл ймовірності часу виконання задачі 1 для методу параметричного оцінювання на базі методу PERT

Рис. 2 демонструє відповідність середнього часу виконання задачі 1 найімовірнішому сценарію. На протипагу цьому, рис. 3 показує, що середній час виконання операції буде спиратися більше на песимістичний сценарій, завдяки варіативним ваговим коефіцієнтам при

можливих сценаріях. Такий результат відображає висновки експертів, за якими розробник рівня junior без попереднього досвіду вирішення задач, подібних до задачі 1, має витратити деякий час на ознайомлення з процесами вирішення задачі та сформувавши план вирішення задачі, перш ніж братися за її виконання. Метод параметричного оцінювання на базі методу PERT надає можливість враховувати експертні висновки щодо впливу кожного сценарію на кінцеву оцінку тривалості операції і саме тому здатний надати точнішу оцінку тривалості виконання операції, ніж оригінальний метод PERT.

6. Обговорення результатів дослідження

За результатами дослідження було практично підтверджено перевагу методу параметричного оцінювання на базі методу PERT над оригінальним в контексті точності оцінювання тривалості операцій. Перевагу було підтверджено для операцій проекту, оцінка тривалості яких не спиралася на найімовірніший сценарій тривалості.

На основі цих результатів можна зробити такий висновок: для отримання точнішої оцінки тривалості операцій проекту є доцільним використовувати модифікований метод PERT замість оригінального при актуальності припущень:

- час виконання операції розподілений за бета-розподілом;
- контекст операції (наявність часових, трудових та матеріальних ресурсів, їх завантаженість та доступність) не спирається на найімовірніший сценарій.

Однак метод параметричного оцінювання на основі методу PERT можна використовувати і у випадку, коли контекст досліджуваної операції спирається на найімовірніший сценарій. Для цього треба прийняти у формулі (8) значення вагових коефіцієнтів $\chi=1$, $\delta=4$ та $\varepsilon=1$. З цими значеннями розроблений метод параметричного оцінювання зводиться до оригінального PERT.

Цей висновок дозволяє визнати розроблений метод привабливішим за оригінальний при оцінюванні тривалості операцій проекту.

7. Висновки

Аналіз існуючої модифікації методу PERT (Modified PERT) показав, що така модифікація дозволяє керувати ступенем невизначеності при розрахунку часу тривалості операції завдяки варіативному параметру при найімовірнішому сценарії. Однак Modified PERT все ще спирається на найімовірніший сценарій, що не вирішує другої поставленої задачі дослідження.

Запропоновано метод параметричного оцінювання на базі методу PERT, який дозволяє уникнути орієнтованості на найімовірніший сценарій та, за потреби, враховувати вплив інших сценаріїв на кінцевий результат оцінювання тривалості операції.

На практичному прикладі порівняно точність оцінювання тривалості операцій оригінальним методом та розробленим методом параметричного оцінювання і з'ясовано, що для ситуацій, коли контекст операції не спирається на найімовірніший сценарій, розроблений метод дозволяє оцінити тривалість операції точніше за оригінальний.

Подальшим розвитком розробленого методу є створення загальної системи критеріїв для спрощення розрахунку варіативних коефіцієнтів експертами. Для цього необхідно розглянути певну сукупність ІТ-проектів міграції ІС до хмари, провести детальний аналіз типових задач, що виконуються в межах операцій, та сформувавши приблизний список критеріїв, за якими експерти будуть визначати вплив відповідного сценарію на кінцеву оцінку тривалості операції.

Перелік посилань

1. What is cloud migration? *Amazon*. URL: https://aws.amazon.com/what-is/cloud-migration/?nc1=h_ls (дата звернення 15.12.2023).
2. Cloud computing costs: Models & Savings. *Rikkeisoft*. URL: <https://rikkeisoft.com/blog/cloud-computing-costs/> (дата звернення 03.01.2024).
3. Estimate activity durations: Tools and techniques. *A Guide to the PROJECT MANAGEMENT BODY OF KNOWLEDGE*, 6th ed., Newtown Square, Pennsylvania: Project Management Institute, Inc., 2017. P. 200–203.

4. Brown L. Understanding estimate activity durations in project management. *Invensis Learning Blog*. URL: <https://www.invensislearning.com/blog/estimate-activity-durations/> (дата звернення 03.01.2024).
5. Sotille M. Projectmanagement.com - expert judgment. *ProjectManagement.com*. URL: <https://www.projectmanagement.com/wikis/344587/Expert-judgment> (дата звернення 03.01.2024).
6. Oberholtzer. J. ProjectManagement.com - analogous estimating. *ProjectManagement.com*. URL: <https://www.projectmanagement.com/wikis/368759/Analogous-estimating> (дата звернення 03.01.2024).
7. PERT. Summary Report Phase 1. Reference Copy. National Technical Information Service, Washington, D.C., Jul. 1958.
8. Wonohardjo E. P., Sunaryo R. F., Sudiyono Y., Surantha N. A Systematic Review Of SCRUM In Software Development. *INTERNATIONAL JOURNAL ON INFORMATICS VISUALIZATION*, Jakarta, 2019.
9. Riaz M. N. Implementation of Kanban Techniques in Software Development Process: An Empirical Study Based on Benefits and Challenges. Sukkur IBA University, Sukkur, 2019.
10. Chai W., Brush K. What is a pert chart and how to use it, with examples. *Software Quality*. URL: <https://www.techtarget.com/searchsoftwarequality/definition/PERT-chart> (дата звернення 03.01.2024).
11. Buchsbaum P. Modified PERT Simulation. Brasil, *Great Solutions*, 2012. URL: https://www.academia.edu/99710071/Modified_Pert_Simulation (дата звернення 07.03.2024)
12. Davis R. Teaching Note—Teaching Project Simulation in Excel Using PERT-Beta Distributions.: Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS), Maryland, USA, 2008.

Надійшла до редколегії 07.02.2024 р.

Панфьорова Ірина Юрївна, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри ІУС ХНУРЕ, м. Харків, Україна, e-mail: iryna.panforova@nure.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7032-9109> (науковий керівник здобувача вищої освіти Шутька Віктора Валерійовича).

Шутько Віктор Валерійович, здобувач вищої освіти, група УППІТм-22-1, факультет комп'ютерних наук, ХНУРЕ, м. Харків, Україна, e-mail: viktor.shutko@nure.ua.

УДК [519.816:005.53]:004.89

DOI: 10.30837/0135-1710.2024.180.036

Т.Г. БІЛОВА, В.М. ДЬОМІНА, І.О. ПОБІЖЕНКО, О.О. ОСТАПЕНКО

МЕТОД МІРКУВАНЬ НА ПРЕЦЕДЕНТАХ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В ГУМАНІТАРНОМУ РЕАГУВАННІ

Розглянуто особливості прийняття рішень в гуманітарному реагуванні. Визначено функції та структуру системи підтримки прийняття рішень в гуманітарному реагуванні, що базується на попередньо накопиченому досвіді прийняття рішень в даній предметній області. Як основу для представлення знань використано модифікований метод міркувань на прецедентах, що дозволяє адаптувати попередні рішення до поточної ситуації. Експериментальна перевірка отриманих результатів показала високий рівень ефективності використання запропонованого методу.

1. Вступ

За два роки військових дій гуманітарна ситуація в Україні різко погіршується. За даними Плану гуманітарних потреб та реагування на 2024 рік [1], допомоги потребують 14,6 млн. населення країни. За цей час накопичений певний досвід надання допомоги, вироблені типові сценарії гуманітарного реагування та критерії оцінки їхньої якості, внесені відповідні зміни до законодавства України. Постає питання можливості використання цього досвіду для подальшого прийняття рішень в гуманітарному реагуванні.

Складність автоматизації процесів прийняття рішень в гуманітарному реагуванні пов'язана з мінливістю становища в зоні бойових дій, низькою прогнозованістю перебігу будь-

яких надзвичайних ситуацій, невизначеністю первісних цілей та задач, обмеженнями в часі, ресурсах та можливостях доставлення допомоги, необхідністю координування дій суб'єктів надання допомоги тощо. Ця предметна область є мало дослідженою, увага в основному приділяється вирішенню окремих питань, зокрема логістичних та управління роботою волонтерських хабів, практично немає робіт, присвячених комплексному підходу до обробки інформації та накопичення знань в сфері гуманітарного реагування. Рішенням цієї проблеми може бути створення системи підтримки прийняття рішень (СППР), в основі якої лежить база знань, яка формалізує накопичений досвід для подальшого використання в прийнятті рішень.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми дослідження

За останні два десятиліття різко збільшилась кількість досліджень, присвячених прийняттю рішень в умовах надзвичайних ситуацій, що пов'язано з розростанням географії збройних конфліктів, природних та техногенних катастроф, а також з необхідністю вирішення проблеми інтеграції та забезпечення потреб біженців. В [2] на основі аналізу сучасних підходів до проведення миротворчих місій зроблено висновок, що необхідний перехід від несистематичної допомоги до «формування загального програмного середовища миротворчої інженерії», яке буде комплексно вирішувати проблеми, пов'язані з війнами, природними та техногенними катастрофами. Програми гуманітарного реагування є невід'ємною частиною миротворчої інженерії, тому вони вимагають поглибленіших досліджень.

Складність та динамічність процесів предметної області, неможливість побудови моделей логічного висновку на основі обмеженої інформації визначає використання моделей представлення знань, що здатні навчатися та адаптуватися при мінімальних початкових даних. Ефективним підходом до вирішення подібних задач є Case-Base Reasoning (міркування на прецедентах, CBR-метод) [3]. В наукових дослідженнях розглядаються модифікації цього підходу для певних предметних областей, в тому числі пов'язаних з попередженням та реагуванням на наслідки різноманітних природних та техногенних катастроф.

В [4] для попередження природних катастроф використовується модифікація CBR, що враховує просторові чинники. Для визначення локальної та глобальної подібності використовується метод найближчого сусіда. Ризик катаклізмів в [5] визначається за допомогою CBR-методу на основі гібридного сценарію, що поєднує онтологічну модель контролю несправностей з міркуванням на прецедентах. В [6] розглядається система готовності до подолання гідрологічних катастроф. Пропонується чотирьохетапний метод, що містить фільтрацію прецеденту, дедукцію, копіювання та адаптацію.

В [7] аналізуються проблеми реагування на масштабні катастрофи за допомогою гібридної онтологічної моделі. Інтеграція міркувань на прецедентах та виведення на основі правил дозволяє оцінити кількості ресурсів, які будуть розгорнуті в разі виникнення надзвичайної ситуації. В [8] пропонується для упорядкування прецедентів в базі використовувати градієнтний метод кластерного аналізу, що прискорює пошук подібних прецедентів. В [9] CBR-модифікація використовується для оцінки ризиків катастроф. На відміну від традиційного CBR, у якому враховується лише подібність інформації, запропонований гібридний метод дозволяє уникнути пропуску важливої корельованої інформації, роблячи висновки на основі даних з багатьох джерел інформації. Врахувати фактор часу дозволяє використання темпоральних прецедентів [10, 11], але процедури вилучення та адаптації для таких прецедентів є складними та малодослідженими.

В [12] для формального опису ситуації використали гібридний підхід аргументації

«зверху вниз» і «знизу вгору» з CBR-методом. Показано, що виконання процесів ідентифікації ситуації та її аналізу дозволяють усвідомити стан знань щодо цієї ситуації на основі немонотонної логіки. Іншим напрямком є представлення слабоструктурованих знань нечіткою логікою [13, 14]: функції належності оцінок за критеріями дозволяють врахувати фактор невизначеності.

Однак вибір моделей та методів, що дозволять періодично накопичувати існуючий досвід саме при прийнятті рішень в гуманітарному реагуванні, залишається недослідженим. Тому проблему даного дослідження слід сформулювати як проблему ефективного накопичення знань в даній предметній області з урахуванням попереднього досвіду реагування на гуманітарні кризи.

3. Мета і задачі дослідження

Метою даного дослідження є адаптація знання-орієнтованої моделі міркувань на прецедентах для підвищення ефективності прийняття рішень при гуманітарному реагуванні. Застосування CBR-методу дозволить спростити процедуру накопичення знань за рахунок адаптації та навчання в реальному часі. Для досягнення поставленої мети слід вирішити такі задачі:

- визначити структуру та основні функції СППР для процесів гуманітарного реагування;
- удосконалити CBR-метод з урахуванням особливостей процесів гуманітарного реагування, зокрема складності структури рішень, що приймаються;
- провести експериментальне дослідження роботи удосконаленого методу на початковому наборі даних.

4. Визначення структури та функцій системи підтримки прийняття рішень в гуманітарному реагуванні

СППР в гуманітарному реагуванні повинна оперативно обробляти інформацію різних типів з різних джерел за допомогою адекватних моделей даних та надавати особам, що приймають рішення, вичерпну інформацію про поточну критичну ситуацію, а також прогнозні моделі щодо подальшого розвитку надзвичайної ситуації з оцінкою майбутніх потреб в гуманітарному реагуванні.

СППР повинна виконувати такі задачі:

- оперативне отримання інформації від різноманітних джерел;
- попередній аналіз даних, очищення та агрегування;
- взаємодія з геоінформаційними системами, відомчими та іншими базами даних та розподіленими інформаційними системами;
- візуалізація даних, у тому числі просторових;
- інтелектуальний аналіз даних, побудова прогнозів та залежностей, у тому числі в умовах невизначеності, коли інформації про ситуацію недостатньо або її неможливо отримати;
- зберігання попереднього досвіду прийняття рішень в області гуманітарного реагування у вигляді прецедентів;
- оцінка якості прийнятих рішень.

Структура СППР для гуманітарного реагування представлена на рис. 1.

Особливістю наведеної на рис. 1 структури є модуль міркувань на прецедентах, що імітує людські міркування та заснований на ефективному використанні існуючого досвіду. Модуль реалізує такі функції:

- формування моделей прецеденту;
- початкове заповнення бібліотеки прецедентів (БП);

- формування моделі поточної ситуації;
- вибір множини прецедентів, що найбільш відповідає поточній ситуації;

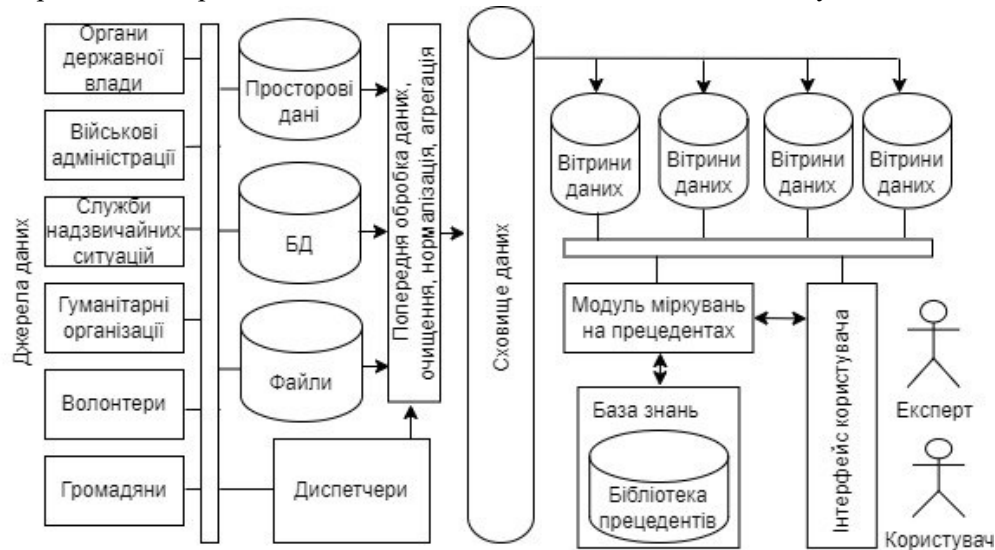


Рис. 1. Структура СППР процесів гуманітарного реагування

- адаптація отриманих рішень до поточної ситуації;
- перевірка та зберігання отриманого рішення.

Розглянемо особливості міркувань на прецедентах. Традиційний CBR-метод [3] дозволяє представити знання про предметну область у вигляді деякого опису ситуації і відповідного їй рішення:

$$case = \langle situation, solution, result \rangle, \quad (1)$$

де *situation* – ситуація, що описує даний прецедент; *solution* – рішення; *result* – результат застосування рішення.

Міркування на основі прецедентів є циклічним процесом, що містить рішення проблеми, запам'ятовування рішення в формалізованому вигляді, вирішення нової проблеми тощо. В загальному вигляді CBR-цикл містить чотири етапи:

- пошук та відбір найподібнішого поточній ситуації прецеденту;
- повторне використання відібраного прецеденту;
- перегляд та адаптація відібраного прецеденту для вирішення поточної проблеми;
- збереження отриманого досвіду.

Головною перевагою використання CBR-методу можна вважати відсутність складних етапів отримання знань, таких як формалізація та узагальнення знань експерта і верифікація системи на коректність та повноту. З іншого боку, практичне використання цього методу ускладнюється тим, що не розроблено механізми, які дозволяли б враховувати структуру прийнятих рішень та критерії вибору декількох рішень, що є близькими до поточної ситуації.

Традиційно найвразливішим є етап адаптації прецеденту, особливо якщо в предметній області не виконується принцип регулярності. В такому разі найближчий за певною метрикою

прецедент не буде містити прийнятного рішення.

5. Метод міркувань на прецедентах для підтримки прийняття рішень в гуманітарному реагуванні

5.1. Розробка модифікованого методу міркувань на прецедентах

Для адаптації міркувань на прецедентах до особливостей процесів гуманітарного реагування пропонується використовувати модифікований метод прецедентів. Знання про предметну область (1) представимо у вигляді прецеденту:

$$case = \langle S, R, count \rangle, \quad (2)$$

де S – ситуація, $S \in U^S$ – множині можливих ситуацій; R – впорядкована множина концептів рішень, $R \subset U^R$ – підмножина множини концептів рішень; $count$ – кількість вдалих використань прецеденту.

В свою чергу, кожна ситуація S характеризується набором параметрів x_1, x_2, \dots, x_n , що приймають значення з діапазонів $x_1 \in X_1, x_2 \in X_2, \dots, x_n \in X_n$, де X_1, X_2, \dots, X_n – діапазони значень відповідного параметра, а n – кількість параметрів прецеденту. Наприклад, при прийнятті рішень в сфері забезпечення населення водою параметрами може бути кількість населення в зоні ураження, наявність централізованого водопостачання, якість водопровідної води, наявність відкритих джерел води та їхня якість, тощо.

Кожному параметру ситуації x_1, x_2, \dots, x_n ставляться у відповідність вагові коефіцієнти $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n, \varphi_i \in [0,1], i = \overline{1, n}$, що задаються експертом відповідно до специфіки кожного значення.

Рішення R , що міститься в прецеденті, в свою чергу, містить набір кроків $r_1, r_2, \dots, r_b, r_i \in R, i = \overline{1, b}$, де b – кількість кроків в рішенні r . В свою чергу, кожен крок містить в собі пару

$$r_i = \langle concept_i, num_i \rangle, \quad (3)$$

де $concept_i$ – концепт, $concept_i \in C$ – множині концептів предметної області; num_i – кількісна характеристика $concept_i$, $num_i \in \mathfrak{R}_i$ – множині допустимих значень відповідного концепту.

Наприклад, концептом може бути організація підвезення питної води в цистернах, тоді num_i – кількість необхідних цистерн. Або у випадках забруднення води може здійснюватися закупівля хімічних реагентів для очисних споруд, в такому разі кількісна характеристика визначає кількість реагентів, які необхідно закупити.

Для вилучення прецедентів розглянемо метод найближчого сусіда [3] з урахуванням специфіки процесів гуманітарного реагування. Для цього введемо додатково величину Q – порогове значення ступеню відмінності поточної ситуації та прецеденту. В результаті відбору

знаходиться множина прецедентів, ступень відмінності яких менше або дорівнює пороговому значенню. Це дозволяє надати експерту інформацію про деяку множину прецедентів, кожен з яких є близьким до поточної ситуації.

Вхідними даними є множина параметрів, що характеризує поточну ситуацію cur : $x_1^{cur}, x_2^{cur}, \dots, x_n^{cur}$, P – непушта множина з БП розмірністю m , $p_k \in P$, $k = \overline{1, m}$. Вихідними даними є множина W , для всіх елементів якої виконується нерівність $d(p_k, cur) \leq Q$, де $d(p_k, cur)$ – відстань між прецедентом та поточною ситуацією. Тоді модифікований метод міркувань на прецедентах містить такі кроки:

Крок 1. Задається вихідна множина $W = \emptyset$, $id = 1$, де id – номер прецеденту з БП.

Крок 2. Якщо $id \leq m$, обирається наступний прецедент з P та здійснюється перехід до кроку 3. Інакше – всі прецеденти з бази розглянуті, здійснюється перехід до кроку 5.

Крок 3. Розраховується відстань між обраним прецедентом та поточною ситуацією за Мангеттенською метрикою ($\beta = 1$):

$$d(p_k, cur) = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^n \varphi_i |x_i^{p_k} - x_i^{cur}|^\beta \right\}^{1/\beta}}{\sum_{i=1}^n \varphi_i}. \quad (4)$$

Крок 4. Якщо $d(p_k, cur) \leq Q$, прецедент p_k включається до множини W . Виконується операція $id = id + 1$, здійснюється перехід до кроку 2.

Крок 5. Якщо $W = \emptyset$, то експертом приймається рішення або збільшити Q та перейти до кроку 1, або здійснити перехід до кроку 10.

Крок 6. Проводиться ранжування множини W за зменшенням значення $d(p_k, cur)$. Якщо значення відстані співпадають, то другим параметром ранжування є кількість вдалих використань $count$.

Крок 7. Якщо прийнято рішення про збереження прецеденту з мінімальною відстанню, то здійснюється перехід до кроку 10.

Крок 8. Для адаптації обирається два прецеденти p_1 та p_2 , для яких відстань (4) є мінімальною. Виконується об'єднання рішень $r_{p_1} \cup r_{p_2}$ за таким правилом: якщо $concept_{i_{p_1}} = concept_{i_{p_2}}$, то значення концепту рішення визначається за правилом обчислення середнього арифметичного кількісних характеристик концепту.

Крок 9. Зберігається новий прецедент.

Крок 10. Кінець виконання методу.

Результатом використання модифікованого CBR-методу є прецедент, що містить адаптоване до поточної ситуації рішення.

5.2. Експериментальне дослідження результатів модифікації базового методу міркувань на прецедентах

На основі модифікованого CBR-методу було розроблено прототип модуля міркувань на

прецедентах, інтерфейс якого представлено на рис. 2. Дані для проведення навчання, пов'язані з забезпеченням населення питною та технічною водою в умовах надзвичайних ситуацій, були отримані з [1] та інших відкритих джерел.



Рис. 2. Приклад використання прототипу модуля міркувань на прецедентах

Як початковий набір даних було створено п'ятдесят прецедентів. Кожен прецедент містив набір параметрів, що його характеризує, та відповідні кроки рішень. Для проведення навчання на прецедентах початкове наповнення БП склало п'ятнадцять прецедентів. В процесі навчання набір параметрів кожного наступного прецеденту розглядався як нова ситуація, для якої слід знайти рішення. Отримане в результаті адаптації рішення порівнювалось з рішенням нового прецеденту для оцінки якості класифікації, після чого новий прецедент поміщався в БП.

На рис. 3 наведено графік залежності якості класифікації від кількості прецедентів в БП, що відображає чисельні результати експерименту.

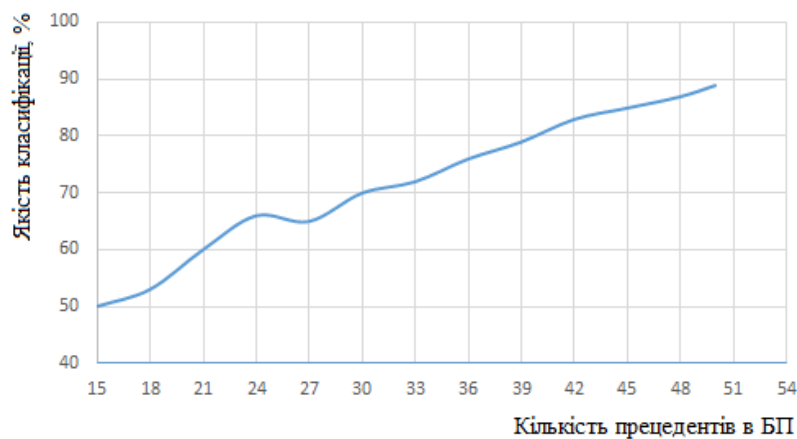


Рис. 3. Графік залежності якості класифікації від кількості прецедентів в БП

6. Обговорення результатів дослідження

СППР для гуманітарного реагування містить як складову модуль міркувань на прецедентах, який на основі інформації, отриманої з вітрин даних (рис. 1), формує прецеденти минулих ситуацій і зберігає їх у БП. Для вилучення та адаптації прецедентів з БП використовується модифікований СВР-метод, що має такі особливості:

– параметричне представлення прецеденту (2) окрім набору параметрів і рішення містить частоту використання прецедентів, що дозволить у разі отримання однакових відстаней вилучати прецеденти, що мали більше вдалих застосувань;

– розширення представлення рішення прецеденту (3) за рахунок розділення на концепти (кроки) та надання кожному концепту додаткових характеристик дозволить адаптувати прецеденти, для яких методом найближчого сусіда отримано відстані в заданих межах, шляхом здійснення процедури об'єднання відповідних концептів.

Як видно з рис. 3, на початку експерименту, коли БП містила п'ятнадцять прецедентів, якість класифікації нових прецедентів складала приблизно 50 %. Але при збільшенні прецедентів якість класифікації повільно зростає до 89 %, коли число прецедентів в БП становить п'ятдесят випадків. Таким чином, можна вважати, що метод міркувань на прецедентах є достатньо ефективним рішенням у випадках, коли немає змоги зібрати багато прикладів вирішення подібної проблеми у минулому. Побудована СППР на основі модуля міркувань на прецедентах дозволить в режимі навчання накопичувати знання та адаптувати їх для вирішення подібних ситуацій у майбутньому.

З метою підвищення ефективності використання модифікованого методу міркувань на прецедентах в подальшому планується розширення параметричного представлення прецеденту онтологічною складовою, що може бути використано для прийняття рішень на стратегічному рівні. Крім того, введення часових параметрів в представлення прецеденту дозволить використовувати міркування на прецедентах з урахуванням розвитку поточної ситуації у часі.

7. Висновки

У ході дослідження було розроблено структуру СППР для гуманітарного реагування, що відповідає особливостям прийняття рішень в даній предметній області. Для підвищення якості прийняття рішень використано модифікований метод прецедентів, який дозволяє представляти рішення для кожного прецеденту у вигляді послідовності кроків, кожен з яких має відповідну характеристику, та в подальшому використовувати об'єднання цих кроків в процесі адаптації.

Проведене експериментальне дослідження показало, що використання модифікованого методу міркувань на прецедентах дозволить структурувати знання, пов'язані з гуманітарним реагуванням, та в подальшому при виникненні подібних ситуацій ідентифікувати їх і повторно використовувати навіть при невеликому обсягу БП.

Перелік посилань:

1. План гуманітарних потреб і реагування. Україна. Цикл гуманітарних програм. 2024 рік. URL: <https://www.unhcr.org/ua/wp-content/uploads/sites/38/2024/01/Ukraine-HNRP-2024-Humanitarian-Needs-and-Response-Plan-EN-20240110.pdf> (дата звернення: 12.01.2024).
2. Lepskiy M., Lepska N. The War in Ukraine and its Challenge to NATO: Peacekeeping to Peace Engineering. *American Behavioral Scientist*. 2023. № 67.3. P. 402–425. <https://doi.org/10.1177/00027642221144833>.
3. Watson I.D., Marir F. Case-based reasoning: A review. *The Knowledge Engineering Review*. 1994. № 4 (9). P. 355-381. <https://doi.org/10.1017/S0269888900007098>.

4. Zheng Z., Jianhua C. An improved spatial case-based reasoning considering multiple spatial drivers of geographic events and its application in landslide susceptibility mapping. *Catena*. 2023. № 223. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106940>.
5. Yu F., Fan B., Qin C., Yao C. A scenario-driven fault-control decision support model for disaster preparedness using case-based reasoning. *Natural Hazards Review*. 2023. Vol. 24, No. 41. <https://doi.org/10.1061/NHREFO.NHENG-1722>.
6. Zhu M., Chen R., Chen S., Zhong S., Lin T., Huang Q. Ontology-supported case-based reasoning approach for double scenario model construction in international disaster medical relief action. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018. Vol. 842. P. 239-250. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98776-7_26.
7. Mehla S., Jain S. An ontology supported hybrid approach for recommendation in emergency situations. *Annals of Telecommunications*. 2020. Vol. 75, No. 7-8. P. 421-435. <https://doi.org/10.1007/s12243-020-00786-z>.
8. Воркут Т. А., Луцкай Ю. В., Харута В. С. Концептуальна модель прецедентного формування портфеля постачальників логістичних послуг в проектах логістичного аутсорсингу. *World science*. 2021. № 5 (66). С. 21-29. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30052021/7586.
9. Jiang X., Wang S., Wang J., Lyu S., Skitmore M. A decision method for construction safety risk management based on ontology and improved cbr: Example of a subway project. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17, No 111. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113928>.
10. Чалий С. Ф., Прибыльнова І. Б. Ситуаційний підхід до представлення темпоральних знань прецедентів. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. 2016. № 45. С. 70–73. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2018-61-11-956-962>.
11. Dyomina V., Bilova T., Pobizhenko I., Chala O., Domina T. Representation of Knowledge by Temporal Cases in Humanitarian Response. *Computational Linguistics and Intelligent Systems: Proceedings of the 7th International Conference, Volume III: Intelligent Systems Workshop, Kharkiv, Ukraine, April 20–21, 2023*. P. 126–136. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3403/paper10.pdf> (дата звернення: 12.01.2024).
12. Jain S., Patel A. Situation-Aware Decision-Support During Man-Made Emergencies. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2020. Vol. 605. P. 532-542. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30577-2_47.
13. Волошин О. Ф., Маляр М. М., Поліщук В. В., Шаркаді М. М. Інформаційне моделювання нечітких знань. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2018. № 4. С. 84–95. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-4-8>.
14. Білова Т. Г., Дьоміна В. М., Мар'їн С. О., Побіженко І. О. Використання нечіткої логіки для представлення знань темпоральними прецедентами в умовах невизначеності. *Системи обробки інформації*. 2023. № 1(172). С. 7-12. <https://doi.org/10.30748/soi.2023.172.01>

Надійшла до редколегії 01.03.2024 р.

Білова Тетяна Георгіївна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри ІУС ХНУРЕ, м. Харків, Україна, e-mail: tetiana.bilova@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1085-7361>.

Дьоміна Вікторія Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій, кібернетики та захисту інформації ДБТУ, м. Харків, Україна, e-mail: vvdemina17@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6467-5021>.

Побіженко Ірина Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри ІІ ХНУРЕ, доцент кафедри цифрових комунікацій та інформаційних технологій ХДАК, м. Харків, Україна, e-mail: irina_pob@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0723-1878>.

Остапенко Олена Олексіївна, здобувач вищої освіти, група УППІТМ-23-1, факультет комп'ютерних наук, ХНУРЕ, м. Харків, Україна, e-mail: olena.ostapenko@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4146-4669>.

