

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"

Серія: Інформатика та моделювання

№ 1 (5) 2021

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

Харків
НТУ "ХПІ", 2021

Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2021. – № 1 (5). – 155 с.

Державне видання

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації України

КВ № 23774-13614Р від 14 лютого 2019 року

Збірник виходить українською, російською та англійською мовами.

Віснику Національного технічного університету "ХПІ" присвоєно категорію В та внесено до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук", затвердженого наказом Міністерства освіти і науки України № 409 (додаток 1) від 17.03.2020 р.

Серія "Інформатика та моделювання" Вісника НТУ "ХПІ" включена у наукометричні бази Copernicus (Польща), Elibrary (РІНЦ), DOAJ (Швеція), Google Scholar і базу даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Головний редактор

Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ "ХПІ", Україна

Заст. головного редактора

Марченко А. П., д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ", Україна

Секретар

Горбунов К. О., доц., НТУ "ХПІ", Україна

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: Дмитрієнко В. Д., д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: Леонов С. Ю., д-р техн. наук, проф.

Члени редколегії:

О.П. Арсеньєва, д-р техн. наук, проф.;

Є.Г. Жилияков, д-р техн. наук, проф.;

О.Ю. Заковоротний, д-р техн. наук, проф.;

М.І. Корсунов, д-р техн. наук, проф.;

Г.А. Кучук, д-р техн. наук, проф.;

О.С. Логунова, д-р техн. наук, проф.;

Р.П. Мигущенко, д-р техн. наук, проф.;

А.І. Поворознюк, д-р техн. наук, проф.;

Г.А. Самігуліна, д-р техн. наук, проф. (Казахстан);

О.А. Серков, д-р техн. наук, проф.;

Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.;

Г.Є. Філатова, д-р техн. наук, проф.;

А.Г. Трифонов, д-р техн. наук, проф. (Білорусь);

Х. Гамзаєв, д-р техн. наук, проф. (Азербайджан);

Б.А. Худаяров, д-р техн. наук, проф. (Узбекистан);

I. Zanevsky, PhD, prof. (Polska);

D. Sakara, PhD, prof. (Switzerland);

Jiri Jaromir Klemes, Dr., Prof (Czech Republic);

Issa Shehabat, Dr., Assistant Professor (Jordan);

David J. Kukulka, PhD (USA);

Badur Tchunashvili, Dr., Prof (Georgia);

Javad Khamisabadi, Dr. (Iran);

М.К. Усаров, д-р фіз.-мат. наук, с.н.с., (Узбекистан).

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ "ХПІ"

Протокол № 06 від 24.06.2021 р.

ISSN 2079-0031 (Print)

ISSN 2411-0558 (Online)

© Національний технічний університет "ХПІ", 2021

Розміщення Вісника НТУ "ХПІ"
серія "Інформатика та моделювання"

в міжнародних наукометричних базах, репозитаріях та пошукових системах

1. Serial registries: ISSN, Ulrich's Periodical Directory (USA).

2. Abstracting systems: Copernicus (Poland), eLibrary (Russia), CiteFactor, SIS (Scientific Indexing Services), Open Academic Journals Index (Russia), UIF (Universal Impact Factor), Directory of Research Journals Indexing (India).

3. Web-based search systems: Google Scholar, Academic Index.

4. Electronic Libraries: Cyberleninka (Russia), Bielefeld Academic Search Engine (Germany), Open Journal Systems (Ukraine), Національна бібліотека ім. Вернадського (Ukraine), Науково-технічна бібліотека НТУ "ХПІ" (Ukraine), Text Archive (Russia).

5. Journal databases: Directory of open access journals (Sweden), OCLC WorldCat (USA), Research Bible (Japan), Genamics Journal Seek (USA), SHERPA/RO-MEO, Academic Database Assessment Tool.

6. University Libraries: **USA:** Walden University, Beardsley Library Journals, University at Albany, University of Texas, WRLC Catalogs, University Oregon, Monterey Bay Library, University of Kentucky, University of Georgia, Indiana University, Harvard Library, New York University, Northwestern University, San Jose State University, Library & Technology Services, Mercyhurst College Library System, Poudre River Public Library District, Virtual Science Library, Journal index, Jean and Alexander Heard Library. **UK:** Birmingham Public Library, British Library, Social Services Knowledge Scotland, Linking Service, University of Strathclyde Glasgow, SUPRIMO Library, University of Glasgow, Royal Holloway University of London, University of Cambridge, University of Essex, University of Nottingham, One Search, UCL Library Services. **Canada:** University of New Brunswick, Trinity Western University, University of Saskatchewan, University of Ottawa, University of Regina, University of Windsor, Laurentian University. **Australia:** Latrobe University Library, The Grove Library, State Library, SL On Search, Griffith University, UniSA. **Sweden:** IBRIS – Nationally bibliotheca system, Hogskolan Dalarna, Sodertorns hogskola, Stockholms University Library, Chalmers Bibliotheca. **Netherlands:** Quality Open Access Market, University of Leiden. **Mexico:** University Mexico, CCG-IBT Bibliotheca. **Other countries:** Universia (Spain), Babord+ (France), SLU (Sweden), Cerge EL (Czech Republic), BON (Portugal), AUT Library (New Zealand), Polska Bibliografia Naukowa (Poland), State National Technical Library (Ukraine), Scientific Library named by Govorov (Russia, St. Petersburg), University bibliothek Gent (Belgium), E-Resources Subject Access (China).

Електронна адреса сайту Вісника НТУ "ХПІ" серії "Інформатика та моделювання" www.pit.net.ua

ЗМІСТ

<i>Розміщення Вісника НТУ "ХПІ" серії "Інформатика та моделювання" в міжнародних наукометричних базах, репозитаріях та пошукових системах</i>	3
---	---

Математичні методи та моделі

<i>Гончаренко Т.А., Міхайленко В.М., Доля О.В. Інваріантність інформаційного моделювання прибудинкової території протягом життєвого циклу</i>	5
<i>Повхан І.Ф. Метод алгоритмічних дерев класифікації на основі обмежень</i>	17

Комп'ютерна інженерія

<i>Дмитриенко В.Д., Мезенцев М.В. Комп'ютерні компоненти для рішення проблем оптимального управління рухомим складом залізниць України</i>	40
<i>Ширяева О.И., Самигулин Т.И. Интеграция современной микропроцессорной техники распределённой системы управления с алгоритмами AIS</i>	56

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

<i>Дашкевич А.О. Метод розташування точок на площині із урахуванням їх взаємної досяжності</i>	69
--	----

Інформаційні технології

<i>Вавіленкова А.І. Взаємозв'язок типів окремих форм логіко-лінгвістичних моделей та видів речень природної мови</i>	77
<i>Кошевий М.Д., Ащепкова Н.С. Метод синтезу оптимальних траєкторій схвату маніпулятора автономного мобільного робота</i>	86
<i>Мнушка О.В., Леонов С.Ю., Шапошникова О.П., Савченко В.М. Модель інформаційної технології віддаленого моніторингу із можливістю керування технологічними процесами та об'єктами</i>	99

Покришка С.А., Шумова Л.О. Удосконалення рекомендаційної веборієнтованої системи з використанням колаборативної фільтрації	115
---	-----

Біологічні та медичні прилади і системи

Алмазова О.Б., Лисиченко М.Л. Вплив ультрафіолетового випромінювання на кінетичні характеристики в еритроцитах	125
Pavlenko V.D., Shamanina T.V., Chori V.V. Biometric method of personality authentication based on the eye tracking data	142

УДК 004.942:045

DOI: 10.20998/2411-0558.2021.01.01

Т. А. ГОНЧАРЕНКО, канд. техн. наук, доц., КНУБА, Київ,

В. М. МІХАЙЛЕНКО, д-р техн. наук, проф., КНУБА, Київ,

О. В. ДОЛЯ, канд. техн. наук, доц., КНУБА, Київ

ІНВАРІАНТНІСТЬ ІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИБУДИНКОВОЇ ТЕРИТОРІЇ ПРОТЯГОМ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

В статті розглянуто вирішення проблеми розробки уніфікованої інформаційної моделі прибудинкової території з додатковими активами протягом всього життєвого циклу. Запропонована параметризація створення уніфікованої моделі об'єкта дозволяє інтегрувати модель управління прибудинковою територією в уніфіковану інформаційну модель об'єкта нерухомості. Іл.: 4. Бібліогр.: 14 назв.

Ключові слова: параметризація створення уніфікованої моделі; уніфікована інформаційна модель; прибудинкова територія; модель об'єкта нерухомості.

Аналіз літератури та постановка проблеми. Для створення комфортного міського середовища для сталого розвитку найбільш відповідним способом є збір і подальше використання інформації з різних рівнів: фізичного, інженерного, юридичного, економічного, екологічного тощо [1]. Такий величезний обсяг інформації має бути застосований ефективно, швидко, якісно і бути зрозумілим для прийняття ефективних управлінських рішень. Для таких вимог є відповідне програмне забезпечення та методи представлення даних. Інформаційне моделювання будівель (BIM – Building Information Model або Modeling) – це процес створення єдиної уніфікованої моделі (UM – unified model), який включає різні додаткові активи [2].

Додаткові активи – це технологічні, організаційні та економічні та інші моделі, які доповнюють одна одну, коли збільшення одного активу збільшує інвестиційний ефект іншого [3]. Додаткові активи взаємно підвищують ефективність проекту будівництва. Іншими словами, додаткові активи повинні розвиватися разом, як це є в уніфікованій моделі (UM). Аналіз наукових праць [4 – 10] дозволяє запропонувати узагальнюючу схему основних компонентів уніфікованої інформаційної моделі об'єкта будівництва з додатковими активами протягом всього життєвого циклу, яка представлена на рис.1.

Наприклад, модель будівлі, створена дизайнером, а потім вдосконалена протягом проекту, має шанс стати "реальною" моделлю. У цю модель будуть включені всі технічні характеристики, інструкція із експлуатації та технічного обслуговування та гарантійна інформація до

© Т.А. Гончаренко, В.М. Михайленко, О.В. Доля, 2021

стадії управління об'єктом нерухомості у майбутньому. Це дозволить власнику оцінити економічну ефективність та доцільність запропонованих змін на етапах проектування та будівництва.

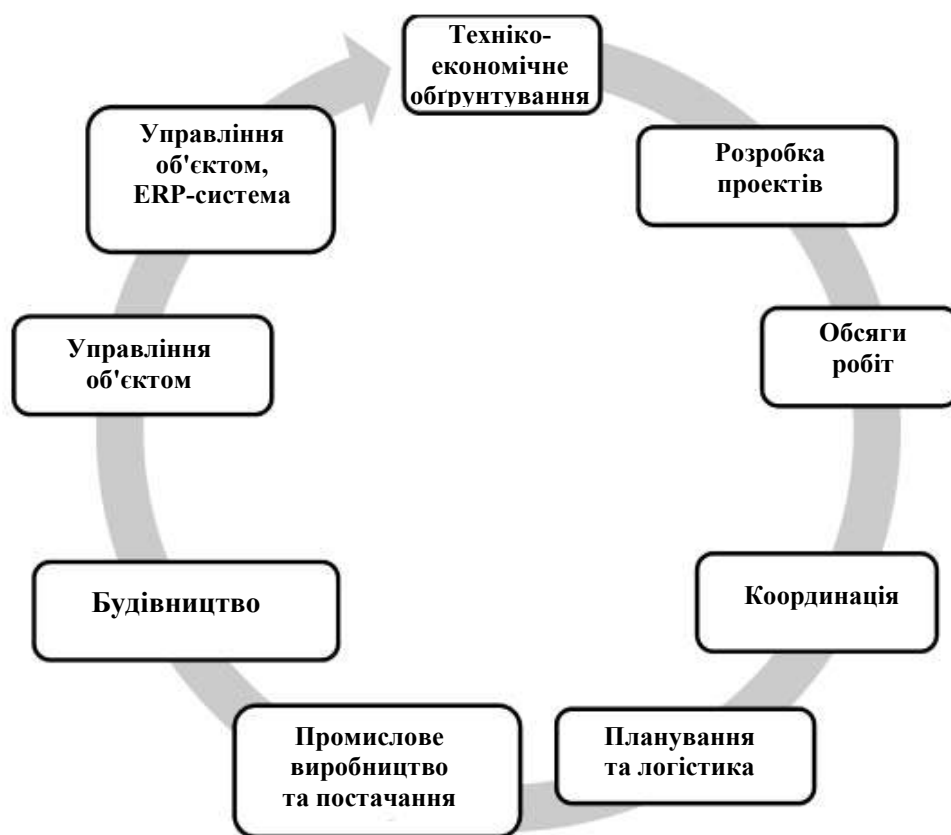


Рис. 1. Уніфікована інформаційна модель об'єкта будівництва з додатковими активами протягом всього життєвого циклу

Мета статті – запропонувати вирішення проблеми розробки уніфікованої інформаційної моделі прибудинкової території з додатковими активами протягом всього життєвого циклу, для чого здійснити параметризацію створення уніфікованої моделі, яка дозволить інтегрувати модель управління прибудинковою територією в уніфіковану інформаційну модель об'єкта нерухомості.

Параметризація створення уніфікованої моделі. Параметричне моделювання (або параметризація) базується на створенні моделі з використанням параметрів елементів об'єкта та взаємозв'язків між цими параметрами [11]. Сукупність програмних продуктів, які беруть участь у

певному проекті будівництва, мають конкретні моделі з певними опціями. З метою зберігання інформації про компоненти база даних запроєктованих моделей містить:

- 1) геометричні параметри об'єкта (розмір, площа, об'єм тощо);
- 2) семантичні параметри фізичного об'єкта (маса, матеріальні фізичні константи тощо);
- 3) присвоєні атрибутивні параметри об'єкта (ідентифікатор, назва, переріз, маркування, коди тощо).

Параметрична модель об'єкта будівництва інтегрує тривимірну модель (геометрію та дані) з моделлю взаємозв'язків та поведінки елементів між собою. Вся робоча документація формується на цій заповненій базі даних. Усі зміни оновлюються автоматично. Послідовна модель змін нагадує комірки таблиці змін, значення яких наведені формулами. Формули дозволяють автоматизувати системи розрахунку та параметричного моделювання об'єкта будівництва, автоматизувати отримання будівельних документів.

Математичну модель параметричного моделювання загальної інформаційної моделі, що визначається множиною компонентів та множиною моделей проектних рішень N_j пропонується подавати в такому вигляді:

$$N_j = \{E, P, R, D, C\}_j, \quad (1)$$

де E – множина елементів структури, яка визначається як $\{E_1, \dots, E_{NE}\}$, де NE – кількість елементів структури; P – набір параметрів, який визначається множиною $\{P_1, \dots, P_{NP}\}$, де NP – кількість параметрів; R – набір вимог і обмежень для моделі, який визначається множиною $\{R_1, \dots, R_{NR}\}$, де NR – кількість вимог і обмежень; D – набір вподобань, який визначається множиною $\{D_1, \dots, D_{ND}\}$, де ND – кількість вподобань; C – набір функцій витрат, який визначається множиною $\{C_1, \dots, C_{NC}\}$, де NC – кількість функціональних залежностей.

Відповідно множина проектних рішень визначається таким чином:

$$N = \{N_j\}, j = 1, \dots, J, \quad (2)$$

де J – кількість проектних рішень.

Елемент структури визначає примітивний елемент моделі дизайну. Параметри відображають значення елемента. Кожен параметр пов'язаний з діапазоном значень. Значення параметрів, визначених функціональними вимогами і обмеженнями. Бажання чи переваги клієнта або всієї системи також відображаються в рівнянні. Принципи

параметризації сучасного програмного забезпечення дозволяють інформаційній моделі бути інваріантною до зміни формату різних програмних систем.

Єдина інформаційна модель. Для єдиної моделі мають бути зібрані дані для інформаційної моделі на всіх етапах життєвого циклу проекту. Виділимо основні етапи створення інформаційної моделі:

1. Етап планування:
 - Інвестиційне планування,
 - Фінансове моделювання,
 - Бізнес-планування.
2. Етап виконання:
 - Управління процесом,
 - Прикладний (включаючи календарне планування),
 - Закупівля,
 - Будівництво,
 - Введення об'єкта в експлуатацію,
 - Експлуатація.
3. Кінцевий етап:
 - Реконструкція,
 - Модернізація,
 - Виведення з експлуатації.

Етап планування. Процес планування складається з процесів, що проводяться для визначення загального змісту робіт, проведення та уточнення цілей та вироблення послідовності дій, необхідних для досягнення цих цілей. Під час процесу планування повинен розроблятися план управління проектом та проектна документація. Складний характер прийняття проектних рішень створює ланцюжок зворотного зв'язку для подальшого аналізу. Після отримання та інтерпретації додаткової інформації або характеристик проекту може знадобитися додаткове планування. Суттєві зміни, що відбуваються протягом життєвого циклу проекту, призводять до необхідності перегляду одного або декількох процесів планування та, можливо, ініціювання процесів. Основною метою планування є інтеграція всіх учасників проекту для виконання комплексу робіт, що забезпечують досягнення результатів проекту. Цей етап являє сукупність дій, що передбачає цілі та параметри взаємодії між роботою і організацією сторін, розподіл ресурсів та вибір інших організаційних, технологічних та економічних рішень, що забезпечують досягнення цілей проекту.

Етап виконання. На етапі втілення моделі генерального планування безпосередньо на території під забудову має бути враховані всі процеси з уніфікованої моделі (рис. 2).

Після формування інженерної моделі проектувальник або BIM менеджер повинен збирати та додавати організаційну, технологічну, економічну інформацію в уніфіковану модель вже прибудинкової території.

Найскладніший етап – це етап управління об'єктом. На етапі будівництва необхідно контролювати процеси будівництва та розробки виконавчої документації. По закінченню будівництва керуюча компанія повинна створити інформаційний та електронний банк даних для поточного об'єкта, заснований на технічній документації або на додатковій уніфікованій інформаційній моделі на основі технології інформаційного моделювання, яка буде містити вхідні дані та систему показників [12].



Рис. 2. Єдина інформаційна модель на етапі реалізації генерального планування для завершення розробки проектної документації

Етап управління. Протягом життєвого циклу виникають кількісні та якісні зміни, які додаються в БД системи обліку об'єкта нерухомості. Умови та форми подання інформаційних даних повинні бути зафіксовані стандартною документацією. Інформаційна модель має оцінювати і відстежувати витрати протягом життєвого циклу прибудинкової території та оптимізувати їх.

Головною метою на етапі експлуатації та управління прибудинковою територією є моделювання і тестування сценаріїв безпеки та алгоритмів збереження кожної системи життєзабезпечення об'єкта нерухомості як у стандартній, так і в надзвичайних ситуаціях таких як прорив трубопроводу, виникнення затоплення чи пожежі,

порушення зв'язку, необхідність проведення робіт по благоустрою чи озелененню території тощо [13]. У процесі моделювання має бути розроблена інформаційна система управління будівлею (Building Management Systems) та підпорядкована їй система життєзабезпечення управління прибудинковою територією. На рис. 3 запропонована інформаційна модель для етапу управління прибудинковою територією.

Експлуатуюча компанія уточнює свої вимоги до технічних, виробничих та експлуатаційних характеристик кожної системи життєзабезпечення будівлі. Після завершення роботи дані з моделей на етапах інжинірингу та будівництва передаються у модель експлуатації інтегрованої системи життєзабезпечення будівлі, яка має оптимально відповідати всім вимогам довкілля, енергоефективності, безпеки та ергономіки, а також враховувати витрати на її експлуатацію та обслуговування [14]. Проблема, яка виникатиме в такій інформаційній системі і потребує вирішення – це верифікація інформаційних даних для автоматизованого оновлення моделі на етапі управління об'єктом нерухомості.

Інтеграція моделі управління прибудинковою територією в уніфіковану інформаційну модель об'єкта нерухомості. Для поліпшення якості житлової забудови в цілому необхідно в єдину інформаційну модель об'єкта нерухомості вводити дані показників кожної інженерної мережі будівлі (водопостачання, опалення, вентиляції, системи управління електроживленням, внутрішнє та зовнішнє освітлення тощо).

На рис. 4 надана уніфікована інформаційна модель комунальної системи на етапі експлуатації і управління прибудинковою територією. Процес експлуатації, управління об'єктами нерухомості та комунальними послугами включає моніторинг і зовнішніх інженерних мереж, їх безпеку та автоматизацію роботи, реєстрацію аварій, плановий ремонт, розрахунок енергії, зміну поточних налаштувань, автоматизоване управління системами. Благоустрій території теж потребує інформаційної підтримки щодо планових робіт по озелененню та підтримання в доброму стані малих архітектурних форм.



Рис. 3. Інформаційна модель етапу управління прибудинковою територією



Рис. 4. Уніфікована інформаційна модель комунальної системи на етапі експлуатації і управління прибудинковою територією

Уніфікована інформаційна модель управління об'єктом нерухомості має базуватися на моделі об'єкта будівництва, яка для подальшого використання наповнюється відповідними інформаційними даними на етапі експлуатації, що потребує відповідних методів верифікації та інтеграції БД для розробки інформаційної системи з використанням BIM-орієнтованого програмного забезпечення.

Висновки. Проведене дослідження дозволяє виділити ключові переваги використання параметричного моделювання у застосуванні додаткових активів для розробки уніфікованої інформаційної моделі об'єкта будівництва протягом всього життєвого циклу, що дозволяє:

- виявити параметри моделі з різних аспектів;
- зменшити кількість помилок у проектних рішеннях та колізій через погану координацію між будівельниками та проектувальниками;
- вибрати найкращі можливі варіанти з альтернативних;
- мати широкий спектр можливостей для аналізу та моделювання;
- контролювати вартість будівництва шляхом прямого обліку всіх змін;
- працювати над складними проектами;
- підтримувати прийняття управлінських рішень на всіх етапах життєвого циклу.

Наукова новизна дослідження полягає у розробці уніфікованої інформаційної моделі комунальної системи на етапі експлуатації і управління прибудинковою територією, яка має базуватися на моделі об'єкта будівництва. Практична цінність результатів дослідження полягає у виявленні необхідності використання BIM-орієнтованого програмного забезпечення для інтеграції моделі прибудинкової території в уніфіковану інформаційну модель об'єкта нерухомості.

Додаткова уніфікована модель, заснована на BIM, бере участь у всіх фазах життєвого циклу проекту, включаючи технічне обслуговування та експлуатацію. Тому основною метою BIM-менеджерів має стати створення діючої автоматизованої системи для забезпечення подальшого використання об'єкта будівництва та його систем вже як об'єкта експлуатації. Ця система має вбирати інформаційні БД, які були зібрані протягом попередніх етапів життєвого циклу.

Для подальших наукових досліджень передбачається вирішення проблеми застосування BIM можливостей програмних продуктів для забезпечення інтеграції різних БД до єдиної БД.

Список літератури:

1. *De Santana S.A.* Modeling urban landscape: new paradigms and challenges in territorial representation / *S.A. De Santana* // *Disegnare con.* – 2013. – № 6 (11). – P. 161-174.
2. *Azhar S.* BIM-based approach for communicating and implementing a construction site safety plan / *S. Azhar, A.A. Behringer* // 49th ASC Annual International Conference Proceedings. – Associated Schools of Construction, 2013.
3. *Eastman C.M.* BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors / *C.M. Eastman.* – John Wiley & Sons. – 2011.
4. *Biancardo S.A.* BIM-Based Design for Road Infrastructure: A Critical Focus on Modeling Guardrails and Retaining Walls / *S.A. Biancardo, N. Viscione, A. Cerbone, E. Dessì* // *Infrastructures.* – 2020. – Vol. 5. – P. 59.
5. *Kulikov P.* OLAP-Tools for the Formation of Connected and Diversified Production and Project Management Systems / *P. Kulikov, G. Ryzhakova, T. Honcharenko, D. Ryzhakov, O. Malykhina* // *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering.* – 2020. – Vol. 8 (10). – P. 7337-7343.
6. *Гончаренко Т.А.* Застосування BIM-технології для створення інформаційної моделі території під забудову / *Т.А. Гончаренко* // *Управління розвитком складних систем.* – К.: КНУБА, 2018. – Вип. 33. – С. 131–138.
7. *Горковчук Д.В.* Розроблення геоінформаційної моделі зонування міських територій для використання в системах містобудівного кадастру / *Д.В. Горковчук* // *ScienceRise.* – 2016. – № 2 (29).
8. *Гончаренко Т.А.* Інструменти інформаційного забезпечення визначення прихованого потенціалу розвитку міських територій для реалізації проєктів генерального планування комплексної житлової забудови / *Т.А. Гончаренко, В.М. Михайленко* // *Управління розвитком складних систем.* – 2020. – № 44. – С. 70–77.
9. *Максимова Ю.С.* Об'єктно-орієнтована модель геопросторових даних генерального плану / *Ю.С. Максимова* // *Управління розвитком складних систем.* – 2017. – № 31. – С. 92–100.

10. Гончаренко Т.А. Структура методології СІМ для інформаційного моделювання міського середовища на основі інтеграції BIM та GIS технологій / Т.А. Гончаренко // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Серія: Інформатика та моделювання. – 2020. – № 2 (4). – С. 42-53.
11. Гончаренко Т.А. Інтеграційна модель життєвого циклу території будівлі на основі BIM / Т.А. Гончаренко // Управління розвитком складних систем. – 2020. – № 43. – С. 83–90.
12. Безлюбченко О.С. Планування і благоустрій міст-[Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://masters.kubg.edu.ua/index.php/art/article/%20view/314/292#.X2oRM2gzZPa>
13. Гончаренко Т.А. Застосування методів багатовимірного аналізу даних для моделювання території під забудову / Т.А. Гончаренко, В.М. Михайленко // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Серія: Інформатика та моделювання, 2019. – № 28 (1353). – С. 5–15.
14. Лященко А.А. Системні вимоги до сучасного містобудівного кадастру та містобудівної документації / А.А. Лященко // Містобудування та територіальне планування. – 2013. – № 47. – С. 397 –405.

References:

1. De Santana, S.A. (2013), "Modeling urban landscape: new paradigms and challenges in territorial representation", *Disegnare con.*, No. 6 (11), pp. 161–174.
2. Azhar, S., and Behringer, A. (2013), "A BIM-based approach for communicating and implementing a construction site safety plan", *49th ASC Annual International Conference Proceedings, Associated Schools of Construction*, <https://ascpro0.ascweb.org/archives/cd/2013/paper/CPRT43002013.pdf>
3. Eastman, C.M., et al. (2011), *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*, John Wiley & Sons.
4. Biancardo, S.A., Viscione, N., Cerbone, A. and Dessì, E. (2020), "BIM-Based Design for Road Infrastructure: A Critical Focus on Modeling Guardrails and Retaining Walls", *Infrastructures*, Vol. 5, 59, <https://doi.org/10.3390/infrastructures5070059>.
5. Kulikov, P., Ryzhakova, G., Honcharenko, T., Ryzhakov, D., and Malykhina, O. (2020), "OLAP-Tools for the Formation of Connected and Diversified Production and Project Management Systems", *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, Vol. 8 (10), pp. 7337-7343, <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/1108102020>.
6. Honcharenko, T. (2018), "The use of BIM-technology to create an information model territories for development", *Management of Development of Complex Systems*, Vol. 33, pp. 131–138,
7. Gorkovchuk, D.V. (2016), "Development of a geoinformation model of zoning of urban areas for use in urban cadastre systems", *ScienceRise*. – No 2 (29).
8. Honcharenko, T., and Mihaylenko, V. (2020), "Information support tools for determining the hidden development potential of urban areas for the implementation of master planning projects of integrated housing", *Management of Development of Complex Systems*. Kyiv, 44, 70–77, doi.org/10.32347/2412-9933.2020.44.
9. Maximova, Yu.S. (2017), "Object-oriented model of geospatial data of the master plan", *Management of complex systems development*, No. 31, p. 92–100.
10. Honcharenko, T.A. (2020), "Structure of CIM methodology for information modeling of the urban environment based on the integration of BIM and GIS technologies", *Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling*. – Kharkov: NTU "KhPI" – No. 2 (4), pp. 42-53.
11. Honcharenko, T., Mihaylenko, V., Borodavka, Y., Dolya, E., and Savenko, V. (2021),

"Information tools for project management of the building territory at the stage of urban planning", *CEUR Workshop Proceedings*, Vol. 2851, pp. 22-33.