В.В. ЯРМАК

РОЗРОБКА БІЗНЕС-МОДЕЛІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НАЙМУ НОВИХ СПІВРОБІТНИКІВ ДО ІТ-КОМПАНІЙ

Розглянуто особливості процесу найму персоналу в ІТ-галузі України. Встановлено переваги та недоліки застосування для планування подібних процесів моделей бізнес-планування (зокрема, Business Model Canvas). Запропоновано модифікацію методики Уолта Діснея як інструменту збільшення гнучкості виконання процесу підвищення ефективності найму нових співробітників до ІТ-компаній. Визначено ключові діяльності Business Model Canvas для цього процесу та запропоновано послідовність виконання цих діяльностей. Розроблено Business Model Canvas процесу підвищення ефективності найму нових співробітників до ІТ компаній.

1. Вступ

Сучасні українські ІТ-компанії слід вважати підприємствами, які постачають ІТ-послуги на вимоги тих фізичних або юридичних осіб, які споживають ці послуги для задоволення своїх бізнес-потреб. Тому системи управління ІТ-компаніями повинні поєднувати у собі моделі і методи довгострокового планування з моделями та методами гнучкого реагування на ризики, які виникають в процесі діяльності цих компаній [1]. Одним з таких ризиків є ризик найму немотивованого персоналу як одного з найважливіших ресурсів ІТ-компанії.

Проблема найму дійсно талановитих та мотивованих ІТ-фахівців, що повністю відповідають вимогам вакансії, в теперішній час полягає у тому, що зараз ринок ІТ-персоналу дуже перенасичений кандидатами (кадрами), що йдуть в ІТ-галузь тільки за великим фінансовим прибутком, або мають низький рівень кваліфікації. Це призводить до того, що ІТ-компанії витрачають велику кількість грошей та часу на обробку та аналіз резюме подібних кандидатів. Метою цих витрат є виявлення та вибір для подальшого опрацювання підмножини резюме фахівців, які будуть релевантними потребам ІТ-компанії. Особливо сильно ця проблема проявляється для співробітників, новоприйнятих на початкові позиції в галузі ІТ: серед них, насправді, тільки одиниці є мотивованими й талановитими і свідомо обирають спеціальність. Причина в тому, що багато старшокласників відчують складності при виборі майбутньої професії, не розуміють, ким вони хочуть стати в майбутньому. Не маючи достатньої інформації та досвіду, вони керуються не своїми уподобаннями, а міркуваннями престижності, майбутньої зарплати та побажаннями батьків. Це призводить до великого розчарування та незадоволеності, як під час подальшого навчання, так і під час безпосереднього виконання робочих обов'язків.

Головною причиною виникнення цієї проблеми слід вважати застосування українськими ІТ-компаніями методів найму, які відносяться до методів пасивного реагування на виникаючий ризик. До основних методів найму нового персоналу зараз відносяться: розміщення інформації про вакансії на сайтах пошуку роботи, проведення ярмарок вакансій, пошук кандидатів в професійних соціальних мережах. Проте ці методи мають великий спільний недолік: вони використовуються тільки для відбору кандидатів згідно з «воронкою» найму. Тому велика кількість кандидатів, що претендують на вакансії, особливо саме на

початкові позиції в галузі ІТ, не дуже розуміють, чи то дійсно та галузь, у якій вони хотіли б працювати.

Найпоширенішим шляхом ліквідації розглянутої вище проблеми є перехід від методів пасивного реагування на постійно існуючий ризик найму немотивованого персоналу до стратегій і методів активного попередження виникнення цього ризику. Як приклад такої стратегії у дослідженні пропонується розглядати стратегію проведення профорієнтаційної діяльності серед майбутніх кандидатів на роботу в ІТ-галузі. Тому дослідження моделей формування подібних стратегій з врахуванням особливостей ІТ-галузі є актуальними з теоретичної та прикладної точок зору.

2. Аналіз особливостей процесу найму персоналу в ІТ-галузі України і постановка проблеми дослідження

Розглянуті у [2] сучасні особливості процесу найму персоналу в ІТ-галузі дозволяють зробити такі висновки:

- а) кількість заявок кандидатів на посади збільшилася;
- б) попит на значну кількість посад в ІТ-галузі залишається дуже високим;
- в) сам процес найму персоналу стає довшим через додаткові вдосконалення процесу найму кваліфікованих та мотивованих фахівців.

Як приклади таких вдосконалень у [2] вказуються тестові завдання та організація додаткових етапів відбору персоналу. Але такі вдосконалення призводять до підвищення складності найму нових фахівців, і як наслідок – до витрат зайвого часу й грошей.

Перший з цих висновків підтверджується результатами дослідження ринку праці станом на лютий 2024 р. [3]. За цим дослідженням, середня кількість відгуків на вакансію зросла до рекордних 32,9 на 1 вакансію. При цьому серед категорій вакансій лідерство займають категорії Quality Assurance (QA) (116,2 відгуків на вакансію) та Front-End (108,8 відгуків на вакансію).

Слід зазначити, що категорії QA та Front-End є також лідерами серед категорій вакансій, заявки до яких надають фахівці з інших ІТ-спеціальностей та галузей діяльності. Існування проблеми перенасичення ІТ-ринку праці та значної кількості світчерів також підтверджується опублікованими у [3] результатами. Це означає, що знайти заявку дійсно релевантного кандидата серед великої множини поданих заявок стало значно складніше. Таким чином, наведені у [3] результати підтверджують також і третій з розглянутих вище висновків.

Стан відновлення ринку праці в ІТ-галузі України може бути охарактеризований графіком зміни кількості вакансій у цій галузі за період з квітня 2021 р. по березень 2024 р., який наведено на рис. 1 [4].

З наведеного на рис. 1 графіка видно, що кількість вакансій в ІТ-галузі України до лютого 2022 р. знаходилася, в середньому, у діапазоні 9000-10000 заявок. З лютого 2022 р. по листопад 2022 р. кількість вакансій знаходилася, в середньому, у діапазоні 4000-5000 заявок. З грудня 2022 р. по грудень 2023 р. кількість вакансій знаходилася, в середньому, у діапазоні 3000 – 4000 заявок. З січня 2024 р. по березень 2024 р. кількість вакансій знаходилася, в середньому, у діапазоні 4500-5000 заявок. Таким чином, можна визнати, що кількість вакансій в ІТ-галузі України почала зростати і досягає половини від попиту, який існував до лютого 2022 р., що підтверджує другий з розглянутих вище висновків.

Вакансії

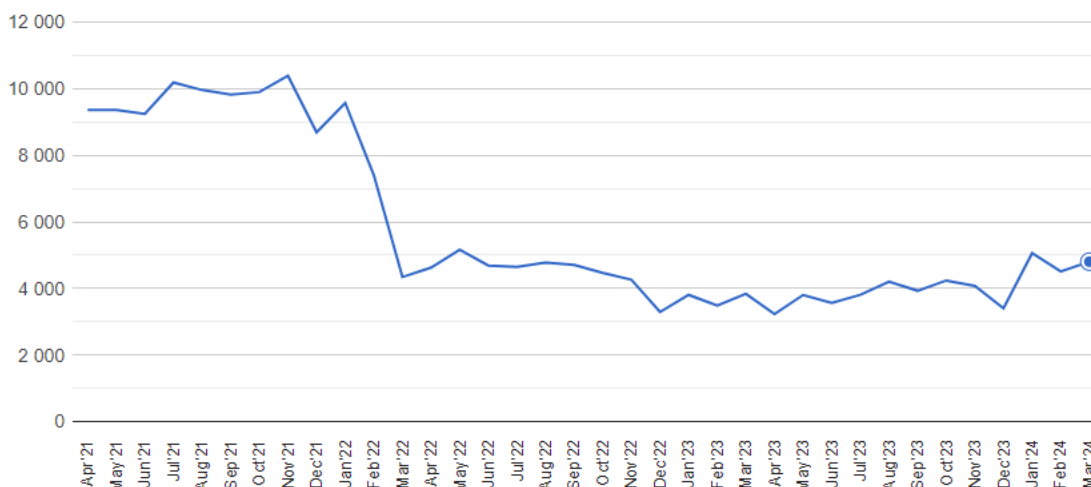


Рис. 1. Графік зміни кількості вакансій в ІТ-галузі України

Слід також зазначити, що найбільшу кількість вакансій в ІТ-галузі України у березні 2024 року зосереджено у категоріях QA (266 вакансій) та Front-End (260 вакансій) [4]. Саме ці категорії вважаються категоріями з легким способом професійного входу, тобто такими, посади в яких можуть обіймати фахівці, що перейшли до ІТ з інших галузей бізнес-діяльності.

Взагалі для України проблема невідповідності отриманої професійної освіти вимогам фаху, за яким працюють фахівці або бажають працювати кандидати на посади, є дуже значною. У 2023 р. компанія Rakuten Viber провела опитування більше, ніж 72000 українських студентів. Результати опитування показали, що близько 40 % респондентів не працюють за спеціальністю: 17 % одразу почали кар'єру в іншій галузі, а 21 % змінили сферу пізніше. Не змінювали напрям зі студентських років тільки 34 % опитуваних [5]. Результати цього опитування підтверджуються дослідженням українського кадрового порталу grc.ua. За результатами цього дослідження, 45 % українців не люблять свою роботу [6].

Таким чином, існування значної нестачі кадрів в ІТ-галузі є проблемою, яка для України була і залишається актуальною. Одними з причин виникнення цієї проблеми є завищені запити кандидатів на початкову зарплату, очікування вищих зарплат за кордоном, помилковий вибір спеціальності під час вступу до закладів вищої освіти (людина не бажає рости та розвиватися в раніше обраному напрямку) тощо.

Для вирішення цієї проблеми рекомендується перейти від розглянутих у [2] вдосконалень існуючого процесу до формування довгострокової стратегії професійної орієнтації кандидатів на посади в ІТ-компаніях. Але подібний підхід в Україні майже не використовується. Зараз на території України існує багато профорієнтаційних центрів, які в більшості випадків пропонують пройти лише тестування на визначення схильностей і співбесіду з психологом, щоб результат був виваженим і обдуманим. Однак часто цього недостатньо, щоб оптимально обрати майбутній фах. Представники профорієнтаційних центрів бачать проблему в тому, що представник якоїсь професії описує свою діяльність надто суб'єктивно. Таким чином, претендент отримує лише часткову інформацію (зміст якої може бути викривленим внаслідок суб'єктивного викладення) про майбутній фах.

За кордоном на зміну моделі, за якою після формальної освіти людина отримує стабільну роботу, прийшла кар'єрна модель побудови множини шляхів, здебільшого різних, індивідуального розвитку протягом усього життя [7]. Одним з варіантів застосування кар'єрної моделі є розглянутий у [7] підхід «BE Aware STudent», в основу якого покладено персоналізовану Business Model Canvas. Застосування Business Model Canvas дозволяє здобувачам освіти індивідуалізувати освітній напрям і почати раннє планування своєї кар'єри. Співробітники закладів освіти можуть застосовувати персоналізовану Business Model Canvas для надання здобувачам освіти ринкового потенціалу дисципліни, яку вони викладають, та для підготовки еталонної моделі можливих посад, пов'язаних з тематикою заняття. Співробітники кар'єрних офісів можуть використовувати персоналізовану Business Model Canvas для консультування здобувачів освіти та збирання професійних вимог від роботодавців [7]. На необхідність поєднання Business Model Canvas як найрозповсюдженішої моделі бізнес-розвитку із безпосередньою участю в освітньому процесі для підприємств малого бізнесу, до якого в Україні належить значна кількість ІТ-компаній, вказують і результати дослідження [8].

Але застосування Business Model Canvas без її суттєвих змін в поточних українських умовах недоцільно. Як показано в [9], застосування Business Model Canvas для розвитку підприємств малого бізнесу ефективно тільки у випадку, якщо ринок продукції чи послуг цих підприємств статичний. Якщо сегменти ринку змінюються достатньо динамічно, підприємці здебільшого переходять від використання класичної Business Model Canvas до застосування власного практичного досвіду. Але проблема вдосконалення Business Model Canvas з використанням гнучких моделей бізнес-розвитку залишається майже недослідженою.

3. Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є створення бізнес-моделі для професійної орієнтації кандидатів на посади в ІТ-компаніях. Очікувана бізнес-модель повинна поєднувати переваги базових моделей планування бізнесу та гнучких методів бізнес-розвитку з врахуванням особливостей процесу професійної орієнтації у ІТ-галузі України.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- модифікувати методику Уолта Діснея як один з гнучких методів виконання ключових діяльностей процесу підвищення ефективності найму нових співробітників до ІТ-компаній;
- розробити загальну модель процесу підвищення ефективності найму нових співробітників до ІТ-компаній на основі Business Model Canvas.

4. Опис бізнес-моделі, що брала за основу

Об'єктом дослідження є процес підвищення ефективності найму нових співробітників до ІТ-компаній. Цей процес є однією із складових загального процесу найму персоналу в ІТ-галузі і розглядається у дослідженні як один із заходів постійного поліпшення процесів управління ІТ-проектами, які виконуються ІТ-компаніями України.

Як основну модель планування процесу підвищення ефективності найму нових співробітників до ІТ-компаній запропоновано розглядати Business Model Canvas. Ця модель є стратегічним інструментом управління, який дозволяє описувати, аналізувати та проектувати бізнес-моделі. За допомогою Business Model Canvas підприємці можуть швидко і наочно аналізувати та адаптувати свої бізнес-моделі, щоб відповідати змінам у ринковому середовищі та потребам клієнтів. Використовуючи цю модель, можна з легкістю ідентифікувати сильні сторони бізнесу, потенційні ризики та можливості для зростання [10].

Як і переважна більшість моделей бізнес-управління, Business Model Canvas є концептуально-блочною. Такі моделі описують досліджуваний бізнес-процес не як сукупність кількісних показників, а як сукупність окремих блоків, кожен з яких визначається у термінах досліджуваної предметної галузі та синтаксично і семантично відрізняється від інших блоків такої моделі. Business Model Canvas складається з таких блоків [10]:

- «Сегменти користувачів»;
- «Ціннісна пропозиція»;
- «Канали маркетингу»;
- «Відносини з клієнтами»;
- «Доходи»;
- «Затрати»;
- «Ключові ресурси»;
- «Ключові діяльності»;
- «Ключові партнери».

Блок «Сегменти користувачів» визначає різні групи людей або організацій, які бізнес прагне обслуговувати. Кожен сегмент має свої потреби, поведінку та інші характеристики, які потребують унікального підходу.

Блок «Ціннісна пропозиція» визначає продукти або послуги, які представляють цінність для конкретного сегмента клієнтів. Ними можуть бути інновація, зниження вартості, підвищення якості тощо, що робить пропозицію унікальною та привабливою для клієнтів.

Блок «Канали маркетингу» описує, як компанія рекламує свою пропозицію цінності для клієнтів. Для цього можуть використовуватися Інтернет- або офлайн-канали маркетингу.

Блок «Відносини з клієнтами» визначає, як компанія будує та підтримує відносини зі своїми клієнтами (персоналізоване обслуговування, самообслуговування, автоматичні послуги тощо).

Блок «Доходи» показує, з яких джерел та яким чином компанія отримує дохід. Це можуть бути продажі товарів, підписки, ліцензійні відрахування, рекламні доходи тощо.

Блок «Затрати» показує, на які активності та ресурси компанія витрачає кошти.

Блок «Ключові ресурси» описує найважливіші активи, необхідні для створення пропозиції цінності, досягнення ринкового проникнення та ефективної роботи бізнесу. Ними можуть бути фізичні, інтелектуальні, людські або фінансові ресурси.

Блок «Ключові діяльності» визначає основні дії, які компанія повинна виконувати для успішної роботи своєї бізнес-моделі, наприклад, виробництво, маркетинг, доставка, тощо.

Блок «Ключові партнери» визначає мережу постачальників і партнерів, які допомагають компанії ефективно функціонувати. Партнерства можуть включати стратегічні альянси, співпрацю з постачальниками, аутсорсинг певних бізнес-процесів тощо [10].

Зазвичай результати створення чи модифікації варіантів Business Model Canvas представляються табличним або графічним способом – у вигляді таблиці або рисунку, елементами яких є фрагменти тексту, що визначають зміст окремих блоків моделі.

Для підвищення гнучкості заходів, пов'язаних із презентаціями IT-професій, запропоновано використовувати метод Уолта Діснея, створений в 1990-х роках Робертом Б. Ділтом. В канонічному вигляді цей метод покликаний допомагати невеликій групі з чотирьох-шести осіб розробити нові ідеї та рішення. Основою для цього є три ролі, які Уолт Дісней використовував під час свого творчого процесу, – Мрійник, Реаліст та Критик. На першому

етапі методу людина у ролі Мрійника повинна висувати яскраві ідеї. На наступному етапі людина у ролі Реаліста повинна ретельно вивчити запропоновані Мрійником ідеї, щоб з'ясувати, чи можливо їх реалізувати у житті. На останньому етапі людина у ролі Критика повинна проаналізувати слабкі сторони ідей, які не були відкинуті на першому та другому етапах. Таким чином, метод Уолта Діснея дозволяє розглядати запропоновані ідеї з різних точок зору [11]. Застосування цього методу для управління презентаціями ІТ-професій дозволяє підвищити об'єктивність надання інформації щодо можливого фаху в ІТ-галузі для кандидатів з різними ступенями релевантності.

5. Опис результатів дослідження

5.1. Результати модифікації методу Уолта Діснея

Використання методу Уолта Діснея для презентації професій в ІТ-галузі вимагає його модифікації. Необхідність такої модифікації визначається тим, що цей метод під час презентації професій в ІТ-галузі орієнтований не на визначення та подальший аналіз принципово нових ідей та думок, а на визначення та подання інформації про вже існуючі професії.

Суть запропонованої модифікації методу Уолта Діснея полягає у відмові від застосування на першому її етапі ролі Мрійника. Замість цієї ролі на першому етапі запропоновано використовувати роль «Оптиміст». На першому етапі методу людина у ролі Оптиміста повинна визначати переваги, позитивні сторони, сприятливі можливості об'єкта презентації тощо. Виходячи з такого представлення першого етапу, наступні етапи методу Уолта Діснея слід модифікувати таким чином:

- на другому етапі людина у ролі Реаліста повинна виявити реальні умови та обмеження, дотримання яких дозволяє кандидату отримати в подальшому ті переваги, які були визначені Оптимістом на першому етапі;

- на третьому етапі людина у ролі Критика повинна визначити найбільші та найчастіші ризики, негативні умови та наслідки для кандидата, який бажає отримати визначені на першому етапі переваги в умовах та обмеженнях, визначених на другому етапі.

Для підвищення ступеня довіри до інформації, яку кандидат отримує на різних етапах модифікованого методу, бажано, щоб ця інформація надходила від трьох різних осіб, кожна з яких відіграє конкретну роль.

Розглянемо особливості застосування модифікованого методу Уолта Діснея на прикладі презентації професії «Розробник програмного забезпечення».

На першому етапі презентації людина в ролі Оптиміста розповідатиме про можливості, перспективи, найбільший інтерес, який можна знайти в професії «Розробник програмного забезпечення», – наприклад, висока зарплата, досить швидкий кар'єрний ріст, можливість приватних поїздок за кордон, можливість працювати віддалено.

На другому етапі презентації людина у ролі Реаліста розповідатиме про справжню дійсність, тобто, як воно є насправді, без перебільшень і песимізму. Наприклад, Реаліст вказує на те, що потрібно буде весь час вчитися, щоб бути затребуваним на ринку праці, потрібно знати англійську мову на достатньому рівні тощо. Реаліст розповідатиме також про конкретні кроки становлення розробником, радити, на що потрібно звернути особливу увагу при навчанні.

На третьому етапі презентації людина у ролі Критика розповідатиме про найбільші помилки в професії, «підводні камені», негативні сторони (наприклад, про велике навантаження на очі розробника, що негативно впливає на зір, про можливість працювати

віддалено, яку мають представники не всіх посад, про залежність роботи від особливостей ІТ-компанії та конкретного ІТ-проєкту тощо).

Очікуваними результатами застосування модифікованого методу Уолта Діснея є інтереси, які виникають в учасників процесу підвищення ефективності найму нових співробітників до ІТ-компаній та підвищують мотивованість подальших дій цих учасників. Інтерес старшокласників, які вважаються основними кандидатами, полягатиме в тому, щоб вибрати саме таку ІТ-спеціальність, яка допоможе розкрити повністю свій потенціал і не витратити 4-6 років життя марно. Інтерес батьків старшокласників полягатиме в тому, щоб збільшити ймовірність правильного вибору дитині потрібної спеціальності, не платити за другу вищу освіту або за навчання на низці спеціальних курсів. Інтерес ІТ-компанії полягатиме в тому, щоб якомога більше кандидатів отримали освіту в галузі, пов'язаній з діяльністю компанії. Інтерес закладів вищої освіти, технікумів, коледжів та інших освітніх установ полягатиме в тому, щоб кандидати в майбутньому приходили навчатися саме в ці заклади. Для розвитку цього інтересу в подальших дослідженнях можна керуватися стратегією win/win (при цьому вигоду від співпраці отримують обидві сторони) [12].

5.2. Результати розробки Business Model Canvas процесу підвищення ефективності найму нових співробітників до ІТ-компаній

Як ключові діяльності Business Model Canvas для процесу підвищення ефективності найму нових співробітників до ІТ-компаній запропоновано:

- а) проведення майстер-класів теоретичного та прикладного спрямування;
- б) проведення «БізСтажів» – різновиду стажування, тривалістю 1-3 тижні, спрямованого, в першу чергу, на пізнання бізнес-процесів ІТ-компанії під час отримання реального досвіду;
- в) проведення презентацій ІТ-професій на основі модифікованого методу Уолта Діснея;
- г) проведення звичайних для України професійних консультацій та тестувань.

Вибір і поєднання цих ключових діяльностей обумовлений необхідністю ліквідації недоліків окремих діяльностей за рахунок переваг інших. Застосування майстер-класів, як показує сучасний український досвід, дає змогу учасникам процесу з мінімальними витратами часу та ресурсів ІТ-компанії зрозуміти, чи підходить/подобається діяльність кожному потенціальному кандидатові. Зрозуміло, що одного майстер-класу може бути недостатньо, тому потрібно проводити серію майстер-класів. Але потрібно врахувати той факт, що майстер-класи не можуть показати бізнес-процеси всередині компанії. Так школяр не може відчутти на собі звичайний день співробітника ІТ-компанії. Адже крім основної діяльності співробітника існують й інші аспекти: обстановка всередині ІТ-компанії, зустрічі (мітинги), поїздки, форс-мажорні ситуації тощо.

Для ліквідації цього недоліку запропоновано застосувати «БізСтаж». На нього можуть потрапити люди, які показали найкращі результати на курсі майстер-класів. Після стажування зацікавлений відповідною ІТ-професією кандидат буде вступати до відповідного закладу освіти. Можливо, йому відразу запропонують роботу, якщо під час стажування у відповідній компанії він опанує необхідні навички.

Головним недоліком проведення послідовності діяльностей «Проведення майстер-класів» та «Проведення «БізСтажу» є те, що майбутній кандидат може обрати для себе ці діяльності, не маючи хоча б попередньої об'єктивної інформації про відповідність своїх індивідуальних особливостей особливостям відповідної ІТ-професії. Для ліквідації цього недоліку запропоновано починати заходи з професійної орієнтації кандидатів із застосування

діяльності «Проведення презентацій IT-професій на основі модифікованого методу Уолта Діснея».

Для виконання цих діяльностей на базі IT-компаній або їхніх HR-підрозділів запропоновано створювати профорієнтаційні центри цих компаній. Такі центри будуть надавати платні послуги з професійної орієнтації майбутніх кандидатів, які бажають шукати роботу в IT-галузі. При цьому основну увагу рекомендовано приділяти наданню послуг за наведеною вище послідовністю ключових діяльностей. Загалом запропоновано застосовувати 3 тарифи: пробний, базовий, просунутий. За пробним тарифом школяр може вибрати 3 будь-які спеціальності із запропонованих на свій розсуд безкоштовно. Базовий тариф – це тариф з 5 спеціальностями за певну суму. Високий рівень – це тариф з 10 спеціальностями, але буде вигідніше купити його, ніж 2 рази базовий тариф.

Для обмеження кількості різноманітних професійних пропозицій для окремого кандидата запропоновано застосовувати ключову діяльність «Проведення звичайних для України професійних консультацій та тестувань». Це дозволить зменшити спектр спеціальностей, зменшити витрати учасників процесу і знайти найбільш підходящу спеціальність кандидату [13].

Загальний вигляд розробленої Business Model Canvas для процесу підвищення ефективності найму нових співробітників до IT-компаній наведено на рис. 2.

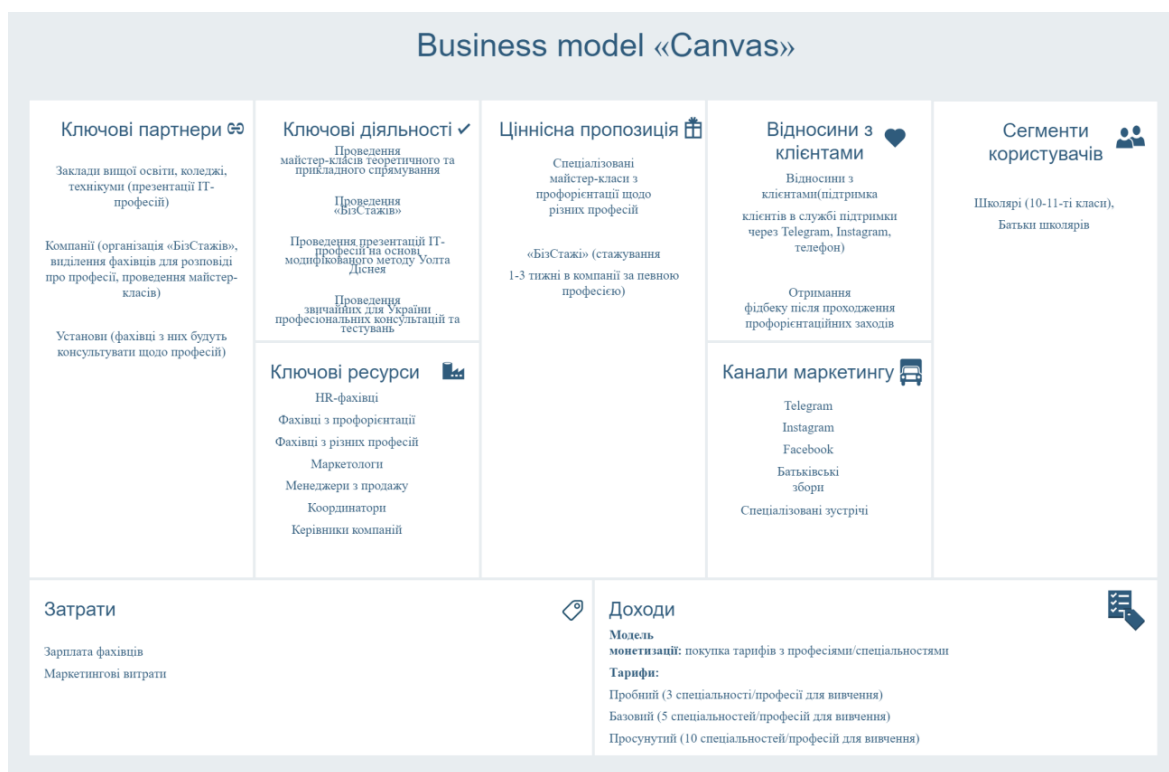


Рис.2. Загальний вигляд розробленої Business Model Canvas для процесу підвищення ефективності найму нових співробітників до IT-компаній

6. Обговорення результатів дослідження

В процесі дослідження було модифіковано метод Уолта Діснея, що дозволило застосувати його не тільки для визначення та аналізу нових можливостей та пропозицій, а й для об'єктивного подання інформації про існуючі об'єкти предметної галузі. Модифікований метод Уолта Діснея є одним з інструментів забезпечення гнучкості процесу підвищення ефективності найму нових співробітників до ІТ-компанії, який дозволяє скоротити витрати часу та ресурсів на проведення подальших загальних профорієнтаційних заходів за рахунок визначення та підвищення інтересів окремих учасників на самому початку цього процесу.

Результати модифікації методу Уолта Діснея було використано під час розробки Business Model Canvas для процесу підвищення ефективності найму нових співробітників до ІТ-компаній. Було визначено ключові діяльності Business Model Canvas, встановлено послідовність їх виконання, яка дозволяє ліквідувати недоліки окремих діяльностей. На рис. 2 представлено загальний результат розробки Business Model Canvas для досліджуваного процесу.

На жаль, розроблена Business Model Canvas не виключає ризиків свого застосування. Зокрема, не всі заклади освіти схочуть співпрацювати з подібним профорієнтаційним центром ІТ-компанії. Деякі з них зажадають грошей за співпрацю або відсоток від суми угоди. Схожа ситуація може виникнути й зі співпрацею профорієнтаційного центру з іншими ІТ-компаніями та установами. Це питання вирішується окупністю проекту реалізації досліджуваного процесу шляхом фінансування, що надходить від батьків кандидатів-старшокласників. Велика конкуренція серед ІТ-компаній створить сприятливіші умови співпраці. Іншим ризиком, який слід взяти до уваги, є те, що далеко не всі ІТ-компанії або установи зможуть надавати курси майстер-класів.

Розроблена Business Model Canvas процесу підвищення ефективності найму нових співробітників до ІТ-компаній може отримати подальший розвиток на державному рівні. Підтримка, впровадження і державне фінансування даного підходу дозволить збільшити ймовірність появи більшої кількості перспективних і мотивованих людей, які працюють за обраними спеціальностями/професіями. Розвиток розробленої моделі в межах окремої компанії забезпечить постійне збільшення кількості партнерів, які будуть проводити майстер-класи, список закладів освіти, а відповідно і аудиторію зацікавлених батьків і школярів, і таким чином, знизить кадровий дисбаланс на ринку праці України.

Запропонована бізнес-модель профорієнтації може бути застосована і реалізована в існуючих профорієнтаційних центрах, компаніях і установах.

7. Висновки

В результаті проведення дослідження було модифіковано метод Уолта Діснея як інструмент збільшення гнучкості процесу підвищення ефективності найму нових співробітників до ІТ-компаній. Суть модифікації полягає у коригуванні ролей, з точки зору яких подається інформація про об'єкт презентації, та особливостей інформації, яка надається від імені кожної з ролей. Результатом цієї модифікації є підвищення об'єктивності подання інформації про об'єкти предметної галузі. Розглянуто особливості застосування модифікованого методу Уолта Діснея для презентації ІТ-професії «Розробник програмного забезпечення».

Розроблено Business Model Canvas для процесу підвищення ефективності найму нових співробітників до ІТ-компаній. Визначено основні ключові діяльності цієї моделі, запропоновано послідовність їх виконання.

Подальші дослідження в цьому напрямі повинні бути спрямовані на вдосконалення процесу підвищення ефективності найму нових співробітників до ІТ компаній та зменшення витрат часу і ресурсів на виконання цього процесу.