12. Bezlyubchenko, O.S. Planning and improvement of cities – [Electronic resource]. Access <http://masters.kubg.edu.ua/index.php/art/article/%20view/314/292#.X2oRM2gzZPa>

13. Honcharenko, T., and Mihaylenko, V. (2020), "Information support tools for determining the hidden development potential of urban areas for the implementation of master planning projects of integrated housing". *Management of Development of Complex Systems*. Kyiv, Vol. 44, pp. 70-77, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2020.44.

14. Liashchenko, A.A. (2013), "System requirements for modern urban cadastre and urban planning documentation", *Urban Planning and Spatial Planning*, No. 47, pp. 397-405.

Статтю представив д-р техн. наук, проф. КНУБА Терентьев О.О.

Поступила (received) 10.05.2021

Tetyana Honcharenko, Ph.D, Associate Professor,
Kyiv National University of Construction and Architecture
Avenue Povitroflotsky, 31, Kyiv, Ukraine, 03037
Tel: +38 093 022-82-01, e-mail: geocad@ukr.net
ORCID ID: 0000-0003-2577-6916

Victor Mihaylenko, Dr.Sci.Tech, Professor
Kyiv National University of Construction and Architecture
Avenue Povitroflotsky, 31, Kyiv, Ukraine, 03037
Tel: (096) 365-04-11, e-mail: kpm_knuba@ukr.net
ORCID ID: 0000-0002-9573-9873

Elena Dolya, Ph.D, Associate Professor,
Kyiv National University of Construction and Architecture
Avenue Povitroflotsky, 31, Kyiv, Ukraine, 03037
Tel: +38 093 022-82-01, e-mail: geocad@ukr.net
ORCID ID: 0000-0003-2503-2634

УДК 004.942+045

Інваріантність інформаційного моделювання прибудинкової території протягом життєвого циклу / Гончаренко Т.А., Михайленко В.М., Доля О.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2021. – № 1 (5). – С. 5 – 16.

В статті розглянуто вирішення проблеми розробки уніфікованої інформаційної моделі прибудинкової території з додатковими активами протягом всього життєвого циклу. Запропонована параметризація створення уніфікованої моделі об'єкта дозволяє інтегрувати модель управління прибудинковою територією в уніфіковану інформаційну модель об'єкта нерухомості. Іл.: 4. Бібліогр.: 14 назв.

Ключові слова: параметризація створення уніфікованої моделі; уніфікована інформаційна модель; прибудинкова територія; модель об'єкта нерухомості.

УДК 004.942+045

Инвариантность информационного моделирования придомовой территории в течение жизненного цикла / Гончаренко Т.А., Михайленко В.М., Доля Е.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2021. – № 1 (5). – С. 5 – 16.

В статье рассмотрено решение проблемы разработки унифицированной информационной модели придомовой территории с дополнительными активами в течение всего жизненного цикла. Предложенная параметризация создания унифицированной модели объекта позволяет интегрировать модель управления придомовой территорией в унифицированную информационную модель объекта недвижимости. Ил.: 4. Библиогр.: 14 назв.

Ключевые слова: параметризация создания унифицированной модели; унифицированная информационная модель; придомовая территория; модель объекта недвижимости.

UDK 004.942+004.045

Invariance of information modeling of adjoining territory during the lifecycle // Honcharenko T.A., Mikhailenko V.M., Dolya E.B. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2021. – № 1 (5). – P. 5 – 16.

The article considers the solution of the problem of development of the unified information model of the adjacent territory with additional assets during all life cycle. The proposed parameterization of the creation of a unified model of the object allows integrating the model of management of the adjacent territory in the unified information model of the real estate object. Figs.: 4. Refs.: 14 titles.

Keywords: parameterization of the creation of a unified model; parametric modeling; unified information model; adjoining territory; construction object; real estate object.

УДК 004.8: 004.89: 519.7

DOI: 10.20998/2411-0558.2021.01.02

І. Ф. ПОВХАН, д-р тех. наук, доц., ДВНЗ "Ужгородський національний університет", Ужгород

МЕТОД АЛГОРИТМІЧНИХ ДЕРЕВ КЛАСИФІКАЦІЇ НА ОСНОВІ ОБМЕЖЕНЬ

Розглянута загальна задача побудови алгоритмічних дерев розпізнавання (класифікації) на основі обмеженого методу в теорії штучного інтелекту. Об'єктом дослідження є концепція алгоритмічного дерева класифікації на базі обмеженого методу. Предметом дослідження є актуальні методи, алгоритми та схеми (обмежені методи) побудови алгоритмічних дерев класифікації. Пропонується обмежений метод побудови алгоритмічних дерев класифікації, який для заданої навчальної вибірки довільного розміру буде деревоподібну структуру (модель дерева алгоритмів), яка складається з набору автономних алгоритмів класифікації та розпізнавання, оцінених на кожному кроці побудови дерев алгоритмів за даною початковою вибіркою. Тобто пропонується обмежений метод побудови алгоритмічного дерева класифікації, основна ідея якого полягає в по кроковій апроксимації початкової вибірки довільного об'єму та структури набором незалежних алгоритмів класифікації та розпізнавання. Метод при формуванні поточної вершини алгоритмічного дерева забезпечує виділення найбільш ефективних автономних алгоритмів класифікації з початкового набору та побудову лише тих шляхів в структурі дерева, де відбувається найбільша кількість помилок класифікації. Такий підхід при побудові результуючого дерева класифікації дозволяє значно скоротити розмір та складність дерева, підвищити якість його наступного аналізу (інтерпретабельність), можливість декомпозиції, та будувати структури дерев класифікації в умовах обмежених апаратних ресурсів. Обмежений метод побудови алгоритмічного дерева класифікації дозволяє будувати різноманітні деревоподібні моделі розпізнавання з наперед заданою точністю для широкого класу задач теорії штучного інтелекту. Розроблений та представлений в роботі обмежений метод алгоритмічного дерева класифікації отримав програмну реалізацію та був досліджений і порівняний з методами логічних дерев класифікації, методами алгоритмічного дерева класифікації (першого та другого типу) при розв'язку задачі розпізнавання реальних даних геологічного типу. Іл.: 2. Табл.: 1. Бібліогр.: 34 назв.

Ключові слова: алгоритмічне дерево класифікації; розпізнавання реальних даних; класифікація; алгоритм класифікації; обмежений метод.

Вступ. Задачі, які об'єднуються тематикою розпізнавання образів, дуже різноманітні та виникають у сучасному світі в усіх сферах економіки та соціального контенту діяльності людини, що приводить до необхідності побудови та дослідження математичних моделей відповідних систем. Станом на зараз не існує універсального підходу до їх розв'язання, запропоновано декілька досить загальних теорій та підходів, що дозволяють вирішувати багато типів (класів) задач, але їх прикладні застосування відрізняються досить великою чутливістю до

© І.Ф. Повхан, 2021

специфіки самої задачі або предметної області застосування. Багато теоретичних результатів отримано для спеціальних випадків та підзадач, причому слід відмітити, що вузьким місцем вдалих реальних систем розпізнавання залишається необхідність виконання величезного об'єму обчислень та орієнтація на потужний апаратний інструментарій. Проте велика кількість прикладних задач, в різних областях природознавства, наприклад, в геології, геофізиці, геохімії, медицині, соціології, археології, біології та інше, де вирішуються задачі класифікації з використанням програмних та апаратних систем, визначає інтенсивність та актуальність такого напрямку досліджень. Так подолання даної проблеми для задач теорії штучного інтелекту при автоматизації алгоритмічного та програмного конструювання конкретних систем розпізнавання (СР) у вигляді моделей дерев класифікації є запорукою їх високої ефективності для кожної реальної задачі, а отже забезпечить швидкий розвиток різних галузей науки й техніки [1 – 3]. Причому на сьогоднішній день відомо більше чотирьох тисяч алгоритмів розпізнавання (заснованих на різноманітних підходах та концепціях), які мають певні обмеження при їх використанні (точність, швидкодія, пам'ять, універсальність, надійність, тощо), крім того кожний з алгоритмів обмежений певною специфікою задач застосування, а це безумовно є найслабкішим місцем не тільки даних алгоритмів, але й систем розпізнавання, які базуються на відповідних концепціях [4]. Так об'єктом даного дослідження є логічні дерева класифікації (дерева рішень). Відомо, що представлення навчальних вибірок (дискретної інформації) великого об'єму у вигляді структур логічних дерев має свої суттєві переваги в плані економічного опису даних та ефективних механізмів роботи з ними [5 – 7].

Відомо, що представлення масивів дискретної інформації (навчальних вибірок) великого об'єму у вигляді структур логічних або алгоритмічних дерев має свої суттєві переваги в плані економічного опису та зручного аналізу даних, ефективних механізмів (процедур) роботи з ними [8]. Так ефективне покриття навчальної вибірки набором елементарних ознак у випадку структури логічного дерева класифікації (ЛДК), або покриття навчальної вибірки фіксованим набором автономних алгоритмів розпізнавання та класифікації у випадку конструкції алгоритмічного дерева класифікації (АДК), породжує фіксовану деревоподібну структуру даних (модель дерева), причому яка забезпечує стиск та перетворення початкових даних навчальних вибірок. Підкреслимо, що такий підхід дозволяє суттєву оптимізацію та економію апаратних ресурсів інформаційної системи [9]. Галузь застосування концепції дерев рішень (структур ЛДК/АДК) в даний час надзвичайно

об'ємна, а абсолютна більшість сучасних схем методів побудови дерев класифікації відома з літератури під назвою – розділення та захоплення [10 – 13]. Відомо, що структура дерева класифікації (ЛДК/АДК) представлена у вигляді послідовності гілок та вузлів, причому на гілках дерева розташовуються деякі мітки від яких залежить цільова функція (у випадку АДК – незалежні алгоритми класифікації, набори узагальнених ознак (УО)), а в вузлах знаходяться значення функції розпізнавання (ФР) – значення класів належності або розширені атрибути переходів. Принциповими питаннями концепції дерев класифікації залишаються питання вибору критерія розгалуження (побудови або відбору вершин), критерію зупинки розгалуження (закінчення побудови структури дерева класифікації) та критерію відкидання гілок (структурних блоків) дерева класифікації. Принциповою особливістю більшості існуючих методів обробки навчаючих вибірок (масивів дискретної інформації) в задачах розпізнавання при побудові правил та схем класифікації є те, що вони не дозволяють регулювати їх складність, точність, інформаційну ємність (параметричну складність УО) у процесі конструювання моделі [4]. Принциповою особливістю методу алгоритмічного дерева – є можливість комплексного використання для розв'язання кожної конкретної задачі побудови схеми розпізнавання багатьох відомих алгоритмів (методів) розпізнавання. В основі концепції АДК лежить єдина методологія – оптимальної апроксимації навчаючої вибірки набором узагальнених ознак (автономних алгоритмів), які входять в деяку схему (оператор), побудовану в процесі навчання [4, 5]. Обмежений метод побудови моделей алгоритмічних дерев класифікації генерує деревоподібні схеми, які складаються з незалежних та автономних алгоритмів класифікації та являють собою в певній мірі новий алгоритм розпізнавання (зрозуміло, що синтезований з відомих алгоритмів та методів).

Постановка задачі. Нехай на деякій множині G об'єктів x задане розбиття R на скінчене число k підмножин (класів, образів)

$$H_i \ (i = 1, \dots, k), \ G = \bigcup_{i=1}^k H_i.$$

Відповідні множини $H_1, \dots, H_k$ будемо називати образами, а елементи множини G – зображеннями або представниками образів $H_1, \dots, H_k$. Об'єкти (зображення) x задаються наборами значень деяких ознак $x_j \ (j = 1, \dots, n)$. Якщо $x \in H_i$ то будемо рахувати, що даний об'єкт належить образу H_i . В загальному випадку образи $H_1, \dots, H_k$ можуть бути задані імовірнісними розподілами $p(H_1/x), \dots, p(H_k/x)$, де $p(H_i/x)$ – імовірність (або в неперервному випадку щільність

імовірності) належності ($x \in G$) образу H_i . Нехай умовою задачі задана деяка початкова навчальна вибірка (НВ) у вигляді послідовності навчальних пар наступного вигляду:

$$(x_1, f_R(x_1)), \dots, (x_m, f_R(x_m)). \quad (1)$$

Причому крім початкової НВ задана також тестова вибірка (ТВ) – набір об'єктів відомої класової належності, як деяка частина початкової НВ. Отже за початковою умовою НВ – це сукупність (фіксована послідовність) деяких наборів (дискретних об'єктів), причому кожний набір це сукупність значень деяких ознак (атрибутів) та значень деяких функцій (ФР) на цьому наборі. Тоді сукупність значень ознак – це деяке зображення (дискретний об'єкт), а значення функції (ФР) відносить це зображення до відповідного образу [5].

Отже в роботі буде стояти задача побудови моделі АДК в умовах обмежених апаратних ресурсів з параметрами p , структура L якої була би оптимальною $F(L(p, x_i), f_R(x_i)) \rightarrow opt$ по відношенню до початкових даних НВ.

Аналіз літературних джерел. Дослідження продовжує цикл робіт, які присвячені проблематиці деревоподібних схем розпізнавання (моделей класифікації ЛДК/АДК) дискретних об'єктів [7 – 9, 14]. В них піднімаються принципові питання побудови, використання, та оптимізації структур дерев класифікації. Так з роботи [7] відомо, що результуюче правило класифікації (схема), яке побудоване довільним методом або алгоритмом РВО, має деревоподібну логічну структуру, причому логічне дерево складається з вершин (ознак, атрибутів), які групуються по ярусам (рівням) і які отримані на певному кроці (етапі) побудови дерева розпізнавання [15]. Так для методів АДК важливою проблемою, яка виникає є задача синтезу дерев розпізнавання, які будуть представлятися фактично деревом (графом) алгоритмів (методи АДК) або деревом моделей класифікації. На відміну від існуючих методів, головною особливістю деревоподібних систем розпізнавання є те, що важливість окремих ознак (групи ознак чи алгоритмів) визначається відносно функції, яка задає розбиття об'єктів на класи [16]. Так в роботі [15] піднімаються принципові питання стосовно генерації дерев рішень для випадку малоінформативних ознак, питання оцінки якості побудованих моделей, причому здатність структур дерев класифікації виконувати одномірне розгалуження (вибір ознак, атрибутів) для аналізу впливу (важливості, якості) окремих змінних (вершин) дає можливість працювати зі змінними різних типів у вигляді предикатів, узагальнених ознак, для випадку АДК – відповідними автономними алгоритмами

класифікації та розпізнавання. Загальна концепція дерев класифікації активно використовується в інтелектуальному аналізі даних (LGMB, XGBoost), де кінцева мета полягає в синтезі моделі (фіксованої схеми), яка прогнозує значення цільової змінної на основі набору початкових даних (масивів даних НВ) на вході системи [17].

Домінуючими підходами на сьогодні в концепції дерев рішень є системи на основі методів CART (спрямованих для розв'язку задач класифікації та регресивного аналізу), а також системи на основі схеми C4.5 та її сучасних модифікацій (для розв'язку задач розпізнавання та класифікації) та ID3. Схема ID3 базується на використанні обмеженого ентропійного критерію – структура ЛДК будується до тих пір, поки для кожної результуючої вершини (листа дерева) не залишаться лише об'єкти одного фіксованого класу, або доки сама процедура розгалуження в дереві, що будується дає зменшення початкового ентропійного критерію. Схема C4.5/C5.0 базується на відомому критерії Gain-Ratio (нормативний ентропійний критерій), причому в якості критерію зупинки процедури розгалуження (побудови дерева) використовується обмеження на кількість об'єктів для результуючої вершини (листа структури ЛДК). Відмітимо, що процедура відсіканні в структурі ЛДК проводиться за схемою Error-Based Pruning, яка базується на загальній оцінці здатності узагальнення для прийняття рішення щодо видалення гілок та вершин конструкції дерева класифікації. Схема CART в своїй роботі використовує критерії Джині, причому процедура відсіканні в структурі ЛДК проводиться за схемою *Cost-Complexity Pruning*, а для випадку наявних пропусків атрибутів використовується базова схема сурогатних предикатів.

Відмітимо, що базову ідею методів розгалуженого вибору ознак (вершин алгоритмів) в структурі АДК можна визначити як оптимальну апроксимацію деякої початкової НВ набором ранжованих алгоритмів класифікації (ознак, атрибутів об'єкту у випадку ЛДК), то на перший план виходить центральне питання – задача вибору ефективного критерію розгалуження (відбору вершин, атрибутів, ознак дискретних об'єктів для ЛДК та алгоритмів для АДК). Ці принципові задачі розглядаються в роботах, де піднімаються питання якісної оцінки окремих дискретних ознак, їх наборів та фіксованих сполучень, що дозволяє запровадити ефективний механізм реалізації розгалуження.

Відомо, що структури моделей дерев класифікації (ЛДК/АДК) характеризується компактністю з одного боку та нерівномірністю заповнення (розрядженістю) ярусів з іншого боку в порівнянні з конструкціями регулярних дерев [18 – 24], причому важливими питаннями залишаються питання збіжності процесу побудови дерев

класифікації за методами розгалуженого вибору ознак та питання вибору критерію зупинки процесу синтезу логічного дерева [25 – 34]. Відмітимо, що концепції дерев класифікації не протирічить можливість в якості ознак (вершин структури) дерева класифікації використовувати не тільки окремі атрибути (ознаки) об'єктів їх сполучення (ідея узагальненої ознаки, розглядалась в роботі [9]) та набори, але якщо піти далі та не розглядати в якості розгалужень атрибути об'єктів (ознаки) – а відбирати окремі незалежні алгоритми розпізнавання, то на виході буде отримане нова структура – АДК [20]. Саме структурам АДК в розрізі обмеженого методу і буде присвячена дана робота.

Мета роботи та задачі дослідження. Отже, зважаючи на все вище сказане, метою даної роботи є створення простого та ефективного обмеженого методу побудови деревоподібних моделей розпізнавання та класифікації на основі алгоритмічних дерев класифікації для навчальних вибірок дискретної інформації великого об'єму – який характеризується структурою отриманих дерев класифікації з незалежних алгоритмів розпізнавання оцінених на основі функціоналу розрахунку їх загальної ефективності для широкого класу прикладних задач.

Саме для досягнення даної мети – був поставлений набір таких завдань:

- 1) Аналіз концепції синтезу структур дерев класифікації.
- 2) Побудова загального методу синтезу обмежених структур АДК на основі модифікованої процедури препрунінгу.

Обмежені методи дерев класифікації. На даному етапі роботи запропонуємо обмежені методи для структур ЛДК та АДК (дерев класифікації), які дозволяють подолати певні негативні концептуальні моменти та обмеження, які притаманні даним схемам з точки зору ресурсних потреб та результуючої складності побудованих моделей дерев класифікації [25].

Так спочатку звернемо увагу, що в загальній схемі методу побудови моделі ЛДК (на основі покрокової селекції елементарних ознак), яка була описана в роботах [21] раніше – є принциповий недолік, який пов'язаний з тим що зі зростанням кількості вершин (ярусів структури дерева класифікації) в конструкції ЛДК кількість елементарних ознак φ_i^j (тут i – номер елементарної ознаки в наборі, j номер ярусу розташування відповідної ознаки) в дереві значно збільшується. Звичайно таке ускладнення результуючої моделі ЛДК (конструкційної складності) негативно впливає на апаратні можливості системи класифікації (пам'ять, процесорний час) та загальну можливість сприйняття і аналізу побудованої моделі без зовнішнього виділення правил класифікації в

структурі дерева. Для того, щоби подолати ці принципово негативні моменти методу дерева класифікації запропонуємо наступну модифікацію методу ЛДК.

Обмежений метод побудови ЛДК. На початковому етапі зафіксуємо деяке додатне число Z . Нехай маємо побудоване ЛДК (дерево класифікації після визначеної кількості кроків побудови моделі ЛДК) наступної загальної структури – (Рис. 1), яке відображає деякий предикат (побудовану узагальнену ознаку) $p_1(x)$.

Звернемо увагу, що в роботі [9] при представленні методу побудови ЛДК (на основі селекції елементарних ознак) на етапі тесту обчислювали деяке число S , яке фігурує у співвідношенні:

$$\frac{S}{m} \geq \delta. \quad (2)$$

Тепер, крім числа S , для кожного незакінченого шляху $r_1 r_2 r_3$ в структурі логічного дерева (рис. 1) розраховуємо ще число $S_{r_1 r_2 r_3}$, де $S_{r_1 r_2 r_3}$ – кількість всіх пар $(x_i, f_R(x_i))$ з НВ, які фактично належать шляху $r_1 r_2 r_3$ і для яких виконується співвідношення:

$$f_R(x_i) \neq l(r_1 r_2 r_3). \quad (3)$$

Таким чином, $S_{r_1 r_2 r_3}$ – це число всіх тих помилок, які здійснюється деяким предикатом $p_1(x)$ (узагальненою ознакою), яке представляється даним ЛДК загальної структури (Рис. 1) на фіксованому шляху $r_1 r_2 r_3$ в конструкції даного дерева.

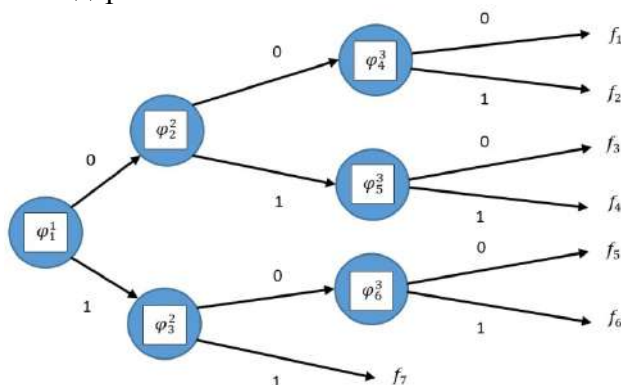


Рис. 1. Структура ЛДК, побудованого за даними початкової НВ на основі селекції елементарних ознак

На наступному етапі вибираємо число Z таких шляхів $(r_1 r_2 r_3)_1, \dots, (r_1 r_2 r_3)_Z$, для яких число $S_{r_1 r_2 r_3}$ буде, по можливості, найбільшим.

Приклад. Нехай задано $Z = 3$, та має місце наступне базове співвідношення:

$$S_{000} \geq S_{100} \geq S_{101} \geq S_{001} \geq S_{010} \geq S_{011}. \quad (4)$$

Тоді вибираються тільки шляхи 000, 100, 101. Наступна побудова відбір вершин (елементарних ознак) $\varphi_{r_1 r_2 r_3}$ здійснюється тільки для цих шляхів.

Зафіксуємо – що дану модифіковану схему побудови дерева класифікації (ЛДК на основі селекції елементарних ознак) будемо називати обмеженим методом побудови ЛДК.

Відмітимо, що за даною схемою, в процесі побудови дерева класифікації продовжуються тільки ті шляхи (загальної структури ЛДК) за якими відбувається найбільша кількість помилок класифікації.

В кінці слід зауважити, що при застосуванні тільки що вказаного процесу в кінці шляхів $r_1 r_2 r_3$, які не входять у відібрані Z шляхів, значення $l(r_1 r_2 r_3)$ зберігаються, причому процес модифікованого методу побудови ЛДК можна застосовувати в тому випадку, коли початкова НВ не є фіксованою – тобто коли на кожному кроці процедури побудови дерева класифікації подається своя вибірка (частина НВ).

Отже, запропонована вище схема побудови дерева класифікації дозволяє фактично запровадити механізм регулювання точності моделі дерева, яка будується враховуючи загальну кількість помилок класифікації на тому чи іншому шляху (етапі побудови) загальної структури логічного дерева.

Зрозуміло, що дана ідея може працювати і на рівні структури АДК, причому враховуючи певні її особливості. Отже зважаючи на все вище сказане запропонуємо наступну модифікацію методу побудови структури АДК першого типу, який був представлений в роботах [20].

Обмежений метод побудови АДК. Нехай, на початку задана деяка НВ загального типу (1) – у вигляді послідовності навчальних пар $(x_i, f_R(x_i))$, потужністю – m , розмірністю ознакового простору – n та фіксований набір різнотипних алгоритмів класифікації $(a_1, \dots, a_M)$. Відмітимо, що робота побудованих моделей дерев класифікації перевіряється на масиві даних ТВ, потужністю – T (класова належність яких також відома).

Зауважимо, що тут дані початкової НВ задають деяке розбиття R на класи $(H_1, \dots, H_k)$, а відповідні алгоритми a_i можуть бути не зв'язані єдиною концепцією розпізнавання, а реалізовувати різноманітні методи та алгоритми класифікації (для прикладу це можуть бути звичайні геометричні алгоритми – принцип роботи яких полягає в апроксимації навчальної вибірки відповідними геометричними об'єктами, алгоритми обчислення оцінок, потенціальних функцій, тощо). Відмітимо, що результатом роботи кожного з зафіксованих (відібраних з бібліотеки алгоритмів деякої інформаційної системи) автономних алгоритмів класифікації та розпізнавання a_i , на відповідному кроці генерації АДК, є одна або декілька узагальнених ознак – f_j (певних правил класифікації НВ), які і описують (апроксимують) визначену частину початкової навчальної вибірки. Так для випадку відомих геометричних алгоритмів розпізнавання – відповідними результуючими узагальненими ознаками будуть геометричні об'єкти, які покривають НВ в ознаковому просторі задачі розмірності – n .

Зрозуміло, що в реальних прикладних задачах можливі випадки, коли відповідний алгоритм класифікації a_i не може побудувати узагальнену ознаку f_j – в зв'язку зі складним розташуванням класів H_k в ознаковому просторі задачі, або певними концептуальними та реалізаційними обмеженнями самого алгоритму класифікації. Тоді, по аналогії з ЛДК можливий випадок, коли побудовані алгоритмом класифікації a_i (побудовані узагальнені ознаки f_j) неповністю апроксимують початкову НВ, або така ситуація передбачена самою схемою алгоритму генерації АДК (як приклад, наявність початкового обмеження в схемі алгоритму дерева класифікації – про генерацію не більше однієї узагальнені ознаки f_j на кожному етапі побудови моделі АДК).

Зауважимо, об'єкти початкової НВ, які не підпадають під побудовану схему апроксимації вибірки послідовністю узагальнених ознак f_j (на останньому етапі процедури синтезу АДК) відносяться до відмов (помилки) класифікації першого типу – En_{tr} і аналогічно для даних ТВ неправильно класифіковані дискретні об'єкти – також відносять до помилок першого типу – Et_{tr} .

Звернемо увагу, що АДК першого типу складається з ярусів, кожен з яких фактично відповідає певному кроку (етапу) побудови (апроксимації даних початкової НВ) дерева класифікації. Причому для кожного алгоритму класифікації на тому чи іншому кроці апроксимації

можна розрахувати його ефективність відносно робочих даних – $(S / P_{pl}(TS^-))$, причому ця величина має бути більше або дорівнювати ніж задане на початку обмеження δ (зрозуміло, що в деяких реалізаціях схеми АДК величина δ може бути використана в якості критерію зупинки K_{Stop} процедури розгалуження в структурі дерева класифікації).

Зауважимо, що тут S – загальна кількість помилок класифікації для фіксованого алгоритму на певному кроці (етапі генерації АДК), а $P_{pl}(TS^-)$ потужність (об'єм) підмножини початкової НВ яка подається на вхід даного алгоритму на відповідному ярусі (рівні або етапі) дерева класифікації, що будується.

Тоді доцільно по аналогії з обмеженим методом ЛДК для кожного ярусу структури АДК (етапу побудови дерева класифікації) розраховувати величини $S_{a_1, \dots, a_i}$ які характеризують кількість всіх пар $(x_i, f_R(x_i))$ з масиву початкової НВ, які не можуть бути апроксимовані послідовністю фіксованих алгоритмів класифікації $a_1, \dots, a_i$. Таким чином, $S_{a_1, \dots, a_i}$ це число всіх тих помилок класифікації, які здійснюється деякою послідовністю УО (побудованих на відповідних рівнях структури АДК), яке представляється даним АДК загальної структури (рис. 2) для фіксованого набору алгоритмів розпізнавання та класифікації $a_1, \dots, a_i$.

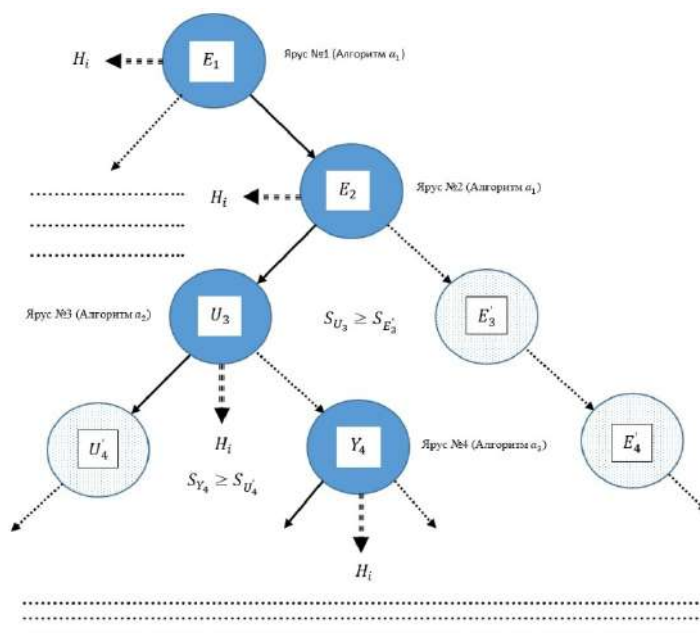


Рис. 2. Фрагмент структури дерева класифікації, побудоване обмеженим методом АДК

Тоді за даною схемою побудови структури АДК вибирається лише той шлях або певні шляхи в конструкції дерева (в залежності від типів дерев класифікації, які можуть бути різні), для який величина $S_{a_1, \dots, a_i}$ буде по можливості максимальною – тобто добудовується шлях в структурі АДК з найбільшою кількістю помилок класифікації. Причому наступна добудова та відбір вершин (алгоритмів класифікації – параметрів УО) $a_1, \dots, a_i$ здійснюється тільки для цих шляхів в структурі АДК.

Зауважимо при такому підході в побудові обмежених методів ЛДК та АДК після побудови моделі дерева класифікації можлива його фактична добудова (донавчання), що дає пряму можливість впливу на точність побудованої моделі системи класифікації.

Відмітимо, що за обмеженою схемою АДК, в процесі побудови дерева класифікації продовжуються (вибираються для добудови УО) тільки ті шляхи (загальної структури АДК) за якими відбувається найбільша кількість помилок класифікації. Зрозуміло, що при застосуванні тільки що вказаного процесу побудови структури АДК в будь який момент є можливість повернення до відкинутих шляхів для добудови структур (шляхів) дерева класифікації.

Підкреслимо, що запропонована вище схема побудови дерева класифікації (обмежений метод АДК) дозволяє регулювання точності (ефективності) моделі дерева, яка будується враховуючи загальну кількість помилок (всіх типів) класифікації на тому чи іншому шляху (етапі побудови) загальної структури алгоритмічного дерева. Важливою є принципова можливість побудови моделі АДК з наперед заданою точністю відносно масиву даних початкової НВ. Така можливість досягається шляхом обмеження кількості кроків процедури генерації АДК, системою обмежень щодо інформаційної ємності, кількості та параметрів узагальнення (області НВ, що апроксимується) набору узагальнених ознак, які будуються на відповідних етапах конструювання результуючого дерева класифікації.

Експериментальна частина. Запропонована в даному дослідженні схема побудови обмеженої структури АДК дозволяє досить гнучко регулювати складність моделі дерева класифікації, що будується, або будувати модель розпізнавання з наперед заданою точністю відповідно до умов поточної задачі, причому задача відбору моделі дерева класифікації (серед фіксованого набору побудованих структур ЛДК/АДК) для конкретної задачі визначається множиною параметрів, які мають визначальну важливість відносно поточної прикладної задачі (наборів

даних НВ/ТВ). Зрозуміло, що для порівняння та відбору конкретної моделі дерева класифікації з фіксованого набору необхідно виділити найбільш важливі їх характеристики (розмірність ознакового простору, кількість вершин, кількість переходів конструкції дерева тощо) та визначити їх похибку відносно масиву вхідних даних.

Принципово важливим моментом на даному етапі дослідження є аналіз критеріїв якості отриманих інформаційних моделей, які залежать від похибки моделі, потужності початкового масиву даних НВ та ТВ (кількість навчальних пар та розмірність ознакового простору задачі), кількості структурних параметрів моделі і так далі. Зрозуміло, що критично важливими параметрами побудованої моделі АДК, які необхідно мінімізувати є помилки моделі відповідно на масивах даних НВ, ТВ та для кожного з класів (частин, підмножин початкової НВ), які задані початковою умовою поточної прикладної задачі.

Відмітимо, що одним з найважливіших показників, який характеризує базові властивості отриманих моделей АДК є базовий показник узагальнення даних початкової НВ деревом класифікації (моделлю класифікації) який розраховується наступним чином:

$$I_{Main} = \frac{m \cdot O_{Uz}}{V_{All} + N_{All} + 2P_{All}}. \quad (5)$$

Даний показник узагальнення моделі дерева класифікації (структури АДК) відображає його базові параметри (характеристики) дерев класифікації та може бути застосован в якості критерію оптимальності в процедурі оцінки довільної деревоподібної схеми розпізнавання, наприклад у випадку методів побудови та відбору випадкових дерев класифікації (з врахуванням їх відповідних структурних параметрів). Для довільної прикладної задачі важливо максимізувати параметр I_{Main} (показник узагальнення моделі АДК), що дозволяє добитися оптимальної структури дерева класифікації та забезпечує фактично максимальний стиск даних початкової НВ (представити масив початкових даних мінімальним за структурною складністю деревом). Також слід підкреслити, що принциповим моментом при побудові структур ЛДК/АДК (моделей класифікації) залишається питання зменшення складності структури дерева (мається на увазі кількість вузлів, вершин, ознак, алгоритмів в структурі дерева класифікації, загальна кількість переходів в структурі моделі), параметри загальних витрат пам'яті та процесорного часу інформаційної системи. Так важливим показником якості побудованої моделі у вигляді дерева класифікації з врахуванням параметрів структури моделі АДК – є

загальний інтегральний показник якості представлений в наступній формі:

$$Q_{Main} = \frac{Fr_{All}}{O_{Uz} \cdot \sum_i p_i} \cdot e^{-\frac{Er_{All}}{M_{All}}} \quad (6)$$

Відмітимо, що тут параметр Er_{All} – загальна кількість помилок моделі АДК на масивах даних початкових тестової та навчальної вибірки – $Er_{All} = En_{tr} + Et_{tr}$, відповідно M_{All} – загальна потужність цих двох масивів даних – $M_{All} = m + T$. Параметр Fr_{All} – характеризує загальну кількість вершин отриманої моделі АДК з результируючими значеннями f_R (ФР, тобто листів дерева класифікації), а параметр O_{Uz} – представляє загальну кількість всіх узагальнених ознак в структурі моделі АДК. Набір параметрів p_i представляє собою найбільш важливі характеристики дерева класифікації (відповідно до структур ЛДК/АДК), що оцінюється (наприклад кількість елементарних ознак або узагальнених ознак, що використовуються в моделі дерева класифікації, кількість переходів між вершинами, ярусами дерева класифікації, тощо).

Відмітимо, що даний інтегральний показник якості моделі АДК буде приймати значення в межах нуля та одиниці. Чим менший він буде тим гірша буде якість побудованого дерева класифікації, а чим більший буде показник тим краще буде отримана модель. Так запропонована інтегральна оцінка якості моделі дерева класифікації (структури АДК) відображає його базові параметри (характеристики) дерев класифікації, також може бути застосована в якості критерію оптимальності в процедурі оцінки довільної деревоподібної схеми розпізнавання (відповідно до своїх параметрів моделі).

Так в Ужгородському національному університеті був розроблений програмний комплекс "Оріон III" для генерації автономних систем розпізнавання та класифікації де алгоритмічна бібліотека системи нараховує 13 алгоритмів (схем розпізнавання) серед яких запропонована вище алгоритмічна реалізація побудови АДК обмеженим методом. Причому базова задача на якій перевірялася робота обмеженого методу побудови АДК була задача класифікації масиву геологічних даних (задача про розділення нафтоносних пластів). Так для розпізнавання об'єктів використовувався набір з 22 елементарних ознак (атрибутів), в НВ представлена інформація про об'єкти двох класів, а на етапі екзамєну побудована система класифікації (модель АДК) має забезпечити ефективне розпізнавання об'єктів невідомої класифікації відносно цих двох класів. На початковому етапі роботи програмної системи навчальна

вибірка була автоматично перевірена на коректність (пошук та видалення однакових об'єктів різної належності – помили першого роду).

Так в початковій НВ представлена інформації про розбиття R на два класи. На етапі екзамену (на основі ТВ) побудована система класифікації має забезпечити ефективне розпізнавання (класифікацію) об'єктів невідомої класифікації відносно цих двох класів. Зауважимо, що в масиві навчаючої інформації переважали навчальні пари класу H_1 (нафтоносні пласти) в пропорції $\approx (1.5/1)$, а масив НВ складався з 1250 об'єктів (наборів відомої класифікації), причому ефективність сконструйованої системи розпізнавання оцінювалася на тестовій вибірці об'єму 240 об'єктів. Відмітимо, що масив ТВ представляв собою відокремлену частину початкової НВ (складався з дискретних об'єктів відомої класифікації). Зауважимо, що звичайно такий об'єм тестової вибірки не достатній для всебічного аналізу якості побудованих моделей дерев класифікації, але в зв'язку з обмеженим характером самої НВ навіть така ТВ дає змогу оцінити та проаналізувати основні параметри синтезованих структур ЛДК/АДК. Дані масивів навчаючих та тестових вибірок отримані на основі геологічної розвідки на території Закарпатської області в період з 2001 року по 2011 рік. Так фрагмент основних результатів, приведених вище експериментів, порівняльних тестів методів побудови моделей АДК (структур дерев класифікації) на масиві даних даної прикладної задачі, представлений в (табл. 1).

Підкреслимо, побудовані моделі (структури) АДК забезпечили необхідний рівень точності, ефективності заданих умовою прикладної задачі, необхідну швидкодію та витрати робочої пам'яті системи, але показували різну структурну складність побудовах дерев класифікації (параметрів складності конструкції ЛДК) та набору узагальнених ознак (в порівняльних випадках моделей алгоритмічного дерева класифікації – структур АДК).

Відмітимо, що представлена в дослідженні загальна оцінки якості моделі АДК (зрозуміло, що вона може бути адаптована і для випадку структур ЛДК) фіксує найважливіші характеристики (параметри) побудованих дерев класифікації та може бути застосований в якості критерію оптимальності в процедурі побудови АДК та фінального відбору (ранжуванні моделей) з множини моделей АДК.

Звернемо увагу, що структура АДК як і обмежений метод алгоритмічного дерева оперує лише вже готовими (побудованими) наборами, узагальненими ознаками (алгоритмами класифікації), та його може зовсім не цікавити, яким алгоритмом чи способом (схемою, правилом, методом) вони отримані, причому кожна із сконструйованих схем за обмеженим методом алгоритмічного дерева буде являти собою

загальну систему розпізнавання (модель АДК), яку можна застосовувати для практичної роботи (обробки великих масивів експериментальних даних у вигляді дискретних наборів).

Таблиця 1

Порівняльна таблиця моделей / методів дерев класифікації (ЛДК/АДК)

№	Метод (схема) синтезу структури (моделі) дерева класифікації (ЛДК/АДК)	Інтегральний показник якості моделі дерева класифікації Q_{Main}	Загальна кількість помилок моделі на НВ та ТВ Er_{All}
1	Метод повного ЛДК на основі селекції елементарних ознак (наборів ознак)	0,004789	2
2	Модель ЛДК з одноразовою оцінкою важливості ознак (наборів ознак)	0,002263	3
3	Обмежений метод побудови структури ЛДК ($Z=5$)	0,003168	4
4	Обмежений метод побудови структури ЛДК ($Z=9$)	0,003029	3
5	Метод алгоритмічного дерева (типу I)	0,005234	0
6	Метод алгоритмічного дерева (типу II)	0,002941	0
7	Метод АДК (типу I) на основі алгоритму гіперсфер в якості УО	0,005445	0
8	Метод АДК (типу I) на основі алгоритму гіперкуба в якості УО	0,005139	1
9	Обмежений метод побудови моделі АДК ($Z=6$)	0,003018	2
10	Обмежений метод побудови моделі АДК ($Z=10$)	0,003176	1

Важливим моментом є те, що отримана схема класифікації буде представляти собою в певній мірі новий алгоритм розпізнавання (зрозуміло, що синтезований з відомих алгоритмів та методів), причому отримана структура АДК (нова схема класифікації) характеризується високою універсальністю відносно прикладного застосування та відносно компактною структурою самої моделі, однак вимагає відносно великих апаратних витрат для зберігання узагальнених ознак (або їх наборів) та початкової оцінки якості алгоритмів класифікації за даними НВ. Причому моделі АДК в порівнянні з структурами ЛДК мають високу швидкість правил класифікації, порівнянні апаратні витрати для зберігання та роботи самої структури дерева та високу якість класифікації.

Висновки. В роботі вирішена задача побудови обмеженого методу синтезу моделей алгоритмічних дерев класифікації на основі апроксимації НВ набором незалежних алгоритмів класифікації в умовах обмежень на шляхи побудови структури АДК.

Наукова новизна отриманих результатів базується в тому, що вперше запропонований обмежений метод побудови структур АДК на основі оцінки та ранжування набору автономних алгоритмів розпізнавання та класифікації для генерації структури дерева класифікації (моделі АДК) з наборами обмежень на напрямки побудови конструкції АДК (моделі дерева класифікації). Причому на кожному кроці розгалуження дерева класифікації апроксимується певна частина НВ (або її підмножина). Відмітимо критерій розгалуження для структур АДК (в обмеженому методі побудови АДК) можна використовувати не тільки для оцінки якості окремих алгоритмів класифікації, але й для розрахунку ефективності зв'язаних наборів алгоритмів, що в перспективі дозволяє досягти більш оптимальної структури синтезованого АДК за початковими даними НВ. В роботі запропонований набір загальних показників (параметрів), який дозволяє ефективно представити загальні характеристики моделі АДК, можливе його використання для відбору найбільш оптимального АДК з набору побудованих на основі методів випадкових дерев класифікації.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому що запропонований обмежений метод побудови моделей АДК (структур ЛДК/АДК) був реалізований в бібліотеці алгоритмів універсальної програмної системи "ОРІОН ІІІ" для розв'язку різноманітних практичних задач класифікації (розпізнавання) різнотипних масивів дискретних об'єктів.

Відмітимо, що проведені практичні випробовування підтвердили працездатність математичного забезпечення та запропонованих моделей АДК, розробленого програмного забезпечення, що дозволяє зробити рекомендацію щодо використання даного підходу (обмеженого методу моделей ЛДК/АДК) та його програмної реалізації для широкого спектру прикладних задач класифікації та розпізнавання дискретних об'єктів.

Перспективи подальших досліджень можуть бути спрямовані в бік розвитку методів алгоритмічних дерев класифікації (методів бустингу структур АДК) оптимізації програмних реалізацій запропонованого обмеженого методу побудови АДК, а також його практичної апробації на множині реальних задач класифікації та розпізнавання.

Список літератури:

1. Srikant R. Mining generalized association rules / R. Srikant, R. Agrawal // Future Generation Computer Systems. – 1997. – Vol. 13. – № 2. – P. 161-180.

2. *Hastie T.* The Elements of Statistical Learning / *T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman.* – Stanford, 2008. – 768 p.
3. *Quinlan J.R.* Induction of Decision Trees / *J.R. Quinlan* // Machine Learning. – 1986. – № 1. – P. 81-106.
4. *Vasilenko Y.A.* Construction and optimization of recongnizing systems / *Y.A. Vasilenko, E.Y. Vasilenko, A.I. Kuhayivsky, I.O. Papp* // Scientific and technical journal "Information technologies and systems". – 1999. – № 1. – P. 122-125.
5. *Povhan I.* Designing of recognition system of discrete objects / *I. Povhan* // 2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP), Lviv, 2016, Ukraine. – Lviv, 2016. – P. 226-231.
6. *Mitchell T.* Machine learning / *T. Mitchell.* – New York: McGrawHill, 1997. – 432 p.
7. *Povhan I.* General scheme for constructing the most complex logical tree of classification in pattern recognition discrete objects / *I. Povhan* // Collection of proceedings "Electronics and information technology". – 2019. – Vol. 11. – P. 73-80.
8. *Breiman L.L.* Classification and regression trees / *L.L. Breiman, J.H. Friedman, R.A. Olshen et al.*] – Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 1984. – 368 p.
9. *Vasilenko Y.A.* Automating the construction of classification systems based on agent - schemes / *Y.A. Vasilenko, F.G. Vashuk, I.F. Povkhan* // Mathematical modeling, optimization and information technologies: International Joint Conference MDIF-2012, Kisheneu, Moldova, 2012. – Kisheneu, 2012. – P. 444-446.
10. *Vtogoff P.E.* Incremental Induction of Decision Trees / *P.E. Vtogoff* // Machine Learning. – 1989. – № 4. – P. 161-186.
11. *Amit Y.* Joint induction of shape features and tree classifiers / *Y. Amit, D. Geman, K. Wilder* // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1997. – Vol. 19. – № 11. – P. 1300-1305.
12. *Dietterich T.G.* Machine learning bias, statistical bias and statistical variance of decision tree algorithms [Electronic resource] / *T.G. Dietterich, E.B. Kong.* – Corvallis: Oregon State University, 1995. – 14 p. – Access mode : <http://www.cems.uwe.ac.uk/~irjohnso/coursenotes/uqc832/trbias.pdf>
13. *Mingers J.* An empirical comparison of pruning methods for decision tree induction / *J. Mingers* // Machine learning. – 1989. – Vol. 4. – № 2. – P. 227-243.
14. *Povhan I.* Question of the optimality criterion of a regular logical tree based on the concept of similarity / *I. Povhan* // Collection of proceedings "Electronics and information technology". – 2020. – Vol. 13. – P. 12-16.
15. *Subbotin S.A.* Construction of decision trees for the case of low-information features / *S.A. Subbotin* // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2019. – № 1. – P. 121-130.
16. *Lupei M.* Identification of authorship of Ukrainian-language texts of journalistic style using neural networks / *M. Lupei, A. Mitsa, V. Repariuk, V. Sharkan* // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Vol. 1 (2 (103)). – P. 30-36. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.195041>
17. *Bodyanskiy Y.* Hybrid neuro-neo-fuzzy system and its adaptive learning algorithm / *Y. Bodyanskiy, O. Vynokurova, G. Setlak and I. Pliss* // Computer Sciences and Information Technologies (CSIT): Xth Scien. and Tech. Conf., Lviv, 2015. – Lviv. – 2015. – P. 111-114.
18. *Karimi K.* Generation and Interpretation of Temporal Decision Rules / *K. Karimi, H.J. Hamilton* // International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications. – 2011. – Vol. 3. – P. 314-323.
19. *Kotsiantis S.B.* Supervised Machine Learning: A Review of Classification Techniques / *S.B. Kotsiantis* // Informatica. – 2007. – № 31. – P. 249-268.
20. *Povkhan I.F.* Features of synthesis of generalized features in the construction of recognition systems using the logical tree method / *I.F. Povkhan* // Information technologies

and computer modeling ITKM-2019: materials of the international scientific and practical conference, Ivano-Frankivsk, May 20–25, 2019. – Ivano-Frankivsk, 2019. – P. 169-174.

21. Vasilenko Y.A. The importance of discrete signs / *Y.A. Vasilenko, F.G. Vashuk, I.F. Povkhan* // XX International Conference Promising ways and directions of improving the educational system, Uzhgorod, November 16–19, 2010. – Uzhgorod, 2010. – Vol. 21. – № 1. – P. 217-222.

22. Deng H. Bias of importance measures for multi-valued attributes and solutions / *H. Deng, G. Runger, E. Tuv* // Proceedings of the 21st International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN), Espoo, Finland, Jun 14–Jun 17, 2011. – Espoo, 2011. – P. 293-300.

23. Kamiński B. A framework for sensitivity analysis of decision trees / *B. Kamiński, M. Jakubczyk, P. Szufel* // Central European Journal of Operations Research. – 2017. – Vol. 26 (1). – P. 135-159.

24. Dietterich T.G. An experimental comparison of three methods for constructing ensembles of decision trees: bagging, boosting, and randomization / *T.G. Dietterich* // Machine learning. – 2000. – Vol. 40. – № 2. – P. 139-157.

25. Povhan I. Generation of elementary signs in the general scheme of the recognition system based on the logical tree / *I. Povhan* // Collection of proceedings "Electronics and information technology". – 2019. – Vol. 12. – P. 20-29.

26. Subbotin S. The dimensionality reduction methods based on computational intelligence in problems of object classification and diagnosis / *S. Subbotin, A. Oliynyk* // Recent Advances in Systems, Control and Information Technology / eds.: R. Szewczyk, M. Kaliczyńska. – Cham : Springer, 2017. – P. 11-19. – (Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 543).

27. Subbotin S.A. Methods and characteristics of locality-preserving transformations in the problems of computational intelligence / *S.A. Subbotin* // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2014. – № 1. – P. 120-128.

28. Koskimaki H. Two-level clustering approach to training data instance selection: a case study for the steel industry / *H. Koskimaki, I. Juutilainen, P. Laurinen, J. Roning* // Neural Networks: International Joint Conference (IJCNN-2008), Hong Kong, 1–8 June 2008: proceedings. – Los Alamitos: IEEE, 2008. – P. 3044–3049. DOI: 10.1109/ijcnn.2008.4634228

29. Subbotin S. The neuro-fuzzy network synthesis and simplification on precedents in problems of diagnosis and pattern recognition / *S. Subbotin* // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2013. – Vol. 22. – № 2. – P. 97-103. DOI: 10.3103/s1060992x13020082

30. Subbotin S.A. Methods of sampling based on exhaustive and evolutionary search / *S.A. Subbotin* // Automatic Control and Computer Sciences. – 2013. – Vol. 47. – № 3. – P. 113-121. DOI: 10.3103/s0146411613030073

31. De Mántaras R.L. A distance-based attribute selection measure for decision tree induction / *De Mántaras R.L.* // Machine learning. – 1991. – Vol. 6. – № 1. – P. 81-92.

32. Alpaydin E. Introduction to Machine Learning / *E. Alpaydin*. – London: The MIT Press, 2010. – 400 p.

33. Painsky A. Cross-validated variable selection in tree-based methods improves predictive performance / *A. Painsky, S. Rosset* // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2017. – Vol. 39. – № 11. – P. 2142-2153. DOI:10.1109/tpami.2016.2636831

34. Miyakawa M. Criteria for selecting a variable in the construction of efficient decision trees / *M. Miyakawa* // IEEE Transactions on Computers. – 1989. – Vol. 38. – № 1. – P. 130-141.

References:

1. Srikant, R. (1997), "Mining generalized association rules", *Future Generation Computer Systems*, Vol. 13, No. 2, pp. 161-180.

2. Hastie, T. (2008), *The Elements of Statistical Learning*, Stanford, 768 p.

3. Quinlan, J.R. (1986), "Induction of Decision Trees", *Machine Learning*, No. 1, pp. 81-106.
4. Vasilenko, Y.A., Vasilenko, E.Y., Kuhayivsky, A.I., and Papp, I.O. (1999), "Construction and optimization of recognizing systems", *Scientific and technical journal "Information technologies and systems"*, No.1, pp. 122-125.
5. Povhan, I. (2016), "Designing of recognition system of discrete objects", *2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)*, Lviv, Ukraine, Lviv, 2016, pp. 226-231.
6. Mitchell, T. (1997), *Machine learning*, New York: McGraw-Hill, 432 p.
7. Povhan, I. (2019), "General scheme for constructing the most complex logical tree of classification in pattern recognition discrete objects", *Collection of proceedings "Electronics and information technology"*, Vol. 11, pp. 73-80.
8. Breiman, L.L., Friedman, J.H., Olshen, R.A., and Stone, C.J. (1984), *Classification and regression trees*. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 368 p.
9. Vasilenko, Y.A. Vashuk, F.G., and Povkhan, I.F. (2012), "Automating the construction of classification systems based on agent – schemes", *Mathematical modeling, optimization and information technologies: International Joint Conference MDIF-2012, Kisheneu, Moldova*, 2012, Kisheneu, pp. 444-446.
10. Vtogoff, P.E. (1989), "Incremental Induction of Decision Trees", *Machine Learning*, No. 4, pp. 161-186.
11. Amit Y., Geman, D., and Wilder, K. (1997), "Joint induction of shape features and tree classifiers", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 19, No. 11, pp. 1300-1305.
12. Dietterich, T.G., and Kong, E.B. (1995), "Machine learning bias, statistical bias, and statistical variance of decision tree algorithms [Electronic resource]", Corvallis: Oregon State University,. – 14 p. – Access mode: <http://www.cems.uwe.ac.uk/~irjohnso/coursenotes/uqc832/trbias.pdf>
13. Mingers, J. (1989), "An empirical comparison of pruning methods for decision tree induction", *Machine learning*, Vol. 4, No. 2, pp. 227-243.
14. Povhan, I. (2020), "Question of the optimality criterion of a regular logical tree based on the concept of similarity", *Collection of proceedings "Electronics and information technology"*, Vol. 13, pp. 12-16.
15. Subbotin, S.A. (2019), "Construction of decision trees for the case of low-information features", *Radio Electronics, Computer Science, Control*, № 1, pp. 121-130.
16. Lupei, M., Mitsa, A., Repariuk, V., and Sharkan, V. (2020), "Identification of authorship of Ukrainian-language texts of journalistic style using neural networks", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1 (2 (103)), pp. 30-36. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.195041>
17. Bodyanskiy Y., Vynokurova O., Setlak G. and Pliss I. (2015), "Hybrid neuro-neo-fuzzy system and its adaptive learning algorithm", *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT): Xth Scien. and Tech. Conf.*, Lviv, 2015, Lviv, pp. 111-114.
18. Karimi, K. and Hamilton, H.J. (2011), "Generation and Interpretation of Temporal Decision Rules", *International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications*, Vol. 3, pp. 314-323.
19. Kotsiantis, S.B. (2007), "Supervised Machine Learning: A Review of Classification Techniques", *Informatica*, No. 31, pp. 249-268.
20. Povkhan, I.F. (2019), "Features of synthesis of generalized features in the construction of recognition systems using the logical tree method", *Information technologies and computer modeling ITKM-2019: materials of the international scientific and practical conference, Ivano-Frankivsk*, May 20–25, 2019, Ivano-Frankivsk, pp. 169-174.
21. Vasilenko, Y.A. Vashuk, F.G., and Povkhan, I.F. (2010), "The importance of discrete

signs", *XX International Conference Promising ways and directions of improving the educational system*, Uzhgorod, November 16–19, Uzhgorod, 2010, Vol. 21, No. 1, pp. 217–222.