Перелік посилань:

1. Левыкин В.М., Евланов, М.В., Керносов, М.А. Паттерны проектирования требований к информационным системам: моделирование и применение: монография. Харьков: ООО «Компанія СМІТ», 2014. 320 с.
2. Koziumentko M. 3 90 заявок на вакансію до співбесіди доходять лише одиниці: як еволюціонує рекрутинг і до чого прагнуть сучасні ІТ-фахівці. URL: <https://dou.ua/forums/topic/45965/> (дата звернення 08.04.2024).
3. Вакансій більше, ніж у будь-який місяць торік, і знову рекордна кількість відгуків. Огляд ІТ-ринку праці, лютий 2024. URL: <https://dou.ua/lenta/articles/it-job-market-february-2024/> (дата звернення 08.04.2024).
4. Кількість вакансій і відгуків за категоріями: березень 2024. URL: <https://jobs.dou.ua/trends/categories/2024-03/> (дата звернення 08.04.2024).
5. Ковальова А. Близько 40 % українців не працюють за спеціальності – опитування Rakuten Viber. URL: <https://thepage.ua/ua/news/blizko-40percent-ukrayinciv-ne-pracyuyut-za-specialnistyu-opituvannya> (дата звернення 08.04.2024).
6. Запорожець І. Стало відомо, скільки українців не люблять свою роботу. URL: <https://dengi.ua/budget/6233169-stalo-izvestno-skolko-ukraintsev-ne-lyubyat-svoyu-rabotu> (дата звернення 08.04.2024).
7. Jakiela J., Świętoniowska J., Wójcik, J. Patterns for Personal Business Model Canvas Applications – BE(A)ST, an Approach for Aware Career Development. Proceedings of the European Conference on Knowledge Management, ECKM. 2022. Vol. 1. P. 552-559.
8. Macha-Huamán, R., Zavala-Zavala, O.M., Soto, F.C., Suárez, J.S., Castañeda, D.R., Lucar, R.G., Jibaja, L.C., Mejía, P.J., Montoya, C.M., Casco, R.J., & Romero-Carazas, R. Business Model Canvas in the entrepreneurs' business model: a system approach. EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems. 2023. Vol. 10, Iss. 5. P. 1–9. <https://doi.org/10.4108/eetis.3594>
9. Lopes H.E., Rodrigues V., Leite R.S., Gosling M.D. Business Model Canvas and Entrepreneurs: Dilemmas in Managerial Practice. *Brazilian Business Review*. 2023. Vol. 20, Iss. 3. P. 260-280. <https://doi.org/10.15728/bbr.2023.20.3.2.en>
10. KDP-Publisher. Business Model Canvas: From the Idea to Business Model - Incl. 100 Templates. (n.p.): Independently Published. 2020. 104 p.
11. Метод Уолта Діснея: реалістична креативна техніка. URL: <https://www.konicaminolta.ua/uk-ua/rethink-work/new-work/metod-uolta-disneya-realistychna-kreatyvna-tehnik> (дата звернення 08.04.2024).
12. Кові. С.Р. 7 звичок надзвичайно ефективних людей. Харків: КСД, 2012. 512 с.
13. Пізнай себе: профорієнтація в тестах. URL: <https://newtonew.com/school/know-your-profession-tests> (дата звернення 08.04.2024).

Надійшла до редколегії 14.04.2024 р.

Ярмак Валерій В'ячеславович, менеджер ІТ-продукту, ІТ-компанія «Brander», м. Харків, Україна, e-mail: valerayarmak@gmail.com, ORCID: 0009-0001-3757-3959.

**МЕТОД ФОРМУВАННЯ ЗАЯВОК ПРИРОДНОЮ МОВОЮ НА ОСНОВІ
ВДОСКОНАЛЕНОЇ МОДЕЛІ BERT**

Розглянуто основні особливості формування заявки на отримання послуги як однієї з важливих задач сучасних систем управління послугами. Проведено аналіз сучасних інформаційних систем і технологій, визначено переваги і недоліки існуючих моделей і методів, які використовуються для вирішення цієї задачі. Розроблено комбінований метод формування заявок на отримання послуги, в якому поєднуються особливості моделі BERT, простіших методів машинного навчання та байєсівської класифікації. Розглянуто особливості програмної реалізації та апробації розробленого методу на прикладі вирішення задачі формування і обробки заявок на оренду автомобілів.

1. Вступ

Переважає більшість сучасних інформаційних систем (ІС) управління бізнес-діяльністю підприємств та організацій побудована на основі концепції надання послуг і управління цими послугами. Головна ідея цієї концепції полягає не в просуванні нових продуктів на ринок, а в зосередженні зусиль підприємства чи організації на задоволенні потреб клієнтів [1]. З 2005 року почалися роботи зі створення типової системи управління послугами, базовані на цій концепції. Основним поточним результатом цих робіт слід визнати зафіксовані у стандарті ISO 20000:2018 основні вимоги до процесів та функцій такої системи [2]. За цими вимогами, надання будь-якої послуги можливе або за результатом визначення потреби кожного окремого користувача (заявки на отримання послуги), або за результатом аналізу множини аналогічних, раніше сформульованих потреб значної кількості користувачів. Тому проблеми, пов'язані з вирішенням задачі формування заявок на отримання послуги, слід визнати такими, що вимагають особливої уваги.

На жаль, зазначені у [2] вимоги не можуть надати ніякої інформації щодо моделей та методів, які можна застосовувати для вирішення задач управління послугами. Тому під час створення окремих ІС та інформаційних технологій (ІТ) автоматизованого управління послугами у різних предметних галузях постійно існує необхідність пошуку, розробки або вдосконалення моделей, методів і алгоритмів, які могли б вирішити відповідні задачі найкращим чином.

Ця необхідність значно ускладнює проведення робіт зі створення ІТ вирішення задачі формування заявок на отримання послуги. Зазначене ускладнення, зокрема, пов'язане з необхідністю застосовувати для цієї ІТ моделі і методи, які відповідали б таким умовам:

- а) можливість сприйняття потреб користувача, сформульованих його природною мовою;
- б) можливість поступової формалізації зафіксованих описів потреб користувача;
- в) можливість попередньої класифікації сформованих заявок з метою покращення надання відповідної послуги.

Одним з напрямів розробки та вдосконалення згаданих вище моделей і методів є постійне збільшення позитивного досвіду користувачів таких систем. Досвід користувача буде позитивним, якщо при оформленні заявки на отримання послуги йому необхідно буде лише надати свої дані у систему через інтерфейс та не контактувати із менеджерами для їх

підтвердження. Це скорочує час на оформлення заявки та полегшує цей процес. Крім того, коли користувач не витрачає час на розмови з менеджером та на уточнення інформації, підвищується його лояльність до компанії та зацікавленість у користуванні її послугами. З іншого боку, скорочення витрат часу менеджера за рахунок неучасті в оформленні заявок також позитивно сприяє бізнесові.

Таке збільшення позитивного досвіду користувачів і бізнесу стає особливо важливим під час створення та експлуатації ІС та ІТ автоматизованого управління послугами, заявки на отримання яких формуються користувачами природною мовою у вигляді коротких неструктурованих текстів. Такі заявки є характерними для систем малого і середнього бізнесу, а також для платформ дистанційного надання державних послуг громадянам країни чи окремого регіону. Тому існує постійна необхідність проведення науково-дослідних робіт та реалізації стартапів, спрямованих на постійне поліпшення моделей і методів розпізнавання коротких текстів природною мовою та прикладних засобів їх реалізації. Найбільшу зацікавленість під час проведення досліджень в межах цього напрямку з урахуванням умов а) та в) викликають моделі і методи штучного інтелекту, які дозволяють формалізувати обробку текстів природною мовою та отримувати з цих текстів дані і знання, необхідні для оформлення заявок. Тому проведення досліджень з вдосконалення та розвитку існуючих методів штучного інтелекту, спрямованих на обробку природної мови користувача, є актуальними для поліпшення вирішення задачі формування заявок на отримання послуги.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми дослідження

2.1. Аналіз сучасних інформаційних технологій, використовуваних для автоматизації формування заявок на отримання послуги

Процес формування заявок на отримання послуги є невід'ємною частиною систем управління підприємствами та організаціями у різних галузях економічної діяльності суспільства. Тому не дивно, що значна кількість сучасних розробок в галузі ІТ присвячена вирішенню проблеми автоматизації цього процесу. Такі розробки, зазвичай, є ІС або ІТ, що поєднують в собі різноманітні функції з метою підвищення ефективності, зручності та точності виконання окремих процесів і функцій управління послугами [3].

Важливою частиною таких ІС або ІТ є онлайн-платформа, яка дозволяє клієнтам здійснювати реалізацію заявки на отримання послуги через веб-сайт або мобільний додаток [3-5]. Користувачі, наприклад, можуть під час створення заявки визначати особливості опису послуги, виходячи з предметної галузі, вказувати терміни та місце отримання обраної послуги, а також додавати додаткові опції. Такі системи включають також модулі для внутрішнього управління компанією, включаючи облік послуг, які може отримати користувач, розподіл цих послуг між різними локаціями, ведення історії обслуговування та станів окремих послуг, а також моніторинг ресурсів, які витрачаються під час надання послуги за заявкою [3, 5]. Крім того, такі ІС або ІТ можуть включати модулі для фінансового обліку, виставлення рахунків та обробки даних про оплату [3]. Функціональні можливості таких ІС або ІТ можуть розширюватися в результаті інтеграції додаткових аналітичних сервісів чи технологій [3-5]. Такі інструменти дозволяють керівництву підприємств або організацій оцінювати ефективність надання послуг, виявляти тенденції попиту на окремі послуги та групи послуг, формувати і приймати управлінські рішення тощо. В цілому подібні ІС або ІТ поліпшують управління тими галузями економічної діяльності, які базуються на процесах надання послуг,

що дозволяє зосередитися на покращенні обслуговування клієнтів та оптимізації внутрішніх процесів.

Актуальним базовим підходом до автоматизації процесів формування та обробки заявок на отримання послуги залишається підхід, який базується на використанні рекомендаційних систем. Цей підхід застосовується в ІТ-продуктах основних компаній, що є лідерами цього сегменту ринку [6]. Такі ІТ-продукти дозволяють розробляти різні рекомендації, легко інтегруються до існуючих систем та мають зручний кабінет адміністратора як інструмент управління функціями рекомендаційної системи. Механізм рекомендацій таких ІТ-продуктів може бути застосований до будь-якого домену предметної галузі, котрий характеризується наявністю каталогу послуг і можливістю взаємодії з великою кількістю користувачів [6, 7]. Застосована у веб- та мобільних додатках рекомендаційна система сприяє поліпшенню користувацького досвіду за рахунок надання кожному окремому користувачу послуги, яка характеризується найбільшою релевантністю окремій заявці цього користувача [7, 8]. При цьому в таких ІТ-продуктах є можливість визначати різні типи властивостей послуги, які піддаються аналізу з використанням рекомендаційних моделей на основі вмісту заявки користувача [7]. Додатковою властивістю цих продуктів є можливість використання фільтрів або бустерів під час розробки правил рекомендаційної системи, що дозволяє підвищувати якість цих правил [6].

Окремою особливістю рекомендаційних систем та ІТ на їх основі є механізм взаємодії між цими ІТ та ІС або ІТ, які використовують рекомендаційні системи у своїй діяльності. Сучасні рекомендаційні ІТ як основні варіанти реалізації такої взаємодії розглядають: віджети HTML, API на стороні клієнта, API на стороні сервера або інтеграції сегмента [6].

Для ініціації сценаріїв роботи рекомендаційної системи необхідна наявність заявки користувача на отримання послуги з публікацією цієї заявки на веб-сайті або у мобільному додатку ІС або ІТ, в електронній пошті користувача тощо. Кожен сценарій орієнтований на певний тип рекомендацій, наприклад: рекомендація для конкретного користувача, рекомендація елементів, пов'язаних із заявкою чи послугою або персоналізований повнотекстовий пошук. Крім цього, кожен сценарій має можливість додаткових налаштувань.

Бажану реалізацію рекомендаційної моделі визначає рекомендаційна логіка, для різних випадків використання рекомендаційних систем можуть використовуватися різні рекомендаційні логіки. Результати функціонування рекомендаційних систем використовуються для фільтрації або вибору окремих послуг на основі їхніх властивостей. Правила, які часто використовуються, в багатьох випадках можуть бути реалізовані у вигляді окремих бібліотек, доступних для негайного використання. Як інструменти формування унікальних правил в багатьох рекомендаційних системах застосовуються інтуїтивно зрозуміла мова запитів (наприклад, ReQL) або механізми інтеграції рекомендацій за допомогою віджета HTML або API & SDK обраної мови програмування [6].

Окремі розробки у цьому напрямку надають рекомендаційним системам додаткові можливості. Як приклад таких розробок можна згадати систему персоналізації Dynamic yield [9], в якій на основі засобів штучного інтелекту реалізовано можливості персоналізації та оптимізації рекомендацій. На думку авторів цієї системи, зазначені можливості допомагають провідним брендам створювати особистий цифровий досвід, який сприяє залученню нових користувачів, конверсії та збільшенню доходу, поліпшенню лояльності та задоволеності клієнтів, надаючи індивідуальний контент, рекомендації та рекламні акції кожному окремому

користувачеві [9]. Іншим прикладом таких розробок є система Amazon Personalize [10], у якій застосовані технології машинного навчання (ML). Дане рішення спрощує інтеграцію персоналізованих рекомендацій у існуючі веб-сайти, додатки, системи електронного маркетингу тощо. Система Amazon Personalize дозволяє розробникам швидко створювати та розгортати ефективні рішення, а також сегментувати клієнтів у будь-якому масштабі [10].

Таким чином, основними напрямками сучасного розвитку рекомендаційних систем як основного способу автоматизованої реалізації процесів формування та обробки заявок на отримання послуги є застосування моделей і методів штучного інтелекту для набуття таких можливостей:

- формалізація заявок, сформованих природною мовою користувача;
- підвищення рівня релевантності послуги індивідуальній заявці користувача;
- персоналізація результатів обробки заявки з урахуванням особливостей кожного окремого користувача;
- оптимізація процесів пошуку та попередньої обробки заявок.

2.2. Аналіз формальних основ автоматизації формування і обробки заявок на отримання послуги

Основу сучасних ІТ, які використовуються для автоматизованого вирішення задачі формування та обробки заявок на отримання послуги зазвичай складають методи ML, обробки природної мови (NLP) та алгоритми автоматичного оформлення заявок [11]. Ці методи інтегруються в систему автоматичного формування та обробки заявок для автоматизації та поліпшення ефективності взаємодії з клієнтами. Зокрема, методи ML та NLP допомагають розпізнавати різноманітні сценарії та вимоги користувачів і реагувати на них, підвищуючи рівень персоналізації та ефективність взаємодії з користувачами. В цілому ж застосування методів ML та NLP обумовлюється такими етапами загальної послідовності дій з формування та обробки заявок на отримання послуги [1, 11].

Етап 1. Розпізнавання та валідація даних при подачі користувачами заявки з використанням різних засобів (онлайн-форми веб-сайтів, мобільні додатки, чат-боти, голосові асистенти тощо).

Етап 2. Розпізнавання та валідація даних, введених користувачем, з використанням моделей нейронних мереж для визначення правильності введення дат, часу, імен, номерів телефонів тощо.

Етап 3. Розуміння текстового введення, яке може здійснюватися з використанням методів NLP для визначення синтаксичних та семантичних елементів мови, що сприяє правильній інтерпретації заявок.

Етап 4. Класифікація типу заявки за допомогою методів ML для визначення особливостей поданої заявки (різновид послуги, питання про ціни тощо).

Етап 5. Аналіз синтаксису та семантики текстового введення, екстракція інформації з текстового контенту з використанням методів NLP.

Етап 6. Екстракція ключової інформації з виділенням з тексту заявок ключових елементів (дати, часи, локації, основні вимоги тощо) за допомогою методів ML.

Етап 7. Аналіз ключової інформації та автоматична генерація відповідей з використанням методів NLP.

Аналіз цих етапів вказує на те, що під час дослідження можливостей вдосконалення сучасних ІТ формування та обробки заявок основну увагу бажано зосередити на подальшому

розвитку методів NLP. Застосування саме цих методів дозволяє таким ІТ перетворити описи заявок, зроблені природною мовою користувачів, на формальні структуровані представлення даних, які можна обробляти методами ML.

Слід зазначити, що популярність застосування методів NLP значною мірою обумовлена впровадженням у цих методах передавального навчання та навчених мовних моделей. Ці заходи розсунули межі розуміння та генерації заявок природною мовою користувачів. В цілому, останні вдосконалення мовних моделей, які застосовуються в методах NLP, схоже, зумовлені не тільки значним збільшенням обчислювальних можливостей, але також відкриттям інноваційних способів полегшення моделей при збереженні високої продуктивності. Тому пропонується зосередити увагу на такому напрямі досліджень, як вдосконалення і подальший розвиток найпопулярніших мовних моделей, які застосовуються в методах NLP.

Однією з найрозповсюдженіших таких моделей є модель двоспрямованих кодувальних представлень з трансформерів (Bidirectional Encoder Representations from Transformers, BERT). На відміну від існуючого підходу до тренування моделей розпізнавання природної мови зліва направо, цю модель розроблено для попереднього формування на основі немаркованого тексту природною мовою багатосарових представлень лівого і правого контекстів. Заздалегідь навчені представлення BERT можуть бути відрегульовані лише за допомогою одного додаткового рівня виведення [12]. Це дає змогу застосовувати модель BERT для вирішення широкого кола задач (відповідь на запитання, мовний висновок тощо) без істотних модифікацій архітектури ІТ, які орієнтовано на вирішення специфічних задач предметних галузей.

Архітектура моделі BERT майже ідентична архітектурі моделі OpenAI GPT. Але за результатами перевірки двох варіантів моделі BERT на завданнях бенчмарку GLUE середнє підвищення точності розпізнавання текстів природною мовою для цих варіантів перевищує значення цього показника для моделі OpenAI GPT на 4, 5% і 7,0 % відповідно. Під час перевірки на завданні MNLI з бенчмарку GLUE модель BERT у порівнянні з моделлю OpenAI GPT отримала підвищення точності розпізнавання на 4,6 % [12]. Загалом, застосування моделі BERT може значно поліпшувати методи NLP, які використовуються на різних етапах формування та обробки заявок (чат-боти для кращої взаємодії з клієнтами; аналіз відгуків клієнтів; пошук відповідної інформації тощо).

Іншою популярною мовною моделлю слід визнати модель GPT-2. Це модель-трансформер, яка досягає найкращих результатів в 7 з 8 перевірених наборів даних моделювання мови. Застосування моделі GPT-2 розглядається сучасними ІТ-компаніями як перспективний шлях до побудови систем обробки мови, які вчаться виконувати завдання на основі своїх природних демонстрацій [13, 14]. Зокрема, команда OpenAI демонструє, що заздалегідь навчені мовні моделі GPT-2 можуть використовуватися для вирішення подальших задач без будь-яких змін параметрів або архітектури. Загалом, модель GPT-2 формує послідовні абзаци тексту та досягає перспективних, конкурентних і найкращих результатів у найрізноманітніших задачах [13].

Навчається дана модель на великих наборах даних, які формуються з таких джерел [13]:

- веб-сторінки, які фільтруються людьми;
- очищені тексти з видаленням всіх документів Вікіпедії для мінімізації накладання навчальних та тестових наборів;

– набори даних, отримані з WebText (загальна кількість документів перевищує вісім мільйонів документів при загальному обсязі тексту цих документів 40 Гб).

GPT2 демонструє досить перспективні результати у таких напрямках вдосконалення методів NLP, як підвищення ефективності міркувань, відповіді на запитання, розуміння читання та перекладу. Але що стосується практичних застосувань, модель GPT-2 без точного налаштування далеко не придатна для використання [13, 14].

Основною перевагою моделі BERT є можливість досягання кращих показників застосування, аніж аналогічні показники у підходів до попередньої підготовки на основі авторегресивного моделювання мови. Ця перевага виникає завдяки можливості моделювання двонаправлених контекстів та попередження підготовки на основі автоматичного кодування [12]. Однак, внаслідок псування вхідних даних масками BERT нехтує залежністю між маскованими позиціями. Для подолання цього недоліку було запропоновано модель XLNet. Цю модель розробили дослідники з університету Карнегі Меллона та Google для вирішення задач обробки природної мови (розуміння читання, класифікація тексту, аналіз сентиментальності тощо). На основі моделі XLNet створено узагальнений метод авторегресивного преднавчання, який використовує найкращі результати як авторегресивного моделювання мови (наприклад, Transformer-XL), так і автокодування (наприклад, BERT), уникаючи їхніх обмежень. Експерименти демонструють, що модель XLNet перевершує BERT і Transformer-XL і досягає найкращих результатів у 18 задачах NLP [15].

XLNet може надавати допомогу компаніям із широким спектром проблем NLP, зокрема [15]:

- створення чат-ботів для підтримки клієнтів першої лінії або відповіді на запити щодо продуктів;
- аналіз сентиментальності для оцінки проінформованості та сприйняття бренду на основі відгуків клієнтів та соціальних мереж;
- пошук відповідної інформації в базах документів або в Інтернеті тощо.

Розглянуті моделі мають один загальний недолік – ускладнення параметрів реплікації та точного налаштування внаслідок значних обчислювальних витрат на навчання цих моделей. Facebook AI та дослідники університету Вашингтона проаналізували навчання моделі BERT та виявили кілька змін у навчальній процедурі, що покращують її ефективність. Зокрема, дослідники використали новий, більший набір даних для навчання, застосували для навчання моделі набагато більшу кількість ітерацій та видалили прогнозування навчальної мети. Отримана в результаті оптимізована модель RoBERTa (надійно оптимізований підхід BERT) відповідає оцінкам нещодавно представленої моделі XLNet в бенчмарку GLUE. Дана модель може використовуватися в бізнес-середовищі для широкого кола подальших задач, включаючи системи діалогу, відповіді на запитання, класифікацію документів тощо [16].

Команда Google Research займається проблемою постійно зростаючого розміру попередньо навчених мовних моделей, що призводить до обмеження пам'яті, збільшення часу навчання та інколи несподівано погіршення продуктивності. Зокрема, ця команда запропонувала модель Lite BERT (ALBERT). Дана модель базується на таких двох методах зменшення параметрів [17]:

- факторизована параметризація вбудовування, де розмір прихованих шарів відокремлюється від розміру вкладених словникових запасів шляхом розкладання великої матриці, що містить словниковий запас, на дві малі матриці;

– спільне використання параметрів між шарами, щоб запобігти зростанню кількості параметрів із глибиною мережі.

Ефективність застосування ALBERT додатково покращується шляхом введення самоконтрольованої втрати для прогнозування порядку речень для усунення обмежень BERT щодо узгодженості між реченнями. ALBERT може в подальшому покращити свою продуктивність за допомогою майнінгу, ефективнішого навчання моделі та інших підходів. Ця модель може бути використана в бізнес-налаштуваннях для підвищення продуктивності широкого кола подальших задач, включаючи підвищення продуктивності чат-ботів, аналіз сентиментальності, аналіз документів та класифікацію тексту [17].

Дослідницька група Alibaba запропонувала розширити BERT до нової мовної моделі StructBERT. Експерименти демонструють, що введена модель суттєво покращує сучасні результати вирішення різних задач із розуміння природної мови, включаючи аналіз сентиментальності та відповіді на запитання. Модель базується на архітектурі BERT з багатошаровою двонаправленою мережею трансформерів [18]. Як і інші попередньо навчені мовні моделі, StructBERT може допомагати компаніям у виконанні різноманітних задач NLP, включаючи відповіді на запитання, аналіз сентиментальності, узагальнення документів тощо.

Дослідницька група Google запропонувала уніфікований підхід до передачі навчання в NLP з метою встановлення нового рівня технології в цій галузі. З цією метою вони запропонували розглядати кожну проблему NLP як проблему «перетворення тексту в текст». Така структура дозволяє використовувати одну і ту саму модель, ціль, процедуру навчання та процес декодування для різних задач, включаючи узагальнення, аналіз сентиментальності, відповіді на запитання та машинний переклад. Дослідники називають свою модель Text-to-Text Transfer Transformer (T5) [19] і навчають її на великому наборі даних, зібраних з Інтернету, для отримання найкращих результатів в ряді задач NLP. Недоліком моделі T5 є низька продуктивність методів, які її використовують для вирішення задач NLP. Для ліквідації цього недоліку пропонується, зокрема, зосередити увагу на дослідженні ефективніших методів вилучення знань та мовно-діагностичних моделей. Втім, незважаючи на те, що T5 має мільярди параметрів і може бути занадто важкою для застосування в бізнес-середовищі, представлені ідеї можуть бути використані для поліпшення ефективності різних задач NLP, включаючи узагальнення, відповіді на питання та аналіз сентиментальності [19].

Дослідницька група OpenAI звернула увагу на той факт, що потреба у маркованому наборі даних для кожного нового мовного завдання обмежує застосовуваність мовних моделей. Ця група запропонувала альтернативне рішення, яке полягає в масштабуванні мовних моделей для поліпшення швидкодії. Цим рішенням є авторегресивна параметрична модель GPT-3 зі ста сімдесятьма п'ятьма мільярдами параметрів. Оцінка ефективності цієї моделі проводилася на понад двох десятках задач NLP. Під час оцінки GPT-3 показала багатообіцяючі результати і навіть іноді перевершувала сучасний рівень, досягнутий за допомогою відрегульованих моделей [20]. Модель GPT-3 використовує ту ж модель та архітектуру, що і GPT-2, включаючи модифіковану ініціалізацію, попередню нормалізацію та оборотну токенизацію. Однак, на відміну від GPT-2, вона використовує чергування щільних і локально смугастих розріджених моделей уваги в шарах трансформатора, як у розрідженому трансформері. Недоліком моделі GPT-3 є необхідність її вдосконалення з метою зменшення розміру великих моделей для використання у реальних програмах та підвищення ефективності вибірок при тренуванні. Слід

визнати, що сучасну модель GPT-3 важко застосувати при вирішенні реальних бізнес-задач через її непрактичні вимоги до ресурсів.

Як альтернативу існуючому підходу до попередньої підготовки таких популярних мовних моделей, як BERT та XLNet, дослідники зі Стенфордського університету та Google Brain запропонували новий підхід ELECTRA, основою якого є виявлення заміненним маркером. Цей підхід дає змогу моделі навчатися на основі змісту усіх вхідних токенів замість невеликої замаскованої підмножини. Він не є змагальним, оскільки генератор, що виробляє токени для заміни, навчається з максимальною ймовірністю. Виявлення заміненним маркером означає, що деякі токени замінюються зразками з невеликої мережі генераторів [21]. Завдяки своїй обчислювальній ефективності модель ELECTRA може зробити застосування попередньо навчених кодерів тексту доступнішим для бізнесу.

Дослідники з Microsoft Research запропонували модель DeBERTa як наслідок двох основних вдосконалень моделі BERT. Цими вдосконаленнями є механізмами розкутої уваги та вдосконалений декодер маски. DeBERTa має два окремі вектори, що представляють зміст і позицію, а самоувага розраховується між усіма можливими парами, тобто зміст до змісту, зміст до позиції, позиція до змісту та позиція до позиції [22]. Автори моделі DeBERTa припускають, що вона потребує інформації про абсолютну позицію, щоб зрозуміти синтаксичні відтінки, такі як характеристика суб'єкта-об'єкта. Вбудовування абсолютної позиції надається останньому шару декодера безпосередньо перед шаром softmax, який дає вихідні дані. Для збільшення узагальнення як метод регуляризації використовується віртуальний змагальний алгоритм навчання, який називається інваріантним масштабуванням. Вбудовані слова порушуються незначною мірою і вчать видавати такий самий результат, як і для невзбурених вбудованих слів. Слова вкладання векторів нормуються до стохастичних векторів (де сума елементів у векторі дорівнює 1), щоб бути інваріантним до кількості параметрів у моделі [22].

Стислий опис переваг і недоліків розглянутих моделей наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Опис переваг та недоліків мовних моделей

Модель	Переваги	Недоліки
BERT	Враховує контекст з обох сторін слова	Велика кількість параметрів, значні обчислювальні витрати
GPT-2	Здатність генерувати тексти без задач, заданих користувачем	Обмежена в різних задачах обробки тексту
XLNet	Враховує контекст з обох сторін слова, без обмежень	Великі обчислювальні витрати
RoBERTa	Надійно оптимізований підхід до підготовки	Потребує великих обсягів даних для тренування
ALBERT	Має менше параметрів, зберігає точність	Обмежена точність порівняно з іншими моделями
StructBERT	Додає мовні структури для кращого розуміння тексту	Вимагає додаткового часу та ресурсів для тренування
T5	Універсальний підхід до обробки тексту	Великі обчислювальні витрати
GPT-3	Велика кількість параметрів, здатність швидко навчатися	Вимагає великих обчислювальних ресурсів

Кінець таблиці 1

Модель	Переваги	Недоліки
ELECTRA	Ефективніше використання обчислювальних ресурсів	Вимагає попередньої підготовки кодерів тексту
DeBERTa	Поліпшене декодування BERT	Вимагає додаткових обчислювальних ресурсів

На основі аналізу табл. 1 можна зробити такі висновки:

- моделі BERT та її варіації (RoBERTa, ALBERT) мають великий потенціал для різних задач обробки тексту, але вимагають значних обчислювальних ресурсів;
- моделі GPT-2 та GPT-3 підходять для генерації тексту, але можуть бути обмежені у точності та обчислювальних витратах;
- моделі XLNet, T5 та StructBERT враховують контекст з обох сторін слова, але вимагають значних обчислювальних витрат;
- моделі ELECTRA та DeBERTa надають покращене використання обчислювальних ресурсів, але можуть вимагати додаткової підготовки або ресурсів для тренування.

Слід відзначити, що великі обчислювальні витрати є загальним недоліком використання мовних моделей у методах NLP, які застосовуються для автоматизованого вирішення задачі формування та обробки заявок на отримання послуги. Тому пропонується основну увагу зосередити на дослідженні можливостей вдосконалення та подальшого розвитку моделі BERT, яка може використовуватися у переважній більшості цих методів.

3. Мета і задачі дослідження

Метою даного дослідження є розробка методу автоматизованого вирішення задачі формування заявок на отримання послуги як одного з основних елементів системи управління послугами. Досягнення цієї мети дозволить поліпшити процес та результати формування заявок на отримання послуги за рахунок використання методів та засобів штучного інтелекту.

Для досягнення цієї мети у статті вирішуються такі задачі:

- розробка комбінованого методу формування заявок на отримання послуги;
- експериментальна перевірка розробленого комбінованого методу на прикладі вирішення задачі автоматизації формування заявок для веб-сайту компанії з оренди автомобілів.

4. Моделі і методи дослідження

Предметом даного дослідження є комбінований метод формування заявок на отримання послуги з урахування обмежень, характерних для предметної галузі.

Для розробки цього методу як вихідні запропоновано використовувати методи ML та модель BERT. Їх використання робить значний крок у розвитку процесу формування та аналізу заявок на різні послуги. Це важливо для власників бізнесу різних галузей через можливість оформлювати заявки на отримання послуги без участі людини.

Модель BERT допомагає швидко та ефективно досягти розуміння семантики в текстах, коли тексти розглядаються в обох напрямках, враховуючи контекст зліва і справа від кожного слова. Попередньо навчена модель BERT може бути доопрацьована за допомогою лише одного додаткового вихідного шару, що дозволяє створити високоефективні моделі для широкого спектра задач NLP.

Архітектура моделі BERT являє собою багатошаровий двоспрямований кодувальник Transformer [A1 (4)]. В основі BERT лежить стек із L ідентичних шарів трансформера. У

кожному шарі є два типи підшарів. Перший підшар реалізує механізм «багатоголовкової» уваги. Його основне завдання полягає в тому, щоб при кодуванні певного слова враховувати контекст, визначений іншими словами у послідовності. Другий підшар являє собою позиційно-орієнтовану повнозв'язну пряму мережу. Ця мережа застосовується до кожної позиції послідовності окремо і включає два лінійних перетворення. Розмірність вхідних та вихідних даних цього підшару складає d_{model} , при цьому внутрішній шар має розмірність $d_{ff}=2d_{model}$. Важливо відзначити, що цей підшар використовує функцію активації GELU, яка демонструє кращу ефективність порівняно зі стандартною ReLU у рамках кодувальника Transformer. У кожному шарі кодувальника реалізуються також і залишкові зв'язки. Вони використовуються навколо кожного з двох підшарів, після чого відбувається нормалізація шару. В результаті вихід кожного підшару є $LayerNorm(x + Sublayer(x))$, де $Sublayer(x)$ – функція, реалізована всередині підшару. Всі підшари в моделі BERT генерують вихідні дані однієї і тієї ж розмірності d_{model} , що полегшує процес залишкового зв'язування. Відзначимо, що, незважаючи на те, що лінійні перетворення однакові для різних позицій усередині одного підшару, модель BERT використовує різні параметри для різних шарів.

Суть механізму «багатоголовкової» уваги полягає в тому, що кожна «головка» може спеціалізуватися на виявленні певного типу взаємозв'язків у даних, що робить цю модель загалом ефективнішою порівняно з моделлю, яка використовує одну «головку» уваги. Цей механізм дозволяє моделі повніше і точніше розуміти контекст та семантику тексту, що суттєво підвищує її продуктивність при вирішенні різних задач NLP. Функція самоуваги реалізується паралельно на різних проекціях матриць запиту, ключа і значення. В результаті формуються h різних вихідних матриць, відомих як «головки уваги». Ці «головки уваги» потім конкатенуються і проєктуються в інший підпростір представлення, що призводить до створення остаточної вихідної матриці «багатоголовкової» уваги.

Загальну архітектуру моделі BERT представлено на рис. 1 [12].

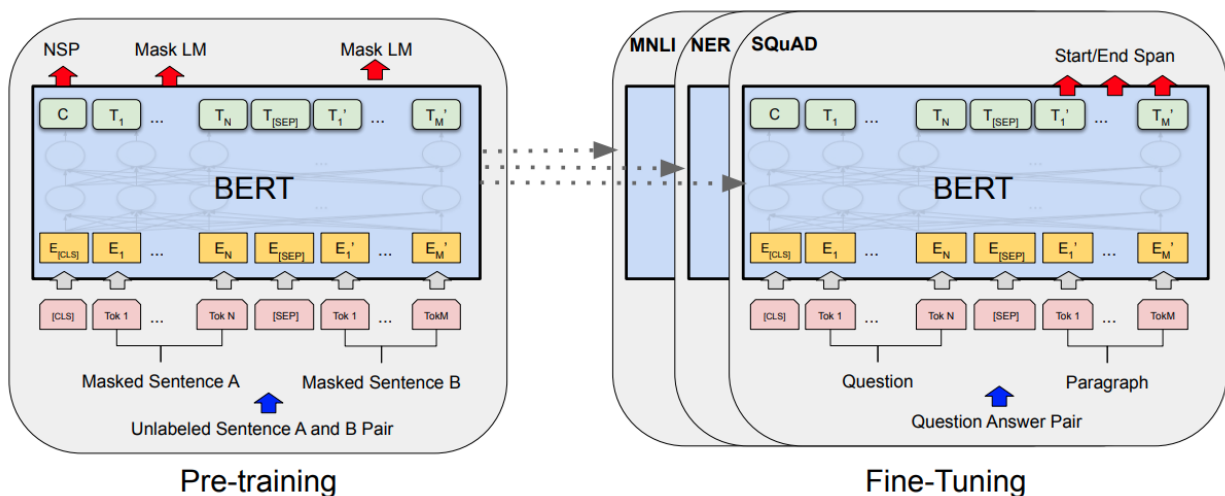


Рис. 1. Загальна архітектура моделі BERT

В процесі формування заявки на отримання послуг модель BERT може бути використано для вирішення різноманітних задач. Однією з цих задач є формування і попередня обробка

заявки, створеної користувачем у вигляді тексту, написаного природною мовою. Під час заповнення форми користувачем BERT аналізує введені дані та забезпечує формування пропозицій щодо подальшого формування та обробки заявки з мінімізацією участі користувача. Наприклад, маємо: T – текст форми; $V(t)$ – векторне представлення токена t ; C – контекстний вектор заповнення. Тоді опис контекстного вектору має вигляд

$$C = \frac{1}{|T|} \sum_{t \in T} V(t). \quad (1)$$

З використанням отриманого вектору формується така пропозиція:

$$Pr\ oposal(N) = \arg \max_{t \in N} (V(t) * C). \quad (2)$$

Вираз (1) описує загальний результат застосування BERT Pre-training; вираз (2) описує загальний результат застосування BERT Fine-Tuning.

Головний недолік моделі BERT полягає у великій кількості параметрів, які потребують обробки. Зокрема, значних витрат потребує створення та обробки формальних представлень шарів та підшарів трансформера BERT. Тому існує необхідність проведення досліджень, спрямованих на зменшення витрат, пов'язаних із застосуванням моделі BERT під час автоматизованого вирішення різноманітних прикладних задач в межах ІС та ІТ управління підприємствами та організаціями.

5. Вирішення задачі автоматизації процесів формування заявок на отримання послуги

5.1. Розробка комбінованого методу для вирішення задачі формування заявок

Однією з задач процесу формування заявки на отримання послуг є задача формування і попередньої обробки заявки, створеної користувачем у вигляді тексту, написаного природною мовою. Але головний недолік моделі BERT не дає змоги застосовувати цю модель у малих та середніх ІС та ІТ управління послугами підприємств або організацій. Тому авторами статті запропоновано розробити комбінований метод вирішення задачі формування та попередньої обробки заявки на отримання послуги. В цьому методі пропонується поєднати переваги застосування моделі BERT та менш витратних моделей і методів ML, які можуть надавати точніший результат в умовах обмеженого тексту опису заявки природною мовою користувача.

Результат розробки комбінованого методу вирішення задачі формування та попередньої обробки заявки на отримання послуги представимо як послідовність таких етапів.

Етап 1. Проведення аналізу текстового запиту з використанням моделі BERT.

Крок 1.1. Проведення попередньої обробки тексту перед подачею текстового запиту на вхід моделі BERT шляхом токенізації, видалення стоп-слова, лематизації тощо.

Крок 1.2. Подача тексту до моделі BERT, яка використовує контекстні вектори для представлення слів у тексті. Вектори отримуються під час BERT Pre-training моделі на великому обсязі текстових даних

$$H = BERT(T), \quad (3)$$

де H – контекстні вектори, отримані як результат застосування BERT; T – вхідний текстовий запит.

Крок 1.3. Визначення ключових параметрів запиту на основі контекстних векторів

$$H = \text{ExtractParameters}(H), \quad (4)$$

де $H = (H_1, \dots, H_i, \dots, H_m)$; m – кількість параметрів

Крок 1.4. Створення вектору параметрів для подальшого використання в лінійній регресії та моделі машинного навчання

$$V_{\text{parameters}} = [KV]. \quad (5)$$

Крок 1.5. Визначення вагових коефіцієнтів для кожного параметра за допомогою лінійної регресії

$$W_{\text{parameters}} = \text{LinearRegression}(V_{\text{parameters}}). \quad (6)$$

Етап 2. Розрахунок вагових коефіцієнтів з використанням лінійної регресії.

Крок 2.1. Підготовка додаткових ознак для лінійної регресії на основі вектору вагових коефіцієнтів $W_{\text{parameters}}$

$$X_{\text{linear}} = \text{PrepareFeatures}(W_{\text{parameters}}, H). \quad (7)$$

Крок 2.2. Визначення вагових коефіцієнтів для лінійної регресії на основі підготовлених ознак

$$W_{\text{linear}} = \text{LinearRegression}(X_{\text{linear}}). \quad (7)$$

Крок 2.3. Розрахунок зважених ознак для подальшого використання у моделі машинного навчання

$$\hat{X}_{\text{linear}} = W_{\text{linear}} * X_{\text{linear}}. \quad (8)$$

Етап 3. Реалізація навченої моделі класифікації за допомогою ML.

Крок 3.1. Підготовка навчального набору даних для класифікації, який містить контекстні вектори H , отримані від BERT, зважені ознаки \hat{X}_{linear} як результат лінійної регресії та відомі мітки класів Y_i на основі типів заявок

$$D_{\text{classification}} = \{(H_i, \hat{X}_{\text{linear}_i}, Y_i)\}_{i=1}^N, \quad (9)$$

де H_i – контекстні вектори для i -го запиту як результат застосування BERT; $\hat{X}_{\text{linear}_i}$ – зважені ознаки для i -го запиту як результат лінійної регресії; Y_i – мітка класу (тип заявки) для i -го запиту.

Крок 3.2. Проведення навчання моделі класифікації з використанням навчального набору даних з використанням Support Vector Machine (SVM), Random Forest, чи іншої моделі ML

$$Model_{classification} = TrainClassificationModel(D_{classification}). \quad (10)$$

Крок 3.3. Класифікація нових запитів на основі їхніх контекстних векторів як результату застосування BERT та зважених ознак від лінійної регресії з використанням навченої моделі

$$Y_{predicted} = Model_{classification}(H_{new}, \hat{X}_{linear_{new}}). \quad (11)$$

Етап 4. Категоризація текстових описів з використанням моделі Байєса.

Крок 4.1. Збір та попередня обробка текстових даних (описи об'єктів заявки, відгуки користувачів, інші текстові ресурси тощо)

$$D_{text} = \{Text_i\}_{i=1}^M. \quad (12)$$

де $Text_i$ – текстові дані для i -го документа; M – кількість видів текстових документів.

Крок 4.2. Тренування моделі Байєса з використанням навчального набору текстових даних та наївного байєсівського класифікатора

$$Model_{Bayes}(Description_{rent}). \quad (13)$$

Крок 4.3. Категоризація текстових даних шляхом їх призначення відповідним типам заявок

$$Y_{Bayes} = MapCategoriesToLabels(Category_{text}), \quad (14)$$

де вектор міток Y_{Bayes} вказує на тип заявки для кожного текстового опису.

Етап 5. Надання рекомендацій користувачам системи.

Крок 5.1. Отримання результатів застосування моделі класифікації $Y_{predicted}$ (11) та моделі категоризації текстового опису об'єкта Y_{Bayes} . (14).

Крок 5.2. Зважене поєднання отриманих результатів реалізації моделей (11) та (14), де ваги можуть бути налаштовані на основі точності та важливості кожної моделі, у вигляді комбінованого вектору

$$Y_{combined} = \alpha * Y_{predicted} + \beta * Y_{Bayes}. \quad (15)$$

де α та β – ваги для кожної моделі.

Крок 5.3. Надання рекомендацій з використанням отриманого комбінованого вектору $Y_{combined}$ для призначення рекомендацій користувачам системи щодо вибору об'єкта.

$$Recommendations = ProvideRecommendations(Y_{combined}). \quad (16)$$

5.2. Експериментальна перевірка результатів реалізації комбінованого методу для вирішення задачі формування заявок на оренду автомобілів через веб-сайт компанії

Сучасні послуги оренди автомобілів пропонують гнучку адаптацію заявок залежно від ситуацій, в яких користувач може обрати, наприклад, автомобіль з дитячим кріслом,

кондиціонером, аудіотехнікою, навігаційною системою тощо. Це робить послуги оренди або прокату автомобілю дуже популярними у сучасному світі. Але у більшості компаній, діяльність яких спрямована на надання цієї послуги, є проблеми, пов'язані з відсутністю автоматизації процесів формування заявок на оренду. Використання алгоритмів оптимізації заявки на оренду для динамічного встановлення цін в залежності від попиту має глибоке значення при процесах формування заявок.

Тому експериментальну перевірку розробленого комбінованого методу запропоновано провести на прикладі автоматизованого вирішення функціональної задачі формування заявок в межах веб-сайту компанії з прокату автомобілів.

Програмний додаток, який забезпечує автоматизоване застосування розробленого комбінованого методу, було розроблено на основі мови Python. Цей додаток включає в себе такі бібліотеки:

- Streamlit – бібліотека Python, яка використовується для швидкого створення веб-додатків. У цьому коді використовується для створення інтерфейсу користувача при рекомендації двигуна транспортного засобу;
- Langchain – користувацький пакет, який надає набір інструментів для побудови моделей природної мови. Він має кілька підмодулів, включаючи Pllms, які з'єднують з LLM, такими як OpenAPIs GPT;
- Azure.search.documents – бібліотека, елементом якої є клас SearchClient, що використовується для взаємодії з компонентом Azure Cognitive Search. Компонент Azure Cognitive Search використовувався як пошукова система для транспортних засобів. Дані транспортного засобу були завантажені як файли JSON;
- Scikit-learn – бібліотека, яка використовувалася для реалізації моделей і методів лінійної регресії.

Для вирішення задачі формування заявки на оренду автомобіля користувач повинен зайти на сайт і обрати функцію «Орендувати авто». Коли користувач натискає на кнопку «Орендувати авто», йому відкривається вікно, куди він повинен вписати свій запит. На цьому етапі користувачу пропонується ввести у довільній формі інформацію про поїздку (вказати терміни та місце отримання транспортного засобу, а також додати додаткові опції). Застосування розробленого комбінованого методу дозволяє користувачеві у вільному форматі і у своєму особистому стилі внести у форму заповнення запиту пояснення, що саме він шукає.

Приклад реалізації функції аналізу тексту запита користувача та вибору автомобіля наведено на

рис. 2.

```
1 import re
2
3 # Припустимо, що у нас є база даних автомобілів
4 car_database = [
5     {'марка': 'Toyota', 'модель': 'Camry', 'вартість': 500, 'місцямиць': 5},
6     {'марка': 'Honda', 'модель': 'Accord', 'вартість': 450, 'місцямиць': 4},
7     # Додайте інші автомобілі за їх характеристиками
8 ]
9
10
11 def analyze_text_and_choose_car(text):
12     # Аналіз тексту
13
14     ages = re.findall(r'\d+\b', text)
15     destination = re.search(r'\b[A-Z][a-z]+(?:\s|,)+', text)
16     start_date = re.search(r'\b\d{2}/\d{2}/\d{4}\b', text)
17     end_date = re.search(r'\b\d{2}/\d{2}/\d{4}\b', text)
18
19     # Залиш вибору автомобілів
20     selected_cars = []
21
22     for car in car_database:
23         if int(ages[0]) <= car['місцямиць'] and int(ages[1]) <= car['місцямиць']:
24             selected_cars.append(car)
25
26     # Виведення результатів
27     print(f"Вік літків: {ages}")
28     print(f"Місце поїздки: {destination.group() if destination else 'Невідомо'}")
29     print(f"Дата початку поїздки: {start_date.group() if start_date else 'Невідомо'}")
30     print(f"Дата завершення поїздки: {end_date.group() if end_date else 'Невідомо'}")
31
32     print("\nВибрані автомобілі:")
33     for car in selected_cars:
34         print(f"Марка: {car['марка']}, Модель: {car['модель']}, Вартість: {car['вартість']}")
35
36
37 # Зразок тексту
38 user_text = "Я вільно, їду з двома дітьми, котрим по 8 та 10 років, до Харкова з 10.01.2024 до 17.01.2024. Підберіть мені, будь ласка, гарне авто :)"
39
40 # Фінальна функція аналізу тексту та вибору автомобіля
41 analyze_text_and_choose_car(user_text)
```

Рис. 2. Функція аналізу тексту запита користувача та вибору автомобіля

На першому етапі для аналізу тексту запиту, виокремлення віку дітей, місця поїздки, а також дат початку та завершення подорожі використовуються регулярні вирази. Ці дані служать вхідними параметрами для подальшого вибору автомобілів.

Для взаємодії з базою даних автомобілів реалізовано спеціальний механізм, який здійснює обмін інформацією про автомобілі у вигляді JSON-файлів (див. рис. 3).

Вихідною інформацією, яка формується в результаті застосування автоматизованого комбінованого методу, є інформація, отримана з поданої заявки, та список автомобілів, визнаних найрелевантнішими цій заявці, разом з характеристиками цих автомобілів. Приклад результату вирішення задачі формування заявки на оренду автомобілів наведено на рис. 4.

```
1 json_data = {}
2   "content": {
3     "DOORS": 5,
4     "COLOUR": "Grey",
5     "VARIANT": "Dacia jogger",
6     "MILEAGE": 23744,
7     "YEAR": 2015,
8     "PEOPLE": 5,
9     "TRANSMISSION": "MANUAL",
10  }
```

Рис. 3. Приклад JSON-файла

6. Обговорення результатів дослідження

Експериментальна перевірка розробленого комбінованого методу вирішення задачі автоматизації формування заявок для веб-сайту компанії з оренди автомобілів включала в себе підготовку даних, удосконалення алгоритмів, тестування, валідацію і аналіз результатів.

Розглянуто особливості підготовки вхідних даних під час формування заявки на оренду автомобілів. Наведено опис програмної функції, яка реалізує розроблений комбінований метод. Розглянуто особливості взаємодії цієї функції з базою даних та пошуковою системою. Продемонстровано можливість знаходження автомобілів, релевантних заявці, яку було сформовано користувачем у довільному текстовому форматі.

Розроблена програмна реалізація проходила тестування та валідацію на тестових наборах даних, які створювалися для імітації різноманітних сценаріїв запитів. Під час формування тестових наборів даних використовувались як реальні, так і синтезовані дані.

Результати, отримані під час валідації розробленої програмної функції в межах веб-сайту компанії з оренди автомобілів, показали покращення точності підбору автомобілів за заявками користувачів у порівнянні попередніми варіантами вирішення даної задачі (ручне вирішення, заповнення жорстко структурованих форм). Було також виявлено зменшення часу відгуку реалізованої функції на запити користувачів, що сприяє покращенню загального користувацького досвіду.

Головним недоліком отриманих результатів слід вважати недостатнє зменшення обчислювальних витрат на реалізацію розробленого комбінованого методу, що приводить до

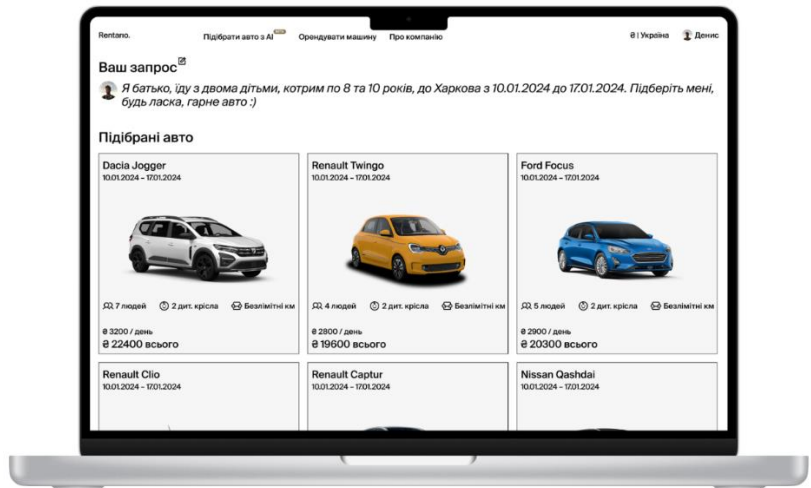


Рис. 4. Результат вирішення задачі формування заявки на оренду автомобілів

появи жорсткіших вимог, які висуваються до серверів даних або хмар як ІТ-інфраструктури, в якій планується експлуатація веб-сайту компанії.

Виходячи з цього недоліку, головним напрямком подальших досліджень в галузі застосування методів ML та моделі BERT є дослідження зі зменшення кількості параметрів та розмірностей цих методів і моделі без значного погіршення результатів обробки.

7. Висновки

У ході даного дослідження було вирішено задачу розробки комбінованого методу автоматизованого формування заявок на отримання послуги. Розроблений метод являє собою поєднання моделі BERT з простішими методами ML та методами байєсівської класифікації. Таке поєднання зменшує обчислювальні витрати на реалізацію моделі BERT без суттєвого погіршення якості визначення послуги, якої потребує користувач.

Для експериментальної перевірки розробленого комбінованого методу було створено програмну функцію та механізми взаємодії цієї функції з базою даних та пошуковою системою. Апробація цієї функції проводилася в межах експлуатації веб-сайту компанії з оренди автомобілів. Результати апробації підтверджують можливість застосування розробленого комбінованого методу для вирішення функціональних задач формування і попередньої обробки заявок на отримання послуги у різних предметних галузях.

Як перспективи подальших досліджень запропоновано звернути особливу увагу на вивчення особливих заходів зі зменшення обчислювальної складності моделі BERT та її різновидів з метою застосування подібних моделей у різноманітних ІС та ІТ управління середніми та малими підприємствами та організаціями.

Перелік посилань:

1. Horovitz J. Service Strategy: Management Moves for Customer Results. Pearson Education. 2004. 205 p.
2. ISO/IEC 20000-1:2018. Information technology – Service management – Part 1: Service management system requirements. 2018-09-14. 31 p.
3. Система управління замовленнями RemOnline. *RemOnline*. URL: <https://remonline.ua/features/order-management/> (дата звернення 20.12.2023).
4. Huang M., Pang J. Research on the Evaluation System of Online Car Service Quality. *Journal of Social Humanities*. 2023. Vol. 5. Iss. 1. [https://doi.org/10.53469/jssh.2023.5\(01\).09](https://doi.org/10.53469/jssh.2023.5(01).09).
5. Ling L. The Design of Multifunctional Online Travel Service Management Platform and the Implementation of MySQL. *2022 4th International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*. Coimbatore, India, 2022. P. 1293-1296. <https://doi.org/10.1109/ICIRCA54612.2022.9985607>.
6. Artificial Intelligence Powered Recommender as a Service. *Recombee*. URL: <https://www.recombee.com/> (дата звернення: 18.12.2023).
7. Liang X., Kuang X., Xu Y. et al. The Construction of National Fitness Online Platform System under Mobile Internet Technology. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2021. Vol. 14. P.98-109. <https://doi.org/10.1007/s13198-021-01198-5>.
8. Chang H., Shi T. Research and Design of a Job Service Platform Based on Recommendation Algorithm. *The Frontiers of Society, Science and Technology*. 2023. Vol. 5, iss. 14. P. 78-83. <https://doi.org/10.25236/FSST.2023.051414>
9. Enter the Era of Hyper-personalization with Experience OS. *Dynamic yield*. URL: <https://www.dynamicsyield.com/experience-os> (дата звернення: 20.12.2023).
10. Amazon Personalize. AWS. URL: <https://aws.amazon.com/personalize/> (дата звернення: 20.12.2023).
11. Battina D.S. Research on Artificial Intelligence for Citizen Services and Government. *International Journal of Creative Research Thoughts*. 2017. Vol. 5. Iss. 2. P. 769-773.
12. Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. *NAACL HLT 2019 – 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies – Proceedings of the Conference*. Minneapolis, 2019. Vol. 1. P. 4171-4186.

13. Zhng Q., Ding L., Liu J., Du B., Tao D. Can ChatGPT understand too? A comparative Study on ChatGPT and Fine-tuned BERT. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2302.10198> (дата звернення 22.12.2023)..
14. Introducing ChatGPT Plus. OpenAI. URL: <https://openai.com/blog/chatgpt-plus> (дата звернення: 22.12.2023).
15. yang Z., Dai Z., Yang Y., Carbonell J., Salakhutdinov R., Le Q.V. XLNet: Generalized Autoregressive Pre-training for Language Understanding. *NIPS'2019: Proceedings of the 33rd International Conference on Neural Information Processing Systems*. Curran Associates inc., USA, 2019. Article No.: 517. P. 5753-5763. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.08237>.
16. Liu Y. et al. RoBERTa: A Robustly Optimized BERT Pre-training Approach. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.11692>. (дата звернення 22.12.2023).
17. Lan Z., Chen M., Goodman S., Gimpel K., Sharma P., Soricut R. ALBERT: A Lite BERT for Self-supervised Learning of Language Representations. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.11942> (дата звернення 22.12.2023).
18. Wang W., Bi B., Yan M., Wu C., Bao Z., Xia J., Peng L., Si L. StructBERT: Incorporating Language Structures into Pre-training for Deep Language Understanding. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.04577> (дата звернення 22.12.2023).
19. Raffel C. et al. Exploring the Limits of Transfer Learning with a United Text-to-Text Transformer. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.10683> (дата звернення 22.12.2023).
20. Brown T.B. et al. Language Models are Few-shot Learners. *NIPS'20: Proceedings of the 34th International Conference on Neural Information Processing Systems*. Vancouver BC Canada, 2020. Article No.: 159. P. 1877-1901. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.14165>.
21. Clark K., Luong M.-T., Le Q.V., Manning C.D. ELECTRA: Pre-training Text Encoders as Discriminators Rather than Generators. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.10555> (дата звернення 20.12.2023).
22. He P., Liu X., Gao J., Chen W. DeBERTa: Decoding-enhanced BERT with Disentangled Attention. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.03654> (дата звернення 20.12.2023).

Надійшла до редколегії 27.12.2023 р.

Левикін Віктор Макарович, доктор технічних наук, професор кафедри ІУС ХНУРЕ, м. Харків, Україна, e-mail: viktor.levykin@nure.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7929-515X> (науковий керівник здобувача вищої освіти Діденка Дениса Олександровича).

Діденко Денис Олександрович, здобувач вищої освіти, група ІУСТМ-22-1, факультет комп'ютерних наук, ХНУРЕ, м. Харків, Україна, e-mail: denys.didenko@nure.ua.

Альошкін Олексій Андрійович, здобувач вищої освіти, група УПГІТМ-22-1, факультет комп'ютерних наук, ХНУРЕ, м. Харків, Україна, e-mail: oleksii.aloshkin@nure.ua.

РОЗРОБКА МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИСТУПІВ СПОРТСМЕНІВ ТА КОМАНД У СПОРТИВНИХ ЗМАГАННЯХ

Розглянуто основні особливості вирішення задачі прогнозування результатів спортивних змагань. Проаналізовано основні методи вирішення цієї задачі, встановлено їхні переваги та недоліки. Розроблено метод вирішення задачі прогнозування результатів виступів спортсменів та команд у спортивних змаганнях, який поєднує переваги методів байєсівської лінійної регресії та байєсівського оцінювання. Проведено експериментальну перевірку отриманих результатів під час вирішення задачі прогнозування результатів участі спортсменів Федерації підводного спорту та підводної діяльності України у спортивних змаганнях на Кубок світу.

1. Вступ

Сучасний спорт є однією з важливих галузей бізнес-діяльності. Однією із задач, яка вирішується для забезпечення якісного управління діяльністю в усіх спортивних напрямках, є задача прогнозування результатів діяльності спортивних клубів, командних та особистих змагань спортсменів. Вирішення задач прогнозування стає необхідністю для управління найрізноманітнішими аспектами цієї галузі (спортивний менеджмент, ставки на спорт, аналіз командних та індивідуальних виступів тощо) [1]. У сучасному спортивному світі, де конкуренція є надзвичайно високою, прогнозування результатів змагань стає ключовою складовою для розвитку та популяризації різних видів спорту. Визначення успішності спортсменів/команд вимагає не лише аналізу історичних даних, а й використання сучасних методів прогнозування, щоб отримати об'єктивні та надійні результати [2].

Прогноз у сфері спорту – це науково обґрунтоване судження про можливий стан спортсмена або певного об'єкта спортивної дійсності у майбутньому, а також про найімовірніші шляхи досягнення бажаного стану [3]. На теперішній час прогнозування в спорті відбувається за основними часовими обмеженнями [4]:

- короткострокове прогнозування;
- середньострокове прогнозування;
- довгострокове прогнозування;
- наддовгострокове прогнозування.

Основну увагу даного дослідження зосереджено на довгостроковому прогнозуванні.

Довгострокове прогнозування спрямоване на оптимізацію процесу відбору, підготовки та участі спортсменів в змаганнях протягом відносно тривалого часу (від 1-2 років до 3-4 років).

Довгостроковий прогноз в спортивній сфері має велике значення при вирішенні таких задач [5]:

- відбір спортсменів/команд, які здатні досягти високих показників в різних видах спорту;
- орієнтація спортсменів на досягнення високих результатів в тій чи іншій дисципліні конкретного вигляду, вибір ігрового амплуа (в іграх), вибір перспективної техніко-тактичної моделі змагання, що спирається на максимальне використання індивідуальних можливостей спортсменів;

- визначення оптимальної структури тренувального процесу, динаміки навантажень, найвірогіднішого розвитку підготовленості, формування різних компонентів спортивної майстерності;

- вибір найефективніших техніко-тактичних рішень (складнокоординаційні види, єдиноборство, ігри), здатних виявитися несподіваними для суперників, найефективнішими з позиції досягнення кінцевого результату змагальної діяльності;

- виявлення складу основних суперників, їхньої технічної й тактичної оснащеності, фізичної та психічної підготовленості, особливостей діяльності змагання;

- вивчення умов майбутніх змагань, включаючи режим проведення змагань, кліматичні умови, особливості суддівства, інвентарю, устаткування;

- визначення спортивного результату, який може виявитися достатнім для перемоги, характеристик підготовленості, які дозволять забезпечити досягнення заданого результату.

Занадто низька точність таких прогнозів обумовлюється зараз великою кількістю чинників, які складно враховуються, але впливають на перемогу в змаганнях і темпи зростання спортивних результатів. На кінцевий результат прогнозу може мати вирішальний вплив кожний з чинників.

Тому існує постійна необхідність проведення досліджень існуючих та розробки нових і вдосконалених моделей і методів довгострокового прогнозу для підвищення ефективності управління спортивними клубами та результативності участі спортсменів у змаганнях різного рівня у різних видах спорту.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми дослідження

2.1. Аналіз існуючих методів вирішення задачі прогнозування результатів спортивних змагань

Аналіз існуючих методів вирішення задачі прогнозування результатів спортивних змагань запропоновано проводити з урахуванням вимоги приділення головної уваги тим методам прогнозування, які впливають на точність та об'єктивність визначення рейтингів спортсменів/команд у різних видах спорту. При цьому акцент слід робити на новітніх тенденціях та підходах, що дозволяють покращити якість прогнозування та враховувати різні аспекти спортивної діяльності [6].

Виходячи з цієї вимоги, було виділено групу математичних методів, які використовуються для прогнозування результатів спортивних змагань, а саме:

- методи машинного навчання (ML) [7];
- статистичні методи [8];
- байєсівські методи [9];
- методи оптимізації [10];
- методи теорії ігор [11];
- методи експертного оцінювання [12];
- методи побудови динамічних моделей [13].

Кожна з зазначених груп методів має власні ролі у розвитку спорту в цілому. Так методи ML в аспекті аналізу діяльності спортсменів використовують статистичні дані для визначення сильних та слабких сторін. Вони також використовуються для прогнозування травм, визначення оптимального часу відновлення та рекомендацій щодо тренувального процесу. У сфері тренування методи ML можуть адаптувати програми тренувань до індивідуальних потреб кожного спортсмена на основі його фізичного стану та показників втоми. В аспекті

стратегічного аналізу результатів змагань методи ML можуть використовуватися для прогнозування дій суперників, аналізу даних щодо спортсменів/команд та визначення оптимальних тактик. Використання методів ML у спорті загалом сприяє підвищенню ефективності тренувань, покращенню стратегій змагань та зниженню ризику травм [14].

Статистичні методи використовуються, наприклад, у ігрових видах спорту, для обробки та аналізу великої кількості даних про гравців, таких, як результати гри, ведення статистики щодо голів, часу гри, кількості травм тощо. Це дозволяє тренерам та аналітикам здійснювати об'єктивний аналіз і визначати ключові аспекти виступу гравців. За допомогою цих методів можна визначати ефективність тренувань та адаптувати їх до потреб індивідуальних гравців. Аналіз статистичних даних щодо фізичного стану, втоми та відновлення дозволяє максимізувати результативність тренувань. Такі методи стають важливим інструментом у спортивній аналітиці, допомагаючи приймати обґрунтовані рішення та оптимізувати різні аспекти спортивного процесу [15].