22. Deng, H., Runger, G., and Tuv, E. (2011), "Bias of importance measures for multi-valued attributes and solutions", *Proceedings of the 21st International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN)*, Espoo, Finland, Jun 14–Jun 17, Espoo, 2011, pp. 293–300.

23. Kamiński, B., Jakubczyk M., and Szufel, P. (2017), "A framework for sensitivity analysis of decision trees", *Central European Journal of Operations Research*, Vol. 26 (1), pp. 135–159.

24. Dietterich, T.G. (2000), "An experimental comparison of three methods for constructing ensembles of decision trees: bagging, boosting, and randomization", *Machine learning*, Vol. 40, No. 2, pp. 139–157.

25. Povhan, I. (2019), "Generation of elementary signs in the general scheme of the recognition system based on the logical tree", Collection of proceedings "Electronics and information technology", Vol. 12, pp. 20–29.

26. Subbotin, S., and Oliinyk, A. (2017), "The dimensionality reduction methods based on computational intelligence in problems of object classification and diagnosis", *Recent Advances in Systems, Control and Information Technology* / eds.: R. Szewczyk, M. Kaliczyńska, Cham: Springer, pp. 11–19, (Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 543).

27. Subbotin, S.A. (2014), "Methods and characteristics of localitypreserving transformations in the problems of computational intelligence", *Radio Electronics, Computer Science, Control*. No. 1, pp. 120–128.

28. Koskimäki, H., Juutilainen, I., Laurinen, P., and Roning, J. (2008), "Two-level clustering approach to training data instance selection: a case study for the steel industry", *Neural Networks: International Joint Conference (IJCNN-2008)*, Hong Kong, 1–8 June 2008: proceedings, Los Alamitos: IEEE, pp. 3044–3049. DOI: 10.1109/ijcnn.2008.4634228

29. Subbotin, S. (2013), "The neuro-fuzzy network synthesis and simplification on precedents in problems of diagnosis and pattern recognition", *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, Vol. 22, No. 2, pp. 97–103. DOI: 10.3103/s1060992x13020082

30. Subbotin, S.A. (2013), "Methods of sampling based on exhaustive and evolutionary search", *Automatic Control and Computer Sciences*, Vol. 47, No. 3, pp. 113–121. DOI: 10.3103/s0146411613030073

31. De Mántaras, R.L. (1991), "A distance-based attribute selection measure for decision tree induction", *Machine learning*, Vol. 6, No. 1, pp. 81–92.

32. Alpaydin, E. (2010), *Introduction to Machine Learning*, London: The MIT Press., 400 p.

33. Painsky, A., and Rosset, S. (2017), "Cross-validated variable selection in tree-based methods improves predictive performance", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 39, No. 11, pp. 2142–2153. DOI:10.1109/tpami.2016.2636831.

34. Miyakawa, M. (1989), "Criteria for selecting a variable in the construction of efficient decision trees", *IEEE Transactions on Computers*, Vol. 38, No. 1, pp. 130–141.

Статтю представив доктор техн. наук, проф. Дмитрієнко В.Д.

Надійшла/Received: 23.05.2021 p.

Povhan Igor, Doctor of Technical Sciences, assistant professor,
DHSU "Uzhhorod National University"

Uzhgorod national university, Ukraine, Narodna Square 3, Uzhgorod, Ukraine, 88000

e-mail: Igor.povkhan@uzhnu.edu.ua

ORCID ID: 0000-0002-7034-8702

УДК 004.8: 004.89: 519.7

Повхан І.Ф. Метод алгоритмічних дерев класифікації на основі обмежень / Повхан І.Ф. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2021. – № 1 (5). – С. 17 – 38.

Розглянуто спільне завдання побудови алгоритмічних дерев розпізнавання (класифікації) на основі обмеженого методу в теорії штучного інтелекту. Об'єктом дослідження є концепція алгоритмічного дерева класифікації на базі обмеженого методу. Предметом дослідження є актуальні методи, алгоритми і схеми (обмежені методи) побудови алгоритмічних дерев класифікації. Пропонується обмежений метод побудови алгоритмічних дерев класифікації, який для заданої навчальної вибірки довільного розміру буде деревоподібну структуру (модель дерева алгоритмів), яка складається з набору автономних алгоритмів класифікації і розпізнавання, оцінених на кожному кроці побудови дерева по вихідній вибірці. Пропонується обмежений метод побудови алгоритмічного дерева класифікації, основна ідея якого полягає в по кроковій апроксимації початкової вибірки довільного обсягу і структури набором незалежних алгоритмів класифікації і розпізнавання. Даний метод при формуванні поточної вершини алгоритмічного дерева (вузла, узагальненої ознаки дерева алгоритмів) забезпечує виділення найбільш ефективних автономних алгоритмів класифікації з початкового набору і побудову тільки тих шляхів в структурі дерева де відбувається найбільша кількість помилок класифікації. Обмежений метод побудови алгоритмічного дерева класифікації дозволяє будувати різнотипні деревовидні моделі розпізнавання з наперед заданою точністю для широкого класу задач теорії штучного інтелекту. Розроблений і представлений в роботі обмежений метод алгоритмічного дерева класифікації отримав програмну реалізацію і був досліджений і зрівняний з методами логічних дерев класифікації, методами алгоритмічного дерева класифікації (першого і другого типу) при вирішенні задачі розпізнавання реальних даних геологічного типу. Іл.: 2. Табл.: 1. Бібліогр.: 34 назв.

Ключові слова: алгоритмічне дерево класифікації; розпізнавання реальних даних; класифікація; алгоритм класифікації; критерій розгалуження; обмежений метод.

УДК 004.8: 004.89: 519.7

Повхан И.Ф. Метод алгоритмических деревьев классификации на основе ограниченный / Повхан И.Ф. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2021. – № 1 (5). – С. 17 – 38.

Рассмотрена общая задача построения алгоритмических деревьев распознавания (классификации) на основе ограниченного метода в теории искусственного интеллекта. Объектом исследования является концепция алгоритмического дерева классификации на базе ограниченного метода. Предметом исследования являются актуальные методы, алгоритмы и схемы (ограниченные методы) построения алгоритмических деревьев классификации. Предлагается ограниченный метод построения алгоритмических деревьев классификации, который для заданной обучающей выборки произвольного размера строит древовидную структуру (модель дерева алгоритмов), которая состоит из набора автономных алгоритмов классификации и распознавания, оцененных на каждом шаге построения дерева по исходной выборке. Предлагается ограниченный метод построения алгоритмического дерева классификации, основная идея которого заключается в по шаговой аппроксимации начальной выборки произвольного объема и структуры набором независимых алгоритмов классификации и распознавания. Данный метод при формировании текущей вершины алгоритмического дерева (узла, обобщенной признаки дерева алгоритмов) обеспечивает выделение наиболее эффективных автономных алгоритмов классификации с начального набора и достройку

только тех путей в структуре дерева где происходит наибольшее количество ошибок классификации. Ограниченный метод построения алгоритмического дерева классификации позволяет строить разнотипные древовидные модели распознавания с наперед заданной точностью для широкого класса задач теории искусственного интеллекта. Разработанный и представленный в работе ограничен метод алгоритмического дерева классификации получил программную реализацию и был исследован и сравнен с методами логических деревьев классификации, методами алгоритмического дерева классификации (первого и второго типа) при решении задачи распознавания реальных данных геологического типа. Ил.: 2. Табл.: 1. Библиогр.: 34 назв.

Ключевые слова: алгоритмическое дерево классификации; распознавание реальных данных; классификация; алгоритм классификации; критерий ветвления; ограниченный метод.

UDC 004.8: 004.89: 519.7

Povhan I.F. Method of algorithmic classification trees based on constraints / Povkhan I.F. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2021. – № 1 (5). – P. 17 – 38.

The general problem of constructing algorithmic recognition (classification) trees based on a limited method in the theory of artificial intelligence is considered. The object of this research is the concept of an algorithmic classification tree based on a bounded method. The subject of the research is actual methods, algorithms and schemes (limited method) for constructing algorithmic classification trees. A limited method for constructing algorithmic classification trees is proposed, which for a given initial training sample of any size builds a tree structure (algorithm tree model), which consists of a set of autonomous classification algorithms and recognition evaluated at each stage of constructing algorithm trees based on this initial sample. That is, a limited method for constructing an algorithmic classification tree is proposed, the main idea of which is a step-by-step approximation of the initial sample of an arbitrary volume and structure by a set of independent classification and recognition algorithms. This method, when forming the current vertex of the algorithmic tree, ensures that the most efficient (high-quality) autonomous classification algorithms are selected from the initial set and only those paths in the tree structure where the greatest number of classification errors occur are completed. The limited method of constructing an algorithmic classification tree makes it possible to build different types of tree-like recognition models with predefined accuracy for a wide class of problems in the theory of artificial intelligence. The limited method of the algorithmic classification tree developed and presented in this paper received a software implementation and was investigated and compared with the methods of logical classification trees, methods of the algorithmic classification tree (first and second types) when solving the problem of recognizing real geological data. Figs.: 2. Tabl.: 1. Refs.: 34 titles.

Keywords: algorithmic classification tree; pattern recognition; classification; classification algorithm; branching criterion; restricted method.

УДК 861.5.015.2

DOI: 10.20998/2411-0558.2021.01.03

В. Д. ДМИТРИЄНКО, д-р техн. наук., проф., НТУ "ХПІ",
М. В. МЕЗЕНЦЕВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ"

КОМП'ЮТЕРНІ КОМПОНЕНТИ ДЛЯ РІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ РУХОМИМ СКЛАДОМ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ

Вирішення завдань оптимального управління тяговим рухомих складом, як правило, виконується у припущеннях, що зовнішнє середовище щодо відношення до рухомого складу залишається незмінним та не впливає або слабо впливає на закони управління. Однак реальний рух рухомих складів по залізниці може вносити суттєві зміни в заздалегідь розроблені закони управління та графіки руху. Це пов'язано з тим, що по залізниці рухається множина рухомих складів, графіки руху яких можуть порушуватися, що може призвести до порушення оптимальних графіків руху цілого ряду рухомих складів. У зв'язку з цим у статті розглядаються підходи до управління складом із змінами, що склалися у зовнішньому середовищі. Такі підходи вимагають ідентифікації зовнішнього середовища в процесі руху конкретного складу та корекції законів управління при зміні параметрів зовнішнього середовища. У цьому випадку відбувається перехід до проактивного управління. Іл.: 1. Бібліогр.: 16 назв.

Ключові слова: комп'ютерні компоненти; оптимальне управління; тяговий рухомий склад; зміна станів зовнішнього середовища; проактивне управління.

Постановка проблеми і аналіз літератури. Тяговий рухомий склад із асинхронним приводом відноситься до складних об'єктів (СО). На його створення навіть при відомих європейських та американських зразках Україні знадобилося близько 20 років [1]. Однак далеко не всі проблеми цього рухомого складу вирішені.

Проблемам оптимізації процесів перевезення вантажів і пасажирів по залізниці традиційно приділяється досить багато уваги [2]. Однак питання оптимізації розглядаються у більшості випадків практично незалежно від можливості суттєвих змін у зовнішньому середовищі, які можуть зводити до мінімуму результати застосування оптимальних законів управління із-за низького рівня інформатизації перевізного процесу на залізничних дорогах України. В даний час на території країн СНД актуальні розробки та повсюдне впровадження інтелектуальних транспортних засобів (ІТЗ). Теорія ІТЗ у більшості розроблена в кінці минулого сторіччя. При цьому вирізняють п'ять видів інтелектуальних систем [2]:

- ІС (інтелектуальна інформаційна система);
- ЕС (експертна система);
- РІС (розрахунково-логічна система);

– ГІС и РІС (гібридна і рефлекторна інформаційні системи).

Ці системи застосовуються при вирішенні різних завдань управління промисловим виробництвом. Однак використовувати досвід застосування цих систем для створення інтелектуальних систем управління перевізним процесом (ІСУПП) на залізничному транспорті важко через особливості функціонування залізниць:

– в процесі перевезення вантажів і пасажирів беруть участь різні динамічні об'єкти, що вимагають безперервного контролю і управління. При цьому системи збору інформації розосереджені, тому необхідна передача великих обсягів інформації про перевізні процеси. З одного боку, це вимагає технічних засобів і технологій більш придатних, ніж на найбільших стаціонарних підприємствах. З іншого боку, це часто породжує затримки інформації для прийняття правильних оперативних рішень, що, в першу чергу, призводить до необхідності приймати рішення в умовах невизначеності. Це знижує і безпеку перевізного процесу та збільшує ризики появи нештатних ситуацій.

– оскільки комп'ютерна техніка та її програмне забезпечення стрімко розвивається, то на залізничному транспорті використовуються безліч різних інформаційних моделей. Ці моделі інтегровані між собою і їх не можна розділити на окремі моделі, кожен з яких можна модифікувати незалежно від інших. Через це періодично такі системи вимагають комплексної переробки, а отже і періодичного вкладання в їх розвиток значних коштів.

В сучасних умовах проблеми оптимального управління тяговим рухомим складом на залізницях України вимагають переходу до нової проактивної технології управління [3 – 8], яка вже отримала широку реалізацію в атомній енергетиці, військових областях, в авіаційній галузі і інш. При цьому проактивне управління складними об'єктами і системами докорінно відрізняється від більшості існуючих реактивних систем управління, що реагують на відхилення від нормального функціонування об'єкта управління і запобігають розвитку негативних і аварійних ситуацій. Реактивне управління забезпечує стає функціонування динамічних об'єктів в реальному часі і управління системами із зворотними зв'язками, в тому числі з урахуванням випадкових збурень зовнішнього середовища. Подальше ускладнення керованих об'єктів і їх взаємодії із зовнішнім середовищем вимагає врахування динаміки не тільки об'єктів управління, а й зовнішнього середовища, що неможливо без її моніторингу. В даний час виділяють два можливих підходи до створення систем моніторингу: підхід, заснований на реалізації систем, виходи яких асоціюються з виходами об'єкта управління, а другий підхід – асоціація з індикаторами, які

відображають результати. При цьому зацікавлені не тільки в конкретних результатах в якийсь момент часу, але і які наслідки цих результатів матимуть в майбутньому і як ефективно розвиватиметься в майбутньому ця система. Це дозволяє оцінювати успішність проекту в майбутньому щодо очікуваних результатів, які грають роль зворотного зв'язку. Залежно від об'єкта та цілей моніторингу можуть ефективно використовуватися обидва підходи. При проактивному управлінні в результаті моніторингу та прогнозування можливостей системи управління СО запобігається розвиток небажаних процесів і позаштатних ситуацій в СО. Це істотно підвищує якість управління СО та запобігає виникненню різних нештатних ситуацій, аварій та катастроф, великих матеріальних втрат і загибелі людей. Однак в більшості випадків моніторинг і прогнозування стану СО вимагає створення дорогих автоматизованих систем, тому в основному управління СО здійснюється вручну, ґрунтуючись як на математичному моделюванні в прискореному часі, так і на евристичних правилах, які не допускають небажані процеси в СО і системах управління.

Сформульовано і загальні принципи реалізації концепції проактивного моніторингу та управління СО [3]:

- принцип необхідного різноманіття, який передбачає полімодельний опис СО за рахунок класифікації та впорядкування моделей і встановлення між ними зв'язків;

- багатокритеріальність рішень, отримання неостаточних рішень;

- декомпозиції і агрегування СО;

- самоорганізації математичних моделей.

Математичні моделі рухомого складу. В даний час при дослідженнях асинхронного приводу і визначення оптимальних законів управління застосовуються різні математичні моделі, які описують рух потягів з тяговим асинхронним приводом [1]. Зручною моделлю для дослідження процесів руху дизель-поїзда з тяговим асинхронним приводом є модель, що описується наступною системою рівнянь:

$$\frac{dx_1}{dt} = a_{17}x_7; \quad (1)$$

$$\frac{dx_2^n}{dt} = a_{212}^n x_{12}^n - a_{222}^n x_2^n + a_{24}^n x_4^n + a_{265}^n x_6^n x_5^n; \quad (2)$$

$$\frac{dx_3^n}{dt} = a_{313}^n x_{13}^n - a_{333}^n x_3^n + a_{35}^n x_5^n - a_{364}^n x_6^n x_4^n; \quad (3)$$

$$\frac{dx_4^n}{dt} = a_{42}^n x_2^n - a_{44}^n x_4^n - p x_6^n x_5^n; \quad (4)$$

$$\frac{dx_5^n}{dt} = a_{52}^n x_2^n - a_{55}^n x_5^n + p x_6^n x_4^n; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_6^n}{dt} = & a_{60}(a_{61}^n(x_4^n x_3^n - x_5^n x_2^n) - b_0^n - b_1^n x_6^n - b_3^n (x_6^n)^2 - i(x_1) - \\ & - \omega_r(x_1) + \eta_8^n(t)); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{dx_7}{dt} = a_{70} \left(\sum_{y=1}^2 a_{71}^y (x_4^y x_3^y - x_5^y x_2^y) - x_{10} - F_{c1} \right); \quad (7)$$

$$\frac{dx_8}{dt} = a_{80}(x_{10} - x_{11} - F_{c2}); \quad (8)$$

$$\frac{dx_9}{dt} = a_{90}(a_{91}^3(x_4^3 x_3^3 - x_5^3 x_2^3) + x_{11} - F_{c3}); \quad (9)$$

$$\frac{dx_{10}}{dt} = a_{10}(x_7 - x_8); \quad (10)$$

$$\frac{dx_{11}}{dt} = a_{11}(x_8 - x_9), \quad (11)$$

де x_1 – шлях, який проходить дизель-поїзд, t – час; a_{17} , $a_{212}^n = a_{313}^n = 1/\sigma^n L_s^n$, $a_{22}^n = a_{33}^n = R_s^n / \sigma^n L_s^n + R_r^n (L_m^n)^2 / (\sigma^n L_s^n (L_r^n)^2)$, $a_{24}^n = a_{35}^n = L_m^n / (\sigma^n L_s^n L_r^n T_r^n)$, $a_{265}^n = a_{364}^n = p L_m^n / (\sigma^n L_s^n L_r^n)$, $a_{42}^n = a_{52}^n = L_m^n / T_r^n$, $a_{44}^n = a_{55}^n = 1/T_r^n$, $a_{60} = p/J^n$, $a_{61}^n = \frac{3}{2} p \frac{k_r^n}{\sigma^n L_s^n} \frac{i_p}{R^n}$,

$a_{70} = a_{90} = 1/m_m$, $a_{80} = 1/m_n$, $a_{10} = C_{12}$, $a_{10} = C_{23}$ ($n = \overline{1, 3}$) – постійні коефіцієнти, які враховують параметри двигунів обмоторених вагонів; $\sigma^n = 1 - (L_m^n)^2 / (L_s^n L_r^n)$ – коефіцієнт розсіювання, R_s^n , R_r^n – активні опори статора и ротора; L_s^n , L_r^n , L_m^n – індуктивності відповідно статора, ротора та взаємна; $T_r = L_r / R_r$ – постійна часу ротора; n – кількість двигунів в моделі; $x_2^n = i_{s\alpha}^n$, $x_3^n = i_{s\beta}^n$, $x_{12}^n = U_{s\alpha}^n$, $x_{13}^n = U_{s\beta}^n$ ($n = \overline{1, 3}$) – проекції на вісі α і β струмів і напруг статорів двигунів, відповідно двох реальних двигунів першого обмотореного вагону і одного еквівалентного двигуна другого обмотореного вагону; $x_6^n = \omega^n$ ($n = \overline{1, 3}$) – кутові швидкості

обертання роторів двигунів, відповідно двох реальних двигунів першого обмотового вагону і одного еквівалентного двигуна другого обмотового вагону; p – число пар полюсів статора у кожному двигуні; J^n ($n=\overline{1,3}$) – момент інерції двигуна і механізму, що зведений до валу, відповідно двох реальних двигунів першого обмотового вагону і одного еквівалентного двигуна другого обмотового вагону; i_p – передавальне число редуктора; R^n ($n=\overline{1,3}$) – радіуси, відповідно, двох колісних пар першого вагону і однієї еквівалентної колісної пари третього вагону; b_0^n, b_1^n, b_2^n – постійні коефіцієнти, які характеризують момент навантаження; $i(x_1)$ – функція опору від уклонів профілю шляху; $\omega_r(x_1)$ – функція опору від кривих профілю шляху; $\eta_\delta^n(t)$ ($n=\overline{1,3}$) – випадкові функції для імітації можливості виникнення боксування, $\eta_\delta^3(t) = 0$; $x_4^n = \Psi_{r\alpha}^n, x_5^n = \Psi_{r\beta}^n$ ($n=\overline{1,3}$) – проекції на вісі α і β потокозчеплень роторів двигунів, відповідно двох реальних двигунів першого обмотового вагону і одного еквівалентного двигуна другого обмотового вагону; $x_7 = V_1, x_8 = V_2, x_9 = V_3$ – швидкості руху першого, другого і третього вагонів дизель-поїзда; m_m, m_n – маса обмотового і пасажирського вагонів; $x_{10} = F_{12}, x_{11} = F_{23}$ – сили, що діють між першим та другим, та другим та третім вагонами; F_c^n ($n=\overline{1,3}$) – сили опору руху першого, другого і третього вагонів; C_{12}, C_{23} – коефіцієнти пружності зв'язків між першим і другим, і другим і третім вагонами; $x_i(t_0), (i=\overline{1,11})$ – початкові значення змінних в момент часу t_0 ; t_0 – початок інтервалу руху складу.

Ціль статті – показати перевагу проактивного управління при змінній обстановці у зовнішньому середовищі, коли на якійсь ділянці залізниці рухомі состави впливають на оптимальне управління інших составів.

Математична модель (1) – (11) може використовуватися як для отримання більш точних моделей руху складу, коли, наприклад, необхідно досліджувати електромагнітні процеси в асинхронному приводі, так і для отримання одномасової моделі складу з одним еквівалентним двигуном. Така модель істотно прискорить моделювання, коли на деякій ділянці залізничної колії рухаються кілька составів.

В даний час управління дизель-поїздом з асинхронним приводом здійснюється машиністом в реактивному режимі, коли машиніст за даними комп'ютера системи управління, приладів і розкладом руху, визначає позицію контролера машиніста, а отже і необхідну швидкість руху складу самостійно або за розрахунками бортової обчислювальної системи.

Сучасне тотальне вторгнення комп'ютерів і комп'ютерних технологій в усі сфери людського життя створило ілюзію, що комп'ютери і їх технології можуть вирішувати будь-які проблеми. Однак як невирішені завдання в різних сферах людського життя, так і величезна кількість аварій і катастроф в різних областях застосування комп'ютерів, причинами яких було недосконалість комп'ютерних технологій, дали привід появи твердження про "комп'ютерному руйнуванні західної цивілізації" і про побудову суспільства ризику, а не "інформаційного суспільства" [9, 10]. Однак перспективи створення інтелектуальних систем на основі проактивного управління показують, що у комп'ютерних технологій є ще майбутнє.

Приклад 1. Нехай приміський склад рухається від станції A до станції B з зупинками на проміжній станції Q_r і зупиночних пунктах $Q_1, Q_2, \dots, Q_{r-1}, Q_{r+1}, Q_q$ (рис. 1).

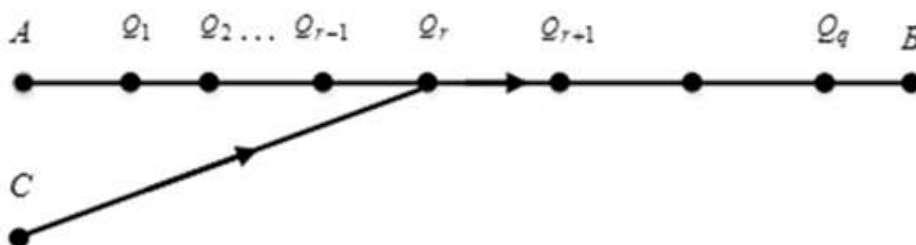


Рис. 1. Схема руху залізничних составів

Якщо по ділянці шляху AB рухається тільки один склад, то розклад руху складу може бути розрахований заздалегідь, коригування цього руху може бути пов'язане тільки з погодними умовами, ремонтними роботами або якимись непередбаченими обставинами. Якщо серед проміжних пунктів зупинки є хоча б одна станція Q_r , на якій перетинаються (або об'єднуються) хоча б два маршрути L_1 і L_2 , за якими можуть рухатися як швидкі, так і приміські поїзди, то можуть виникати ситуації, які необхідно враховувати при розрахунку руху між пунктами зупинок. Наприклад, приміський поїзд рухається зі станції A до станції B (маршрут

L_1) за розкладом і прибуває на станцію, де йому затримують відправлення, оскільки за маршрутом CQ_rB рухається швидкий поїзд, який спізнюється. Оскільки між станціями Q_r і Q_q немає можливості пропустити швидкий поїзд перед приміським, то необхідно це здійснити на станції Q_r , затримавши на необхідний час приміський поїзд. Якщо інформація про вимушений простій на станції Q_r приміського поїзда надійшла заздалегідь до його відправлення з зупинкового пункту Q_{r-1} , то можливо скорегувати закон руху між зупинним пунктом Q_{r-1} і станцією Q_r з метою мінімізації витрат енергоресурсів. Таким чином, з цього прикладу видно, що закони управління приміським складом між зупинковими пунктом Q_{r-1} і станцією Q_r залежать не тільки від характеристик рухомого приміського складу, але і від руху інших потягів на цій ділянці шляху. У зв'язку з цим для визначення оптимальних законів керування в подібних випадках необхідно володіти інформацією про рух інших складів. Відзначимо також, що все-таки стабільно високий рівень виконання розкладів пасажирських і приміських поїздів характерний не тільки для України, але і інших країн [16]. Для Великобританії, Франції, Німеччини рівень виконання розкладів в літній період приблизно дорівнює 90%. Найбільш високий рівень виконання розкладів в Японії, де середнє запізнення не перевищує 30 с. Однак на таких лініях щодоби виділяється до 6 годин на ремонт і утримання інфраструктури.

Таким чином, для реалізації концепції проактивного управління необхідно мати уявлення не тільки про поточний стан СО, але і прогнозувати поведінку як його, так і зовнішнього середовища на деякий час вперед. Даний підхід можна здійснити за рахунок реалізації в системі управління моделі об'єкта, на якій виконувати розрахунки з використанням певних законів управління. При цьому постійно здійснювати ідентифікацію параметрів даної моделі, поточного стану СО і зовнішнього середовища. Якщо розглядати математичну модель (1) – (11) в якості моделі для реалізації концепції проактивного управління, то слід зазначити, що в процесі руху дизель-поїзда є чинники, які неможливо врахувати заздалегідь: поява составів, що рухаються поза розкладом, метеорологічні умови, реальний опір руху дизель-поїзда, включення або виключення додаткового обладнання (пристроїв освітлення, опалення та ін.). Все це може призводити до неточного розрахунку керуючих впливів. Крім того, застосування тягових асинхронних двигунів (ТАД) вимагає створення досить складних систем управління і їх складових [10]. При експлуатації дизель-поїзда

змінюються характеристики ТАД, а через допустимі відхилення при виробництві та ремонті двигунів виникають деякі невизначеності тягових характеристик, які також потрібно враховувати і коригувати. Крім того, за допомогою процесу ідентифікації можна проводити діагностику і прогнозування з метою виявлення на ранніх етапах можливі майбутні несправності обладнання, а також для побудови більш ефективних законів управління.