Основні аспекти використання байєсівських методів у спорті включають оцінювання ймовірностей успіху, оптимізацію стратегій та прогнозування травм. Зокрема, байєсівські методи в спортивній аналітиці використовують теорію ймовірностей для моделювання та аналізу невизначеностей, прийняття рішень та оцінювання ймовірностей подій [9]. Ці методи можуть адаптуватися в реальному часі, враховуючи попередні знання та нові докази (дані). Вони також застосовуються для аналізу стратегій суперників та оцінювання впливу різних факторів на спортсменів [16].

Методи оптимізації в спортивному контексті широко використовуються для підвищення ефективності та результативності. Вони включають в себе розробку оптимальних тренувальних програм, визначення оптимальних стратегій гри та максимізацію використання ресурсів. Ці методи дозволяють аналізувати та вдосконалювати процеси тренувань, адаптувати підходи до індивідуальних потреб спортсменів, а також знаходити оптимальні рішення в умовах обмежень. Використання методів оптимізації допомагає спортивним командам досягати кращих результатів, мінімізувати травми та ефективно використовувати ресурси для досягнення найвищого потенціалу [9].

Теорія ігор в спортивному контексті є важливим інструментом для аналізу стратегічної взаємодії між різними учасниками. Вона дозволяє розглядати спортивні події як ігрові сценарії, де гравці приймають стратегічні рішення, впливаючи один на одного. Теорія ігор застосовується також для розуміння оптимальних стратегій, визначення слабких та сильних сторін гравців, а також прогнозування можливих варіантів розвитку подій. Ця теорія може бути використана для планування тактичних кроків, враховуючи можливі дії суперників, та для оптимізації стратегій гри з метою досягнення перемоги [5].

Експертні оцінки в світі спорту є невід'ємним ресурсом, що дає важливий внесок в розуміння різних аспектів гри та тренувань. Тренери, фахівці з фізіології та аналітики завдяки своїм глибоким знанням можуть доповнити статистичні дані, розкриваючи інтуїцію гравців, їхні лідерські якості та інші важливі аспекти. Вони допомагають у виокремленні аспектів виступу гравців, тому що такі аспекти не завжди відображаються у статистичних даних. Експертні думки стають основою для розробки оптимальних стратегій гри та спортивних тренувань [17].

Динамічні методи й моделі застосовуються для прогнозування різних аспектів у спортивному середовищі. Наприклад, такі моделі можуть використовуватися для аналізу

фізичного стану спортсменів, прогнозувати їхню витривалість та форму перед матчами та змаганнями. Вони можуть також використовуватися для прогнозування динаміки гри, враховуючи тактичні зміни та стратегії суперників. Завдяки динамічним моделям тренери та аналітики можуть краще розуміти та оптимізувати тренувальні процеси та приймати обґрунтовані рішення під час змагань [18].

Для обраних груп методів були визначені їхні переваги та недоліки, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Переваги та недоліки сучасних математичних методів прогнозування, які можна використовувати в спортивній діяльності

Метод	Характеристики	Переваги	Недоліки
Методи машинного навчання	Використовують алгоритми для вивчення шаблонів у даних	Здатність робити прогнози на основі великої кількості даних	Потребують великої кількості даних для ефективної роботи
Статистичні методи	Засновані на статистичних моделях та методах	Здатність розраховувати ймовірність та довірчі інтервали	Можуть бути чутливими до викидів та аномалій у даних
Байєсівські методи	Використовують теорему Байєса для оцінки ймовірностей	Добре працюють при обмежених вхідних даних	Вимагають апріорних ймовірностей, які можуть бути суб'єктивними
Методи оптимізації	Максимізують або мінімізують обрану функцію відносно параметрів	Ефективні для оптимізації конкретних функцій	Як остаточні рішення можуть пропонуватися локальні екстремуми
Методи теорії ігор	Вивчають стратегії взаємодії між учасниками	Допомагають у розумінні стратегічних аспектів змагань	Складно моделюються ускладнені взаємодії та стратегії
Методи експертного оцінювання	Використовують експертні знання та думки для прогнозування	Можуть бути ефективними в випадках обмежених даних	Залежать від якості та об'єктивності експертних рішень
Методи побудови динамічних моделей	Створюють моделі, які враховують зміну в часі	Допомагають у прогнозуванні тенденцій та динаміки	Вимагають точних даних для побудови й оновлення даних

Результати порівняльного аналізу обраних груп методів наведено у табл. 2.

У табл. 2 прийнято такі скорочення: 1 – методи машинного навчання; 2 – статистичні методи; 3 – байєсівські методи; 4 – методи оптимізації; 5 – методи теорії ігор; 6 – методи експертного оцінювання; 7 – методи побудови динамічних моделей.

За результатами проведеного аналізу було обрано для подальшого поглибленого дослідження три групи методів:

- методи машинного навчання;
- байєсівські методи;
- статистичні методи.

Результати порівняльного аналізу цих груп методів за додатковими критеріями наведено

у табл. 3.

Таблиця 2

Результати порівняльного аналізу обраних груп методів

Критерії якісного прогнозу	Сучасні методи прогнозування						
	1	2	3	4	5	6	7
Обробка обмежених даних	-	-	+	+	-	+	+/-
Ефективність при використанні великої кількості даних	+	+/-	+	+/-	-	+/-	+
Чутливість до викидів та аномалій	-	-	+/-	+/-	+/-	+/-	-
Залежність від суб'єктивних оцінок	-	-	+	-	-	-	-
Обчислювальні витрати	-	+/-	-	+/-	+/-	+/-	-
Здатність моделювати стратегії	-	-	-	-	+	-	-
Залежність від точності даних	+	+	-	+/-	+/-	+/-	+

Таблиця 3

Результати порівняльного аналізу методів прогнозування за додатковими критеріями

Додаткові критерії	Методи машинного навчання	Байєсівські методи	Статистичні методи
Точність	Висока	Середня	Низька
Чутливість	Висока	Середня	Низька
Врахування взаємодії факторів	Висока	Середня	Низька
Специфічність	Висока	Середня	Низька
Час виконання	Так	Так	Ні
Відповідність задачі	Так	Так	Так
Врахування природи даних	Так	Ні	Так
Масштабованість	Так	Так	Ні
Здатність до оновлення	Так	Так	Ні
Ймовірнісний підхід	Ні	Так	Ні
Можливість роботи з малою кількістю даних	Ні	Так	Ні
Фактори спорту	Так	Ні	Так
Форма спортсмена	Так	Ні	Так
Умови змагань	Так	Ні	Так
Тривалість тренувань	Так	Ні	Так

Аналіз сучасних методів вирішення задачі прогнозування результатів спортивних змагань показав, що більшість з них не використовується для прогнозування спортивних рейтингів, а лише допомагають у аналізі спортивних результатів, виходячи з показаного часу чи результату спортсменів. Аналіз методів, які можна використати для прогнозування результатів змагань, показав, що методи ML і методи, які використовують байєсівські моделі, є найбільш підходящими для прогнозування рейтингу за медальним заліком (далі – успіх) у видах спорту та для визначення стабільності та пріоритетності спортсменів.

Важливою частиною прогнозування результатів спортивних змагань є прогнозування результатів виступів окремих спортсменів/команд (далі – прогнозування результатів

виступів). Методи подібного прогнозування є одними з найменш досліджених методів спортивного прогнозування. Тому проведення досліджень, спрямованих на вдосконалення існуючих та розробку нових методів прогнозування результатів виступів, є одним з найважливіших напрямів проведення досліджень в цій галузі.

3. Мета і задачі дослідження

Метою даного дослідження є підвищення точності прогнозування результатів виступів. Досягнення цієї мети дозволить обґрунтовано приймати рішення щодо визначення стабільності та пріоритетності участі спортсменів у майбутніх змаганнях.

Для досягнення поставленої мети треба вирішити такі задачі:

- адаптація моделі байєсівської лінійної регресії до особливостей вирішення задачі прогнозування результатів виступів;
- розробка вдосконаленого методу прогнозування результатів виступів;
- експериментальна перевірка розробленого вдосконаленого методу під час вирішення задачі прогнозування результатів виступів у спортивних змаганнях Федерації підводного спорту та підводної діяльності України.

4. Опис методу дослідження

Об'єктом дослідження є задача прогнозування результатів виступів.

Проведений аналіз застосування методів прогнозування в спортивній діяльності показав, що для вирішення цієї задачі найбільше підходять дві групи методів. Це методи ML та методи, основою яких є байєсівські моделі. ML дозволяє виявляти складні зв'язки у великих даних, а байєсівські моделі ефективно оцінюють ймовірності та адаптуються до нових даних, що робить їх ефективними для спортивного прогнозування.

Тому предметом дослідження є вдосконалений метод прогнозування результатів виступів, який, на відміну від існуючих, поєднує переваги методів ML та методів, в основі яких знаходяться байєсівські моделі.

Дослідження при вирішенні задачі прогнозування результатів виступів з використанням методу ML починається з отримання детальної вхідної інформації про таке:

- завойовані місця та отримані медалі;
- кількість отриманих рейтингових очок (РО) спортсменів чи спортивних клубів після кожних вагомих змагань;
- статистику з попередніх змагань.

Як вихідний метод вирішення задачі прогнозування результатів виступів запропоновано використати метод байєсівської лінійної регресії. Цей метод включає оцінку параметрів регресійної моделі шляхом використання апріорних і апостеріорних розподілів [19]. Він також дозволяє враховувати невизначеність у моделі та адаптуватися до нових даних, що робить його особливо корисним в умовах з обмеженими або змінними даними.

Результатом застосування методу байєсівської лінійної регресії є модель прогнозування загальної кількості РО спортсменів на основі середньої кількості їхніх РО у змаганнях та стабільності отриманих результатів. Ця модель може бути представлена у вигляді:

$$P(\beta_0, \beta_1 | \text{дані}) \propto P(\beta_0, \beta_1) \times P(\text{дані} | \beta_0, \beta_1), \quad (1)$$

де $P(\beta_0, \beta_1 | \text{дані})$ – умовна ймовірність параметрів моделі β_0 та β_1 при заданих даних; β_0 – параметр регресії (точка перетину); β_1 – параметр регресії (коефіцієнт нахилу); $P(\beta_0, \beta_1)$ –

апостеріорна ймовірність параметрів моделі β_0 та β_1 , тобто ймовірність їхніх значень до отримання даних; $P(\text{дані} / \beta_0, \beta_1)$ – ймовірність отримання даних при заданих значеннях параметрів β_0 та β_1 , тобто ймовірність даних при певній моделі.

Параметри регресії β_0 та β_1 визначаються при використанні формули простої лінійної регресії

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon, \quad (2)$$

де y – залежна змінна; β_0 – параметр регресії (точка перетину); β_1 – параметр регресії (коефіцієнт нахилу); x – незалежна змінна; ε – випадкова похибка, яка враховує неможливість ідеального прогнозування.

Аналіз проводиться з використанням нормального закону для апостеріорного та апостеріорного розподілу. Тоді модель (1) набуває вигляду:

$$P(\beta_0, \beta_1 | \text{дані}) = \exp \left(\left(-\frac{1}{2} \right) \left[\frac{(\beta_0 - \mu_{\beta_0})^2}{\sigma_{\beta_0}^2} + \frac{(\beta_1 - \mu_{\beta_1})^2}{\sigma_{\beta_1}^2} \right] \right) \times \prod_{i=1}^N P(y_i / \beta_0, \beta_1, x_i), \quad (3)$$

де $P(\beta_0, \beta_1 | \text{дані})$ – апостеріорна ймовірність параметрів моделі β_0 та β_1 при заданих даних; β_0 – параметр регресії (точка перетину); β_1 – параметр регресії (коефіцієнт нахилу); μ_{β_0} , μ_{β_1} , $\sigma_{\beta_0}^2$, $\sigma_{\beta_1}^2$ – параметри апостеріорного розподілу для β_0 та β_1 ; N – кількість точок (вимірювань) даних; $P(y_i / \beta_0, \beta_1, x_i)$ – функція правдоподібності для даних; y_i – спостереження; x_i – вхідні дані; $\prod_{i=1}^N P(y_i / \beta_0, \beta_1, x_i)$ – добуток ймовірностей спостережень y_i при відомих параметрах β_0 і β_1 та відповідних значеннях x_i .

Для тренування моделі використовуються зібрані дані про виступи спортсменів. Натренована модель застосовується для прогнозування результатів майбутнього виступу спортсменів на змаганнях.

Головна проблема використання методу байєсівської лінійної регресії для вирішення задачі прогнозування результатів виступів полягає у тому, що цей метод базується на використанні історичної інформації про результати тих змагань, які вже завершилися. Ця історична інформація у спорті найчастіше має вигляд даних щодо рейтингу окремих команд та спортсменів за результатами виступів у різних змаганнях. Визначення аналогічних за структурою та змістом даних для майбутніх змагань є достатньо складною задачею, а в багатьох випадках – такою, що не може бути вирішеною.

Розглянута вище модель байєсівської лінійної регресії не враховує особливості вирішення задачі прогнозування результатів виступів спортсменів та команд. Тому необхідно адаптувати її до цих особливостей.

5. Вирішення задачі підвищення точності прогнозування результатів виступів спортсменів та команд у спортивних змаганнях.

5.1. Адаптація моделі байссівської лінійної регресії до особливостей вирішення задачі прогнозування результатів виступів спортсменів та команд

Головною особливістю регресійних методів є можливість їх застосування для обробки виключно числових даних. Тому треба спочатку визначити можливість створення за результатами спортивних змагань масивів даних, які давали б змогу враховувати як загальні результати змагання, так і участь у цих змаганнях окремих спортсменів/команд.

Як основу для створення подібних масивів даних пропонується використовувати системи рейтингів спортсменів/команд та змагань. Формування подібних рейтингів змагань та подальше прогнозування результатів змагань для визначення пріоритетності виду спорту є важливою задачею для Міністерства молоді та спорту України.

Оскільки існує багато факторів, які впливають на прогнозування та формування рейтингів у подальшому, при формуванні рейтингів робляться такі припущення:

- спортсмен, який бере участь у змаганнях, може обирати лише обмежену кількість варіантів участі у цих змаганнях;
- спортсмен може завоювати лише одну медаль в одному варіанті змагання;
- спортсмен для участі у змаганнях повинен бути зареєстрованим офіційно у спортивному клубі, за який він буде брати участь у змаганнях;
- підрахування очок для спортивних клубів визначається за загальною кількістю очок спортсменів цього клубу;
- підрахування кількості очок, завойованих спортсменом, визначається до 16 місця;
- результати щодо змагань повинні бути підкріплені документами, які надаються на вимоги офіційних органів.

На основі рейтингів можливо визначити загальну кількість РО спортсменів/команд як сукупну кількість РО, які спортсмен/команда набрали за свої виступи у різних змаганнях. При цьому кожне змагання може мати свою систему нарахування очок.

Множину R_A усіх можливих результатів конкретного змагання для формування рейтингу спортсменів/команд можна визначити як декартів добуток за формулою:

$$R_A = A \times D \times R \times P, \quad (4)$$

де $A = \{a_1, a_2, \dots, a_s, \dots, a_m\}$ – множина спортсменів/команд, які беруть участь у змаганнях;
 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_k, \dots, d_h\}$ – множина варіантів участі у змаганнях (наприклад, множина дистанцій), за якими отримано спортивний результат; $R = \left\{ r_{1,1}, r_{1,2}, \dots, r_{j,d_k}, \dots, r_{u,d_h} \right\}$ – множина номерів місць, які посідають спортсмени/команди у конкретних варіантах змагання;
 $P = \left\{ p_{r_{1,1}}, p_{r_{1,2}}, \dots, p_{r_{j,d_k}}, \dots, p_{r_{u,d_h}} \right\}$ – множина кількості РО, нарахованих за місце, яке посіли спортсмени/команди на змаганнях.

При формуванні рейтингу конкретних спортсменів/команд на конкретному змаганні, результати їхніх виступів можуть бути представлені у вигляді:

$$R_{a_s} = \left\{ \left(a_s, d_k, r_{j,d_k}, p_{r_{j,d_k}} \right) / a_s \in A; d_k \in D; r_{j,d_k} \in R; p_{r_{j,d_k}} \in P \right\}, \quad (5)$$

де $R_{a_s} \subset R_A$ – підмножина результатів участі конкретного спортсмена/команди у конкретному змаганні; a_s – ліцензійний номер спортсмена/команди; d_k – варіант участі у змаганні, за яким отримано результат; r_{j,d_k} – номер місця, яке посів спортсмен/команда a_s на конкретному змаганні в конкретному варіанті змагання; $p_{r_{j,d_k}}$ – кількість РО, нарахованих за місце, яке посів спортсмен/команда a_s в конкретному варіанті змагання.

Тоді загальна кількість РО $P_{total_a_s}$, яку отримав спортсмен/команда на усіх змаганнях, розраховується для подальшого формування рейтингу спортсменів/команд за формулою:

$$P_{total_a_s} = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{l=1}^q \left(p_{r_{j,d_k}} \right)_l \right)_i, \quad (6)$$

де n – кількість змагань, проведених за визначений період; q – кількість варіантів участі конкретного спортсмена/команди у конкретному змаганні; r_{j,d_k} – номер місця, яке посів спортсмен/команда a_s на конкретному змаганні в конкретному варіанті змагання; $\left(p_{r_{j,d_k}} \right)_l$ – кількість РО, нарахованих спортсмену/команді a_s за місце з номером r_{j,d_k} в l -му варіанті змагання.

Для визначення стабільності спортсмена/команди a_s у n змаганнях пропонується розрахувати середню кількість РО, які отримав спортсмен/команда за формулою:

$$P_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{q} \sum_{l=1}^q \left(p_{r_{j,d_k}} \right)_l \right)_i. \quad (7)$$

Для оцінки послідовності результатів спортсмена/команди у n змаганнях пропонується використовувати обчислення стабільності як одного з суттєвих показників підвищення рейтингу спортсменів, яке базується на стандартному відхиленні. У контексті спортивних результатів стандартне відхилення дозволяє оцінити, наскільки результати спортсмена/команди відрізняються від змагання до змагання. Низьке стандартне відхилення вказує на те, що результати спортсмена/команди порівняно стабільні та передбачувані, тобто він показує приблизно однакові результати протягом усіх змагань. Високе стандартне відхилення, навпаки, свідчить про великий розкид результатів, що може вказувати на нестабільність форми, різницю рівня складності змагань або інші фактори, що впливають на продуктивність спортсмена/команди.

Обчислення стандартного відхилення σ_{a_s} результатів спортсмена/команди проводиться

за формулою:

$$\sigma_{a_s} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\left(\sum_{l=1}^q (r_{j,d_k})_l \right)_i - \mu \right)^2}, \quad (8)$$

де μ – середнє значення результатів, які отримав спортсмен/команда a_s на змаганнях, що обчислюється за формулою:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\sum_{l=1}^q (r_{j,d_k})_l \right)_i. \quad (9)$$

5.2. Розробка вдосконаленого методу прогнозування результатів виступів

Для подолання визначеної вище проблеми використання методу байєсівської лінійної регресії для вирішення задачі прогнозування результатів виступів необхідно брати до уваги не тільки історичну інформацію про участь команд або спортсменів у спортивних змаганнях, а й інформацію щодо особливостей того змагання, для якого розраховується прогноз. Тому для вирішення цієї задачі розроблено вдосконалений метод байєсівського прогнозування. Суть вдосконаленого методу полягає в об'єднанні попередніх знань про спортсмена/команду з новими даними, щоб отримати оновлену та точнішу оцінку їхніх можливостей. З цією метою введемо поняття байєсівської ймовірності успіху як оцінки ймовірності настання події (успіху спортсмена), що заснована на принципах байєсівської статистики. Початкова ймовірність (апріорна ймовірність) є початковою оцінкою ймовірності успіху спортсмена до врахування нових даних. Ця оцінка може базуватися на попередніх результатах спортсмена, рейтингу чи інших відомих факторах. Оновлення ймовірності (байєсівське оновлення) використовується, коли з'являються нові дані (результати нових змагань). Це оновлення засноване на правилі Байєса, що дозволяє перерахувати ймовірність, враховуючи нову інформацію. Правило Байєса має вигляд:

$$P(A/B) = \frac{P(B/A) * P(A)}{P(B)}, \quad (10)$$

де $P(A/B)$ – оновлення ймовірності події A після отримання даних B ; $P(B/A)$ – ймовірність отримання даних B за умови події A ; $P(A)$ – початкова ймовірність події A ; $P(B)$ – початкова ймовірність даних B .

Якщо спортсмен виграє (посідає призове місце), ймовірність його успіху у майбутньому підвищується. Цю ймовірність запропоновано розраховувати за формулою:

$$P(H/E) = \frac{P(E/H) * P(H)}{P(E/H) * P(H) + P(E/-H) * P(-H)}, \quad (11)$$

де $P(H/E)$ – оновлена (апостеріорна) ймовірність гіпотези H (прогнозований успіх

спортсмена/команди на майбутньому змаганні) після врахування події E (успіх); $P(E/H)$ – ймовірність події E (успіх), якщо гіпотеза H вірна; $P(H)$ – апіорна ймовірність того, що гіпотеза H вірна (ймовірність успіху до врахування події); $P(E/\neg H)$ – ймовірність події E (успіх), якщо гіпотеза H невірна; $P(\neg H)$ – апіорна ймовірність того, що гіпотеза H невірна (ймовірність неуспіху до врахування події).

Якщо спортсмен не досягає успіху, ймовірність його успіху в майбутньому знижується. Цю ймовірність запропоновано розраховувати за формулою:

$$P(H/E) = \frac{P(\neg E/H) * P(H)}{P(\neg E/H) * P(H) + P(\neg E/\neg H) * P(\neg H)}, \quad (12)$$

де $P(\neg E/H)$ – ймовірність події $(\neg E)$ (неуспіх), якщо гіпотеза H вірна; $P(\neg E/\neg H)$ – ймовірність події $(\neg E)$ (неуспіх), якщо гіпотеза H невірна.

Тоді вдосконалений метод байєсівського прогнозування пропонується представити як послідовність таких етапів і кроків.

Етап 1. Попередня обробка даних щодо виступів спортсмена/команди на змаганнях.

Крок 1. Формування вибірки історичних даних про участь спортсменів/команд у попередніх змаганнях.

Крок 2. Визначення різновиду змагань, для яких потрібно вирішити задачу прогнозування.

Крок 3. Перевірка можливості участі спортсмена/команди в змаганнях, для яких потрібно вирішити задачу прогнозування.

Етап 2. Оновлення оцінок ймовірності успіху спортсмена/команди на змаганні з використанням нових даних про зміни в спортивному середовищі.

Крок 1. Розрахунок загальної кількості РО за змагання за формулами (4) та (5).

Крок 2. Розрахунок середньої кількості РО за змагання за формулою (6).

Крок 3. Розрахунок початкової ймовірності успіху за формулами (10)-(12).

Крок 4. Визначення ймовірності успіху спортсмена/команди з врахуванням успіху (розрахунок за формулою (11)) або неуспіху (розрахунок за формулою (12)) у попередньому змаганні.

Крок 5. Якщо відомі нові або додаткові дані щодо змагання, за якими потрібно вирішити задачу прогнозування, – розрахунок байєсівського оновлення даних за формулою (10).

Етап 3. Розрахунок кінцевої оцінки ймовірності успіху виступу спортсмена/команди на змаганні.

Крок 1. Тренування і розрахунок байєсівської лінійної регресії за формулами (1)-(3).

Крок 2. Розрахунок стабільності спортсмена за формулою (8) і отримання ймовірностей успіху (високих, середніх чи низьких).

Крок 3. Формування та публікація таблиці з результатами прогнозування. Завершення використання методу.

5.3. Експериментальна перевірка розробленого вдосконаленого методу.

Для експериментальної перевірки розробленого вдосконаленого методу було запропоновано вирішити задачу прогнозування результатів виступів спортсменів у змаганнях на Кубок світу для Федерації підводного спорту та підводної діяльності України з метою підвищення ефективності

та визначення пріоритетності спортсменів у наступних змаганнях подібного типу.

Опис початкових даних для вирішення задачі прогнозування результатів виступів спортсменів на Кубок світу наведено у табл. 4.

Таблиця 4

Початкові дані для вирішення задачі прогнозування результатів виступів

Спортсмен	Стать	РН	ЧС – місяця	КС 1 – місяця	КС 2 – місяця	Тренер
Уварова Вікторія	Ж	2001	50 sf – 1 100 sf – 1 50 ap – 2 4x100 – 1	50 sf – 1 100 sf – 1 50 ap – 1 4x100 – 1	50 sf – 1 100 sf – 1 50 ap – 1 4x100 – 1	Шляховська А.А.
Шляховська Ольга	Ж	1989	200 im – 3 400 sf – 2 1500 sf – 3 400 im – 1	200 im – 2 400 sf – 2 1500 sf – 1 400 im – 3	200 im – 4 400 sf – 5 1500 sf – 2 400 im – 1	Шляховська А.А.
Березна Вірсавія	Ж	2002	200 sf – 4 400 sf – 3 4x100 – 1 800 sf – 5	50 bf – 2 100 bf – 5 4x100 – 1 200 bf – 3	50 bf – 1 100 bf – 5 4x100 – 2 200 bf – 4	Альошков О.В.
Гречко Софія	Ж	2005	--	200 sf – 1 400 sf – 2 4x100 – 1 800 sf – 3	200 sf – 1 400 sf – 1 4x100 – 2 800 sf – 4	Яковлев Є.О.
Макаренко Анастасія	Ж	2006	50 ap – 4 100 sf – 3 200 sf – 1 4x100 – 5	50 ap – 1 100 sf – 2 200 sf – 2 4x100 – 3	50 ap – 1 100 sf – 5 200 sf – 2 4x100 – 4	Годована М.О.
Антоняк Анастасія	Ж	1996	800 sf – 5 1500 sf – 6 400 im – 3 100 im – 5	800 sf – 4 1500 sf – 3 400 im – 2 100 im – 1	800 sf – 6 1500 sf – 2 400 im – 2 100 im – 7	Альошков О.В.
Ячник Валерія	Ж	2007		100 imj – 9 200 imj – 5 50 sfj – 5 50 apj – 2	100 imj – 7 200 imj – 3 50 sfj – 7 50 apj – 2	Шляховська А.А.
Резник Валентина	Ж	2001	100 im – 10 200 im – 9 50 bf – 11	100 imj – 1 200 imj – 6 50 bfj – 4 100 bfj – 2	100 imj – 2 200 imj – 4 50 bfj – 4 100 bfj – 2	Золотов О.Ю
Вакарева Єлизавета	Ж	2001	100 bf – 3 200 bf – 5 400 bf – 2 4x100 – 8	100 bf – 3 200 bf – 4 400 bf – 2 4x100 – 8	100 bf – 5 200 bf – 1 400 bf – 8 4x100 – 2	Красногор Т.С.
Краснокутська Вікторія	Ж	2005	200 imj – 13 400 imj – 8 200 bfj – 12 4x100 – 3	200 imj – 5 400 imj – 2 200 bfj – 4 4x100 – 2	200 imj – 8 400 imj – 2 200 bfj – 4 4x100 – 2	Краснокутський В.О.

Кінець таблиці 4

Спортсмен	Стать	РН	ЧС – місця	КС 1 – місця	КС 2 – місця	Тренер
Воробйова Вероніка	Ж	2008	200 sfj – 4 400 sfj – 3 800 sfj – 3 400 bfj – 9	200 sfj – 2 400 sfj – 1 800 sfj – 5 400 bfj – 2	200 sfj – 6 400 sfj – 2 800 sfj – 3 400 bfj – 3	Шляховська А.А.
Сміщенко Сергій	М	2000	50 sf – 12 100 sf – 4 100 im – 9 200 im – 15 50 ap – 4	50 sf – 3 100 sf – 3 50 ap – 1 100 im – 8	50 sf – 12 100 sf – 1 50 ap – 3 100 im – 7	Годована М.О.
Захаров Олексій	М	2001	200 sf – 1 400 sf – 1 800 sf – 6 1500 sf – 2	200 sf – 1 400 sf – 2 800 sf – 4 1500 sf – 7	200 sf – 1 400 sf – 1 800 sf – 1 1500 sf – 1	Шляховська А.А.

У табл. 4 прийняті такі скорочення: РН – рік народження; ЧС – Чемпіонат світу; КС – Кубок світу. У табл. 4 також наведені варіанти участі у змаганнях (скорочені позначення дисциплін – sf, ap, im, bf тощо – та дистанції – 50, 100 тощо).

Оцінки результатів спортсменів при успіху у змаганнях розраховуються за таблицею єдиного рейтингу спортсменів згідно з наказом № 530 Міністерства молоді та спорту України [20]. В цій таблиці відображений також поділ на вікові категорії спортсменів (дорослі, молодь та юнаки).

Згідно з таблицею єдиного рейтингу спортсменів, Олімпійські ігри та Всесвітні ігри приносять найбільшу кількість РО за завойовані місця і є найпріоритетнішими для майбутньої участі спортсменів.

Максимальна кількість РО, яку можна отримати за змагання на Кубок світу, – 8000. Це визначено тим, що спортсмен має змогу брати участь тільки у трьох індивідуальних дистанціях та одній естафетній дистанції.

Результати використання розробленого вдосконаленого методу наведено на рис. 1 і у табл. 5 (у табл. 5 РМ – рейтингове місце).

6. Обговорення результатів дослідження

Розроблений вдосконалений метод, на відміну від існуючих в Україні практик вирішення задачі прогнозування, дозволяє враховувати не тільки історичну інформацію про змагання, які відбулися раніше, а й інформацію про майбутні різновиди змагання. Це дозволяє підвищити точність оцінювання за рахунок об'єднання попередніх знань про спортсмена/команду зі знаннями, здобутими з аналізу даних про нове змагання. Використання розробленого вдосконаленого методу дає змогу керівництву спортивних федерацій та клубів України приймати обгрунтованіші рішення щодо участі окремих команд та спортсменів у найперспективніших змаганнях, результати виступів у яких можуть укріпити позиції українського спорту та поліпшити спортивний імідж України в світі.

Головним обмеженням запропонованого методу є використання для прогнозування рейтингових показників, які необхідно формувати за заздалегідь встановленими правилами. Слід зазначити, що різні спортивні федерації можуть використовувати різні рейтингові системи, особливості яких можуть вплинути на розроблений метод як позитивно, так і негативно.