Якщо розглядати модель об'єкта, яка описана співвідношеннями (1) – (11), то виникає необхідність в проведенні ідентифікації як електричних параметрів ТАД в процесі руху дизель-поїзда, так і параметрів, пов'язаних з рухом поїзда (момент опору руху, амплітуди коливань вагонів, зміна параметрів руху складів). Тобто можна сказати, що має місце дворівнева ідентифікація: на першому (нижньому) рівні необхідно виконувати оцінку параметрів, пов'язаних з ТАД, а на другому (верхньому) рівні – параметрів, пов'язаних з рухом поїзда і змін у зовнішньому середовищі.

При роботі ТАД відбувається нагрів активних опорів статора і ротора, що погіршує точність регулювання швидкості і потокозчеплення, а також може призвести до втрати стійкості всієї системи [12]. Особливо помітний вплив зміни цих опорів на роботу двигуна в області малих швидкостей руху. Внаслідок того, що досить складно безпосередньо виміряти параметри опорів ротора і статора, то застосовують непряме визначення їх значень. На сьогоднішній момент запропоновано декілька методів ідентифікації параметрів ТАД [12, 13]. Однак слід зазначити, що одним із загальних недоліків цих методів є те, що при зростанні ступеня несинусоїдальності форми статорних струмів, в значній мірі знижується точність ідентифікації.

Для ідентифікації параметрів пропонується на основі математичної моделі (1) – (11) робити уточнення параметрів двигуна в N заданих моментах часу. Необхідними даними для розрахунків є виміряні значення струму і напруги статора, а також їх похідні першого і другого порядків.

Розглянемо ідентифікацію основних параметрів для ТАД на основі математичної моделі (1) – (11) (співвідношення (2) – (5)). У наведеній моделі невідомими для кожного двигуна є п'ять параметрів:

$R_s^n, R_r^n, L_m^n, L_s^n, L_r^n$, які змінюються в процесі роботи двигуна. Вектор стану системи доступний для вимірювання частково, а саме: вимірюються проекції струму статора $i_{sa}^n, i_{s\beta}^n$ і частота обертання ротора двигуна ω ; вектор потокозчеплення ротора для вимірювання недоступний; керуючими сигналами є компоненти двовимірного вектора

напруги статора $U_{s\alpha}^n$, $U_{s\beta}^n$. Для виконання ідентифікації необхідно виконати перетворення математичної моделі до виду, в якому виключені величини потокозчеплення ротора, які неможливо виміряти. Для цього слід виконати такі перетворення:

$$\frac{dx_2^n}{dt} = a_{212}^n \left(\frac{dx_{14}^n}{dt} - K_r^n \frac{dx_4^n}{dt} \right); \quad (12)$$

$$\frac{dx_4^n}{dt} = \frac{1}{K_r^n} \left(\frac{dx_{14}^n}{dt} - \frac{1}{a_{212}^n} \frac{dx_2^n}{dt} \right) = \frac{1}{K_r^n} \left(x_{12}^n - R_s^n x_2^n - \frac{1}{a_{212}^n} \frac{dx_2^n}{dt} \right); \quad (13)$$

$$\frac{dx_2^n}{dt} = a_{212}^n \left(\frac{dx_{15}^n}{dt} - K_r^n \frac{dx_5^n}{dt} \right); \quad (14)$$

$$\frac{dx_5^n}{dt} = \frac{1}{K_r^n} \left(\frac{dx_{15}^n}{dt} - \frac{1}{a_{212}^n} \frac{dx_2^n}{dt} \right) = \frac{1}{K_r^n} \left(U_{12}^n - R_s^n x_2^n - \frac{1}{a_{212}^n} \frac{dx_2^n}{dt} \right), \quad (15)$$

де $x_{14}^n = \Psi_{r\alpha}^n$, $x_{15}^n = \Psi_{r\beta}^n$ ($n=\overline{1,3}$) – проекції на осі α і β потокозчеплень статорів двигунів, відповідно, двох реальних двигунів першого обмотового вагона і одного еквівалентного двигуна другого обмотового вагона.

Виконавши диференціювання обох частин виразів (2) – (3), отримаємо такі вирази:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x_2^n}{dt^2} &= a_{212}^n \frac{dx_{12}^n}{dt} - a_{22}^n \frac{dx_2^n}{dt} + a_{24}^n \frac{dx_4^n}{dt} + \\ &+ p\beta^n x_6^n \frac{dx_5^n}{dt} + p\beta^n \frac{dx_6^n}{dt} x_5^n; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x_3^n}{dt^2} &= a_{313}^n \frac{dx_{13}^n}{dt} - a_{33}^n \frac{dx_2^n}{dt} + a_{35}^n \frac{dx_5^n}{dt} + \\ &+ p\beta^n x_6^n \frac{dx_4^n}{dt} + p\beta^n \frac{dx_6^n}{dt} x_4^n. \end{aligned} \quad (17)$$

Тепер підставимо вираз (2) в (16), а вираз (3) в (17), і виконавши алгебраїчні перетворення, отримаємо наступні залежності:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x_2^n}{dt^2} + p x_6^n \frac{dx_3^n}{dt} &= K_1^n x_2^n + K_2^n x_{12}^n + \\ &+ K_3^n p x_6^n x_2^n + K_4^n \left(\frac{d_{12}^n}{dt} + p x_6^n x_{13}^n \right) + K_5^n \frac{dx_2^n}{dt}; \\ \frac{d^2 x_3^n}{dt^2} - p x_6^n \frac{dx_2^n}{dt} &= K_1^n x_3^n + K_2^n x_{13}^n + \\ &+ K_3^n p x_6^n x_2^n + K_4^n \left(\frac{dx_{13}^n}{dt} - p x_6^n x_{12}^n \right) + K_5^n \frac{dx_3^n}{dt}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{де } K_1^n &= -\frac{R_s^n}{\sigma^n L_s^n T_r^n}; \quad K_2^n = \frac{1}{\sigma^n L_s^n T_r^n}; \quad K_3^n = -\frac{R_s^n}{\sigma^n L_s^n}; \quad K_4^n = \frac{1}{\sigma^n L_s^n}; \\ K_5^n &= -\frac{(L_r^n R_s^n + L_s^n R_r^n)}{\sigma^n L_s^n L_r^n}. \end{aligned}$$

У наведених рівняннях невідомими є коефіцієнти $K_1^n - K_5^n$. Провівши вимірювання напруги, струму статора і частоти обертання ротора двигуна в п'яти моментах часу, отримуємо матрицю вигляду $Y^n = K^n X^n$, де

$$\begin{aligned} Y^n &= \begin{bmatrix} \left(\frac{d^2 x_2^n}{dt^2} \right)_k + p x_6^n \left(\frac{dx_3^n}{dt} \right)_k \\ \left(\frac{d^2 x_2^n}{dt^2} \right)_{2k} + p \omega^n \left(\frac{dx_3^n}{dt} \right)_{2k} \\ \dots \\ \left(\frac{d^2 x_2^n}{dt^2} \right)_{5k} + p \omega^n \left(\frac{dx_3^n}{dt} \right)_{5k} \end{bmatrix}, \\ X^n &= \begin{bmatrix} (X_1^n)_k & (X_2^n)_k & (X_3^n)_k & (X_4^n)_k & (X_5^n)_k \\ (X_1^n)_{2k} & (X_2^n)_{2k} & (X_3^n)_{2k} & (X_4^n)_{2k} & (X_5^n)_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (X_1^n)_{5k} & (X_2^n)_{5k} & (X_3^n)_{5k} & (X_4^n)_{5k} & (X_5^n)_{5k} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

де k – величина інтервалу дискретизації; $X_1^n = x_2^n$; $X_2^n = x_{12}^n$;

$$X_3^n = px_6^n x_3^n; \quad X_4^n = \frac{dx_{12}^n}{dt} + px_6^n x_{13}^n; \quad X_5^n = \frac{dx_2^n}{dt}.$$

Вектор невідомих параметрів

$$K^n = \left[K_{1k}^n; K_{2k}^n; K_{3k}^n; K_{4k}^n; K_{5k}^n \right]^T.$$

Із системи рівнянь $(K^n = Y^n (X^n)^{-1})$, отримаємо оцінки параметрів цієї системи $K_1^n - K_5^n$, за допомогою яких можуть бути отримані наступні параметри двигунів:

$$R_s^n = -\frac{K_3^n}{K_4^n}, \quad T_r^n = \frac{K_4^n}{K_2^n}, \quad \sigma^n = \frac{K_2^n}{K_4^n (K_3^n - K_5^n)}, \quad L_s^n = \frac{(K_3^n - K_5^n)}{K_2^n}.$$

Слід зазначити, що визначити такі параметри, як R_r^n , L_r^n , L_m^n , через коефіцієнти $K_1^n - K_5^n$ неможна. Визначення даних параметрів з урахуванням того, що діапазон їх можливої зміни щодо паспортного значення відомий, запропоновано виконати за допомогою генетичного алгоритму. Внаслідок того, що ці параметри можуть змінюватися в невеликих межах відносно їх паспортних значень, використання генетичного алгоритму дає прийнятне рішення за досить короткий час.

У рівняння руху математичної моделі (1) – (11) входить момент опору руху, який апроксимується поліномом другого ступеня з постійними коефіцієнтами (b_0 , b_1 , b). Ці коефіцієнти розраховуються заздалегідь за методом тягових розрахунків і залишаються постійними при русі дизель-поїзда для конкретного перегону. Але в процесі руху дизель-поїзда, при зміні дорожньої обстановки (погодні умови, зміни розкладу і т.п.) момент опору руху може змінюватися, що призводить до відхилень у визначенні керуючих впливів при виконанні управління з моделлю. Необхідно відзначити, що крім невизначеності дорожньої обстановки на точність прогнозування руху дизель-поїзда впливає також відхилення його фактичної ваги від розрахункового значення. Значення моменту опору руху (за різними оцінками) може відрізнятися від розрахункових значень не більше ніж на 20%. В результаті при використанні розробленого методу похибка прогнозування швидкості руху дизель-поїзда, з урахуванням оцінки моменту опору в процесі моделювання при різних варіантах завантаження дизель-поїзда склало не більше 2%.

Проактивне управління передбачає також використання моніторингу стану СО. Система управління тяговим електроприводом дизель-поїзда характеризуються значним числом технічних і економічних показників, що змінюються в часі. Оперативна оцінка всіх цих показників людиною практично неможлива навіть при візуальному відображенні інформації, для аналізу якої потрібно не тільки висока кваліфікація фахівця, а й трудомістка обробка даних з використанням обчислювальної техніки. У зв'язку з цим для моніторингу стану тягових електроприводів пропонується використовувати підхід, заснований на аналізі таксономічного показника [1, 15]. Для визначення таксономічного показника використовується рекурентна нейронна мережа, яка розраховує його значення в певні моменти часу. Якщо одержувані значення приблизно однакові і близькі до одиниці, то це свідчить про нормальне функціонування об'єкта управління. Зменшення значень таксономічного показника є сигналом про відхилення функціонування об'єкта від оптимального.

Висновки. В роботі розглянуто застосування концепції проактивного управління для рухомого складу з тяговим асинхронним електроприводом. В системі управління дизель-поїздом запропоновано використовувати реалізацію математичної моделі руху складу, з метою коригування законів управління при можливій зміні параметрів моделі. Ідентифікація параметрів здійснюється на двох рівнях: на першому (нижньому) рівні визначаються параметри, пов'язані з тяговими асинхронними електродвигунами, а на другому (верхньому) – параметри, що пов'язані з рухом поїзда. Моніторинг стану дизель-поїзда здійснюється за допомогою розрахунку таксономічного показника, на підставі значення якого визначаються відхилення у функціонуванні об'єкта від норми. Для розрахунку таксономічного показника застосовується рекурентна нейронна мережа, що має додаткові виходи, на яких формуються сигнали відхилення кожного з контрольованих параметрів від оптимального значення. Це дозволяє швидко ліквідувати виникаючі відхилення від оптимальних режимів при функціонуванні СО.

Список літератури:

1. Носков В.И. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / В.И. Носков, В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заполовский, С.Ю. Леонов // Научное издание – Х.: ХФИ "Транспорт Украины". – 2003. – 248 с.
2. Ерофеев А.А. Предпосылки создания системы интеллектуального управления перевозочным процессом // Вестник Белорусского государственного университета транспорта. 2017. – №1 (34). – С. 42 – 45.
3. Вонт Р. Адаптивные и проактивные компьютерные системы / Р. Вонт, Т. Перинг, Д. Тенненхау // Открытые системы. – 2003. – № 7. – С. 4 – 9.

4. Охтилев М.Ю. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. – М.: Наука, 2006. – 410 с.
5. Васильев С.Н. От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению // Теория и системы управления. – 2001. – № 1. – С. 5 – 22.
6. Тиханович О.В. Об использовании принципа проактивного управления в системах поддержки принятия решений // Прикладная информатика. – 2018. – Т. 13. – № 2 (74).
7. Li Yongkui Proactive behavior-based system for controlling safety risks in urban highway construction megaprojects / Yongkui Li, Yi Hu, Xia Bo, M. Skitmore // Automation in Construction. – Vol. 95. – 2018. – P. 118 – 128.
8. Want R. Comparing autonomic and proactive computing / R. Want, T. Perling, D. Tennenhouse // IBM Systems Journal. – 2003. – Vol. 42. – Is. 1. – P. 129 – 135.
9. Герасименко В.А. Информатика и интеграция в технике, науке, познании // Зарубежная радиоэлектроника. – 1993. – № 5. – С. 22 – 42.
10. Верзилин Д.Н. Неокибернетика: состояние исследований и перспективы развития / Д.Н. Верзилин, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Системный анализ в проектировании и управлении: Сборник научных трудов XXIII Междунар. науч.-практич. конф. Ч.1.-СПб.: Изд-во Политех-Пресс. – 2019. – С. 81-98.
11. Осипов С. И. Основы тяги поездов. Учебник для студентов техникумов и колледжей железнодорожного транспорта / С.И. Осипов, С.С. Осипов. – М.:УМК МПС России. – 2000. – 592 с.
12. Kenne G. An online simplified rotor resistance estimator for induction motors / G. Kenne, R.S. Simo, F. Lamnabhi-Lagarigue, A. Arzande, J.C. Vannier // IEEE Transactions on control systems technology, 2010. – Vol. 18. – № 5. – P. 1188 – 1194.
13. Duran M.J. Induction-motor sensorless vector control with online parameter estimation and overcurrent protection / M.J. Duran, J.L. Duran, F. Perez, J. Fernandez // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2006. – Vol. 53. – № 1. – P. 154 – 161.
14. Castaldi P. Parameter estimation of induction motor at standstill with magnetic flux monitoring / P. Castaldi, A. Tilli // IEEE Transactions on control systems technology. – 2005. – Vol. 13. – № 3. – P. 386 – 400.
15. Дмитриенко В.Д. Анализ интегральных показателей для контроля тягового подвижного состава / В.Д. Дмитриенко, Г.В. Гейко, Н.В. Мезенцев, С. Ю. Леонов // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Харків: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. – 2015. – № 12 (137). – С. 20 – 22.
16. Махедов М.И. Развитие системы нормирования и учета показателей выполнения расписаний движения пассажирских и пригородных поездов для железных дорог и сети в целом / М.И. Махедов, Е.А. Сотников, Е.А. Махедова // Вестник ВНИИЖТ. – 2020, Т. 79. – № 4. – С. 183 – 190.

References:

1. Noskov, V.I., Dmitrienko, Zapolovsky, N.I., Leonov, S.Yu. (2003), *Modeling and optimization of control and monitoring systems for locomotives*, Kharkiv, HFI "Transport of Ukraine", 248 p.
2. Erofeev, A.A. (2017), "Prerequisites for the creation of an intelligent control system of the transportation process", *Bulletin of the Belarusian State Universistema of Transport*, No. 1 (34), pp. 42 – 45.
3. Vont, R., Perling, T., Tennenhow, D. (2003), "Adaptive and proactive computer systems", *Open systems*, No. 7, pp. 4 – 9.

4. Okhtilev, M.Yu., Sokolov, B.V., Yusupov, R.M. (2006), *Intelligent technologies for monitoring and control of the structural dynamics of complex technical objects*, Moscow, Nauka, 410 p.
5. Vasiliev, S.N. (2001), "From classical regulation problems to intelligent control", *Theory and control systems*, No. 1, pp. 5 – 22.
6. Tikhanychev, O.V. (2018), "On the use of the principle of proactive control in decision support systems", *Applied Informatics*, Vol. 13, No. 2 (74).
7. Li, Yongkui., Yi, Hu., Xa, Bo., Skitmore, M. (2018), "Proactive behavior-based system for controlling safety risks in urban highway construction megaprojects", *Automation in Construction*, Vol. 95, pp. 118 – 128.
8. Want, R., Pering, T., Tennenhouse, D. (2003), "Comparing autonomic and proactive computing", *IBM Systems Journal*, Vol. 42, Is. 1, pp. 129 – 135.
9. Gerasimenko, V.A. (1993), "Informatics and integration in technology, science, cognition", *Foreign radio electronics*, No. 5, pp. 22 – 42.
10. Verzhilin, D.N., Sokolov, B.V., Yusupov, R.M. (2019), "Neocybernetics: state of research and development prospects", *System analysis in design and management*, SPb, Polytech-Press Publishing House, pp. 81 – 98.
11. Osipov, S.I., Osipov, S.S. (2000), *Fundamentals of traction trains. Textbook for students of technical schools and colleges of railway transport*, Moscow, UMK Ministry of Railways of Russia, 592 p.
12. Kenne, G., Simo, R.S., Lamnabhi-Lagarigue, F., Arzande, A., Vannier, J.C. (2010), "An online simplified rotor resistance estimator for induction motors", *IEEE Transactions on control systems technology*, Vol. 18, No. 5, pp. 1188 – 1194.
13. Duran, M.J., Duran, J.L., Perez, F., Fernandez, J. (2006), "Induction-motor sensorless vector control with online parameter estimation and overcurrent protection", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, No. 1, pp. 154 – 161.
14. Castaldi, P., Tilli, A. (2005), "Parameter estimation of induction motor at standstill with magnetic flux monitoring", *IEEE Transactions on control systems technology*, Vol. 13, No. 3, pp. 386 – 400.
15. Dmitrienko, V.D., Heiko, H.V., Mezentsev, M.V., Leonov, S.Yu. (2015), "Analysis of integral indicators for control of traction rolling stock", *Information systems: collection of scientific works*, Kharkiv: Kharkiv University of the Powers of the Power named Ivan Kozhedub, No. 12 (137), pp. 20 – 22.
16. Makhedov, M.I., Sotnikov, E.A., Makhedova, E.A. (2020), "Development of the system of rationing and accounting for the performance of timetables for the movement of passenger and suburban trains for railways and the network as a whole", *Bulletin of VNIIZhT*, Vol. 79, No. 4, pp. 183 – 190.

Статтю представив д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПІ" Серков О.А.

Поступила (received) 29.05.2021

Dmitrienko Valerii, Dr. Tech. Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (057) 707-61-98, e-mail: valdmitrienko@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-2523-595X

Mezentsev Mykola, Cand. Tech. Sci., Docent
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (098) 859-88-98, e-mail: mykola.mezentsev@khpi.edu.ua
ORCID ID: 0000-0001-7834-2797

УДК 861.5.015.2

Комп'ютерні компоненти для вирішення проблем оптимального управління рухомим складом залізниць України / Дмитрієнко В.Д., Мезенцев М.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2021. – № 1 (5). – С. 40 – 55.

Вирішення завдань оптимального управління тяговим рухомим складом, як правило, виконується у припущеннях, що зовнішнє середовище щодо відношення до рухомого складу залишається незмінним та не впливає або слабо впливає на закони управління. Однак реальний рух рухомих складів по залізниці вносить суттєві зміни в заздалегідь розроблені закони управління та графіки руху. У зв'язку з цим у статті розглядаються підходи до управління складом із змінами, що склалися у зовнішньому середовищі. Такі підходи вимагають ідентифікації зовнішнього середовища в процесі руху конкретного складу та корекції законів управління при зміні параметрів зовнішнього середовища. У цьому випадку відбувається перехід до проактивного управління. Іл.: 1. Бібліогр.: 16 назв.

Ключові слова: комп'ютерні компоненти; оптимальне управління; тяговий рухомий склад; зміна станів зовнішнього середовища; проактивне управління.

УДК 861.5.015.2

Компьютерные компоненты для решения проблем оптимального управления подвижным составом железных дорог Украины / Дмитриенко В.Д., Мезенцев Н.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2021. – № 1 (5). – С. 40 – 55.

Решение задач оптимального управления тяговым подвижным составом, как правило, выполняется в предположении, что внешняя среда по отношению к составу остается неизменной и не влияет или слабо влияет на законы управления. Однако реальное движение составов по железной дороге вносит существенные изменения в заранее рассчитанные законы управления и графики движения. В связи с этим в статье рассмотрены подходы к управлению составом с учетом изменения состояний внешней среды. Такие подходы требуют идентификации внешней среды в процессе движения конкретного состава и коррекции законов управления при изменении параметров внешней среды. В этом случае происходит переход к проактивному управлению. Ил.: 1. Библиогр.: 16 назв.

Ключевые слова: компьютерные компоненты; оптимальное управление; тяговый подвижной состав; изменение состояний внешней среды; проактивное управление.

УДК 861.5.015.2

Computer components for solving the problems of optimal control of the rolling stock of the railways of Ukraine / Dmitrienko V.D., Mezentsev M.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2021. – № 1 (5). – P. 40 – 55.

The solution of the problems of optimal control of traction rolling stock, as a rule, is performed under the assumption that the external environment in relation to the composition remains unchanged and does not affect or weakly affects the laws of control. However, the actual movement of trains on the railway makes significant changes to the pre-calculated laws of control and schedules. In this regard, the article considers approaches to the control of the composition taking into account changes in the state of the environment. Such approaches require the identification of the external environment in the process of movement of a particular composition and the correction of control laws when changing the parameters of the external environment. In this case, there is a transition to proactive control. Figs.: 1. Refs.: 16 titles.

Keywords: computer components; optimal control; traction rolling stock; change in the state of the environment; proactive control.

УДК 681.5

DOI: 10.20998/2411-0558.2021.01.04

О. И. ШИРЯЕВА, канд. техн. наук, в.н.с., ИИиВТ КН МОН РК,
Алматы, Казахстан,

Т. И. САМИГУЛИН, докторант, КазННТУ им. К. Сатпаева,
Алматы, Казахстан

ИНТЕГРАЦИЯ СОВРЕМЕННОЙ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ТЕХНИКИ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С АЛГОРИТМАМИ AIS

В статье сформированы условия интеграции современной микропроцессорной техники, реализующей законы типового регулирования в распределённой системе управления, с такими интеллектуальными алгоритмами, как искусственные иммунные системы (AIS). В рамках сформированных условий решена задача синтеза I-PD регулятора для двухконтурной системы управления технологическим процессом очистки природного газа от различных примесей дистиляционной колонны. Ил.: 4. Табл.: 1. Библиогр.: 14 назв.

Ключевые слова: интеграция; микропроцессорная техника; искусственный интеллект; типовой регулятор; искусственная иммунная система; задача синтеза.

Постановка проблемы и анализ литературы. Проблема интеграции современной микропроцессорной техники с различными интеллектуальными алгоритмами является актуальной. Это следствие интенсивного развития интеллектуальных алгоритмов для эффективного решения различных задач производства [1]. В частности, для обработки данных, для оптимального управления производственными процессами, для решения задач прогнозирования на основе технологий умного производства, анализа больших данных, методов машинного обучения, цифровых двойников [2].

Успешное внедрение промышленного искусственного интеллекта обуславливает его интеграцию, например, и в нефтегазовой отрасли, отличающейся высокими технологическими требованиями к процессам, набором больших данных и использованием микропроцессорной техники. Одно из важнейших перспективных направлений внедрения искусственного интеллекта в нефтегазовой отрасли – это моделирование и оптимизация различных процессов. То есть использование искусственного интеллекта для управления технологическими процессами, в том числе, оптимальными [3]. Для решения данных задач используются оптимизационные алгоритмы искусственного интеллекта, широко представленные в современной литературе [4].

В рамках развития исследований интеллектуальных алгоритмов

поисковой оптимизации, в настоящее время, можно условно выделить следующие направления [5]:

1. Эволюционные алгоритмы:

- генетические алгоритмы;
- искусственные иммунные системы;
- эволюционные стратегии;
- эволюционное программирование;
- дифференциальная эволюция;

2. Роевые алгоритмы:

- роя частиц;
- колонии муравьёв;
- пчелиного роя;
- бактериальная оптимизация;
- рой светлячков;
- кукушкин поиск и т.д.

3. Алгоритмы неживой природы:

- гармонический поиск;
- гравитационный поиск;
- электромагнитный поиск и т.д.

Многие из перечисленных алгоритмов уже используются для решения задач синтеза оптимальных типовых регуляторов систем автоматического управления: генетический алгоритм [6], роя частиц [7], колонии муравьёв [8], кукушкин поиск [9], искусственные иммунные системы [10] и т.д.

Современные интеллектуальные алгоритмы разнообразны – каждый из алгоритмов имеет свои преимущества и недостатки, поэтому должен рассматриваться непосредственно в соответствии с конкретными технологическими процессами нефтегазовой отрасли, желаемыми требованиями к динамике и качеству систем, типом регулятора.

В данной статье поставлена задача формирования условий интеграции современной микропроцессорной техники нефтегазовой отрасли, реализующей законы типового регулирования, с такими интеллектуальными алгоритмами, как искусственные иммунные системы.

Цель статьи. Разработка механизмов интеграции и внедрение интеллектуального алгоритма искусственных иммунных систем в промышленные регуляторы распределенной системы управления для нефтегазовой отрасли.

Основной раздел. При осуществлении процедур управления технологическими процессами на основе микропроцессорной техники

нефтегазовой отрасли, используется распределённая система управления (Distributed Control System, DCS). В системной архитектуре PCY, компонент, предназначенный для выполнения функций управления – станция управления (контроллер распределённой системы управления), который интегрирован в PCY наряду с другими компонентами.

Распределённая система управления включает пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (PID-регулятор) с переменной структурой, на выходе которого формируется сигнал управления, MV (рис. 1).

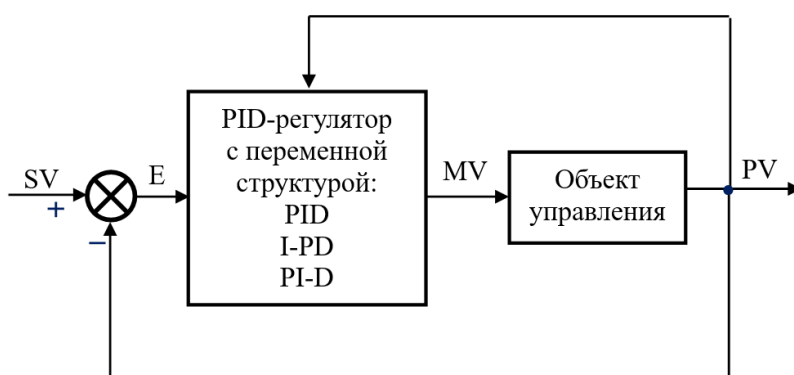


Рис. 1. Схема распределённой системы управления с PID-регулятором

На рис. 1: PV – текущее значение выходного сигнала объекта управления; SV – заданный сигнал процесса; E – ошибка рассогласования между значениями выходного сигнала объекта управления и заданного сигнала.