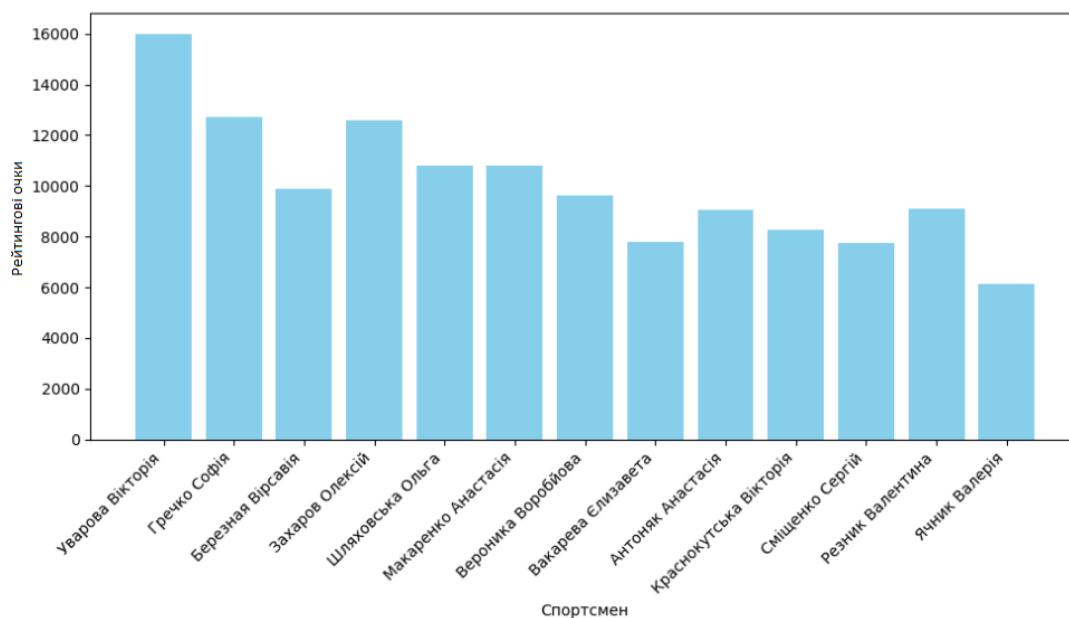


Рис. 1. Діаграма результатів прогнозування результатів виступу спортсменів на наступних змаганнях

Головним недоліком розробленого методу слід вважати відсутність можливості врахування під час вирішення задачі прогнозування даних щодо фізичного стану спортсмена або спортсменів команди. Ці дані та динамка їх зміни з часом можуть серйозно вплинути на результати вирішення задачі прогнозування результатів виступів спортсменів та команд у спортивних змаганнях.

Виходячи з визначених обмежень та недоліків, пропонується розглядати такі напрями подальших досліджень із вдосконалення розробленого методу:

- дослідження впливу параметрів фізичного стану спортсмена на ймовірність успіху у змаганні, для якого розраховується прогноз;
- дослідження впливу різних систем рейтингування спортсменів/команд на результати вирішення задачі прогнозування результатів виступів спортсменів та команд у спортивних змаганнях;
- дослідження можливості перетворення ймовірнісних оцінок на оцінки шансів спортсменів/команд на успіх, що дозволило б розширити предметну галузь застосування розробленого методу (наприклад, для використання у діяльності букмекерських контор з метою подальшої популяризації окремих видів спорту).

7. Висновки

В результаті даного дослідження було запропоновано адаптувати модель байесівської лінійної регресії до особливостей вирішення задачі прогнозування результатів виступів спортсменів та команд у спортивних змаганнях. Цю адаптацію виконано шляхом розробки кількісних оцінок результатів та характеристик участі спортсмена/команди (4)-(9) у змаганнях на основі рейтингу.

Таблиця 5

Результати експериментальної перевірки розробленого методу

РМ	Спортсмен	Загальна кількість РО	Кубок світу 1	Кубок світу 2	Загальна кількість РО за Кубки світу	Середня кількість РО за Кубки світу	Стабільність спортсмена	Байєсівська ймовірність успіху	Прогноз	Опис прогнозу (шанси на успіх)
1	Уварова Вікторія	39000	8000	8000	16000	2000.0	0.0	1.0	16000	Високі
2	Гречко Софія	35700	6500	6200	12700	1585.5	1.05	0.76	<12000	Високі
3	Березна Вірсавія	30900	5100	4800	9900	1237.5	1.54	0.09	<9000	Середні
4	Захаров Олексій	30575	4575	8000	12575	1571.88	2.05	0.76	>13000	Високі
5	Шляховська Ольга	27300	6000	4800	10800	1350.0	1.32	0.03	<10000	Високі
6	Макаренко Анастасія	23550	6000	4800	10800	1350.0	1.32	0.03	<9000	Середні
7	Воробйова Вероніка	19500	5600	4000	9600	1200.0	1.58	0.0	<9000	Середні
8	Вакарева Єлизавета	18550	3450	4350	7800	975.0	2.52	0.0	>8000	Середні
10	Краснокутська Вікторія	13200	4300	3950	8250	1031.25	2.0	0.0	<8000	Середні
11	Сміщенко Сергій	11500	4250	3500	7750	968.75	3.63	0.0	<7000	Низькі
12	Резник Валентина	10150	4700	4400	9100	1137.5	1.54	0.0	<9000	Середні
13	Ячник Валерія	6150	2900	3250	6150	768.0	2.4	0.0	>7000	Низькі

Результати цієї адаптації було покладено в основу розробки вдосконаленого методу прогнозування результатів виступів спортсменів та команд у спортивних змаганнях. Цей метод, на відміну від існуючих, дозволяє оновлювати оцінки ймовірності (байєсівське оновлення) успіху у майбутньому змаганні з врахуванням успіху (11) або неуспіху (12) спортсмена/команди у попередньому змаганні такого ж різновиду.

Для здійснення експериментальної перевірки розробленого вдосконаленого методу було запропоновано застосувати його для прогнозування ймовірності успіху українських спортсменів з Федерації підводного спорту та підводної діяльності України у змаганнях на Кубок світу. Результати прогнозування дозволяють визначити найперспективніший склад української збірної для участі у змаганнях Кубка світу з підводного плавання.

Перелік посилань:

1. Неолімпійський спорт: навч. посіб. / С. В. Імас та ін. Київ: НУФВСУ, Олімп. л-ра, 2015. 184 с.
2. Павленко В. О., Насонкіна Е.Ю., Павленко Є. Є. Сучасні технології підготовки в обраному виді спорту: підручник. Харків, 2020. 550 с.
3. Прогнозування в спорті. URL: [https://repository.ldufk.edu.ua/bitstream/34606048/3733/1/Прогнозування в спорті.pdf](https://repository.ldufk.edu.ua/bitstream/34606048/3733/1/Прогнозування%20в%20спорті.pdf) (дата звернення: 21.11.2023).
4. Запорожанов В. А., Платонов В. Н. Прогнозування та моделювання у спорті. *Теорія спорту* / под. ред. В. Н. Платонова. Київ: Вища школа, 1987. Ч. 3. С. 350-371.
5. Теорія і методика підготовки спортсменів: управління, контроль, відбір, моделювання та прогнозування в олімпійському спорті: навч. посіб. / О. А. Шинкарук. К., 2013. 136 с.
6. Костюкевич В. М. Теорія і методика спортивної підготовки (на прикладі командних ігрових видів спорту): навч. посіб. Вінниця: Планер, 2014. 616 с.
7. Rao С., Govindaraju V. Handbook of Statistics: Machine Learning: Theory and Applications. 2013. 552 с.
8. Особливості прогнозування результативності спортсменів як фактора підвищення ефективності навчально-тренувального процесу. URL: <http://eprints.zu.edu.ua/6740/1/Яворська1110uatp.pdf> (дата звернення: 24.11.2023).
9. Байєсівський аналіз даних: монографія / П. І. Бідюк, І. О. Калініна, О. П. Гожий. Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2021. 208 с.
10. Методи оптимізації та комп'ютерні технології: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / В.І. Захарчук. Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2017. 144 с.
11. Aumann R.J. Lectures on Game Theory. San Francisco: Westview Press, 1989. 120 с.
12. Експертні методи прогнозування URL: [https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload_Електронний посібник ФІНАНСОВЕ ПРОГНОЗУВАННЯ/page11.html](https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload_Електронний%20посібник%20ФІНАНСОВЕ%20ПРОГНОЗУВАННЯ/page11.html) (дата звернення: 01.12.2023).
13. Коршевнюк Л.О., Терентьев О.М., Бідюк П.І. Методика побудови математичних моделей динамічних процесів. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/19603/1/Terentiev_CAIT_2013.pdf (дата звернення: 01.12.2023).
14. Келлер В. С. Теоретико-методичні основи підготовки спортсменів / Келлер В. С., Платонов В. М. Львів: Українська Спортивна Асоціація, 1992. 269 с.
15. Інноваційні та інформаційні технології у фізичній культурі, спорті, фізичній терапії та ерготерапії: *Матеріали I Всеукраїнської електронної науково-практичної конференції з міжнародною участю (Київ, 19 квітня 2018 р.)* / під заг. ред. О.А. Шинкарук. К.: НУФВСУ, 2018. 131 с.
16. Платонов В. М. Фізична підготовка спортсмена / Платонов В. М., Булатова М. М. К.: Олімпійська література, 1995. 320 с.
17. Катренко А. В., Пасічник В. В. Прийняття рішень: теорія та практика : підручник. Львів : Новий Світ – 2000, 2020. 447 с.
18. Костюкевич В.М. Теорія і методика тренування спортсменів високої кваліфікації: Навчальний посібник. Вінниця: «Планер», 2007. 273 с.
19. Основні поняття теорії ймовірностей. *LibreTexts - Ukrayinska*. URL: [https://ukrayinska.libretexts.org/фізики/Термодинаміка_та_статистична_механіка/Книга%3A_Термодинаміка_та_статистична_механіка_\(Arovas\)/01%3A_Основи_ймовірності/1.02%3A_Основні_поняття_теорії_ймовірностей](https://ukrayinska.libretexts.org/фізики/Термодинаміка_та_статистична_механіка/Книга%3A_Термодинаміка_та_статистична_механіка_(Arovas)/01%3A_Основи_ймовірності/1.02%3A_Основні_поняття_теорії_ймовірностей) (дата звернення: 10.12.2023).
20. Про затвердження Положення про рейтинг з олімпійських та неолімпійських видів спорту в Україні: наказ Міністерства молоді та спорту України від 09.07.2020 № 530. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0785->

Євланов Максим Вікторович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри ІУС ХНУРЕ, м. Харків, Україна, e-mail: maksym.ievlanov@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6703-5166>.

Васильцова Наталія Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри ІУС ХНУРЕ, м. Харків, Україна, e-mail: nataliia.vasytsova@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4043-487X> (науковий керівник здобувачки вищої освіти Уварової Вікторії Олександрівни).

Уварова Вікторія Олександрівна, здобувач вищої освіти, група ІУСТМ-22-1, факультет комп'ютерних наук, ХНУРЕ, м. Харків, Україна, e-mail: viktoriia.uvarova@nure.ua.

УДК 681.513.1

DOI: 10.30837/0135-1710.2024.180.088

С.Г. УДОВЕНКО, В.А. ЗАТХЕЙ, О.В. ТЕСЛЕНКО

МОДУЛЬНА СИСТЕМА ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ БАГАТОЗВ'ЯЗНИМИ ПРОЦЕСАМИ ЗА НАЯВНОСТІ СТРУКТУРНИХ ЗБУРЕНЬ

Розглянуто завдання побудови модульної структури системи децентралізованого керування багатозв'язними процесами за наявності структурних збурень (MULTICON). Запропоновано алгоритм декомпозиції багатозв'язної системи на відносно ізольовані підсистеми. Досліджено питання підвищення робастності систем децентралізованого керування до структурних збурень, пов'язаних з послабленням взаємодії окремих підсистем. Вирішення задачі керування запропоновано здійснювати за допомогою аналізу впливу цих взаємодій на загальний оптимум. Розглянуто функції та особливості реалізації модулів, що входять до складу запропонованої системи керування. Проведено експериментальну перевірку отриманих результатів.

1. Вступ

До найважливіших проблем, що виникають при побудові систем керування багатозв'язними процесами, відноситься проблема вибору їхньої структури.

У разі локального керування багатозв'язним процесом, опис якого не вимагає багатостадійного представлення його окремих етапів, природним є застосування централізованого багатовимірного регулятора [1]. Очевидно, що складність регулятора такого типу багато в чому залежить від характеру та розмірності перехресних зв'язків моделі об'єкта. При цьому може бути суттєво ускладнена можливість реалізації розглянутої схеми управління, що послідовно реалізує процедури фільтрації даних, прогнозування виходу, оцінювання параметрів та визначення керуючих впливів. Тісний взаємозв'язок цих процедур погіршує умови роботи системи керування і призводить до таких небажаних наслідків, як неідентифікованість та низька швидкість збіжності процесу параметричної ідентифікації. Крім того, через такий взаємозв'язок загальний час обробки інформації на кожному такті роботи регулятора визначається сумарною тривалістю виконання всіх процедур, що обмежує можливість ефективного управління швидкоплинними процесами. Ці обставини стимулювали застосування в багатовимірних системах методів, мета яких полягає в декомпозиції загального завдання на локальні підзавдання ідентифікації та керування з паралельною їх координацією [2, 3]. Децентралізація завдань може бути здійснена з використанням модульної структури

системи керування.

Такий підхід до синтезу систем керування має низку певних переваг, серед яких можна виділити:

- спрощення схеми проектування, викликане тим, що кожен модуль виконує одну функцію загального завдання (при цьому кожен модуль може містити набір алгоритмів, що реалізують різні процедури, пов'язані зі застосуванням тих чи інших критеріїв та обмежень, що забезпечує системі розширення функціональних можливостей);

- можливість паралельного вирішення завдань ідентифікації та управління, що сприяє підвищенню швидкодії системи;

- підвищення надійності функціонування системи, обумовлене наявністю координатора, здатного послабити негативні наслідки збою окремих блоків;

- можливість роздільного використання мікропроцесорних модулів, що реалізують окремі функції системи та скоординовані між собою (при цьому можуть бути суттєво знижені вимоги до основних характеристик обчислювальних засобів, що обираються для реалізації завдань системи).

Практично безальтернативним є застосування принципу децентралізації при управлінні багатостадійними технологічними процесами. Про це свідчать результати його застосування в системах різного функціонального призначення (енергетичних, газотранспортних, хіміко-технологічних тощо) [4]. У найпростішому варіанті багатовимірний регулятор децентралізованого управління реалізується послідовністю регуляторів, призначених для вирішення локальних задач мінімізації складових деякого квадратичного критерію.

Перспективним розвитком децентралізованого керування багатозв'язними процесами є дослідження, пов'язані з розглядом можливості його застосування для реальних ситуацій часткового порушення взаємозв'язків між підсистемами в багатовимірних стохастичних системах. Втім слід зазначити, що подібні дослідження на сьогодні є недостатньо розвинутими.

2. Аналіз літературних даних і постановка задач дослідження

В багатьох дослідженнях, присвячених побудові систем децентралізованого керування, використовується багаторівневий координаційний підхід [5, 6]. Структура таких систем передбачає збереження стандартних функцій багатовимірних регуляторів, але при цьому змінюється характер взаємодії між їхніми окремими блоками. Перехід до локалізованих завдань для таких блоків потребує, зазвичай, роздільної формалізації критеріїв управління та ідентифікації, що призводить до необхідності розгляду задачі багатоцільової мінімізації. Вирішення такої задачі має забезпечуватися в реальному масштабі часу за допомогою додаткових блоків координації та визначення допоміжних параметрів, необхідних для оперативної підтримки вибраної схеми координованої оптимізації. Для реалізації багатовимірних регуляторів, заснованих на подібному (або близькому до нього) підході, у роботах [7, 8] пропонується параметричний метод, заснований на використанні зваженої адитивної цільової функції, що відображає компроміс між цілями ідентифікації та управління.

Мінімізація такої функції за змінними керуваннями та параметрами ідентифікації може бути зведена до пошуку ефективної точки множини Парето. Регулятор, що реалізує управління за відповідним компромісним критерієм, відноситься до класу псевдодуальних субоптимальних регуляторів [1]. Його властивості значною мірою залежать від значення вагового коефіцієнта, який надає певні пріоритети алгоритмам корекції параметрів моделі або

визначення керуючих дій. При цьому регулятор може інтенсифікувати процедури оцінювання параметрів та предикції виходу (обережний режим) чи функціонувати в режимі стохастично еквівалентного управління [9]. Таким чином, за допомогою вибору різних значень вагових коефіцієнтів компромісного критерію можна реалізувати різні стратегії управління. У відомих алгоритмах псевдодуального управління такі вагові коефіцієнти компромісної функції є постійними і вибираються експериментально, що зазвичай прийнятно для динамічних систем з дрейфом параметрів. Розробка оперативного алгоритму налаштування таких коефіцієнтів може підвищити ефективність використання багаторівневих псевдодуальних методів у системах управління багатозв'язними об'єктами, що самоналаштовуються.

Слід також згадати такі методи децентралізованого управління:

- модифікацію параметричного методу, засновану на розгляді обмежень на одну із складових цільової функції. Наприклад, в [10] запропонований регулятор, що формує управління при обмеженнях на певну частину змінних стану системи;

- двокроковий метод, при якому завдання ідентифікації та оптимізації вирішуються, як у звичайних системах, що самоналаштовуються, але при цьому мінімізується функціонал якості, що враховує замість значень параметрів об'єкта їхні оцінки [1];

- метод змішаної координації, заснований на введенні в керуючий вплив зондувального сигналу та одночасному згладжуванні оцінок [2].

Всі ці методи тією чи іншою мірою ґрунтуються на результатах теорії ієрархічних систем і містять елементи евристики, викликані необхідністю визначення (або апріорного вибору) цілого ряду допоміжних параметрів [11, 12, 13].

Аналіз розглянутих публікацій дозволяє зробити висновок щодо доцільності проведення досліджень, що дозволили б отримати послідовність побудови децентралізованих систем керування багатовимірними технологічними об'єктами за умов часткового порушення структурних взаємозв'язків.

3. Мета та задачі дослідження

Метою даної роботи є розробка модульної структури побудови децентралізованих систем керування багатовимірними технологічними об'єктами за умов часткового порушення структурних взаємозв'язків.

Для досягнення цієї мети вирішуються такі задачі:

- розробка структури та визначення функцій окремих модулів запропонованої децентралізованої системи;

- розробка методу декомпозиції завдань керування багатозв'язним процесом;

- аналіз впливу структурних взаємодій між підсистемами на робастність керованої багатозв'язної системи;

- розробка методу децентралізованого керування багатовимірними системами з явним завданням взаємодій між підсистемами;

- експериментальне моделювання запропонованого підходу.

4. Структура та функції модульної децентралізованої системи

Розглянемо завдання побудови модульної структури системи децентралізованого керування багатозв'язними процесами за наявності структурних збурень (MULTICON).

Така система може бути реалізована, якщо є можливість оперативного автоматичного виміру необхідних параметрів об'єкта управління (ОУ). У цьому випадку завданням системи MULTICON є синтез цифрового багатовимірного регулятора, який мінімізує очікуване

значення квадратичних втрат (Q), якщо система описана лінійною (L) гауссівською (G) дискретною моделлю. При цьому синтезований LGQ-регулятор повинен працювати не тільки з керуючими входами та керованими виходами, але й зі збуреннями (явними та неявними). Пропонований підхід до його розробки ґрунтується на попередній декомпозиції глобальної багатозв'язної системи на відносно ізольовані підсистеми з урахуванням структурних збурень, що пов'язані з можливим послабленням взаємодії окремих підсистем в поточному часі. Розрахунок керуючих дій має здійснюватися за результатами аналізу впливу цих взаємодій на загальний оптимум.

Для реалізації системи MULTICON доцільно розробити комплекс взаємопов'язаних програмно-алгоритмічних модулів: модуль вибору структури глобальної моделі ОУ (STR); модуль декомпозиції глобальної моделі ОУ на моделі підсистем (DEC); модуль оцінювання стану взаємозв'язків між локальними підсистемами (SLOC); модуль робастного керування децентралізованою системою (SCON).

5. Реалізація функцій STR та DEC модульної системи

В загальному випадку динамічна багатовимірна система може бути описана у дискретному часі рівнянням (глобальною моделлю) вигляду:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) = f(x, u, k), \quad (1)$$

де $x(k), u(k)$ – вектори змінних стану та керувань відповідно ($x(k) \in R^n$, $u(k) \in R^m$); A, B – матриці розмірності $(n \times n)$ та $(n \times m)$ відповідно; k – дискретний час.

Вибір структури глобальної матрично-векторної моделі багатозв'язного ОУ (1) здійснюється модулем STR з визначенням відповідних розмірностей та елементів матриць та векторів.

Якщо матриця B є діагональною, то система (1) може бути декомпозована на підсистеми S_i , $i = \overline{1, N}$, поєднані за допомогою функцій зв'язку $z_i(x', u', k)$, керування якими за заданим квадратичним критерієм можна задовільно здійснювати з використанням методів координації [10].

В цьому випадку кожна з підсистем описується рівнянням:

$$x_i(k+1) = f_i(x_i, u_i, k) + z_i(x', u', k); \quad i = \overline{1, N}, \quad (2)$$

де $x'(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k)]^T$; $u'(k) = [u_1(k), u_2(k), \dots, u_m(k)]^T$.

Векторна функція $z_i(x', u', k)$ є тут функцією взаємодій, що входять до i -ї підсистеми з j -х підсистем ($j = \overline{1, N}$; $i \neq j$). При цьому управління підсистемами здійснюється за допомогою стандартного алгоритму, що використовує зворотний зв'язок:

$$u_i(k) = g_i[x_i, k], \quad k \geq k_1, \quad i = \overline{1, N}, \quad (3)$$

де k_1 – початковий такт управління.

Однак при великій кількості взаємозв'язків між підсистемами ітераційний характер

методів координації призводить до значних обчислювальних складнощів і наявності похибок, що накопичуються. Крім того, рішення при розрахунку параметрів координації засновані на попередній оцінці траєкторій, яка ускладнюється тим, що координаційним змінним, які штучно формуються для рівнянь зв'язку, не можна дати фізичної інтерпретації. Для усунення цих недоліків запропонуємо метод вирішення задачі робастного управління багатозв'язними динамічними системами, що базується на аналізі впливу взаємодій на загальний оптимум.

Цей метод враховує взаємодії як реальні зв'язки між підсистемами, а модифікація локальних керувань базується на аналізі впливу цих взаємодій на загальний оптимум. Для реалізації запропонованих методів доцільно використовувати математичний апарат, який дозволив би перетворити матриці в рівнянні (1) таким чином, щоб кожна підсистема була керована лише через свої власні змінні. Процедура такого перетворення є основою розв'язання задачі децентралізації (декомпозиції) загальної системи (модуль DEC).

Представимо рівняння (1) у вигляді:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ \vdots \\ x_m(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n1} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_n(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & \cdots & B_{1m} \\ B_{21} & \cdots & B_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ B_{n1} & \cdots & B_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ \vdots \\ u_m(k) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Розглянемо стандартне завдання управління системою (4), що мінімізує лінійно-квадратичний функціонал:

$$J(u) = \min_u (k-k_1)^{-1} \left[x(k_2)^T D x(k_2) + \sum_{k=k_1}^{k_2} (x^T(k) Q x(k) + u^T(k) R u(k)) \right], \quad (5)$$

де D , Q , R – діагональні позитивно визначені матриці.

Для декомпозиції системи S на N підсистем S_i , $i = \overline{1, N}$ виділимо N завдань локальної оптимізації.

Нехай кожна з таких підсистем описується рівнянням:

$$x_i(k+1) = A_i x_i(k) + B_i u_i(k) + \sum_{j=1}^N A_{ij} x_j(k), \quad i = \overline{1, N}, \quad (6)$$

де $x_i(k) \in R^{n_i}$, $u_i(k) \in R^{m_i}$; A_i , B_i – матриці розмірності $(n_i \times n_i)$ та $(n_i \times m_i)$ відповідно; A_{ij}

– матриці взаємодій, що входять до i -ї підсистеми.

Введемо перетворення підсистем S_i такого вигляду:

$$x'_i(k) = L_i^{-1} x_i(k), \quad (7)$$

де $L_i = [B_1^i, \dots, A_i^{n_i-1} B_1^i, \dots, B_m^i, \dots, A_i^{n_i N} B_m^i]$; B_1^i, \dots, B_m^i – рядки матриці B_i .

Рівняння (6) при цьому перетворюється так:

$$x'_i(k+1) = A'_i x'_i(k) + B'_i u_i(k) + A'_{ij} x'_j(k), \quad (8)$$

де $A'_i = L_i^{-1} A_i L_i$; $A'_{ij} = L_i^{-1} A_{ij} L_j$; $B'_i = L_i^{-1} B_i L_i$.

Оскільки вектор $x'_i(k) = [x'_{i1}(k), \dots, x'_{in_i}(k)]^T$, надалі можна ввести перестановочну матрицю для перегрупування елементів $x'_i(k)$ таким способом, щоб кожен елемент i -ї підсистеми був пов'язаний з управлінням $u_i(k) \in R^{m_i}$.

Очевидно, що перестановочна матриця повинна мати блокову структуру:

$$P = (P_1^T, P_2^T, \dots, P_m^T)^T,$$

причому i -й блок задається так:

$$P_i = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & I_{1i} & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & I_{2i} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & I_{Ni} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix},$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{i-1} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{n+1} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{m-i}$

де I_{ji} – одинична матриця розмірності $(n_{ji} \times n_{ji})$.

Результуюче рішення у векторній формі набуде вигляду:

$$Px(k+1) = A'_p Px(k) + B'_p u(k),$$

$$\text{де } A' = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2N} \\ \vdots & & & \vdots \\ A_{N1} & A_{N2} & \dots & A_{NN} \end{bmatrix}; \quad B' = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_N \end{bmatrix}, \quad B'_p = PB', \quad A'_p = PA'.$$

При цьому кількість керувань відповідатиме числу підсистем, тобто:

$$n = \sum_{i=1}^m n_i; \quad u_i(k) \rightarrow S_i; \quad u_j(k) \rightarrow S_j.$$

Результуюча структура децентралізованої підсистеми відповідатиме рівнянню:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ \vdots \\ x_i(k+1) \\ \vdots \\ x_N(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1l} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{l1} & \cdots & A_{ll} \end{pmatrix} & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \begin{pmatrix} A_{i1} & \cdots & A_{ip} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{p1} & \cdots & A_{pp} \end{pmatrix} & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \begin{pmatrix} A_{j1} & \cdots & A_{jN} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{N1} & \cdots & A_{NN} \end{pmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ \vdots \\ x_i(k) \\ \vdots \\ x_N(k) \end{bmatrix} + \\
\begin{bmatrix} B_1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ 0 & \cdots & B_i & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & B_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(k) \\ \vdots \\ u_i(k) \\ \vdots \\ u_N(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \cdots & A_{1i} & \cdots & A_{1N} \\ \vdots & & & & \vdots \\ A_{i1} & \cdots & 0 & \cdots & A_{iN} \\ \vdots & & & & \vdots \\ A_{N1} & \cdots & A_{Ni} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ \vdots \\ x_i(k) \\ \vdots \\ x_l(k) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де $1 \leq l \leq n_i$.

Залежність (9) відповідає децентралізованій системі. Перевага запропонованого методу децентралізації полягає у відносно простій процедурі перетворення та перестановки елементів вихідних матриць. Усі операції тут здійснюються на рівні підсистем і лише перестановка здійснюється для всієї системи. Децентралізація є основою робастного керування підсистемами. Важливим етапом подальшого синтезу багатозв'язного регулятора є визначення незалежних змінних виділених підсистем.

6. Аналіз впливу взаємодій на робастність керованої багатозв'язної системи (модуль SLOC)

Розглянемо рівняння керованої багатозв'язної системи S , що містить N взаємозалежних підсистем S_i після здійснення децентралізації (тобто взаємодії пов'язані лише зі змінними станами $x(k)$):

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= f_i(x_i(k), u_i(k), k) + z_i[x_i(k), k], \quad i = \overline{1, N}, \\ x_i(k) &\in R^{n_i}; \quad R^n = R^{n_1} \times R^{n_2} \times \cdots \times R^{n_N}; \\ u_i(k) &\in R^{m_i}; \quad R^m = R^{m_1} \times R^{m_2} \times \cdots \times R^{m_N}; \quad k_1 \leq k \leq k_2, \end{aligned} \quad (10)$$

де $z_i[x_j(k), k]$ – змінні взаємодій між підсистемами; $u_i(k)$ – керуючі впливи підсистем.

Цільову функцію для всієї системи представимо у вигляді:

$$J(u) = \min_u \left\{ \Phi_i [x(k_2), k_2] + \sum_{k=k_1}^{k_2} F(x(k), u(k), k) \right\}, \quad (11)$$

де $J(u) = \sum_{i=1}^N J_i(u_i)$; $J_i(u_i) = \min_{u_i} \left\{ \Phi_i [x_i(k_2), k_2] + \sum_{k=k_1}^{k_2} F_i(x_i(k), u_i(k), k) \right\}$; k_1 та k_2 – відповідно початковий та кінцевий такти управління.

Припустимо, що оптимальне управління для i -ї підсистеми може бути представлене стандартним рівнянням зворотного зв'язку:

$$u_i(k) = g_i [x_i(k), k]. \quad (12)$$

Локальну функцію управління без урахування інтеракцій позначимо так:

$$u_i^S(k) = g_i^S [x_i(k), k], \quad (13)$$

тоді

$$J^S(u^S) = \sum_{i=1}^N J^S(u_i^S). \quad (14)$$

Оскільки функції управління $u_i^S(k)$ неспроможні гарантувати умов глобального оптимуму, локальні управління є лише субоптимальними.

Якщо позначити глобальну функцію як $J^g(u)$, то співвідношення значень глобального функціоналу і функціоналу (14) можна виразити нерівністю вигляду:

$$J^g(u) \leq (1 + \varepsilon) J^S(u^S), \quad (15)$$

де ε – індекс субоптимальності управління ($\varepsilon > 0$).

Очевидно, що індекс субоптимальності є мірою впливу на якість управління взаємодій, що враховуються між підсистемами.

Нехай кожна підсистема, виділена після децентралізації, описується рівнянням вигляду (10), а відповідні локальні функції управління – рівняннями вигляду (13). Вважатимемо, що рішення рівнянь (10) є субоптимальним при застосуванні управлінь (13), якщо існує таке значення $\varepsilon > 0$, для якого нерівність (15) виконується.

Субоптимальне рішення має враховувати обмеження норми змінних взаємодій $\|z_i(k, x(k))\|$. Нехай вирішення проблеми оптимізації виділених в результаті децентралізації систем S_i , $i = \overline{1, N}$ здійснюється за дворівневою схемою. На нижньому рівні проводиться локальна оптимізація підсистем, а завданням верхнього рівня є така корекція локальної

функції управління, яка з урахуванням взаємодій забезпечує робастність системи, причому індекс субоптимальності повинен відповідати таким умовам:

$$\varepsilon = g \left[J_i^0(u_i(k)) - J_i^S(u_i^S(k) + u_i^M(k)) \right] \rightarrow 0 \quad (16)$$

або

$$\varepsilon = g \left[J_i^0(u_i(k)) - J_i^S(u_i^S(k) + u_i^M(k)) \right] \rightarrow 0. \quad (17)$$

Умова (16) відповідає випадку, коли взаємодії інтерпретуються як невизначеності моделі; при цьому необхідно $u^M(k)$ визначати так, щоб $\varepsilon \rightarrow 0$.

Умова (17) відповідає випадку, коли взаємодії інтерпретуються як реальні зв'язки між виділеними підсистемами, а локальні управління $u_i^S(k)$ модифікуються за допомогою управлінь $u_i^M(k)$ так, щоб параметр ε сходився до нуля з урахуванням функції помилки $g(J_i^0 - J_i^S)$.