В состав автоматизированных систем управления микропроцессорной техники различных фирм входят регуляторы с переменной структурой – законы управления таких регуляторов включают не только ошибку рассогласования, но и текущее значение выходного сигнала, PV.

Для интеграции современной микропроцессорной техники нефтегазовой отрасли с интеллектуальными алгоритмами предлагается рассмотреть условия формирования задачи микропроцессорной настройки PID-регулятора с переменной структурой на основе интеллектуальных алгоритмов.

В качестве условий сформируем этапы настройки интеллектуального регулятора.

Этап 1. Формирование и загрузка данных в контроллеры распределённой системы управления.

Етап 2. Применение функционального блока PID-регулятора с переменной структурой.

Етап 3. Законы PID-регулирования.

Етап 4. Настройка регулятора, минимизирующего выбранный критерий качества, на основе алгоритмов искусственного интеллекта.

Етап 5. Формирование дискретного управляющего сигнала для объекта управления.

В соответствии с третьим этапом сформируем законы управления.

Закон PID управления, в котором управляющее воздействие формируется на основе ошибки рассогласования

$$MV(t) = K_p \cdot K_s \cdot \left\{ E(t) + \frac{1}{T_i} \int_{t=0}^{t_1} E(t) dt + T_d \frac{dE(t)}{dt} \right\}, \quad (1)$$

где K_p – пропорциональный коэффициент усиления;

K_s – коэффициент усиления, определяющий допустимый диапазон изменения для устойчивости замкнутой системы управления;

T_i – постоянная интегрирования;

T_d – постоянная дифференцирования.

Закон I-PD управления, в котором управляющее воздействие формируется на основе ошибки рассогласования, E , и изменения выходного сигнала PV

$$MV(t) = K_p \cdot K_s \cdot \left\{ -PV(t) + \frac{1}{T_i} \int_{t=0}^{t_1} E(t) dt - T_d \frac{dPV(t)}{dt} \right\}. \quad (2)$$

Закон PI-D управления, в котором управляющее воздействие формируется на основе ошибки рассогласования, E , и изменения выходного сигнала PV

$$MV(t) = K_p \cdot K_s \cdot \left\{ E(t) + \frac{1}{T_i} \int_{t=0}^{t_1} E(t) dt - T_d \frac{dPV(t)}{dt} \right\}. \quad (3)$$

В настоящее время разработаны методы синтеза подобных регуляторов на основе таких интеллектуальных алгоритмов роевого интеллекта, как Cuckoo Search (CS), Genetic Algorithm (GA), Particle

swarm optimization (PSO), Bacterial Foraging Algorithm (BG) [12,13]. В данной статье рассматривается алгоритм AIS.

В случае (1), передаточные функции идеального типового регулятора и замкнутой системы управления имеют стандартный вид:

$$C_{PID}(s) = K_p \cdot K_s \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{T_i} \cdot \frac{1}{s} + T_d \cdot s \right\},$$

$$T_{PID}(s) = \frac{C_{PID}(s) \cdot G(s)}{1 + G(s) \cdot C_{PID}(s)}. \quad (4)$$

Для регуляторов (2) и (3), передаточная функция формируется в соответствии со схемой (рис. 2) и законами управления (1) – (3):

$$T_{I-PD}(s) = \frac{C_I(s) \cdot G(s)}{1 + G(s) \cdot (C_I(s) + C_{PD}(s))}, \quad (5)$$

$$T_{PI-D}(s) = \frac{C_{PI}(s) \cdot G(s)}{1 + G(s) \cdot (C_{PI}(s) + C_D(s))}. \quad (6)$$

В соответствии с четвёртым этапом настройки регуляторов, на основе алгоритма искусственных иммунных систем, необходимо сформировать критерий качества, с учётом передаточных функций замкнутой системы (4) – (6).

В качестве примера используем передаточные функции двухконтурной системы управления процессами очистки природного газа от различных примесей дистилляционной колонны [14]:

$$G_1(s) = \frac{0.0042}{1.9588s + 1}, \quad G_2(s) = \frac{0.0072}{1.9588s + 1}. \quad (7)$$

Для формирования требований к желаемой динамике получены переходные процессы (рис. 2), где PV1 и PV2 – текущие значения выходных сигналов двух контуров. В качестве желаемых сигналов SV1 и SV2 – единичный ступенчатый сигнал.

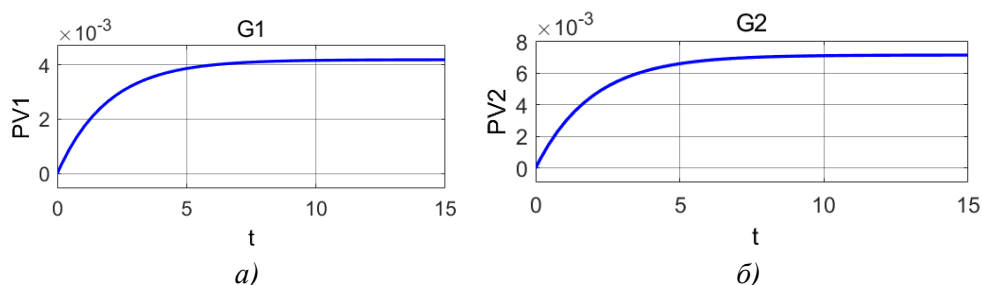


Рис. 2. Переходные процессы контуров (7)
 а – 1 контур, б – 2 контур

Для реализации желаемой динамики, введём в рассмотрение интегральный квадратичный критерий качеств:

$$ISE = \int_{t=0}^{t_1} E^2(t) dt = \int_{t=0}^{t_1} (SV(t) - PV(t))^2 dt, \rightarrow \min. \quad (8)$$

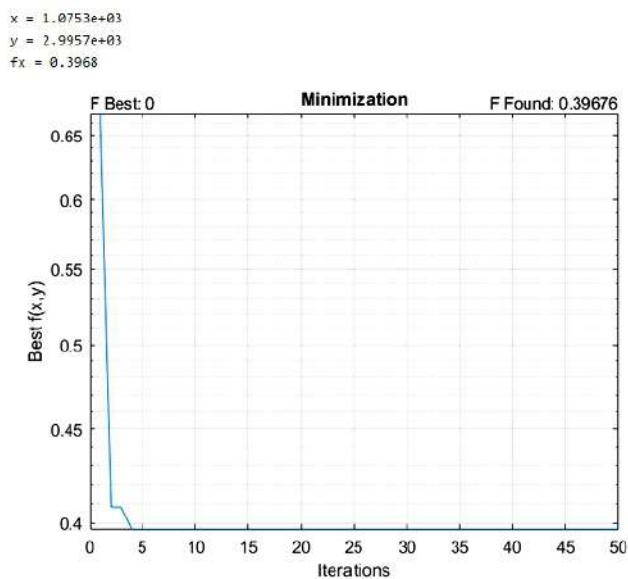
Критерий (8) является целевой функцией для оптимизационной задачи нахождения минимума на основе алгоритмов искусственного интеллекта.

В этом случае поставленная задача сводится к следующей: найти неизвестные параметры регуляторов, которые обеспечивают минимум критерию качества (8) на основе алгоритма искусственного интеллекта AIS.

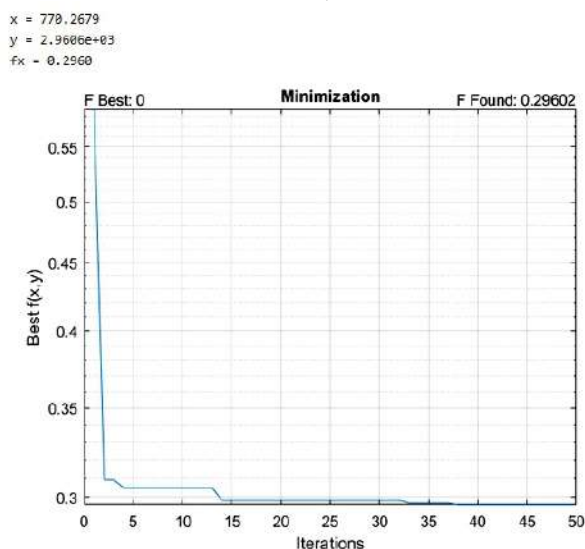
В данной статье приведём результаты синтеза I-PD регулятора распределённой системы (2). Для поиска неизвестных параметров K_p , T_i , T_d , используется методология, представленная в работе [14]. В соответствии с ней формируется начальная популяция, которая представляет собой параметры регуляторов из диапазона допустимых значений, удовлетворяющего свойству устойчивости замкнутой системы. Затем производится полный цикл вычислений, на основе шагов поискового AIS [14].

Общие настройки алгоритма: $n = 100$ – размер популяции; $ab = \text{cadeia}(n, 44)$ – популяция антител; $gen = 50$ – число генераций; $pm = 0.5$ – вероятность мутации; $d = 0.3$ – популяция, которая подвергается случайным перестановкам; $beta = 0.5$ – множитель, контролирующий количество клонов.

На рис. 3 представлены удовлетворительные результаты оценки работы алгоритма AIS для двух контуров (7).



a)



b)

Рис. 3. Оценка работы алгоритма AIS для двух контуров (7)
 a – 1 контур, b – 2 контур

Результаты применения алгоритма AIS для нахождения параметров I-PD регулятора представлены в таблице. Для сравнения, получены параметры PID регулятора на основе PID Tuner среды MATLAB.

Таблица

Математические модели и параметры регуляторов

Объект управления (ОУ)	Параметры регулятора					
	Схема ОУ с PID регулятором (PID Tuner)			Схема ОУ с I-PD регулятором (AIS)		
	K_p	$\frac{1}{T_i}$	$\frac{1}{T_d}$	K_p	T_i	T_d
1 контур	400	0.61	0.13	1075.3	2995.7	0
2 контур	181.14	1.09	0	770.3	2960.6	0

Результаты моделирования объектов управления двух контуров (7) с регуляторами, представлены на рис. 4.

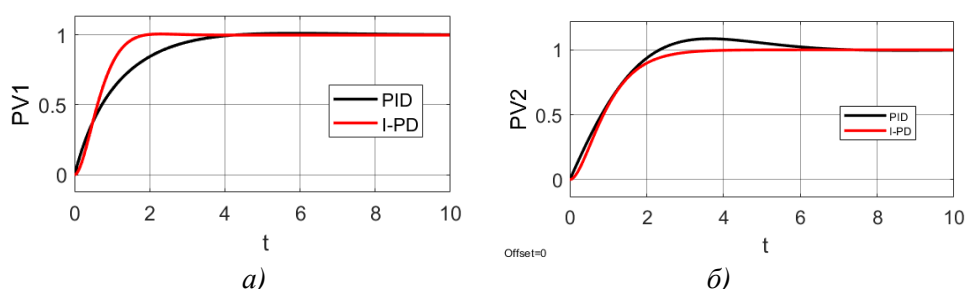


Рис. 4. Переходные процессы объекта управления (7) с регуляторами
а – 1 контур, б – 2 контур

По полученным результатам моделирования можно сделать вывод об эффективности I-PD регуляторов, настроенных алгоритмом AIS, с точки зрения прямых оценок качества переходных процессов: время регулирования, перерегулирование, время нарастания.

Выводы. Для распределённой системы управления, с использованием интеллектуального алгоритма AIS, получены результаты синтеза регуляторов. Приведено решение задачи синтеза I-PD регуляторов для двухконтурной системы управления технологическим процессом очистки природного газа от различных примесей дистиляционной колонны, с достижением желаемой динамики. На основе полученных результатов можно сделать выводы о пути и условиях интеграции современной микропроцессорной техники, реализующей законы типового регулирования в распределённой системе управления, с интеллектуальными алгоритмами.

Данное исследование было профинансировано Комитетом Науки

Министерства Образования и Науки Республики Казахстан (грант № AP08855743).

Список литературы:

1. *Arinez J.* Artificial Intelligence in Advanced Manufacturing: Current Status and Future Outlook / *J. Arinez, Q. Chang, R. Gao, C. Xu, J. Zhang* // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2020. – Vol. 142. – 16 p.
2. *Malik H.* Applications of Artificial Intelligence Techniques in Engineering. Advances in intelligent systems and computing / *H. Malik, S. Srivastava, Y.R. Sood, A. Ahmad* // Springer Nature Singapore. – 2019. – Vol. 1. – P. 698.
3. *Lee J.* Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems / *J. Lee, H. Davari, J. Singh, V. Pandhare*. – Manufacturing Letters. – 2018. – Vol. 18. – P. 20-23.
4. *Xing B.* Innovative computational intelligence: A rough guide to 134 clever algorithms / *B. Xing, W. Gao*. – Cham: Springer, 2014. – 451 p.
5. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации / *А.П. Карпенко*. – М.: МВТУ им.Баумана. – 2014. – 446 p.
6. *Slavov T.* Application of Genetic Algorithm to Tuning a PID Controller for Glucose Concentration Control / *T. Slavov, O. Roeva* // WSEAS Transactions on Systems. – 2012. – Issue 7. – Vol. 11. – P. 223-233.
7. *Amar M.N.* Optimization of WAG process using dynamic proxy, genetic algorithm and ant colony optimization / *M.N. Amar, N. Zeraibi, K. Redouane* // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2018. – Vol. 42. – Issue 11. – P. 6399-6412.
8. *Wang J.* The Application of the Particle Swarm Algorithm to Optimize PID Controller in the Automatic Voltage Regulation System / *J. Wang, N. Song, E. Jiang, D. Xu., W. Deng, L. Mao*. – Springer Singapore: Advanced Computational Methods in Energy, Power, Electric Vehicles and Their Integration, 2017. – P. 529-536.
9. *Sethi R.* Cuckoo search algorithm based optimal tuning of PID structured TCSC controller / *R. Sethi, S. Panda, B. Sahoo* // Computational Intelligence in Data Mining. – 2015. – Vol. 1. – P. 251-263.
10. *Sahraoui M.* Application of artificial immune algorithm-based optimisation in tuning a PID controller for nonlinear systems / *M. Sahraoui, M. Salem* // International Journal of Automation and Control. – 2015. – Vol. 9. – No. 3. – P. 186-200.
11. *Kumar D.* Design of PSO based I-PD Controller and PID Controller for a Spherical Tank System / *D. Dinesh Kumar, B. Meenakshipriya, S. Ram* // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9. – Issue 12. – P. 1-5.
12. *Puangdownreonga, D.* Optimal Design of I-PD Controller for DC Motor Speed Control System by Cuckoo Search / *D. Puangdownreonga, A. Nawikavatana, C. Thammarat* // International Electrical Engineering Congress, iEECON2016, Chiang Mai, Thailand. – 2016. – P. 83-86.
13. *Jain, T.* Optimization of PD-PI Controller using Swarm Intelligence / *T. Jain, M.J. Nigam* // Journal Of Theoretical And Applied Information Technology. – 2008. – Vol. 4. – No. 11. – P. 1013-1018.
14. *Ширяева, О.И.* Реализация SMART-технологии построения оптимальных систем на основе модифицированных алгоритмов / *Ширяева О.И., Самигулин Т.И.* // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2020. – № 1(3). – С. 41-49.

References:

1. Arinez, J., Chang, Q., Gao, R., Xu, C., Zhang, J. (2020), "Artificial Intelligence in Advanced Manufacturing: Current Status and Future Outlook", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 142, 16 p.
2. Malik, H., Srivastava, S., Sood, Y.R., Ahmad, A. (2019), "Applications of Artificial Intelligence Techniques in Engineering", *Advances in intelligent systems and computing*, Springer Nature Singapore, Vol. 1, 698 p.
3. Lee, J., Davari, H., Singh, J., Pandhare, V. (2018), "Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems", *Manufacturing Letters*, Vol. 18, pp. 20-23.
4. Xing, B., Gao, W. (2014), *Innovative computational intelligence: A rough guide to 134 clever algorithms*, Cham, Springer, 451 p.
5. Karpenko, A.P. (2014), *Sovremennye algoritmy poiskovoj optimizatsii*, Moscow, Bauman MSTU, 446 p.
6. Slavov, T., Roeva, O. (2012), "Application of Genetic Algorithm to Tuning a PID Controller for Glucose Concentration Control", *WSEAS Transactions on Systems*, Issue 7, Vol. 11, pp. 223-233.
7. Amar, M.N., Zeraibi, N., Redouane, K. (2018), "Optimization of WAG process using dynamic proxy, genetic algorithm and ant colony optimization", *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 42, Issue 11, pp. 6399-6412.
8. Wang, J., Song, N., Jiang, E., Xu, D., Deng, W., Mao, L. (2017), "The Application of the Particle Swarm Algorithm to Optimize PID Controller in the Automatic Voltage Regulation System", Springer Singapore, *Advanced Computational Methods in Energy, Power, Electric Vehicles and Their Integration*, pp. 529-536.
9. Sethi, R., Panda, S., Sahoo B. (2015), "Cuckoo search algorithm based optimal tuning of PID structured TCSC controller", *Computational Intelligence in Data Mining*, Vol. 1, pp. 251-263.
10. Sahraoui, M., Salem, M. (2015), "Application of artificial immune algorithm-based optimisation in tuning a PID controller for nonlinear systems", *International Journal of Automation and Control*, Vol. 9, No. 3, pp. 186-200.
11. Kumar, D., Meenakshipriya, B., Ram, S. (2016), "Design of PSO based I-PD Controller and PID Controller for a Spherical Tank System", *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 9, Issue 12, pp. 1-5.
12. Puangdownreonga, D., Nawikavatana, A., Thammarat C. (2016), "Optimal Design of I-PD Controller for DC Motor Speed Control System by Cuckoo Search", *International Electrical Engineering Congress, iEECON2016*, Chiang Mai, Thailand, pp. 83-86.
13. Jain, T., Nigam, M.J. (2008), "Optimization of PD-PI Controller using Swarm Intelligence", *Journal Of Theoretical And Applied Information Technology*, Vol. 4, No. 11, pp. 1013-1018.
14. Shiryayeva, O.I., Samigulin, T.I. (2020), "Implementation SMART-technology constructing optimal systems based on modified algorithms", *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*, Kharkiv: NTU "KhPI", No. 1(3), P.41-49.

Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ" Леонов С.Ю.

Поступила (received) 13.06.2021

Shiryayeva Olga, Cand.Sci.Tech, Leading Researcher
Institute of Information and Telecommunication Technologies MES RK
Str. Pushkin, 125, Almaty, Kazakhstan, 050010
Tel: +8(727)2723711, e-mail: oshiryayeva@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-2532-0636

Samigulin Timur, Doctoral Student
Satbayev Kazakh National Research Technical University
Str. Satpayev, 22 A, Almaty, Kazakhstan, 050013
Tel:+8(727)2929952, e-mail: timur.samigulin@yandex.kz
ORCID ID: 0000-0001-9963-6719

УДК 681.5

Інтеграція сучасної мікропроцесорної техніки розподіленої системи управління з алгоритмами AIS / Ширяєва О.І., Самігулін Т.І. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2021. – № 1 (5). – С. 56 – 67.

У статті сформовані умови інтеграції сучасної мікропроцесорної техніки, що реалізує закони типового регулювання в розподіленій системі управління, з такими інтелектуальними алгоритмами, як штучні імунні системи (AIS). В рамках сформованих умов вирішено завдання синтезу I-PD регулятора для двоконтурної системи управління технологічним процесом очищення природного газу від різних домішок дистиляційної колони. Ил.: 4. Табл.: 1. Бібліогр.: 14 назв.

Ключові слова: інтеграція; мікропроцесорна техніка; штучний інтелект; типовий регулятор; штучна імунна система; завдання синтезу.

УДК 681.5

Интеграция современной микропроцессорной техники распределённой системы управления с алгоритмами AIS / Ширяева О.И., Самигулин Т.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2021. – № 1 (5). – С. 56 – 67.

В статье сформированы условия интеграции современной микропроцессорной техники, реализующей законы типового регулирования в распределённой системе управления, с такими интеллектуальными алгоритмами, как искусственные иммунные системы (AIS). В рамках сформированных условий решена задача синтеза I-PD регулятора для двухконтурной системы управления технологическим процессом очистки природного газа от различных примесей дистиляционной колонны. Ил.: 4. Табл.: 1. Библиогр.: 14 назв.

Ключевые слова: интеграция; микропроцессорная техника; искусственный интелект; типовой регулятор; искусственная иммунная система; задачи синтеза.

UDC 681.5

Integration of modern microprocessor technology of a distributed control system with AIS algorithms / Shiryayeva O.I., Samigulin T.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2021. – № 1 (5). – P. 56 – 67.

The article forms the conditions for the integration of modern microprocessor technology that implements the laws of standard regulation in a distributed control system with such intelligent algorithms as artificial immune systems (AIS). Within the framework of the formed conditions, the problem of synthesis of the I-PD regulator for a two-circuit control system for the technological process of natural gas purification from various impurities of the distillation column is solved. Figs.: 4. Tabl.: 1. Refs.: 14 titles.

Keywords: integration; microprocessor technology; artificial intelligence; typical regulator; artificial immune system (AIS); synthesis tasks.

УДК 004.932

DOI: 10.20998/2411-0558.2021.01.05

А. О. ДАШКЕВИЧ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ"

МЕТОД РОЗТАШУВАННЯ ТОЧОК НА ПЛОЩИНІ ІЗ УРАХУВАННЯМ ЇХ ВЗАЄМНОЇ ДОСЯЖНОСТІ

В роботі представлено підхід визначення положень множини точок, які забезпечують заданий коефіцієнт досяжності для заданої точкової множини на площині. Представлений метод полягає в нанесенні кіл із центрами у заданих точках множини на регулярну сітку та визначенні точок перетину максимальної кількості кіл. Запропонований метод реалізовано в вигляді програмного інструменту, який дозволяє знаходити мінімально необхідну множину точок, заданих на регулярній сітці, яка покриває задану множину точок та дозволяє проводити візуалізацію результатів досліджень. Іл.: 3. Бібліогр.: 13 назв.

Ключові слова: коефіцієнт досяжності; точкова множина на площині; регулярна сітка; множини точок; точки перетину максимальної кількості кіл.

Постановка проблеми. Задачі на розташування точок виникають в багатьох областях діяльності, наприклад, у аналізі видимості [1], визначенні розташувань сенсорів [2 – 4], моделюванні людських потоків [5, 6], плануванні міських середовищ [7], задачах керування мобільними роботами [8]. В багатьох подібних задачах часто виникає необхідність визначення деякої множини точок, яка охоплює задані положення, наприклад, оглядові точки на поверхні, що спостерігається [9]. Схожі задачі виникають при вивченні та симуляції нанесення фарб на поверхню [10], в яких виникає необхідність визначення мінімальної множини точок положень системи, яка наносить плівку.

Аналіз останніх досліджень. Найчастіше, проблему розташування точок розглядають як задачу визначення видимості, яка розглядається в багатьох сучасних дослідженнях, зокрема, при оптимізації планування шляху [11, 12], найчастіше із використанням методів еволюційної оптимізації [12], але такі методи не надають можливості визначення точних розв'язків і можуть збігатись до локальних оптимумів. В роботі [13] було представлено метод визначення видимості точок для полігональної моделі місцевості, але в багатьох задачах необхідно визначати розв'язки для двовимірного випадку, що призводить до необхідності пошуку ефективних способів пошуку таких розв'язків.

Мета роботи. Розробка підходу та відповідного програмного інструментарію для визначення множини точок на площині, які забезпечують максимальну досяжність точок заданої точкової множини.

© А.О. Дашкевич, 2021

Основна частина. Сформулюємо задачу визначення множини положень точок сенсору: для точкової множини $P = \{p_1, \dots, p_N\}$, яка задана точками $p_i = (x_i, y_i)$, знайти таку множину точок-сенсорів $P_S = \{p_1, \dots, p_M\}$, $M < N$, які характеризуються деяким максимальним значенням відстані впливу T , при розташуванні в яких кожна точка $p_i \in P$, буде досяжною хоча б із однієї точки p_j , де $i = 1..N, j = 1..M$.

Визначимо умову взаємної досяжності точок:

$$f(p_i, p_j) < T, \quad (1)$$

де $f(a, b) = f(b, a)$ – деяка функція, наприклад, Евклідова відстань між точками на площині, T – задане порогове значення.

Далі нанесемо точки P на прямокутну піксельну сітку G розміром $w \times h$ із наступними параметрами:

$w \leq \max(x_{p_i})$ – ширина сітки;

$h \leq \max(y_{p_i})$ – висота сітки.

Також сформуємо двовимірний цілочисельний масив-акумулятор A такої самої розмірності, що й G , кожна комірка якого на початку проініціалізована нульовим значенням.

Для визначення положень точок P_S через кожен $p_i \in P$ проводимо коло $c_i = (c_x, c_y)$ із заданим r_i . Взаємна досяжність за виразом (1) для кола:

$$(c_x - g_x)^2 + (c_y - g_y)^2 \leq r_i^2. \quad (2)$$

Тоді, для кожної точки $g_i = (g_x, g_y) \in G$ піксельної сітки, що належить колу c_i за умови (2), збільшимо значення в комірці із індексами (g_x, g_y) масиву A на одиницю. Після нанесення усіх кіл на сітку G значення у комірках масиву-акумулятору A визначатимуть кількість точок множини P , які є досяжними із точки, координати якої відповідають індексам комірки. Таким чином, масив A може бути представлений як диз'юнкція усіх кіл c_i :

$$A = \cup c_i. \quad (3)$$

Розглянемо згенеровану випадково тестову точкову множину (рис. 1), відповідна візуалізація масиву-акумулятору, який відповідає виразу (3), наведена на рис. 2 (більш світлі області відповідають більшій кількості кіл, що перетинаються).



Рис. 1. Приклад тестової точкової множини

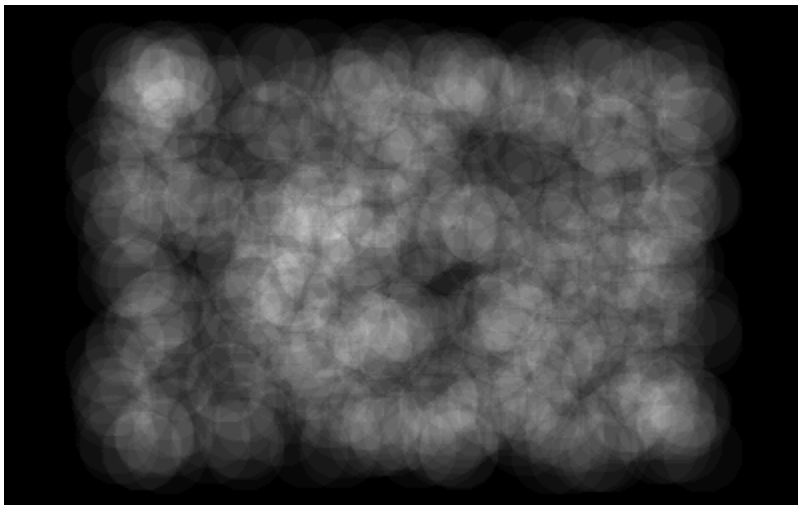


Рис. 2. Візуалізація масиву-акумулятору, $r_t = 20$

Для визначення положень точок, в яких слід розмістити точки множини P_S , проведемо наступний ітеративний процес, який розширює метод із [13]:

- 1) відсортуємо значення у масиві A у зростаючому порядку, встановимо початкове значення $a = a_{\min}$;
- 2) розраховуємо коефіцієнт досяжності для a :

$$R = (n_C | a) / N, \quad (4)$$

де $n_C | a$ – загальна кількість точок, що задовільняє вимозі (2) при значенні a ;

3) поки коефіцієнт досяжності не досяг заданого значення, обираємо a із наступним значенням та переходимо на крок 2.

На рис. 3 наведено залежність коефіцієнту досяжності R від поточного значення a .