Нехай цільова функція для підсистем S_i , $i = \overline{1, N}$ без урахування взаємозв'язків має вигляд:

$$J_i^S(u_i^S) = \min_{u_i^S} \left\{ \Phi_i[x_i(k_2), k_2] + \sum_{k=k_1}^{k_2} F_i(x_i(k), u_i(k), k) \right\}. \quad (18)$$

Тоді очевидно є така залежність:

$$\nabla_k J_i^S + \nabla_{x_i} J_i^S f_i^S(x_i(k), u_i^S(k), k) + F_i^S(x_i(k), u_i^S(k), k) = 0. \quad (19)$$

Якщо підсистеми S_i , $i = \overline{1, N}$ є локально керованими стосовно своїх цільових функцій $J_i^S(u_i^S)$, то повинні виконуватися нерівності:

$$\nabla_{x_i} J_i^{ST} z_i^S[x_j(k), k] \leq \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} F_i^S(x_i(k), u_i^S(k), k), \quad i = \overline{1, N}. \quad (20)$$

Нехай існує така модифікована функція управління $u_i^M(k)$, яка відбиває вплив взаємодій між підсистемами на глобальний оптимум. Тоді після введення норми $\|z_i(x_j(k), k)\|$ нерівність (20) може бути перетворена до вигляду:

$$\|\nabla_{x_i} J_i^S\|^T \|z_i^M(u_i^M(k), k)\| \leq \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} F_i^S(x_i(k), u_i^S(k), k). \quad (21)$$

Остання нерівність відбиває залежність між індексом ε і взаємодіями $z_i[x_j(k), k]$.

У загальному випадку взаємодії $z_i[x_j(k), k]$ пов'язані з елементами фундаментальної матриці взаємозв'язків $E'(k) = [e_{ij}(k)]_{N \times N}$. Елементи цієї матриці обмежені залежністю $0 \leq e_{ij}(k) \leq 1$. При цьому взаємодії виражаються такою функцією:

$$z_i[x_j(k)] = z_i[e_{i1}(k)x_1(k), e_{i2}(k)x_2(k), \dots, e_{iN}(k)x_N(k), k], \quad i, j = \overline{1, N}. \quad (22)$$

Підсистема S_i є субоптимальною по відношенню до цільової функції $J_i^S(u_i^S)$ при $u_i^S(k) = g_i^S[x_i(k), k]$, якщо норма взаємодій обмежується нерівністю вигляду:

$$\|z_i[x_j(k), k]\| \leq \sum_{i=1}^N e_{ij}(k) \xi_{ij} \|x_j(k)\|, \quad (23)$$

де ξ_{ij} – функція обмеження норми змінних взаємодії, що визначається таким чином:

$$\xi = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N e_{ij} \xi_{ij} = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}. \quad (24)$$

Багатозв'язну систему виду (10) вважатимемо c -робастною (або connection-робастною) по відношенню до змінних взаємодії, якщо виконується умова (24). Очевидно, що c -робастність гарантує субоптимальність управління системою в сенсі (16) та її асимптотичну стійкість.

Визначимо умови c -робастності для багатозв'язних систем із квадратичною цільовою функцією. Нехай після проведення децентралізації вихідної багатозв'язної системи за правилами, визначеними вище, підсистеми описуються рівняннями вигляду (9), тобто:

$$x_i(k+1) = A_i x_i(k) + B_i u_i(k) + \sum_{j=1}^N A_{ij} x_j(k), \quad i = \overline{1, N}, \quad (25)$$

де A_i, A_{ij} – матриці розмірностей $(n_i \times n_i)$ та $((n - n_i) \times (n - n_i))$ відповідно; B_i – блочно-діагональна матриця.

Задамо квадратичний функціонал для кожної підсистеми:

$$J_i(u_i) = \min_{u_i} (k-k_1)^{-1} \sum_{k=k_1}^{k_2} (x_i^T(k) Q_i x_i(k) + u_i^T(k) R_i u_i(k)), \quad (25)$$

де Q_i, R_i – позитивно визначена та позитивно напіввизначена блочно-діагональні матриці відповідно.

Нехай існують локальні керування підсистемами, що відповідають стандартним рівнянням зворотного зв'язку:

$$u_i^S(k) = -K_i^S x_i(k), \quad i = \overline{1, N}, \quad (26)$$

де $K_i^S = R_i^{-1} B_i^T K_i x_i(k)$; K_i – рішення рівняння Ріккати для заданого значення k .

Відомо, що рівняння Ріккати мають вигляд:

$$K_i(k+1) = -A_i^T K_i - K_i A_i + K_i B_i R_i^{-1} B_i^T K_i - Q_i, \quad \text{для } k \rightarrow \infty;$$

$$-A_i^T K_i - K_i A_i + K_i B_i R_i^{-1} B_i^T K_i - Q_i = 0, \quad \text{для } k \rightarrow \infty.$$

Після визначення локальних рішень отримуємо:

$$x_i(k+1) = A_i x_i(k) - B_i R_i^{-1} B_i^T K_i x_i(k) + z_i [x_j(k), k], \quad i = \overline{1, N}, \quad (27)$$

де $z_i(k) = \sum_{j=1}^N A_{ij} x_j(k)$.

Твердження А. Якщо взаємодії $z_i [x_j(k), k]$, $i, j = \overline{1, N}$; $i \neq j$ обмежені по відношенню до норми нерівністю вигляду

$$\|z_i [x_j(k), k]\| \leq \xi_{ij} \|x_{ij}\|, \quad (28)$$

то існує число ξ , що гарантує ε -робастність вихідної системи, причому:

$$\xi = \frac{\lambda_{\min}(P)\varepsilon}{\lambda_{\max}(K)(1+\varepsilon)}, \quad (29)$$

де P – блочно-діагональна матриця з елементами $P_i = -K_i B_i R_i^{-1} B_i^T K_i + Q_i$; K – симетрична позитивно визначена матриця з блочно-діагональними елементами K_i , які є матричними рішеннями рівнянь Ріккати для $k \rightarrow \infty$; $\lambda_{\max}(K)$ – максимальне власне число матриці K ; $\lambda_{\min}(P)$ – мінімальне власне число матриці P .

Залежність (29) передбачає визначення власних чисел матриць P і K . Коректність твердження А, заснованого на виконанні (28) та (29), може бути показана за аналогією з доказом умови (21), де при відомих значеннях $J(u_i)$ та F_i , $i = \overline{1, N}$ визначалися для заданого ε управління $u_i^S(k)$, які гарантували б субоптимальність та стійкість рішення.

7. С-робастне управління децентралізованою системою з явним завданням взаємодій між підсистемами (модуль SCON)

Припустимо, що кожна підсистема S_i повністю керована, взаємодії впливають лише на змінні стани, а матриця B всієї системи може бути приведена до блочно-діагонального вигляду описаним вище методом децентралізації.

Нехай взаємодії є реальними зв'язками між підсистемами, а застосування локальних цільових функцій дає лише субоптимальні результати для локальних управлінь $u_i^S(k)$, $i = \overline{1, N}$ без гарантованого забезпечення стійкості підсистем.

Локальні управління мають стандартний вигляд:

$$u_i^S(k) = -K_i^S x_i(k), \quad (30)$$

де $K_i^S = R_i^{-1} B_i^T K_i$; K_i – розв'язання матричного рівняння типу

$$A_i^T K_i + K_i A_i - K_i B_i R_i^{-1} B_i^T K_i + Q_i = 0. \quad (31)$$

Розглянемо деякі теоретичні передумови, що дозволяють визначити умови c -робастності аналізованої динамічної системи.

Можна показати, що такі умови можуть виконуватися лише тоді, коли матриця явних взаємодій між підсистемами $Z = (z_i)$, $i = \overline{1, N}$ може бути представлена у вигляді:

$$Z = VK, \quad (32)$$

де K – симетрична діагональна матриця рішень (31); V – антисиметрична матриця розмірності $(n \times n)$.

Для модифікації локальних управлінь з урахуванням взаємодій, які відповідають реальному зв'язкам між підсистемами, було доведено таке твердження.

Твердження В. Якщо для системи, що розглядається, з глобальним квадратичним функціоналом може бути визначено глобальне управління

$$u^g(k) = -R^{-1} B^T K' x(k), \quad (33)$$

де K' – розв'язання матричного рівняння Ріккати вигляду

$$K'A + A^T K' - K' B R^{-1} B^T K' + Q = 0, \quad (34)$$

то мають існувати:

– антисиметрична матриця V , яка є рішенням матричного рівняння Ляпунова:

$$V(A_0 + Z) + (A_0 + Z)^T V + Z^T K A_0 - A_0^T K Z = 0; \quad (35)$$

– позитивно визначена коригуюча матриця K^c , яка визначається залежністю вигляду:

$$K^c = K' - K = (V - KZ)(A_0 + Z)^{-1}; \quad (36)$$

– матриця корекції управліннь B^c розмірності $(n \times n)$, яка визначається залежністю вигляду:

$$B^c = -(K + K^c)^{-1} K^c B. \quad (37)$$

При цьому скориговане управління $u^c(k)$ представляється таким виразом:

$$u^c(k) = u^S(k) + u^M(k) = -(K^S + K^M)x(k). \quad (38)$$

На рис. 1 наведено загальну схему модифікації локальних рішень, що відповідає описаному методу.

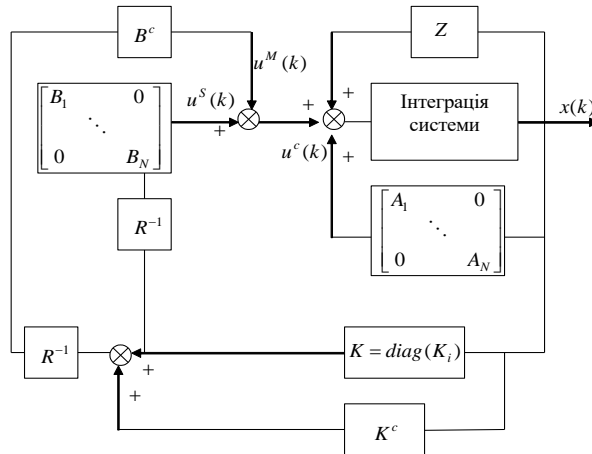


Рис. 1. Схема модифікації локальних рішень за явного завдання взаємодій між підсистемами

Твердження B дає можливість простого розв'язання задач цифрового управління багатозв'язковими системами, основою якого є визначення матриць корекції B^c та K^c .

Відомо, що однією з основних труднощів, що виникають при оптимізації багатозв'язкових динамічних систем, є необхідність відшукування глобального рішення K' нелінійного матричного рівняння Ріккати. Запропонований метод дозволяє після декомпозиції загального завдання перейти до вирішення рівнянь для локальних підсистем, тобто визначення матриць K_i , $i = \overline{1, N}$, що суттєво полегшує практичну реалізацію процедур цифрового

управління.

Процедура корекції локальних рішень забезпечує c -робастність системи, тобто гарантовану стійкість та субоптимальність. Запропонований підхід може бути реалізований дворівневою схемою оптимізації. На нижньому рівні цієї схеми вирішуються локальні завдання оптимізації без урахування взаємодій, а на вищому рівні ці рішення коригуються (при відомих $A_i, B_i, Q_i, R_i (i = \overline{1, N})$) для досягнення c -робастності.

8. Експериментальне моделювання

Експериментальне моделювання розглянутого методу проводилося для вихідних моделей багатозв'язних хіміко-технологічних систем, що описують взаємозв'язок між вхідними та вихідними параметрами процесів. Зазначимо, що на нинішньому етапі дослідження розглядалися лише спрощені моделі таких систем, кожна з підсистем яких повністю керована, взаємодії впливають лише на змінні стану, а матриця B усієї системи може бути приведена до блочно-діагонального вигляду шляхом децентралізації. Під час моделювання було здійснено декомпозицію глобальної системи на 4 локальні підсистеми.

У таблиці 1 наведено деякі результати моделювання методу для вихідної системи типу (1) з описом реальних зв'язків між підсистемами (для прикладів 1 та 2). У прикладах 1 та 2 моделювалися відповідно випадки неявного та явного завдання зв'язків між підсистемами після декомпозиції глобальної системи.

Таблиця 1

Результати моделювання (для прикладів 1 та 2)

Метод	Індекс субоптимальності	Значення квадратичних функціоналів
Локальних керувань (1)	1.017	5.653
Робастного керування (1)	0.1009	3.157
Локальних керувань (2)	1.628	1.283
Робастного керування (2)	0.251	0.532

Моделювання завдання децентралізованого керування було також здійснено за відомим методом координації, заснованим на відшуканні значень невизначених множників [12]. Порівняльний аналіз результатів, отриманих з використанням цього стандартного методу та c -робастних методів, свідчить про перевагу останніх.

Результати для методу локальних управлінь $u_i^S(k), i = \overline{1, 4}$ з координацією істотно поступаються відповідним результатам при застосуванні c -робастного управління (за оцінками індексу субоптимальності і значень квадратичних функціоналів). Крім того, локальні управління не гарантували забезпечення стійкості підсистем, а траєкторії змінних стану підтвердили асимптотичну стійкість системи після введення матриць корекції в алгоритм управління.

Зазначимо також, що c -робастні методи характеризуються значно меншим часом

реалізації обчислювальних процедур на кожному такті ідентифікації та управління в реальному масштабі часу.

Результати експериментального моделювання знаходяться у відповідності до представлених в даній роботі теоретичних висновків.

6. Обговорення результатів дослідження

Проблема розробки системи децентралізованого керування багатозв'язними динамічними процесами (MULTICON), що враховує взаємозв'язки між локальними підсистемами, вирішується в даній роботі завдяки використанню сукупності програмно-аналітичних модулів.

Система MULTICON передбачає необхідність реалізації низки функцій, зокрема: вибору структури глобальної моделі ОУ (модуль STR); попередньої декомпозиції глобальної моделі на відносно ізольовані підсистеми з урахуванням структурних збурень, пов'язаних з можливим послабленням взаємодії окремих підсистем в поточному часі (модуль DEC); оцінювання стану взаємозв'язків між локальними підсистемами (SLOC); модуль робастного керування децентралізованою системою (SCON), де розрахунок керуючих дій здійснюється за результатами аналізу впливу взаємозв'язків між локальними підсистемами на загальний оптимум.

Відзначимо доцільність введення поняття c -робастності багатозв'язних систем, що гарантує їхню асимптотичну стійкість та субоптимальність при виникненні структурних збурень.

Запропонований підхід до робастного децентралізованого керування з урахуванням взаємозв'язків між локальними керуваннями заснований на визначенні матриць корекції. Цей підхід має певні переваги у порівнянні з методом координації локальних керувань.

Слід зазначити, що результати мають переважно теоретичний характер.

Перспективним розвитком запропонованого методу є подальші дослідження, пов'язані з розглядом можливості його застосування для реальних ситуацій часткового порушення взаємозв'язків між підсистемами в конкретних прикладних галузях, зокрема, в електроенергетичних системах та системах транспортування газу.

Крім того, доцільним є доповнення базової структури системи MULTICON додатковими модулями EST (поточної корекції параметрів моделі ОУ) та PCON (прогнозування якості керування), а також застосування мікросервісної архітектури обробки даних [14].

7. Висновки

У ході даного дослідження було вирішено задачу розробки модульної системи децентралізованого керування багатозв'язними технологічними об'єктами за умов часткового порушення структурних взаємозв'язків.

Для вирішення цієї задачі було здійснено:

- розробку структури та визначення функцій окремих модулів запропонованої децентралізованої системи;
- розробку методу декомпозиції завдань керування багатозв'язним процесом;
- аналіз впливу порушення структурних взаємодій на працездатність керованої багатозв'язної системи;
- розробку методів децентралізованого керування багатовимірними системами з різними типами завдання взаємодій між підсистемами;
- експериментальне моделювання запропонованого підходу.

Перелік посилань:

1. Isermann R. Digital Control Systems. Springer Science & Business Media, 2013 . 566 p. DOI:10.1007/978-3-662-02319-8
2. Ходаков В.Е., Соколова Н.А., Кірійчук Д.Л. Про розвиток основ координації складних систем. *Проблеми інформаційних технологій*. 2014. № 2 (016). С. 25 – 30.
3. Zhang Y.,Wei, W. Decentralized coordination control of PV generators, storage battery, hydrogen production unit and fuel cell in islanded DC microgrid. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 4., No. 15. P. 8243–8256.
4. Shrivastava S., Subudhi B. Comprehensive review on hierarchical control of cyber-physical microgrid system. *Generation, Transmission & Distribution*. 2020. Vol. 14, No. 26. P. 6397–6416.
5. Ладанюк А.П., Власенко Л.О., Заєць Н.А. Системний аналіз складного об'єкта в задачах діагностики та координації. *Автоматизація виробничих процесів*. 2006. № 2. С. 44–47.
6. Ge X., Han Q.-L, Ding L., Wang Y.-L., Zhang M. X., Dynamic eventtriggered distributed coordination control and its applications: a survey of trends and techniques. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2020. Vol. 50, No. 9. P. 3112–3125.
7. Шумиґай Д.А., Ладанюк А.П. Алгоритми координації підсистем технологічних комплексів з використанням еталонних моделей. *Восточноєвропейський журнал передових технологій*. 2010. № 6/3 (48). С. 24-32.
8. Shergin V., Udovenko S., Chala L., Pogurskaya M. Elastic scale-free networks model based on the mediation-driven attachment rule. 2020. *IEEE Third International Conference «DATA STREAM MINING & PROCESSING» (DSMP)*. Lviv, Ukraine, 21–22 august 2020. P. 291-295. <https://doi.org/10.1109/DSMP47368.2020.9204207>
9. Gigi S., Tangirala A. Quantification of interaction in multiloop control systems using directed spectral decomposition. *Automatica* 2013. No. 49(5). URL: <https://cse.sc.edu/~gatzke/cache/huang-multi-loop-control.pdf>
10. Бодянский Е.В., Удовенко С.Г., Ачкасов А.Е., Вороновский Г.К. Субоптимальное управление стохастическими процессами. Харьков: Основа. 1997. 140 с.
11. Катренко А.В., Савка І.В. Механізми координації у складних ієрархічних системах. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: Інформаційні системи та мережі. 2008. С. 156–166.
12. Бойченко О.В. Координація нечітких рішень в багаторівневій системі. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2016. № 2 (37). С. 57 – 61.
13. Дубовой В.М., Юхимчук М.С. Дослідження стійкості та збіжності децентралізованої координації локальних систем управління розподіленими кіберфізичними системами. *Вісник ВПІ*. 2021. Вип. 4. С. 62–69. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-62-69/>
14. Нефьодов Д.А., Удовенко С.Г., Чала Л.Е. Мікросервісна архітектура системи потокової обробки великих даних. *АСУ та прилади автоматики*. 2022. № 178. С. 50-64. <https://doi.org/10.30837/0135-1710.2022.178.050> .

Надійшла до редколегії 18.04.2024 р.

Удовенко Сергій Григорович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри ІКТ ХНЕУ ім. С. Кузнеця, м. Харків, Україна, e-mail:udovenkosg@gmail.com, ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-5945-86-47>

Затхей Володимир Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри ІКТ ХНЕУ ім. С. Кузнеця, м. Харків, Україна, e-mail:zathey_va@ukr.net, ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-4426-7789>.

Тесленко Олег Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри ІКТ ХНЕУ ім. С. Кузнеця, м. Харків, Україна, e-mail:oleh.teslenko@hneu.net, ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-3105-9323>.

РЕФЕРАТИ

УДК 004.8:004.9

Побудова пояснень в інтелектуальних системах на основі формування каузальних залежностей / С.Ф. Чалий, В.О. Лещинський// АСУ та прилади автоматики. 2024. № 180. С. 4-15.

Розглядається процес побудови пояснень в інтелектуальних інформаційних системах. Розроблено каузальний підхід до формування пояснень в таких системах, який створює умови для автоматизованого уточнення пояснень з тим, щоб зробити їх зрозумілими для користувачів з урахуванням їхніх цілей та потреб. Пояснення будується з використанням показників можливості та необхідності, що дає можливість врахувати невизначеність щодо проміжних даних інтелектуальної системи, представленої у вигляді «чорного ящика». В рамках запропонованого підходу виконано структурування задач побудови пояснень в системах пояснювального штучного інтелекту, розроблено каузальну модель пояснення в інтелектуальній інформаційній системі, розроблено метод побудови пояснень в інтелектуальній інформаційній системі з використанням каузальних залежностей. Отримано такі нові наукові результати. Запропоновано узагальнену каузальну модель пояснення, яка об'єднує темпоральну, причинно-наслідкову та цільову складові. Модель забезпечує побудову багатоаспектного пояснення, що може бути використано не лише після реалізації рішення, а й до початку його імплементації. Запропоновано узагальнений метод побудови пояснення на основі каузальних залежностей, що містить етапи формування темпорального, причинно-наслідкового та цільового опису пояснення. Метод забезпечує можливість автоматизованої побудови та ітеративного уточнення пояснень.

Ключові слова: пояснення, інтелектуальна система, самопояснювальний штучний інтелект, темпоральна залежність, каузальна залежність, можливість, система штучного інтелекту, узгодження знань.

Табл. 2. Іл. 0. Бібліогр.: 21 назва.

UDC 004.8:004.9

Construction of explanations in intelligent systems based on the formation of causal dependencies// S.F. Chaly, V.O. Leshchynskiy // Management Information System and Devices. 2024. № 180. P. 4-15.

The article considers the process of building explanations in intelligent information systems. A causal approach to building explanations in such systems is developed, which creates conditions for automated refinement of explanations in order to make them understandable for users, taking into account their goals and needs. The explanation is built using the indicators of possibility and necessity, which makes it possible to take into account the uncertainty of the intermediate data of the intelligent system presented in the form of a «black box». Within the framework of the proposed approach, the tasks of building explanations in explanatory artificial intelligence systems are structured, a causal model of explanation in an intelligent information system is developed, and a method of building explanations in an intelligent information system using causal dependencies is developed. The following new scientific results were obtained. A generalized causal model of explanation is proposed, combining temporal, causal and target components. The model allows for the construction of a multidimensional explanation that can be used not only after the decision has been made, but also before its implementation. A generalized method for constructing an explanation based on causal dependencies is proposed, which includes stages of formation of temporal, causal and goal description of the explanation. The method offers the possibility of automated construction and iterative refinement of explanations.

Keywords: explanation, intelligent system, self-explanatory artificial intelligence, temporal dependence, causal dependence, possibility, artificial intelligence system, knowledge matching.

Tab. 2. Fig. 0. Ref.: 21 items.

УДК 681.5+519.711.2

Нечітка модель прийняття рішень для автоматичної сортувальної лінії пошти / І.В. Гребенник, О.А. Коваленко // АСУ та прилади автоматики. 2024. № 180. С. 16-26.

Об'єктом дослідження є процес нечіткого управління автоматичною сортувальною лінією.

Для зменшення часу обробки об'єктів поштових відправлень використовуються автоматичні сортувальні лінії зі стрічковими конвеєрами, які здійснюють транспортування до заданих пунктів завантаження. Головним недоліком застосування таких систем є обмеження моделі прийняття рішень, пов'язаних з невизначеністю умов під час реалізації заданої логіки сортування

Для позбавлення розглянутих недоліків розроблено нечітку модель прийняття рішень автоматичної сортувальної ліній, що дозволяє за визначеними умовами реалізувати задану логіку сортування об'єктів поштових відправлень за пунктами завантаження. Для цього формалізовано задачу нечіткої класифікації вантажів за їхніми параметрами з визначенням пунктів завантаження для кожного класу. Проведено формалізацію всіх етапів нечіткого виведення на базі алгоритму Такагі-Сугено-Канга. Визначено вхідні і вихідні нечіткі лінгвістичні змінні, формалізовано базу правил нечіткого виведення для проведення фазифікації. Для дефазифікації обрано метод розрахунку центру ваги для сингтонних множин. Для реалізації логіки сортування визначено три критерії, що повинні реалізовуватися базою правил нечіткого виведення. За першим критерієм сортування об'єктів за пунктами завантаження проводиться з урахуванням оцінки вартості, незалежно від ваги і габаритів. За другим критерієм – з урахуванням оцінки ваги, незалежно від габаритів. За третім критерієм – з урахуванням сумісної оцінки ваги і габаритів. Тестування розробленої моделі проводилося за допомогою середовища Matlab. Проведене моделювання підтвердило працеспроможність нечіткої моделі і визначених критеріїв управління сортуванням об'єктів поштових відправлень за пунктами завантаження.

Ключові слова: модель прийняття рішень, автоматична лінія, транспортування, нечітка логіка, нечітка класифікація, нечітке виведення, алгоритм Такагі-Сугено-Канга.

Табл. 2. Іл. 4. Бібліогр.: 8 назв.

UDC 681.5+519.711.2

Fuzzy decision-making model for automatic mail sorting line/ I.V. Grebennik, O.A. Kovalenko // Management Information System and Devices. 2024. № 180. P. 16-26.

The object of this research is the implementation of fuzzy control in an automated mail sorting line.

To decrease the processing time of postal items, automated sorting lines with conveyor belts are used, which carry out transportation to predefined loading points. The principal limitation of such systems is the decision-making model's inherent ambiguity when implementing the designated sorting logic.

To overcome these shortcomings, a fuzzy decision-making model for automated sorting lines has been developed. This model allows implementing the sorting logic of postal items to specified loading points under predefined conditions. For this, the fuzzy classification of objects based on their parameters has been formalized, with loading points determined for each class. The fuzzy inference process stages have been formalized based on the Takagi-Sugeno-Kanga algorithm. The input and output fuzzy linguistic variables have been identified, and a rulebase for fuzzy inference has been formalized for fuzzification. For defuzzification, the center of gravity calculation for singletons has been chosen.

Three criteria have been defined to implement the sorting logic, facilitated by the fuzzy inference rulebase. The first criterion sorts items to loading points considering cost evaluation, irrespective of weight and dimensions. The second criterion considers weight evaluation independent of dimensions. The third one takes into account the combined evaluation of weight and dimensions.

The developed model was tested using the Matlab environment. The simulation confirmed the model's functionality and the sorting management criteria for postal items to loading points.

Keywords: decision-making model, automated line, transportation, fuzzy logic, fuzzy classification, fuzzy inference, Takagi-Sugeno-Kanga algorithm.

Tab. 2. Fig. 4. Ref.: 8 items.

УДК 004.046

Розробка методу параметричного оцінювання тривалості операцій IT-проєкту міграції інформаційної системи до хмарної платформи/ І.Ю. Панфьорова, В.В. Шутько// АСУ та прилади автоматизи. 2024. № 180. С. 27-36.

Розглянуто процес міграції інформаційних систем (ІС) до хмари, що є актуальною проблемою для багатьох сучасних підприємств. Предметом дослідження є методи оцінки тривалості операцій при виконанні IT-проєкту міграції ІС до хмари. Розглянуто декілька основних методів оцінки тривалості операцій: метод експертного судження (Expert Judgment), метод оцінювання за аналогами (Analogous Estimation) та метод аналізу та перегляду сценаріїв (Program Evaluation and Review Technique, PERT). Серед розглянутих методів обрано метод PERT як такий, що найкраще адаптується до часових невизначеностей.

Розглянуто переваги та недоліки оригінального методу PERT. Виявлено, що орієнтованість на найімовірніший сценарій з мінімальним урахуванням впливу інших сценаріїв може не відображати усі можливі випадки при оцінюванні тривалості операцій IT-проєктів. Приділено увагу існуючим модифікаціям, меті їх розробки та адаптованості під вирішення задач оцінювання тривалості операцій для IT-проєктів міграції ІС до хмари. Виконано аналіз існуючої модифікації методу (Modified PERT) щодо можливості вирішення проблеми орієнтованості на найімовірніший сценарій.

За результатами попередньо проведеного дослідження запропоновано метод параметричного оцінювання на базі методу PERT для вирішення визначеної проблеми. Виконано порівняння точності оцінювання тривалості операцій IT-проєкту міграції ІС до хмари Google Cloud для оригінального методу PERT та розробленого методу параметричного оцінювання на прикладі трьох задач. Експериментально показано, що для ситуацій, коли контекст операції не спирається на найімовірніший сценарій, розроблений метод надає точнішу оцінку, ніж оригінальний. Наочно показано зміну графіку кривої ймовірності розподілу часу виконання операції при використанні оригінального методу PERT та методу параметричного оцінювання на базі методу PERT.

Ключові слова: інформаційна система, методи оцінки, міграція, хмара, PERT.

Табл. 4. Іл. 3. Бібліогр.: 12 назв.

UDC 004.046

Development of a parametric estimation method of the operations duration of the IT project of migration of the information system to the cloud platform/ Iryna Panforova, Viktor Shutko // Management Information System and Devices. 2024. № 180. P. 27-36.

The process of migration of information systems (IS) to the cloud, which is an urgent problem for many modern enterprises, is considered. The subject of the research is methods for estimating the duration of operations in the implementation of an IT project of migration of information systems to the cloud. Several main methods for estimating the duration of operations are considered: the method of Expert Judgment, the method of Analogous Estimation and the method of analysis and revision of scenarios (Program Evaluation and Review Technique (PERT)). Among the methods considered, the PERT method was chosen as the one that best adapts to temporal uncertainties.

The advantages and disadvantages of the original PERT method are considered. It is found that focusing on the most probable scenario with minimal consideration of the influence of other scenarios may not reflect all possible cases when estimating the duration of operations of IT projects. Attention is paid to the existing modifications, the purpose of their development and adaptability to solving the problems of estimating the duration of operations for IT projects of migration of information systems to the cloud. An analysis of the existing modification of the method (Modified PERT) on the possibility of solving the problem of focusing on the most likely scenario.

Based on the results of the preliminary study, a method of parametric estimation based on the PERT method has been proposed to solve the identified problem. A comparison of the accuracy of estimating the

duration of operations of the IT project of migration of IS to the Google Cloud for the original PERT method and the developed method of parametric estimation is carried out on the example of three tasks. It has been experimentally shown that for situations where the context of the operation is not based on the most probable scenario, the developed method provides a more accurate estimate than the original one. The change in the graph of the probability curve of the distribution of the time of the operation is clearly shown using the original PERT method and the parametric estimation method based on the PERT method.

Key words: information system, valuation methods, migration, cloud, PERT.

Tab. 4. Fig. 3. Ref.: 12 items/

УДК [519.816:005.53]:004.89

Метод міркувань на прецедентах для підтримки прийняття рішень в гуманітарному реагуванні / Т.Г. Білова, В.М. Дьоміна, І.О. Побіженко, О.О. Остапенко // АСУ та прилади автоматики. 2024. № 180. С. 36-44.

Об'єктом дослідження є процеси прийняття рішень в гуманітарному реагуванні. Відмічено, що певний досвід гуманітарного реагування може бути використаний в подібних ситуаціях в майбутньому. Визначено, що процеси гуманітарного реагування мають такі особливості: складність та динамічність; прийняття рішень відбувається в умовах невизначеності; ситуації, що виникають, потребують оперативного реагування.

Зазначено відсутність комплексного підходу до створення систем підтримки прийняття рішень в гуманітарному реагуванні. Сучасні дослідження пов'язані з прийняттям рішень в рамках передбачення та ліквідації наслідків стихійних лих, техногенних катастроф та збройних конфліктів, гуманітарні питання розглядаються як суміжні.

Як представлення знань про процеси гуманітарного реагування обрано міркування на прецедентах (СВР). Цей метод дозволяє використовувати попередній досвід прийняття рішень без виконання детального аналізу предметної області та адаптувати накопичені знання під нові ситуації.

Визначено функції та структуру системи підтримки прийняття рішень в гуманітарному реагуванні. Для представлення знань в системі використовується модуль міркувань на прецедентах, що імітує людські міркування та заснований на ефективному використанні існуючого досвіду.

Модуль реалізує модифікований СВР-метод. Параметричне представлення прецеденту розширено показником використання прецедентів. Структуроване представлення рішення прецеденту у вигляді послідовності кроків, кожен з яких має власну характеристику, дозволяє проводити адаптацію декількох прецедентів, що мають близьку відстань від поточної ситуації.

Проведено експериментальну перевірку результатів дослідження шляхом навчання роботи модуля на початковому наборі даних. Для експерименту було сформовано п'ятдесят прецедентів, що описують прийняття рішень при забезпеченні населення питною та технічною водою. В результаті навчання показано, що при наповненні бази прецедентів в п'ятдесят прецедентів якість класифікації складає 89 %. Отримані результати дозволяють зробити висновок про доцільність структурування знань про гуманітарне реагування у вигляді прецедентів з можливістю подальшої адаптації до нових ситуацій та навчання.

Ключові слова: прийняття рішень, гуманітарне реагування, знання-орієнтована модель, міркування на прецедентах.

Табл. 0. Іл. 3. Бібліогр.: 14 назв.

UDC [519.816:005.53]:004.89

The case-base reasoning to support decision-making in humanitarian response // T.G. Bilova, V.M. Dyomina, I.O. Pobizhenko, O.O. Ostapenko // Management Information System and Devices. 2024. № 180. P. 36-44.

The object of the study is decision-making processes in humanitarian response. It is noted that certain experience of humanitarian response can be used in similar situations in the future. It is determined that

humanitarian response processes have the following features: complexity and dynamism; decision-making takes place in conditions of uncertainty; emerging situations require a prompt response.

There is a lack of an integrated approach to the creation of decision support systems in humanitarian response. Current research is related to decision-making in the framework of predicting and eliminating the consequences of natural disasters, man-made disasters and armed conflicts, and humanitarian issues are considered as related.

Case-base reasoning was chosen as a representation of knowledge about humanitarian response processes. This method allows using previous decision-making experience without performing a detailed analysis of the subject area and adapting the accumulated knowledge to new situations.

The functions and structure of an decision-making support system in humanitarian response are defined. The system uses the case-base reasoning module to represent knowledge, which simulates human reasoning and is based on the effective use of existing experience.

The module implements a modified case-base reasoning. The parametric representation of a case is extended by the indicator of the use of precedents. The structured representation of the case solution in the form of a sequence of steps, each of which has its own characteristics, allows for the adaptation of several cases that are close to the current situation.

The results of the study were experimentally verified by training the module on the initial data set. Fifty cases were generated for the experiment, describing decision-making in the provision of drinking and industrial water to the population. The training results show that when the cases database is filled with fifty cases, the classification quality is 89%. The results obtained allow us to conclude that it is expedient to structure knowledge about humanitarian response in the form of cases with the possibility of further adaptation to new situations and training.

Keywords: decision-making, humanitarian response, knowledge-oriented model, case-base reasoning.

Tab. 0. Fig. 3. Ref.: 14 items.

УДК 005.2; 004.2

Розробка бізнес-моделі для підвищення ефективності найму нових співробітників до ІТ-компаній / В.В. Ярмак // АСУ та прилади автоматики. 2024. № 180. С. 45-54.

Об'єктом дослідження є процес підвищення ефективності найму нових співробітників до ІТ-компаній, який розглядається як один із заходів постійного поліпшення процесів управління ІТ-проектами.

Найм талановитих та мотивованих ІТ-фахівців в даний період часу серйозно ускладнений внаслідок перенасичення ринку праці в ІТ-галузі кандидатами, які мають або виключно фінансову мотивацію, або низький рівень кваліфікації. Наслідком цієї проблеми є збільшення витрат часу та грошей на виявлення та вибір для подальшого опрацювання підмножини резюме фахівців, які будуть релевантними потребам ІТ-компанії. Тому дослідження моделей активних стратегій проведення профорієнтаційної діяльності серед майбутніх кандидатів на роботу в ІТ-галузі є актуальним.

Метою дослідження є створення бізнес-моделі для професійної орієнтації кандидатів на посади в ІТ-компаніях. Ця бізнес-модель повинна поєднувати переваги базових моделей планування бізнесу та гнучких методів бізнес-розвитку з врахуванням особливостей процесу професійної орієнтації у ІТ-галузі України.

За основу цієї бізнес-моделі запропоновано використати Business Model Canvas. В межах цієї моделі для підвищення гнучкості заходів, пов'язаних із презентаціями ІТ-професій, запропоновано використовувати метод Уолта Діснея. Під час проведення дослідження похідний метод Уолта Діснея модифіковано шляхом відмови від застосування на його першому етапі ролі Мрійника та використання замість неї ролі Оптиміста. Людина у ролі Оптиміста повинна визначати переваги, позитивні сторони, сприятливі можливості об'єкта презентації тощо.

Результати модифікації методу Уолта Діснея використано під час розробки Business Model Canvas для процесу підвищення ефективності найму нових співробітників до ІТ-компаній. Визначено ключові

діяльності Business Model Canvas, встановлено послідовність їх виконання, яка дозволяє ліквідувати недоліки окремих діяльностей.

Ключові слова: IT-компанія, професійна орієнтація, Business Model Canvas, метод Уолта Діснея.

Табл. 0. Іл. 2. Бібліогр. : 13 назв.

UDC 005.2; 004.2

Development of a business model to improve the efficiency of hiring new employees to IT companies/
V.V. Jarmak // Management Information System and Devices. 2024. № 180. P. 45-54.

The object of the research is the process of increasing the efficiency of hiring new employees to IT companies, which is considered as one of the measures of continuous improvement of IT project management processes.

Hiring talented and motivated IT specialists is seriously complicated nowadays due to the oversaturation of the labor market in the IT industry with candidates who are either exclusively financially motivated or have a low level of qualifications. The consequence of this problem is an increase in time and money spent on identifying and selecting for further processing a subset of resumes of specialists who will be relevant to the needs of the IT company. Therefore, the study of models of active strategies for conducting career guidance activities among future candidates for work in the IT industry is relevant.

The purpose of the study is to create a business model for professional orientation of candidates for positions in IT companies. This business model should combine the advantages of basic business planning models and flexible business development methods, taking into account the peculiarities of the process of professional orientation in the IT industry of Ukraine.

As a basis for this business model, it is proposed to use the Business Model Canvas. Within this model, to increase the flexibility of activities related to the presentations of IT professions, it is proposed to use the Walt Disney method. During the research, Walt Disney's derivative method was modified by abandoning his first stage use of the role of the Dreamer and instead using the role of the Optimist. A person in the role of an Optimist should determine the advantages, positive aspects, favorable opportunities of the presentation object, etc.

The results of the modification of Walt Disney's method were used during the development of the Business Model Canvas for the process of increasing the efficiency of hiring new employees to IT companies. The key activities of the Business Model Canvas were determined, the sequence of their implementation was established, which allows eliminating the shortcomings of individual activities.

Keywords: IT company, professional orientation, Business Model Canvas, Walt Disney's method.

Table 0. Fig. 2. Ref.: 13 items.

УДК 004.8

Метод формування заявок природною мовою на основі вдосконаленої моделі BERT / В.М. Левикін, Д.О. Діденко, А.О. Альошкін // АСУ та прилади автоматички. 2024. № 180. С. 55-71.

Об'єктом дослідження є процес формування заявок на отримання послуг. Під час створення інформаційних систем та інформаційних технологій автоматизованого управління послугами у різних предметних галузях постійно існує необхідність розвитку моделей, методів і алгоритмів, які могли б автоматизувати процес формування заявок на отримання послуг. Основні напрями досліджень у цій галузі пов'язані з використанням методів та моделей машинного навчання та обробки природної мови. Але подібні методи та моделі мають недоліки, які значно утруднюють застосування цих методів та моделей в інформаційних системах та технологіях, які автоматизують процес формування заявок на отримання послуг. Тому актуальним є дослідження, спрямоване на розробку методів і моделей, у яких ці недоліки усунені за рахунок комбінації відомих моделей і методів.

Як основу для розробки комбінованого методу формування заявки на отримання послуги обрано модель BERT. Для усунення її недоліків запропоновано застосовувати менш витратні методи машинного навчання. Розроблений комбінований метод складається з п'яти етапів: проведення аналізу

текстового запиту з використанням моделі BERT; розрахунок вагових коефіцієнтів з використанням лінійної регресії; реалізація навченої моделі класифікації за допомогою методів машинного навчання; категоризація текстових описів з використанням моделі Байєса; надання рекомендацій користувачам системи.

Експериментальну перевірку розробленого комбінованого методу проведено на прикладі задачі формування та обробки заявок на отримання послуги з оренди автомобіля. Для розробки інформаційної технології використано мову Python та окремі бібліотеки, які дозволяють інтегрувати розроблену технологію до веб-сайту компанії. Отримані результати дозволяють стверджувати про доцільність використання розробленого комбінованого методу під час формування заявок у вигляді невеликих за обсягом текстів природною мовою користувачів.

Ключові слова: послуга, заявка, BERT, лінійна регресія, байєсівський класифікатор.

Табл. 1. Іл. 4. Бібліогр.: 22 назв.

UDC 004.8

Method of generating applications in natural language based on the improved BERT model / V.M. Levykin, D.O. Didenko, A.O. Alyoshkin // Management Information System and Devices. 2024. № 180. P. 55-71.

The object of the research is the process of forming applications for receiving services. During the creation of information systems and information technologies for the automated management of services in various subject areas, there is a constant need to develop models, methods and algorithms that could automate the process of forming applications for receiving services. The main directions of research in this field are related to the use of methods and models of machine learning and natural language processing. But such methods and models have disadvantages that significantly complicate the application of these methods and models in information systems and technologies that automate the process of forming applications for receiving services. Therefore, research aimed at the development of methods and models in which these disadvantages are eliminated due to a combination of known models and methods is relevant.

The BERT model was chosen as the basis for the development of a combined method of forming an application for receiving a service. To eliminate its shortcomings, it is proposed to use less expensive methods of machine learning. The developed combined method consists of five stages: analysis of a text query using the BERT model; calculation of weighting factors using linear regression; implementation of the trained classification model using machine learning methods; categorization of text descriptions using the Bayesian model; providing recommendations to system users.

The experimental verification of the developed combined method was carried out on the example of the task of forming and processing applications for obtaining a car rental service. For the development of information technology, the Python language and separate libraries were used, which allow the integration of the developed technology into the company's website. The obtained results allow us to assert the feasibility of using the developed combined method during the formation of applications in the form of small texts in the natural language of users.

Key words: service, application, BERT, linear regression, Bayes classifier.

Tab. 1. Fig. 4. Ref.: 22 items.

УДК 004.8:519.2

Розробка методу прогнозування результатів виступів спортсменів та команд у спортивних змаганнях / М.В. Євланов, Н.В. Васильцова, В.О. Уварова // АСУ та прилади автоматики. 2024. № 180. С.72-88.

Об'єктом дослідження є задача прогнозування результатів виступів спортсменів та/або команд у змаганнях. Визначено доцільність вирішення задач довгострокового прогнозування у спортивній діяльності. Проведено порівняльний аналіз математичних методів, які використовуються для прогнозування результатів спортивних змагань. Виділено групи математичних методів, які за

результатами порівняльного аналізу визначені як найбільш підходящі для вирішення задач довгострокового прогнозування результатів виступів спортсменів та/або команд. Обґрунтовано теоретичну та прикладну актуальність вирішення подібних задач.

Як основні методи дослідження було обрано методи машинного навчання та методи, в основі яких знаходяться байєсівські моделі. Визначено особливості використання цих методів цих моделей під час вирішення задачі довгострокового прогнозування результатів виступів. Запропоновано байєсівські оцінки ймовірності успіху та невдачі виступу спортсмена на змаганні. Розроблено метод вирішення задачі довгострокового прогнозування результатів виступів, який поєднує в собі переваги методів машинного навчання та методів, в основі яких знаходяться байєсівські моделі. На відміну від існуючих в Україні практик вирішення задачі прогнозування розроблений метод дозволяє враховувати не тільки історичну інформацію про змагання, які відбулися раніше, а й інформацію про майбутні різновиди змагання.

Експериментальну перевірку отриманих наукових результатів було проведено під час вирішення задачі прогнозування результатів виступів спортсменів у змаганнях на Кубок світу для Федерації підводного спорту та підводної діяльності України. Метою вирішення цієї задачі є підвищення ефективності та визначення пріоритетності спортсменів у наступних змаганнях подібного типу. Розглянуто хід і результати вирішення задачі для провідних спортсменів Федерації підводного спорту та підводної діяльності України.

Ключові слова: довгострокове прогнозування, байєсівська регресія, рейтингове оцінювання, стандартне відхилення, підводний спорт.

Табл. 5. Лл. 1. Бібліогр.: 20 назв.

UDC 004.8:519.2

Development of a method of forecasting the results of the performances of athletes and teams in sports competitions/ M.V. Yevlanov, N.V. Vasylytsova, V.O. Uvarova // Management Information System and Devices. 2024. № 180. P. 72-88.

The object of the research is the task of forecasting the results of the performances of athletes and/or teams in competitions. The expediency of solving the problems of long-term forecasting in sports activities has been determined. A comparative analysis of the mathematical methods used to predict the results of sports competitions was conducted. The groups of mathematical methods that, according to the results of the comparative analysis, are determined to be the most suitable for solving the problems of long-term forecasting of the performance results of athletes and/or teams are highlighted. The theoretical and applied relevance of solving similar problems is substantiated.

Machine learning methods and methods based on Bayesian models were chosen as the main research methods. The peculiarities of the use of these methods when solving the problem of long-term prediction of performance results are determined. Bayesian estimates of the probability of success and failure of an athlete's performance at a competition are proposed. A method for solving the problem of long-term prediction of performance results has been developed, which combines the advantages of machine learning methods and methods based on Bayesian models. In contrast to the practices of solving the forecasting problem existing in Ukraine, the developed method allows taking into account not only historical information about competitions that took place before, but also information about future types of competitions.

The experimental verification of the obtained scientific results was carried out while solving the problem of forecasting the results of athletes' performances in World Cup competitions for the Federation of Underwater Sports and Underwater Activities of Ukraine. The purpose of solving this problem is to increase the efficiency and determine the priority of athletes in the next competitions of this type. The course and results of solving the problem for the leading athletes of the Federation of Underwater Sports and Underwater Activities of Ukraine were considered.

Key words: long-term forecasting, Bayesian regression, ranking assessment, standard deviation, underwater sports.

УДК 681.513.1

Модульна система децентралізованого керування багатозв'язними процесами за наявності структурних збурень/ С.Г. Удовенко, В.А. Затхей, О.В. Тесленко // АСУ та прилади автоматики. 2024. № 180. С. 88-103.

Об'єктом дослідження є цифрові системи децентралізованого керування квазістаціонарними багатозв'язними процесами з урахуванням структурних збурень.

Визначено, що перспективним розвитком децентралізованого керування багатозв'язними процесами є дослідження, пов'язані з розглядом можливості його застосування для реальних ситуацій часткового порушення взаємозв'язків між підсистемами в багатовимірних стохастичних системах. Подібні дослідження на сьогодні є недостатньо розвинуті, тому тематику запропонованої роботи слід вважати актуальною з теоретичної і прикладної точок зору. Здійснено формалізацію проблеми децентралізованого керування багатозв'язними стохастичними об'єктами, що враховує внутрішні взаємозв'язки між локальними підсистемами системи. Запропоновано метод децентралізації багатозв'язної системи, перевага якого полягає у використанні простих обчислювальних процедур перетворення та перестановки елементів матриць глобальної моделі.

Введено поняття с-робастності багатозв'язної динамічної системи, що гарантує її асимптотичну стійкість та субоптимальність при виникненні структурних збурень. Запропоновано методи с-робастного децентралізованого керування для випадків явних та неявних завдань взаємозв'язків між локальними підсистемами. Запропоновані методи мають певну перевагу у порівнянні з методом координації локальних керувань, що полягають у підвищенні оперативності децентралізованого керування з гарантованим рівнем субоптимальності.

Проведено експериментальне моделювання розглянутого методу для моделей багатозв'язних хіміко-технологічних систем, що описують взаємозв'язок між вхідними та вихідними параметрами процесів. Під час моделювання було здійснено декомпозицію глобальної системи на чотири локальних підсистеми. Моделювання завдання децентралізованого керування було також здійснено за відомим методом координації, заснованим на відшуканні значень невизначених множників. Порівняльний аналіз результатів, отриманих з використанням цього стандартного методу та запропонованих робастних методів, свідчить про перевагу останніх.

Ключові слова: децентралізоване керування, декомпозиція, робастність, структурні збурення.

Табл. 1. Іл. 1. Бібліогр.: 14 назв.

UDC 681.513.1

A modular decentralized control system of multi-connected processes in the presence of structural disturbances // S.G. Udovenko, V.A. Zathey, O.V. Teslenko // Management Information System and Devices. 2024. № 180. P. 88-103.

The object of research is digital systems of decentralized control of quasi-stationary multi-connected processes taking into account structural disturbances.

It was determined that the promising development of decentralized control of multi-connected processes is research related to considering the possibility of its application for real situations of partial disruption of interconnections between subsystems in multidimensional stochastic systems. Such studies are not sufficiently developed today, therefore the topic of the proposed work should be considered relevant from the theoretical and applied points of view. The problem of decentralized management of multi-connected stochastic objects is formalized, taking into account the internal relationships between their local subsystems of the system. A method of decentralization of a multi-connected system is proposed, the advantage of which is the use of simple computational procedures of transformation and permutation of matrix elements of the global model.

The concept of c-robustness of a multi-connected dynamic system is introduced, which guarantees its asymptotic stability and suboptimality in the event of structural disturbances. Methods of robust decentralized

control are proposed for cases of explicit and implicit tasks of interconnections between local subsystems. The proposed methods have a certain advantage in comparison with the method of local control coordination, which consists in increasing the efficiency of decentralized control with a guaranteed level of suboptimality.

Experimental modeling of the considered method for models of multi-connected chemical-technological systems describing the relationship between the input and output parameters of the processes was carried out. During the simulation, the global system was decomposed into 4 local subsystems. Modeling of the task of decentralized management was also carried out according to the well-known method of coordination, based on finding the values of uncertain multipliers. A comparative analysis of the results obtained using this standard method and the proposed robust methods shows the superiority of the latter.

Keywords: decentralized control, decomposition, robustness, structural disturbances.

Tab. 1. Fig. 1. Ref.: 14 items.

**ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ
У ВСЕУКРАЇНСЬКОМУ МІЖВІДОМЧОМУ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОМУ ЗБІРНИКУ
«АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ПРИЛАДИ АВТОМАТИКИ»**

1. Загальні вимоги

До розгляду приймаються раніше не опубліковані статті українською та англійською мовами. Статті англійською мовою подаються разом з українськомовним варіантом. Статті, перекладені англійською за допомогою комп'ютерного перекладача та не відредаговані належним чином, не розглядаються.

Наукова стаття, яка подається до розгляду, має бути структурована та містити всі основні частини, характерні для наукової статті:

- постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими та практичними задачами;
- аналіз останніх досліджень та публікацій, у яких розпочато вирішення даної проблеми та на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми;
- формулювання цілей статті (постановка задачі);
- подання основного матеріалу досліджень з повним обґрунтуванням отриманих результатів;
- висновки даного дослідження та перспективи подальших досліджень у даному напрямку;
- перелік посилань (References).

2. Вимоги до структури рукопису

Структурно матеріали статті поділяються на такі елементи:

- УДК;
- прізвища та ініціали авторів статті;
- заголовки статті;
- анотація до статті;
- основний текст статті;
- перелік посилань;
- дата надходження статті до редколегії збірника;
- відомості про авторів статті;
- реферати українською та англійською мовами.

Бажаний порядок та зміст розділів основного тексту статті:

а) розділ 1 «Вступ», в якому визначається проблема у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими та практичними задачами;

б) розділ 2 «Аналіз літературних джерел та визначення проблеми дослідження», в якому наводяться результати аналізу останніх досліджень та публікацій, де розпочато вирішення даної проблеми та на які спирається автор, виділяються невирішені раніше частини загальної проблеми дослідження та конкретизується головна проблема дослідження у даній статті;

в) розділ 3 «Мета і задачі дослідження», в якому наводяться описи мети дослідження та задач дослідження, вирішення яких дозволяє досягти визначеної раніше мети дослідження;

г) розділ 4 «Матеріали і методи дослідження», в якому наводяться описи формального апарату та раніше проведених експериментальних досліджень, які будуть використані у подальшому тексті статті;

д) розділ 5 «Результати дослідження», в якому структуровано наводяться результати вирішення сформульованих у розділі 3 окремих задач дослідження (теоретичних та експериментальних);

е) розділ 6 «Обговорення результатів дослідження», в якому наводяться: опис особливостей отриманих результатів дослідження та їхньої відмінності від результатів попередніх досліджень у відповідній галузі; опис переваг отриманих результатів перед існуючими; опис недоліків і обмежень, які утруднюють використання отриманих результатів дослідження; опис подальших перспектив проведення досліджень за цим напрямом;

ж) розділ 7 «Висновки», в якому наводяться стислі описи отриманих результатів вирішення окремих задач дослідження та загальний висновок про досягнення поставленої у розділі 3 мети дослідження.

Заголовки окремих розділів основного тексту статті можуть змінюватися відповідно до змісту конкретної статті.

Розділи основного тексту статті, перелік посилань, дата надходження статті до редколегії збірника та відомості про авторів статті відокремлюються один від одного одним порожнім рядком.

3. Вимоги до оформлення рукопису

До розгляду приймаються матеріали статей обсягом не менше 5 повних сторінок (з урахуванням рисунків і таблиць).

Матеріали статті повинні бути набраними у редакторі MS Word. Припустимі формати файлу з матеріалами статті – .doc або .docx.

Формат сторінки – А4 (210x297 мм). Поля знизу, зверху, справа, зліва – 3 см.

Основний текст статті набирається шрифтом Times New Roman, кегль 11, інтервал – 1,1, абзацний відступ – 8 мм, інтервали перед і після – 0 мм, вирівнювання по ширині.

Для УДК – шрифт Times New Roman, кегль 11, інтервал – 1,1, абзацний відступ – 8 мм, інтервал перед – 0 мм, інтервал після – 6 мм, вирівнювання по ширині.

Для прізвищ та ініціалів авторів статті – шрифт Times New Roman, кегль 11, інтервал – 1,1, абзацний відступ – 8 мм, інтервали перед і після – 6 мм, вирівнювання по ширині.

Для заголовка статті – шрифт Times New Roman, кегль 11, напівжирний, інтервал – 1,1, абзацний відступ – 8 мм, інтервали перед і після – 6 мм, вирівнювання по ширині.

Для анотації – шрифт Times New Roman, кегль 10, інтервал – 1,1, відступ зліва – 0,8 см, абзацний відступ – 8 мм, інтервал перед – 6 мм, інтервал після – 0 мм, вирівнювання по ширині.

Для заголовків таблиць – шрифт Times New Roman, кегль 10, інтервал – 1,1, абзацного відступу немає, інтервали перед і після – 0 мм, слово «Таблиця» та її номер – з вирівнюванням вправо, назва таблиці (якщо вона є) – з вирівнюванням по центру.

Для підписуваних підписів – шрифт Times New Roman, кегль 10, інтервал – 1,1, абзацного відступу немає, інтервали перед і після – 0 мм, вирівнювання по центру.

Для переліку посилань та відомостей про авторів – шрифт Times New Roman, кегль 9, інтервал – 1,1, абзацний відступ – 8 мм, інтервали перед і після – 0 мм, вирівнювання по ширині.

Для рефератів – шрифт Times New Roman, кегль 10, інтервал – 1,1, абзацний відступ – 8 мм, інтервали перед і після – 0 мм, вирівнювання по ширині.

Формули набираються у редакторі формул Microsoft Equation або MathType, розташовуються у центрі робочого поля, нумерація – з правої сторони поля. Для цього необхідно весь рядок розташувати справа, а потім вирівняти формулу табуляціями так, щоб вона розташовувалася по центру. Відступ зверху і знизу – по 6 пунктів. Нумерація формул усередині кожної статті наскрізна.

Формули, а також їхні складові, присутні у тексті, набираються з такими параметрами (див. рис. 1).

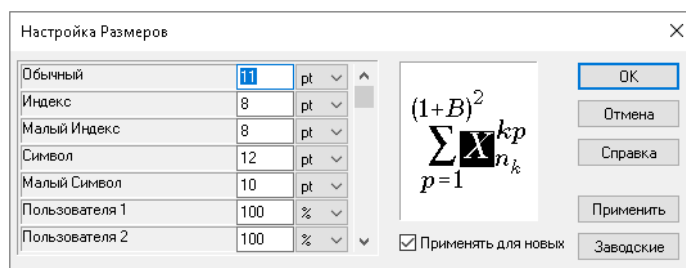


Рис. 1. Параметри настроювання розмірів редактора формул MathType

Кожна таблиця виконується та розташовується в тексті одразу після посилання на неї. Усі таблиці у статті обов’язково нумеруються, незважаючи на їх кількість. Таблиця відокремлюється від попереднього та наступного тексту (таблиці, рисунку тощо) одним порожнім рядком.

Дані всієї таблиці набираються шрифтом розміром 10 пунктів, розміщуються по центру; у випадках, коли необхідно показати розрядність, – вирівнювання за знаком. Товщина сітки таблиці – 1 пункт. Приклад оформлення таблиці наведено на рис. 2.

Таблиця 1

Множина описів сутностей функціональної задачі

ID	Найменування
1	Academic_load
2	Academic
3	Department
4	Individual_plan
5	Academic_section

Рис. 2. Приклад оформлення таблиці у тексті статті.

Бажано таблицю зі сторінки на сторінку не переносити. Якщо таблиця не може розміститися на сторінці, її поділяють на частини. У кожній частині таблиці повторюють її головку та боковик або замінюють їх відповідно номерами колонок або рядків, нумеруючи їх арабськими цифрами на першій частині таблиці. Слово «Таблиця» подається лише над першою її частиною. Над наступними її частинами праворуч друкується: «Продовження таблиці», а на останній – «Кінець таблиці», в усіх випадках вказується номер таблиці.

Кожен рисунок виконується та розташовується в тексті одразу після посилання на нього. Усі рисунки в статті обов'язково нумеруються, незважаючи на їх кількість. Необхідно вставляти рисунки у текст як графічні об'єкти (файли з розширенням .bmp, .jpg, .tiff чи .png, якість не менше 300 dpi), об'єкти MS Word або MS Visio.

Рисунок відокремлюється від попереднього та наступного тексту (таблиці, рисунку тощо) одним порожнім рядком.

Кожен рисунок повинен мати підписування, в якому вказується номер та, у випадку необхідності, назва рисунку. Якщо рисунок займає менше 50 % ширини робочого поля, то можна зробити обтікання рисунку текстом, розташувавши його ліворуч або праворуч від робочого поля. Приклад рисунку з підписом наведений на рис. 3.

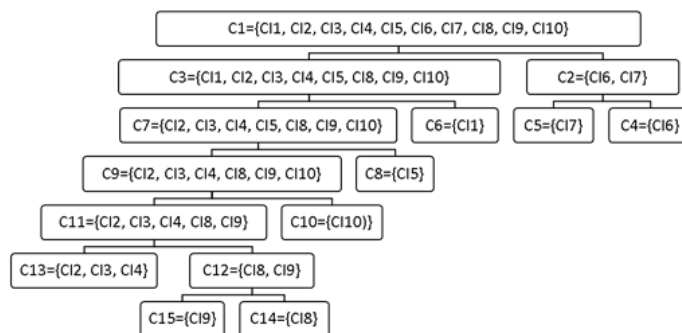


Рис. 3. Приклад виконання рисунку та підписування

Посилання на літературні та електронні джерела у тексті статті позначаються у квадратних дужках [1]. До переліку посилань включаються тільки ті роботи, на які посилається автор статті. Посилання на неопубліковані роботи не допускаються.

Для оформлення переліку посилань слід використовувати один з таких шаблонів:

а) шаблон IEEE (автоматичне оформлення за шаблоном IEEE <https://www.citethisforme.com/ieee/source-type>);

б) положення ДСТУ 8302:2015 «Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання» та ДСТУ 3582:2013 «Інформація та документація. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень українською мовою. Загальні вимоги та правила».

Кожен з цих шаблонів слід використовувати для оформлення усіх елементів переліку посилань. Використання двох шаблонів для оформлення одного й того ж переліку посилань неприпустимо.

Кожне посилання у переліку посилань наводиться за порядком появи цих посилань у тексті статті.

У переліку посилань бажано використовувати посилання на сучасні публікації, вік яких не перевищує п'яти років у момент подачі статті до редакції. Крім того, під час формування переліку посилань статті необхідно дотримуватися такого розподілу: самоцитування – до 20 %, цитування зарубіжних публікацій – не менше 50%.

Відомості про авторів слід наводити українською та англійською мовами. У відомості про авторів слід включати: повні прізвище, ім'я та по-батькові; вчений ступінь (за наявності); вчене звання (за наявності); посаду; країну, місто; e-mail (вкрай бажано вказувати

корпоративний e-mail, можна вказувати кілька e-mail, на які ви бажаєте отримувати повідомлення від редакції та читачів, які можуть зацікавитися вашою статтею); ORCID.

Реферат набирається українською та англійською мовами. Реферат повинен бути змістовним, дотримуватися логіки опису результатів у статті та давати можливість встановити її основний зміст. Реферат не повинен містити формул та рисунків. Необхідні символи в рефераті необхідно додавати через функцію вставки символів.

Реферат містить: УДК, назву статті (напівжирним шрифтом), ініціали та прізвища авторів (курсивом), текст (не менше 1800 друкованих знаків з пробілами та ключовими словами), ключові слова, кількість таблиць, рисунків та посилань у статті.

Ключові слова повинні містити до 10 слів, а не словосполучень, без використання аббревіатур, в іменному відмінку, розділятися крапкою з комою.

Реферати надаються до редколегії разом із статтею у вигляді окремого файлу.

4. Правила надсилання статей та подальшої взаємодії з редакційною колегією збірника

До редколегії збірника «АСУ та прилади автоматики» слід надсилати такі матеріали:

- файл у форматі .doc або .docx з текстом статті українською мовою;
- файл у форматі .doc або .docx з текстом статті англійською мовою (якщо автори бажають опублікувати статтю у збірнику англійською мовою);
- файл (у форматі .doc або .docx з текстами рефератів статті українською та англійською мовами;
- відскановану копію експертного висновку з дозволом опублікувати матеріали статті у відкритому друку. В разі потреби експертні висновки для авторів – співробітників (студентів, аспірантів тощо) ХНУРЕ можуть оформлюватися редколегією централізовано.

Матеріали статей надсилати електронною поштою – за адресою maksim.ievlanov@nure.ua.

Кожна надіслана в редакцію стаття після проходження рецензування і при позитивному рішенні редколегії буде надрукована в найближчому випуску збірника. Для цього авторам від імені редколегії надсилається ліцензійний договір, який закріплює право першої публікації статті у збірнику «АСУ та прилади автоматики». Автори статті повинні підписати цей ліцензійний договір та завірити свої підписи печаткою організації, в якій вони працюють. Підписаний ліцензійний договір автори статті надсилають на адресу редколегії збірника.

Відповідальний випусковий В.М. Левикін
Редактор О.Є. Неумивакіна
Комп'ютерна верстка М.В. Євланов, О.Є. Неумивакіна
Дизайн обкладинки номера за участю Є.Чех

Підп. до друку 22.05.2024. Формат 60x841/8. Умов. друк. арк.
Обл.-вид. арк. 13,4. Тираж 300 прим.
Зам. № 144. Ціна договірна.

Харківський національний університет радіоелектроніки (ХНУРЕ).
Україна, 61166, Харків, пр. Науки, 14

Оригінал-макет підготовлено у редакційно-видавничому відділі ХНУРЕ,
Україна, 61166, Харків, пр. Науки, 14

Збірник віддруковано в ТОВ «ДРУКАРНЯ МАДРИД»
61024, м. Харків, вул. Гуданова, 18
Тел.: +38(057)7565325
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
Серія ДК № 4399 від 27.08.2012 р.
www.madrid.in.ua e-mail:info@madrid.in.ua