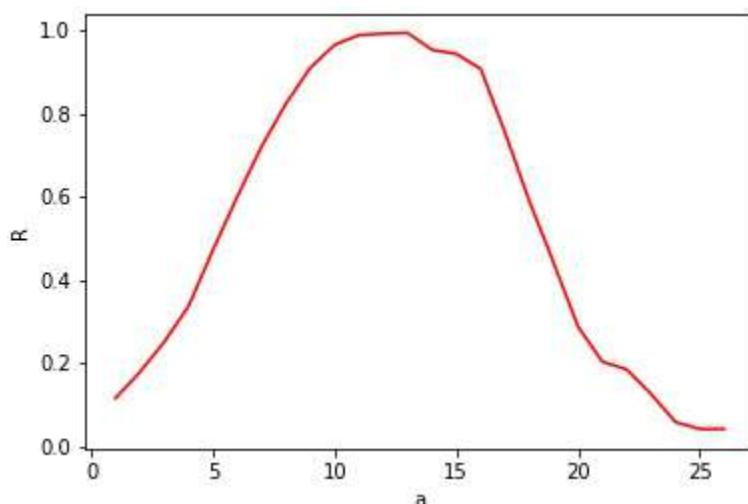


Рис. 3. Залежність коефіцієнту досяжності, $r_t = 20$

Висновки і перспективи подальших досліджень. В результаті роботи розроблено підхід до визначення положень множини точок, які забезпечують заданий коефіцієнт досяжності для заданої точкової множини на площині. Результатом виконання роботи є створення обчислювального програмного забезпечення для визначення мінімально необхідної множини точок, яка покриває задану точкову множину.

Подальші дослідження будуть спрямовані на автоматизацію підбору параметрів системи для більш ефективного пошуку розв'язків.

Список літератури:

1. *Jing W.* Model-based view planning for building inspection and surveillance using voxel dilation, medial objects, and random-key genetic algorithm / *W. Jing, K. Shimada* // Journal of Computational Design and Engineering. – 2018. – Vol. 5. – No. 3. – P. 337–347.
2. *Tekdas O.* Sensor placement for triangulation-based localization / *O. Tekdas, V. Isler* // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. – 2010. – Vol. 7. – No. 3. – P. 681–685.
3. *Nilsson U.* Optimal positioning of surveillance ugvs / *U. Nilsson, P. Ogren, J. Thunberg* // 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2008. – P. 2539–2544.
4. *Liu Y.* S2U: an efficient algorithm for optimal integrated points placement in hybrid optical-wireless access networks / *Y. Liu, C. Zhou, Y. Cheng* // Computer Communications. – 2011. – Vol. 34. – No. 11. – P. 1375–1388.

5. Zhou S. Crowd modeling and simulation technologies / S. Zhou, D. Chen, W. Cai, [et al.] // *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*. – 2010. – Vol. 20. – No. 4. – P. 1–35.
6. Xu M.-L. Crowd simulation and its applications: recent advances / M.-L. Xu, H. Jiang, X.-G. Jin, Z. Deng // *Journal of Computer Science and Technology*. – 2014. – Vol. 29. – No. 5. – P. 799–811.
7. Drettakis G. Design and evaluation of a real-world virtual environment for architecture and urban planning / G. Drettakis, M. Roussou, A. Reche, N. Tsingos // *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. – 2007. – Vol. 16. – No. 3. – P. 318–332.
8. Qin L. Formation control of robotic swarm using bounded artificial forces / L. Qin, Y. Zha, Q. Yin, Y. Peng // *The Scientific World Journal*. – 2013. – Vol. 2013. – P. 194–280.
9. Wang W. Efficient visibility analysis for massive observers / W. Wang, B. Tang, X. Fan, [et al.] // *Procedia Computer Science*. – 2017. – Vol. 111. – P. 120–128.
10. Peng Z. The trajectory optimization of spray gun for spraying painting robot based on surface curvature properties / Z. Peng, N. Huifeng, G. Jun, W. Lina. – Cham: Springer International Publishing. – 2017. – P. 331–339.
11. Lv P. An optimal method for multiple observers sitting on terrain based on improved simulated annealing techniques / P. Lv, J. Zhang, M. Lu. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006. – P. 373–382.
12. Elshamli A. Genetic algorithm for dynamic path planning / A. Elshamli, H. A. Abdullah, S. Areibi. – Niagara Falls, Ont., Canada: IEEE, 2004. – P. 677–680.
13. Дашкевич А.О. Метод визначення множини розташувань дрону для забезпечення максимальної видимості місцевості / А.О. Дашкевич, О.В. Шоман // *Сучасні проблеми моделювання: зб. наук. праць*. – Мелітополь: Вид-во МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2020. – Вип. 18. – С. 99–105.

References:

1. Jing, W., and Shimada, K. (2018), "Model-based view planning for building inspection and surveillance using voxel dilation, Medial Objects, and Random-Key Genetic Algorithm". *Journal of Computational Design and Engineering*, Vol. 5, pp. 337–347.
2. Tekdas, O., and Isler, V. (2010), "Sensor Placement for Triangulation-Based Localization", *IEEE Trans. Automat. Sci. Eng*, Vol. 7, pp. 681–685.
3. Nilsson, U., Ogren, P., and Thunberg, J. (2008), "Optimal positioning of surveillance UGVs", in: *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2539–2544.
4. Liu, Y., Zhou, C., and Cheng, Y. (2011), "S2U: An efficient algorithm for optimal integrated points placement in hybrid optical-wireless access networks", *Computer Communications*. Vol. 34, pp. 1375–1388.
5. Zhou, S., Chen, D., Cai, W., Luo, L., Low, M.Y.H., Tian, F., Tay, V.S.-H., Ong, D.W.S., and Hamilton, B.D. (2010), "Crowd modeling and simulation technologies", *ACM Trans. Model. Comput. Simul.*, Vol. 20, pp. 1–35.
6. Xu, M.-L., Jiang, H., Jin, X.-G., and Deng, Z. (2014), "Crowd Simulation and Its Applications: Recent Advances", *J. Comput. Sci. Technol.*, Vol. 29, pp. 799–811.
7. Drettakis, G., Roussou, M., Reche, A., and Tsingos, N. (2007), "Design and Evaluation of a Real-World Virtual Environment for Architecture and Urban Planning". *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 16, pp. 318–332.
8. Qin, L., Zha, Y., Yin, Q., and Peng, Y. (2013), "Formation Control of Robotic Swarm Using Bounded Artificial Forces", *The Scientific World Journal*, pp. 194–280.
9. Wang, W., Tang, B., Fan, X., Mao, H., Yang, H., and Zhu, M. (2017), "Efficient visibility analysis for massive observers". *Procedia Computer Science*, Vol. 111, pp. 120–128.

-
10. Peng, Z., Huifeng, N., Jun, G., and Lina, W. (2017), "The Trajectory Optimization of Spray Gun for Spraying Painting Robot Based on Surface Curvature Properties", in: Balas, V.E., Jain, L.C., Zhao, X. (Eds.), *Information Technology and Intelligent Transportation Systems. Springer International Publishing, Cham*, pp. 331–339.
11. Lv, P., Zhang, J., and Lu, M. (2006), "An Optimal Method for Multiple Observers Sitting on Terrain Based on Improved Simulated Annealing Techniques", in: Ali, M., Dapoigny, R. (Eds.), *Advances in Applied Artificial Intelligence. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg*, pp. 373–382.
12. Elshamli, A., Abdullah, H.A., and Areibi, S. (2004), "Genetic algorithm for dynamic path planning, in: Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2004 (IEEE Cat. No.04CH37513)". *Presented at the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2004, IEEE, Niagara Falls, Ont., Canada*, pp. 677–680.
13. Dashkevich, A., and Shoman, O. (2020), "Method of determining the set of drone positions to cover maximum visibility of the location". *Modern problems of modeling, Melitopol*, Vol. 18, pp.99–105.

Статтю представив д-р. техн. наук, проф., зав. каф. геометричного моделювання та комп'ютерної графіки Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Шоман Ольга Вікторівна

Поступила (received) 30.05.2021

Dashkevych Andrii, Cand. Tech, Sci.
National Technical University "KhPI",
Str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (095) 388-04-56, e-mail: dashkevich.a@gmail.com
ORCID ID:0000-0002-9963-0998

УДК 004.932

Метод розташування точок на площині із урахуванням їх взаємної досяжності / Дашкевич А.А. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2021. – № 1 (5). – С. 69 – 75.

В роботі представлено підхід визначення положень множини точок, які забезпечують заданий коефіцієнт досяжності для заданої точкової множини на площині. Представлений метод полягає в нанесенні кіл із центрами у заданих точках множини на регулярну сітку та визначенні точок перетину максимальної кількості кіл. Запропонований метод реалізовано в вигляді програмного інструменту, який дозволяє знаходити мінімально необхідну множину точок, заданих на регулярній сітці, яка покриває задану множину точок та дозволяє проводити візуалізацію результатів досліджень. Ил.: 3. Бібліогр.: 13 назв.

Ключові слова: коефіцієнт достижимости; точечное множество на плоскости; регулярная сетка; множество точек; точки пересечения максимального количества кругов.

УДК 004.932

Метод размещения точек на плоскости с учетом их взаимной достижимости / Дашкевич А.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2021. – № 1 (5). – С. 69 – 75.

В работе представлен подход для определения положений множества точек, которые обеспечивают заданный коэффициент взаимной достижимости для заданного точечного множества на плоскости. Представленный метод состоит в нанесении окружностей с центрами в заданных точках множества на регулярную сетку и определении точек пересечения максимального количества окружностей. Предложенный метод реализован в виде программного инструмента, который позволяет находить минимально необходимое множество точек, заданных на регулярной сетке, которое покрывает заданное множество, а также позволяет проводить визуализацию результатов. Ил.: 3. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: коэффициент достижимости; точечное множество на плоскости; регулярная сетка; множество точек; точки перетину максимальної кількості кіл.

UDC 004.932

Point placement method in the plane taking into account points mutual reachability / Dashkevych A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2021. – № 1 (5). – P. 69 – 75.

The paper presents an approach for determining the positions of a set of points that provide a given ratio of mutual reachability for a given point set on the plane. The presented method consists in drawing circles with centers at given points of the set on a regular grid and determining the intersection points of the maximum number of circles. The proposed method is implemented in the form of a software tool that allows you to find the minimum required set of points on a regular grid, which covers a given set, and also allows you to visualize the results. Figs.: 3. Refs.: 13 titles.

Keywords: reachability factor; a point set on a plane; regular grid; many points; the point of intersection of the maximum number of circles.

А. І. ВАВІЛЕНКОВА, д-р техн. наук, проф., НАУ, Київ

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ТИПІВ ОКРЕМИХ ФОРМ ЛОГІКО-ЛІНГВІСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ВИДІВ РЕЧЕНЬ ПРИРОДНОЇ МОВИ

Запропоновано апарат логіко-лінгвістичного моделювання для вилучення знань з електронних текстових документів. Виокремлено різні типи форм логіко-лінгвістичних моделей для формалізованого представлення складних речень природної мови. Сформульовано правила та здійснено класифікацію окремих форм логіко-лінгвістичних моделей залежно від синтаксичних конструкцій речень природної мови. Іл.: 1. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: логіко-лінгвістична модель; вилучення знань; окрема форма; речення природної мови; електронний текстовий документ.

Постановка проблеми. Сьогодні актуальною для сфери інформаційних технологій задачею залишається вилучення знань із електронних текстових документів з подальшою можливістю їх порівняння, пошуку та створення нового контенту. Інструментом для розв'язання цієї задачі може служити логіко-лінгвістичне моделювання. Зокрема, для формалізованого представлення простих речень природної мови автором було розроблено шаблон [1], логіко-лінгвістичну модель, що складається з простих предикатів першого порядку і до складу якої входять відношення, суб'єкт, об'єкт, предмет відношення та їх характеристики відповідно. Логіко-лінгвістична модель для кожного речення природної мови набуває окрему форму залежно від того, скільки граматичних основ у реченні, чи присутні однорідні члени, а також, які логічні та контекстуальні зв'язки між простими реченнями у межах складного. Якщо два перших фактори описуються у вигляді різних типів окремих форм логіко-лінгвістичних моделей, то такий фактор, як логічні та контекстуальні зв'язки потребує ретельного дослідження, чому і присвячено матеріал даної статті.

Аналіз літератури. Проблемою формального представлення та вилучення знань з текстової інформації займається багато вітчизняних [2, 3] та зарубіжних [4, 5] вчених базуючи свої дослідження на різних типах моделей представлення знань. Так, у статті австрійських авторів [6] запропоновано алгоритм вилучення інформації з веб-таблиць, що базується на дослідженні топології таблиць та розрахунку відстані між колонками. Популярною тенденцією серед іноземних розробників у

сфері Natural Language Processing є використання методу N-грам [7].

В області логіко-лінгвістичного моделювання, що поєднує формальний математичний апарат та основи комп'ютерної лінгвістики, також зроблено спроби застосувати логіко-лінгвістичні моделі для вилучення фактів [8], а також інтерпретації предикатів як форм опису граматичних характеристик розміщення фактів у реченні природної мови [9]. Розглянуті матеріали дозволяють реалізувати процес формалізації та вилучення знань з простих речень природної мови з певною імовірністю, проте при аналізі складних речень природної мови, а тим більше цілих електронних текстових документів, імовірність коректної обробки текстової інформації зменшується.

Мета статті – здійснити класифікацію окремих форм логіко-лінгвістичних моделей представлення знань залежно від типів речень природної мови, які вони описують, що в подальшому дасть можливість розробити алгоритм відновлення текстової інформації з формальних моделей.

Логіко-лінгвістичні моделі складних речень природної мови. Залежно від типу речення природної мови, яке підлягає формалізації, логіко-лінгвістична модель [10] може приймати вигляд однієї із своїх окремих форм, класифікацію яких продемонстровано на рис. 1.

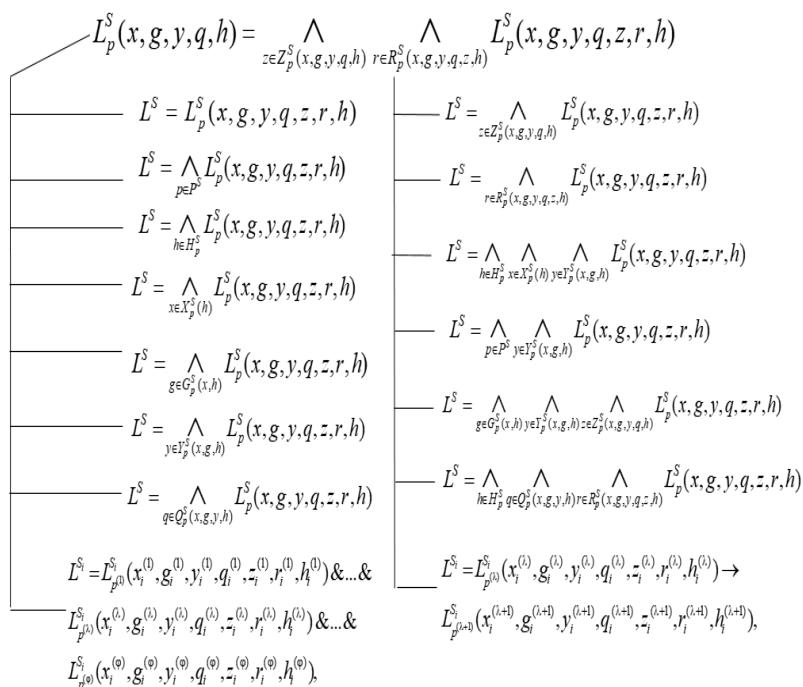


Рис. 1. Класифікація окремих форм логіко-лінгвістичних моделей

Складне речення – це речення, в якому одна складова є незалежна, а друга – підпорядкована, що приєднується сполучником підрядності або за допомогою сполучного слова. Таке речення можна інтерпретувати за допомогою декількох простих предикатів [11], об'єднаних певними логічними операціями. За синтаксичним відношенням складнопідрядні речення поділяються на означальні, з'ясувальні та обставинні.

Саме від типу складного речення і залежить, яка логічна операція буде використана у логіко-лінгвістичній моделі, що поєднає декілька простих предикатів першого порядку.

Тип 1. Логіко-лінгвістична модель складного речення природної мови, у якому за допомогою протиставних сполучників "а", "але", "проте", "однак" або часток "тільки", "лише", "же" оформлені відношення зіставлення або проставлення явищ і подій, або відношення не одночасності явищ, а їх чергування або виключення одного при можливій наявності іншого за допомогою розділових сполучників "то...то", "чи...чи", "або...або", матиме вигляд набору простих предикатів, поєднаних логічною операцією диз'юнкції:

$$L^{S_i} = L_{p^{(1)}}^{S_i} \left(x_i^{(1)}, g_i^{(1)}, y_i^{(1)}, q_i^{(1)}, z_i^{(1)}, r_i^{(1)}, h_i^{(1)} \right) \vee \dots \vee \\ L_{p^{(\lambda)}}^{S_i} \left(x_i^{(\lambda)}, g_i^{(\lambda)}, y_i^{(\lambda)}, q_i^{(\lambda)}, z_i^{(\lambda)}, r_i^{(\lambda)}, h_i^{(\lambda)} \right) \vee \dots \vee \\ L_{p^{(\varphi)}}^{S_i} \left(x_i^{(\varphi)}, g_i^{(\varphi)}, y_i^{(\varphi)}, q_i^{(\varphi)}, z_i^{(\varphi)}, r_i^{(\varphi)}, h_i^{(\varphi)} \right),$$

де $L_{p^{(\lambda)}}^{S_i} \left(x_i^{(\lambda)}, g_i^{(\lambda)}, y_i^{(\lambda)}, q_i^{(\lambda)}, z_i^{(\lambda)}, r_i^{(\lambda)}, h_i^{(\lambda)} \right)$ – предикатний вираз, що описує частину складного речення S_i , яка відображає закінчений зміст, виражається за допомогою простого речення рівня вкладеності $\lambda = \overline{1, \varphi}$; i – номер речення природної мови у тексті; φ – кількість простих речень у складному.

Наприклад, для речення природної мови "Від цього вугілля розжоврювалося, займалося вогнем, червоно палахкотіло, а довкола злітали й потріскували іскри" (Мешак Азаре) логіко-лінгвістична модель типу 1 матиме вигляд:

$$L^{S_1} = [p_{11}(x_1, 0, 0, 0, 0, 0, 0) \& p_{12}(x_1, 0, 0, 0, 0, 0, 0) \& p_{13}(x_1, 0, 0, 0, 0, 0, h_1)] \vee \\ [p'_{11}(x'_1, 0, 0, 0, 0, 0, h'_1) \& p'_{12}(x'_1, 0, 0, 0, 0, 0, h'_1)].$$

$$L^{S_1} = [\text{розжеврювалося}(\text{вугілля}, 0, 0, 0, 0, 0, 0) \& \\ \text{займалося}(\text{вугілля}, 0, \text{вогнем}, 0, 0, 0, 0) \& \\ \text{палахкотіло}(\text{вугілля}, 0, 0, 0, 0, 0, \text{червоно})] \vee \\ [\text{злітали}(\text{іскри}, 0, 0, 0, 0, 0, \text{довкола}) \& \text{потріскували}(\text{іскри}, 0, 0, 0, 0, 0, \text{довкола})].$$

Це складносурядне речення із відношенням зіставлення, для чого використано сполучник "а", загальна кількість простих речень у ньому – п'ять, представлення однорідних членів, зокрема присудків у кожному простому реченні інтерпретовано за допомогою логічної операції кон'юнкції, а відношення зіставлення між простими реченнями у структурі складного – через операцію диз'юнкції.

Тип 2. Формальне представлення складного речення природної мови, частини якого рівноправні за змістом, представляє собою набір простих предикатів, поєднаних логічною операцією кон'юнкції. При цьому потужність множини відношень та множини суб'єктів відношень повинна бути не менше двох, а логіко-лінгвістична модель матиме вигляд:

$$L^{S_i} = L_{p^{(1)}}^{S_i}(x_i^{(1)}, g_i^{(1)}, y_i^{(1)}, q_i^{(1)}, z_i^{(1)}, r_i^{(1)}, h_i^{(1)}) \& \dots \& \\ L_{p^{(\lambda)}}^{S_i}(x_i^{(\lambda)}, g_i^{(\lambda)}, y_i^{(\lambda)}, q_i^{(\lambda)}, z_i^{(\lambda)}, r_i^{(\lambda)}, h_i^{(\lambda)}) \& \dots \& \\ L_{p^{(\varphi)}}^{S_i}(x_i^{(\varphi)}, g_i^{(\varphi)}, y_i^{(\varphi)}, q_i^{(\varphi)}, z_i^{(\varphi)}, r_i^{(\varphi)}, h_i^{(\varphi)}),$$

де $L_{p^{(\lambda)}}^{S_i}(x_i^{(\lambda)}, g_i^{(\lambda)}, y_i^{(\lambda)}, q_i^{(\lambda)}, z_i^{(\lambda)}, r_i^{(\lambda)}, h_i^{(\lambda)})$ – предикатний вираз, що описує частину складного речення S_i , яка відображає закінчений зміст, виражається за допомогою простого речення рівня вкладеності $\lambda = \overline{1, \varphi}$; i – номер речення природної мови у тексті; φ – кількість простих речень у складному.

Такий спосіб зв'язку може бути реалізований за допомогою різноманітних синтаксичних конструкцій, кожна з яких відповідно до розроблених автором правил [12] вносить відповідні зміни до простих предикатів логіко-лінгвістичної моделі складного речення.

Складні речення можна представити у вигляді окремої форми логіко-лінгвістичної моделі типу 2, якщо:

2.1. Прості речення у складному пов'язані за допомогою сурядних сполучників.

2.2. Формалізується складнопідрядне означальне речення, у якому друга частина відноситься до суб'єкта або об'єкта головного речення і виражає його ознаку.

2.3. Підрядне речення приєднане до головного сполучниками "що", "ніби", "як", "мовби" та інші, а зміст пояснювального слова (іменника або прислівника) розкривається у підрядному з'ясувальному реченні.

2.4. Декілька підрядних з'ясувальних речень приєднані до одного головного речення різними сполучниками і сполучними словами або синтаксична конструкція передає пряму мову непрямою.

2.5. У головному реченні присутні сполучні слова "там", "туди", "звідти", з якими співвідносяться сполучні слова підрядного речення місця "де", "куди", "звідки".

Так, логіко-лінгвістична модель для складного речення природної мови *"Батько витягує посудину з рідиною з вогню, несе її обережно, наче кицька своє кошеня, і старанно розливає в глиняні форми"* матиме вигляд:

$$L^{S_1} = p_{11}(x_1, 0, y_1, 0, z_1, 0, h_{11}) \& p_{12}(x_1, 0, y_1, 0, 0, 0, h_{12}) \& \\ p_{12}(x'_1, 0, y'_1, q'_1, 0, 0, h_{12}) \& p_{13}(x_1, 0, z_1, 0, z'_1, r'_1, h_{13}).$$

$$L^{S_1} = \text{витягує}(\text{батько}, 0, \text{посудину}, 0, \text{рідиною}, 0, \text{вогню}) \& \\ \text{несе}(\text{батько}, 0, \text{посудину}, 0, 0, 0, \text{обережно}) \& \\ \text{несе}(\text{кицька}, 0, \text{кошеня}, \text{своє}, 0, 0, \text{обережно}) \& \\ \text{розливає}(\text{батько}, 0, \text{форми}, \text{глиняні}, 0, 0, \text{старанно}).$$

Побудована логіко-лінгвістична модель відображає зміст складнопідрядного пояснювального речення зі сполучником "наче", де дії відбуваються одночасно. Саме тому таке речення природної мови потрібно віднести до другого типу окремої форми логіко-лінгвістичної моделі.

Тип 3. Відображає типові зв'язки в підрядному реченні природної мови, у якому йдеться про умови, мету, причину, допуск, наслідок та ін. і для якого головна та залежна частини з'єднуються в логіко-лінгвістичній моделі логічною операцією імплікації " $\rightarrow$ ", при цьому потужність множини відношень та множини суб'єктів відношень повинні бути не менше двох, а логіко-лінгвістична модель набуває вигляду:

$$L^{S_i} = L_{p^{(\lambda)}}^{S_i} \left(x_i^{(\lambda)}, g_i^{(\lambda)}, y_i^{(\lambda)}, q_i^{(\lambda)}, z_i^{(\lambda)}, r_i^{(\lambda)}, h_i^{(\lambda)} \right) \rightarrow \\ L_{p^{(\lambda+1)}}^{S_i} \left(x_i^{(\lambda+1)}, g_i^{(\lambda+1)}, y_i^{(\lambda+1)}, q_i^{(\lambda+1)}, z_i^{(\lambda+1)}, r_i^{(\lambda+1)}, h_i^{(\lambda+1)} \right),$$

де $L_{p^{(\lambda)}}^{S_i} \left(x_i^{(\lambda)}, g_i^{(\lambda)}, y_i^{(\lambda)}, q_i^{(\lambda)}, z_i^{(\lambda)}, r_i^{(\lambda)}, h_i^{(\lambda)} \right)$ – предикатний вираз, що описує частину складного речення S_i , яка відображає закінчений зміст,

виражається за допомогою простого речення; i – номер речення природної мови у тексті.

Складні речення можна представити у вигляді окремої форми логіко-лінгвістичної моделі типу 3, якщо:

3.1. Підрядні речення часу, у яких присутні сполучники, що виражають відношення співвіднесеності дій підрядного і головного речень, наприклад, "після того як", "щойно", "ледве" та ін.

3.2. Підрядне речення умовне і виражає умову, за якої можлива дія, про яку йдеться у головному реченні, та приєднується сполучниками "якщо", "якби", "тоді" та ін.

3.3. Підрядне речення причини та мети, виражає причину дії, про яку говориться у головному реченні, та приєднується сполучниками "бо", "тому що", "внаслідок того що", "для того щоб" та ін. або підрядне речення наслідкове та виражає наслідок дії.

Для складного речення природної мови *«Маленький хлопчик завзято працює ковальським міхом, а батько тим часом готує форми, щоб залити в них розтоплену мідь»* логіко-лінгвістична модель матиме вигляд:

$$L^{S1} = p_1(x_1, g_1, y_1, q_1, 0, 0, h_1) \& p'_1(x'_1, 0, y'_1, 0, 0, 0, h'_1) \rightarrow p''_1(0, 0, y''_1, 0, z''_1, r''_1, 0).$$

$L^{S1} = \text{працює}(\text{хлопчик}, \text{маленький}, \text{міхом}, \text{ковальським}, 0, 0, \text{завзято}) \& \text{готує}(\text{батько}, 0, \text{форми}, 0, 0, 0, \text{тим_часом}) \rightarrow \text{залити}(0, 0, \text{форми}, 0, \text{мідь}, \text{розтоплену}, 0).$

Дане речення складається з трьох простих та являється комбінацією сурядного зв'язку, для чого використовується сполучник "а" та підрядного причини з сполучником "щоб", тому у логіко-лінгвістичній моделі вжито дві логічні операції: кон'юнкція та імплікація.

Висновки. У матеріалах статті запропонована класифікація окремих форм логіко-лінгвістичних моделей залежно від типу речення природної мови. Оскільки під кожною компонентою логіко-лінгвістичної моделі розуміється конкретне слово, а не лише його формальне позначення, це дає змогу створити шаблон для різних синтаксичних конструкцій, зокрема і для складних сурядних та підрядних речень природної мови. Такі шаблони з певними логічними операціями, залежно від знаків пунктуації та сполучних слів, що вжиті у реченнях, а також специфічний порядок з'єднання простих предикатів, залежно від логічних зв'язків між простими реченнями у структурі складного, дають можливість розробити алгоритм для подальшого аналізу текстової інформації та її відновлення із формальних моделей представлення знань.

Список літератури:

1. Вавіленкова А.І. Аналіз і синтез логіко-лінгвістичних моделей речень природної мови: монографія / А.І. Вавіленкова. – К.: ТОВ "СІК ГРУП Україна", 2017. – 152 с.
2. Ланде Д.В. Основи теорії і практики інтелектуального аналізу даних у сфері кібербезпеки: навч. посіб. / Д.В. Ланде, І.Ю. Субач, Ю.Є. Бояринова. – К.: ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 300 р.
3. Широков В.А. Язык. Информация. Система: Трансдисциплинарность в лингвистике / В.А. Широков. – К., 2017, – 280 с.
4. Zhang Y. Discriminative syntax-based word ordering for text generation/ Y. Zhang // Computational linguistics. – 2015. – Vol. 41. – P. 503-538.
5. Che W. Deep learning in lexical analysis and parsing / W. Che, Y. Zhang // Deep learning in Natural Language Processing, Springer Nature Singapore Pte Ltd. – 2018. – ch.4. http://doi.org/10.1007/978-981-10-5209-5_4.
6. Gatterbauer W. Towards domain-independent information extraction from web tables / W. Gatterbauer, P. Bohunsky, M. Herzog, B. Krupl, B. Pollak // Proceedings WWW-07, Banff, Canada. – 2007. – P. 71–80.
7. Briggs J. The Ultimate Performance Metric in NLP / J. Briggs. – 2021, режим доступу: <https://towards-datascience.com/the-ultimate-performance-metric-in-nlp-111df6c64460> (дата звернення 03.03.2021).
8. Khairova N.F. The Logical-Linguistic Model of Fact Extraction from English Texts / N.F. Khairova, S. Petrasova, A.P.S. Gautam // Communications in Computer and Information Science, Springer, Cham. – 2016. – Vol. 639. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46254-7_51.
9. Khairova N. Logical-linguistic model for multilingual Open Information Extraction / N. Khairova, O. Mamyrbayev, K. Mukhsina, A. Kolesnyk // Cogent Engineering. – 2021. doi: 10.1080/23311916.2020.1714829.
10. Vavilenkova A. Modelling of the context links between the natural language sentences / A. Vavilenkova // Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference "Information Control Systems & Technologies" (ICST2020). – 2020. – P. 282-293.
11. Конверський А.Є. Сучасна логіка (класична та некласична) / А.Є. Конверський. 2-ге вид. перероб. та доп. – К.: Центр учбової літератури. – 2017. – 294 с.
12. Vavilenkova A. Basic principles of the synthesis of logical-linguistic models / A.Vavilenkova // Cybernetics and systems analysis. – 2015. – Vol. 51(5). – P. 826-834. <http://doi.org/10.1007/s10559-015-9776-z>.

References:

1. Vavilenkova, A. (2017), *Analysis and Synthesis of logic and linguistic models for natural language sentences*, TOV "SIK GROUP UKRAINE", Kyiv, 152 p.
2. Lande, D.V., Subach, I.Y. and Boyarinova, Y.E. (2018), *Fundamentals of Theory and Practice of Intelligent Data Analysis in Cybersecurity*, ISZZI KPU, Kyiv, 300 p.
3. Shirokov, V.A. (2017), *Language. Information. System: Transdisciolinarity in linguistics*, Kyiv, 280 p.
4. Zhang, Y. (2015), "Discriminative syntax-based word ordering for text generation", *Computational linguistics*, Vol. 41, pp. 503-538.
5. Che, W. and Zhang, Y. (2018), "Deep learning in lexical analysis and parsing" in *Deep learning in Natural Language Processing*, Springer Nature Singapore Pte Ltd., ch.4. http://doi.org/10.1007/978-981-10-5209-5_4.
6. Gatterbauer, W., Bohunsky, P., Herzog, M., Krupl, B. and Pollak, B. (2007), "Towards domain-independent information extraction from web tables", *Proceedings WWW-07*, Banff, Canada, pp. 71-80.

-
7. Briggs, J. (2021) "The Ultimate Performance Metric in NLP", available at: <https://towardsdatascience.com/the-ultimate-performance-metric-in-nlp-111df6c64460> (accessed 3 March 2021).
 8. Khairova, N.F., Petrasova, S. and Gautam A.P.S. (2016), "The Logical-Linguistic Model of Fact Extraction from English Texts", *Communications in Computer and Information Science*, vol 639. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46254-7_51.
 9. Khairova, N., Mamyrbayev, O., Mukhsina, K. and Kolesnyk, A. (2020), "Logical-linguistic model for multilingual Open Information Extraction", *Cogent Engineering*, doi: 10.1080/23311916.2020.1714829.
 10. Vavilenkova, A. (2020), "Modelling of the context links between the natural language sentences", *Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference "Information Control Systems & Technologies" (ICST2020)*, pp. 282-293.
 11. Konverskiy, A.E. (2017), *Modern logic (classic and non-classic)*, The Centre of Educational Literature, Kyiv, 294 p.
 12. Vavilenkova, A. (2015), "Basic principles of the synthesis of logical-linguistic models", *Cybernetics and systems analysis*, Vol. 51(5), pp. 826-834, <http://doi.org/10.1007/s10559-015-9776-z>.

Статтю представив д-р техн. наук, проф. Черкаського національного університету ім. Б. Хмельницького Голуб С.В.

Надійшла (received) 23.03.2021

Vavilenkova Anastasiia, Dr.Sci.Tech, DSc, Docent, Professor
National Aviation University
Ave. Liubomira Guzara, 1, Kyiv, Ukraine, 03058
Tel: (066) 751-65-01, e-mail: vavilenkovaa@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-9630-4951

УДК 510.635:004.891(045)

Взаємозв'язок типів окремих форм логіко-лінгвістичних моделей та видів речень природної мови / Вавіленкова А.І. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2021. – № 1 (5). – С. 77 – 85.

Запропоновано апарат логіко-лінгвістичного моделювання для вилучення знань з електронних текстових документів. Виокремлено різні типи форм логіко-лінгвістичних моделей для формалізованого представлення складних речень природної мови. Сформульовано правила та здійснено класифікацію окремих форм логіко-лінгвістичних моделей залежно від синтаксичних конструкцій речень природної мови. Іл.: 1. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: логіко-лінгвістична модель; вилучення знань; електронний текстовий документ; окрема форма; речення природної мови.

УДК 510.635:004.891(045)

Взаимосвязь отдельных форм логико-лингвистических моделей с видами предложений естественного языка / Вавиленкова А.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2021. – № 1 (5). – С. 77 – 85.

Предложен аппарат логико-лингвистического моделирования для извлечения знаний из электронных текстовых документов. Выделены различные типы форм логико-лингвистических моделей для формализованного представления сложных предложений естественного языка. Сформулированы правила и осуществлена классификация отдельных форм логико-лингвистических моделей в зависимости от синтаксических конструкций предложений естественного языка. Ил.: 1. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: логико-лингвистическая модель; извлечение знаний; электронный текстовый документ; отдельная форма; предложение естественного языка.

UDC 510.635:004.891(045)

Interrelation of types of separate forms of logic and linguistic models and types of sentences of natural language / Vavilenkova A.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2021. – № 1 (5). – P. 77 – 85.

The article proposes an apparatus of logic and linguistic modeling for extracting knowledge from electronic text documents. Different types of forms of logic and linguistic models have been singled out for the formalized representation of complex sentences of natural language. The author formulates the rules and carries out the classification of separate forms of logic and linguistic models depending on syntactic constructions of sentences natural language. Such separate forms of logic and linguistic models are templates with certain logical operations, which are used depending on the punctuation marks and connecting words applied in sentences. The specific order of simple predicates depends on the logical connections between simple sentences in the structure of the complex one. This allows to develop an algorithm for further analysis of textual information and its recovery from formal models of knowledge representation. Figs.: 1. Refs.: 12 titles.

Keywords: logic and linguistic model; knowledge extraction; electronic text document; separate form; sentence of natural language.

УДК629.7.615.3

DOI: 10.20998/2411-0558.2021.01.07

М. Д. КОШЕВИЙ, д-р техн. наук, проф., каф. НАУ "ХАІ"

ім. М. Жуковського, Харків,

Н. С. АЩЕПКОВА, канд. техн. наук, доц., ДНУ ім. О. Гончара,
Дніпро

МЕТОД СИНТЕЗУ ОПТИМАЛЬНИХ ТРАЄКТОРІЙ СХВАТУ МАНІПУЛЯТОРА АВТОНОМНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА

Розглянуто особливості динаміки автономного мобільного роботу змінюваної конфігурації при відносному русі маніпулятора. Для ефективного виконання маніпулятором АМР технологічних операцій в екстремальних наперед не визначених умовах доцільно на етапі проектування розробити базу даних, що містить оптимальні послідовності переміщень по узагальнених координатах, які забезпечують пересування схвату між заданими початковими і кінцевими точками робочого простору. Іл.: 3. Табл.: 2. Бібліогр.: 20 назв.

Ключові слова: автономний мобільний робот; маніпулятор; динаміка; схват; траєкторія.

Постановка задачі. Розширення сфери застосування та ускладнення завдань для сучасних автономних мобільних роботів (АМР) обумовлює наявність елементів конструкції, рухомих відносно платформи робота: маніпулятор, щуп, бур, ківш і т.п. При експлуатації АМР ці елементи рухаються відносно платформи, змінюючи геометрію мас системи. При плануванні траєкторій схвату маніпулятора АМР необхідно враховувати рух платформи вздовж траєкторії або зсув зупиненої платформи.

Особливістю динаміки АМР з маніпулятором, як системи тіл, є:

- зміна положення центра мас системи при відносному русі маніпулятора,

- сумірність недіагональних і діагональних елементів тензора інерції, обчислених відносно осей базової системи координат $SX_cY_cZ_c$, пов'язаної із центром мас платформи АМР.

Зміна положення центру мас системи обумовлює виникнення збурюючих моментів.

Недіагональність тензору інерції системи тіл відносно базової системи координат, обумовлює:

- виникнення неузгодженості головних центральних осей інерції системи тіл з осями зв'язаної із центром мас платформи АМР базовою системою координат $SX_cY_cZ_c$,

- неузгодженість керуючих впливів з напрямками головних

центральної осей інерції системи,

– взаємозалежність каналів керування.

Відцентрові і осьові моменти інерції АМР з маніпулятором (відносно осей базової системи координат $CX_cY_cZ_c$) залежать від часу і значень узагальнених координат.

Планування траєкторій схвату маніпулятора АМР з врахуванням перелічених особливостей дозволить підвищити експлуатаційні характеристики АМР при дистанційній роботі в наперед невизначених або екстремальних умовах.

Таким чином, розробка методу синтезу оптимальних траєкторій схвату маніпулятора АМР з урахуванням особливостей динаміки конструкції є актуальною науково-прикладною задачею.

Аналіз літератури. Розвиток нових технологій дає можливість застосування маніпуляторів (М) для робіт в екстремальних для людини умовах. Наприклад, використання М и автономних мобільних роботів (АМР) для ліквідації наслідків екологічних і техногенних катастроф, експлуатація дистанційно керованих М для роботи з радіоактивними речовинами, застосування М для складання конструкцій у космосі або на морському дні і т.п. Для робіт в екстремальних умовах, як правило, застосовуються дистанційно керовані роботи й М. У багатьох випадках дистанційно керована рука-маніпулятор встановлюється на керовану рухливу платформу. Це розширює сервісні характеристики М, але накладає більш жорсткі вимоги на пристрої систем керування й спостереження. Прикладом таких конструкцій є: рука-маніпулятор розміщена на космічному апараті, на кораблі, на колісному шасі і т.п. У всіх перерахованих вище випадках рух основи впливає на кінематику й динаміку руки-маніпулятора, збільшуючи помилку позиціонування й відхилення полюса схвату від заданої траєкторії. Динамічні процеси для М на рухомій платформі можна розділити на три режими руху:

– керований рух платформи по заданому маршруту з "зачекованим" М;

– виконання технологічних операцій М при зупиненій платформі;

– М виконує технологічні операції при керованому русі платформи.

Керований рух платформи з "зачекованим" маніпулятором досить добре досліджено для різних варіантів конструкції шасі. В [1] досліджено динаміку повнопривідного 4-колісного візка при поворотах. Синтез закону керування плоским рухом транспортного робота є типовою задачею: відомо декілька методів стабілізації руху вздовж заданої траєкторії. У [2] застосовано перетворення системи рівнянь до

нормальної форми Коші з подальшим диференціюванням по новій незалежній змінній [2 – 4]. У [5] рівняння динаміки візка складаються відносно шляхових координат, які добре фіксують відхилення від заданої траєкторії.

При виконанні технологічних операцій М, який встановлено на зупинену платформу, доцільно розглянути рівняння динаміки відносно нерухомої системи координат, пов'язаної з точкою стиківки М і платформи. При цьому розв'язок задач кінематичного і динамічного аналізу М залежить від співвідношення інерційних характеристик платформи і М з навантаженням. В якості навантаження може бути об'єкт маніпулювання, щуп, бур, ківш і т.п. В [6 – 9] розглядається два підходи до складання рівнянь динаміки М: метод Ньютона-Ейлера й метод Лагранжа-Ейлера. Для моделювання процесів динаміки і керування М доцільно застосовувати математичні пакети Mathcad [10 – 12] або Matlab [13 – 15]. В [13] презентовано псевдо символічне динамічне моделювання (PSDM) для створення спрощених динамічних моделей М, конструкція яких містить до 7 ступенів рухливості. Представлений алгоритм дозволяє генерувати код у реальному часі, моделювати динаміку й підвищувати ефективність моделі за рахунок виключення мінімально важливих елементів. Крім того, авторами [13] розроблена реалізація алгоритму в середовищі MATLAB, яка є загальнодоступною. Авторами [14] була розроблена віртуальна модель кінематики й динаміки М в MATLAB&SIMULINK. Представлена модель використовує ПІД-регулятор, а рівняння динаміки отримані методом Лагранжа-Ейлера. Робота [15] присвячена динамічному моделюванню просторового трьохланкового М з використанням символічних і чисельних методів. Для складання рівнянь динаміки у формі простору станів пропонується алгоритм, заснований на методі Ньютона-Ейлера. Алгоритм реалізовано у системі Maple, моделювання здійснено в MATLAB&SIMULINK.

При експлуатації АМР маніпулятором виконуються технологічні операції переміщення об'єкту маніпулювання (вантаж, інструмент, контрольно-вимірювальні прилади) за заданим законом руху [8, 9]. Залежно від призначення маніпулятора на різних ділянках траєкторії АМР можуть змінюватися параметри навантаження: геометричні розміри, форма, розподіл мас [8, 9]. Ці особливості слід врахувати на етапі проектування і складання математичної моделі, оскільки коефіцієнти диференціальних рівнянь є функціями узагальнених координат маніпулятора і залежать від закону руху і параметрів навантаження [8 – 10, 16, 17].

Для вирішення цього завдання на ЕОМ можна використати мови

програмування (Fortran, Pascal, C) або математичні пакети (Matlab, Mathcad). Чисельні методи рішення інженерних завдань реалізуються в середовищі прикладних програм Mathcad [18, 19], яке характеризується можливістю рішення алгебраїчних лінійних і нелінійних рівнянь, диференціальних рівнянь і систем; виконанням операцій з векторами, матрицями і поліномами [18, 19].

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є чотирьохколісний повнопривідний АМР із маніпулятором, маса якого з вантажем складає 10 % ÷ 20 % від маси платформи АМР. Схема конструкції АМР із маніпулятором наведена на рис. 1. Конструкція складається з повнопривідної 4-колісної платформи АМР; маніпулятора складеного з диску, що обертається навколо вертикальної осі, та стрижневих ланок руки, з'єднаних ротаційними кінематичними парами п'ятого класу.

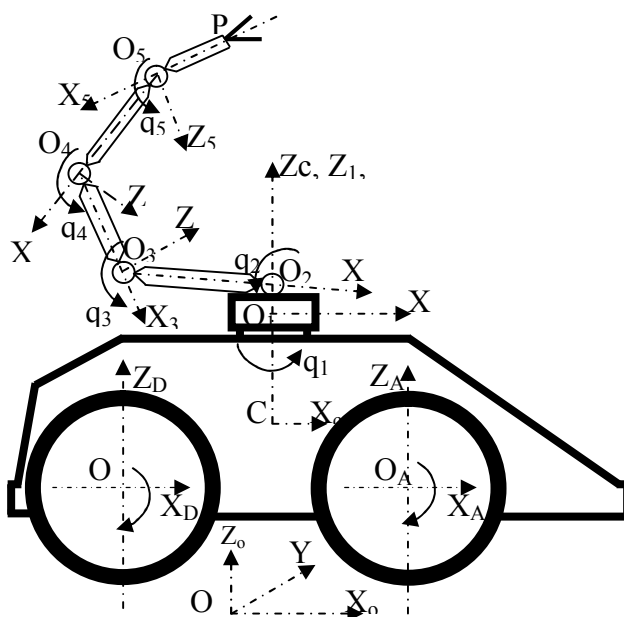


Рис. 1. Схема конструкції АМР з маніпулятором

Розглянемо розрахункову модель представлену на рис. 2, (геометричні розміри вказано у мм). Маса маніпулятора з навантаженням становить до 20 % від маси платформи АМР.

Мета дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності використання АМР при дистанційній роботі в наперед невизначених або екстремальних умовах: вибір оптимальної конфігурації маніпулятора АМР для забезпечення якісних показників і надійного виконання заданих

технологічних операцій; вибір послідовності рухів по узагальненим координатам; забезпечення мінімального відхилення схвату маніпулятора АМР від заданої траєкторії.

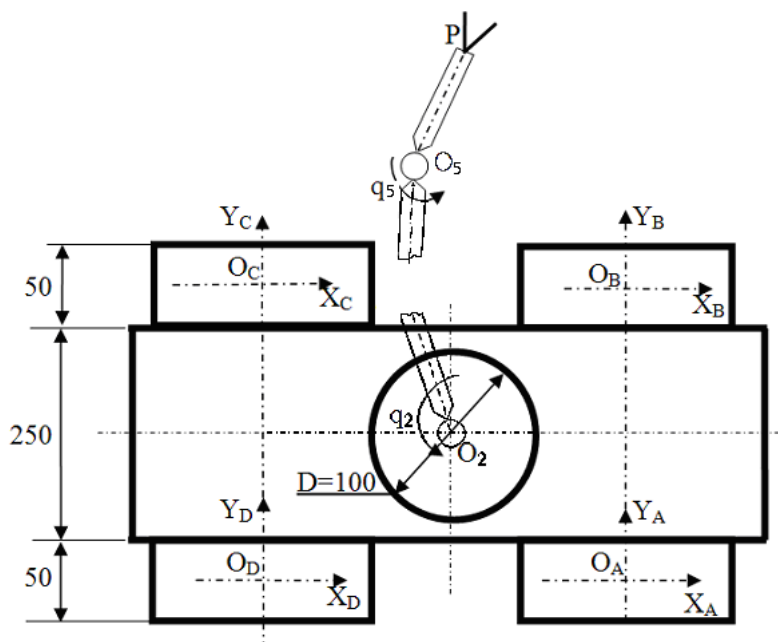


Рис. 2. Розрахункова модель АМР с маніпулятором

Матеріали та методи дослідження. Сформульовані в роботі висновки, наукові припущення й рекомендації базуються на фундаментальних положеннях теоретичної механіки, теорії диференціальних рівнянь й теорії керування [5, 6, 16, 17].

При моделюванні траєкторії схвату маніпулятора АМР припустимо наступне:

- платформа АМР – абсолютно твердий жорсткий паралелепіпед (рис. 3) з рівномірним розподілом маси із щільністю $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$;
- масою кінематичних пар можна знехтувати;
- друга, третя, четверта і п'ята ланки маніпулятора абсолютно тверді жорсткі стрижні діаметром $d = 30 \text{ мм}$, з рівномірним розподілом маси із щільністю $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$, довжиною $l_5 = O_5P = 300 \text{ мм}$, $l_4 = O_4O_5 = 600 \text{ мм}$, $l_3 = O_3O_4 = 700 \text{ мм}$, $l_2 = O_2O_3 = 800 \text{ мм}$; $l_1 = O_1O_2 = 50 \text{ мм}$.
- маси другої, третьої і четвертої ланки маніпулятора зосереджені в кінематичних парах, тобто у точках O_2 , O_3 і O_4 відповідно.
- перша ланка маніпулятора абсолютно твердий жорсткий диск діаметром $D = 100 \text{ мм}$ висотою $h = 50 \text{ мм}$, з рівномірним розподілом маси

із щільністю $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$;

– узагальнені координати мають конструктивні обмеження

$$q_1(t) \in \left[\frac{\pi}{180}; \frac{15\pi}{8} \right], \quad q_2(t) \in \left[\frac{\pi}{180}; \frac{2\pi}{3} \right], \quad q_3(t) \in \left[\frac{\pi}{180}; \frac{2\pi}{3} \right], \quad q_4(t) \in \left[\frac{\pi}{180}; \frac{2\pi}{3} \right],$$

$$q_5(t) \in \left[\frac{\pi}{180}; \frac{15\pi}{8} \right].$$

– мотор-колеса діаметром $D = 165 \text{ мм}$ товщиною $b = 50 \text{ мм}$, масою 2800 г .

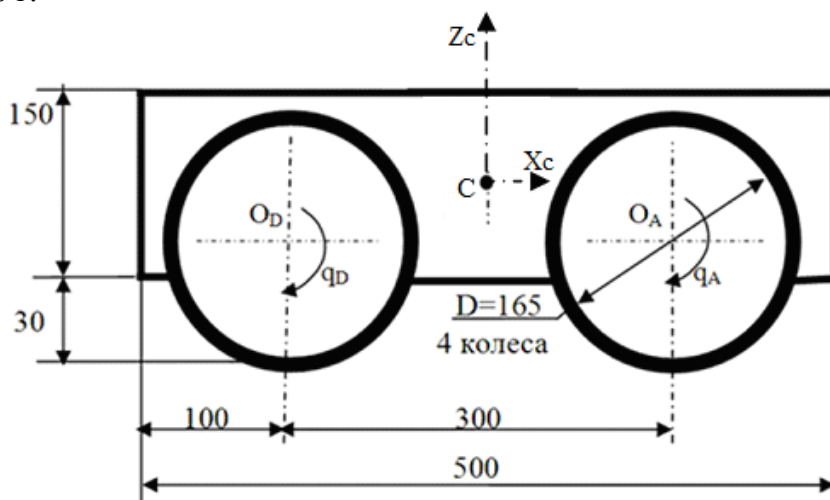


Рис. 3. Розрахункова модель платформи автономного мобільного робота

Рівняння динаміки моделі АМР змінюваної конфігурації в загальному випадку включають:

- рівняння керованого руху центру мас багатомасової системи по заданій траєкторії;
- рівняння кутового руху платформи з маніпулятором відносно центра мас багатомасової системи;
- рівняння відносного руху маніпулятора;
- рівняння регулятора системи керування.

Припустимо, що рух схвату АМР при виконанні технологічних операцій здійснюється, як послідовність переміщень по узагальненим координатам M встановленого на зупинену платформу. В цьому випадку моделювання траєкторії схвату виконується у системі координат $O_1X_1Y_1Z_1$ нерухомій відносно платформи, O_1 – точка стикування M і платформи.

Метод синтезу оптимальної траєкторії схвату маніпулятора АМР складається з наступних етапів:

- кінематичний та динамічний аналіз маніпулятора;
- обчислення меж робочого простору;
- перевірка приналежності координат вузлових точок технологічного процесу робочому простору маніпулятора;
- визначення конфігурації маніпулятора для точок робочого простору, координати яких відповідають вузловим точкам технологічного процесу;
- оцінка точності позиціювання схвату, перерегулювання та часу перехідного процесу при визначених конфігураціях M для кожної послідовності переміщень по узагальненим координатам.
- синтез оптимальної траєкторії схвату M , як послідовності переміщень по узагальненим координатам, на основі аналізу отриманих результатів для забезпечення якісних показників виконання технологічних операцій.

Оскільки, елементи тензору інерції АМР відносно осей базової системи координат $CX_cY_cZ_c$ сумірні, то приріст будь-якої узагальненої координати Δq_i обумовлює зміну перерозподілу мас, зсув платформи і зниження точності позиціювання. Таким чином, для ефективного виконання маніпулятором АМР технологічних операцій в екстремальних наперед не визначених умовах необхідно на етапі проектування розробити базу даних, яка б містила оптимальні послідовності переміщень по узагальненим координатам з заданими початковими та кінцевими точками робочого простору. Розрахунки на кожному етапі методу синтезу оптимальної траєкторії схвату маніпулятора АМР можна виконати з використанням стандартного програмного забезпечення (Fortran, Pascal, C або математичних пакетів Matlab, Mathcad).

Розглянемо реалізацію методу синтезу оптимальної траєкторії схвату маніпулятора АМР з застосуванням Mathcad. Програмне середовище Mathcad дозволяє автоматизовано провести кінематичний та динамічний аналіз [10], визначити межі робочого простору [11], провести моделювання приводу обертання для кожного ступеня рухливості, проаналізувати оптимальність конфігурацій у заданих точках робочого простору [20], оцінити точність позиціювання схвату [12].

Кінематичний та динамічний аналіз маніпулятора здійснюють з урахуванням потужності приводів, коефіцієнтів тертя, особливостей конструкції й характеристик кінематичних пар. У [11] представлені результати моделювання руху та зображення робочого простору полюса схвату маніпулятора АМР в системі координат $O_1X_1Y_1Z_1$ при заданих обмеженнях узагальнених координат $q_i(t) \in [q_{i\min}; q_{i\max}]$, $i = 1, \dots, 5$ з використанням пакета прикладних програм Mathcad.

Припустимо, що в системі координат $O_1X_1Y_1Z_1$ задані координати

вузлових точок технологічного процесу: $S1(-0,202; 0,404; 0,002)$; $S2(-0,130; 0,433; -0,017)$. Результати розв'язання зворотного завдання кінематики M відносно зв'язаної системи координат $O_1X_1Y_1Z_1$ і відповідні набори значень узагальнених координат q_i наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Результати розв'язання зворотного завдання кінематики маніпулятора АМР відносно зв'язаної системи координат $O_1X_1Y_1Z_1$

Координати вузлових точок траєкторії (м)	Набор	Значення узагальнених координат (рад)				
		q_1	q_2	q_3	q_4	q_5
$S1(-0,202; 0,404; 0,002)$	S11	-0,464	1,529	1,613	2,406	0
	S12	-0,464	0,677	2,465	-0,200	0
	S13	2,678	2,854	0,288	-1,636	0
	S14	2,678	2,124	1,017	0,331	0
$S2(-0,130; 0,433; -0,017)$	S21	2,850	2,826	0,316	-1,615	0
	S22	2,850	2,117	1,025	0,275	0
	S23	-0,292	1,550	1,591	2,486	0
	S24	-0,292	0,684	2,458	-0,252	0

Для реалізації переміщення схвату маніпулятора з точки $S1$ у точку $S2$ (табл.1) існує 192 послідовності переміщень по узагальненим координатам. Оцінка точності позиціонування схвату, перерегулювання та часу перехідного процесу при визначених конфігураціях M для кожної послідовності переміщень по узагальненим координатам проводилась з застосуванням Mathcad. Корекція точності позиціонування схвату враховує зсув платформи АМР обумовлений приростом будь-якої узагальненої координати Δq_i . Для прикладу у табл. 2 наведено значення часу перехідного процесу $t_{пп}$, точності позиціонування схвату P , перерегулювання δ , корекції ΔP та загальної точності позиціонування P_Σ для конфігурацій маніпулятора $S11$ і $S21$ при послідовностях переміщень $q_1 \rightarrow q_2 \rightarrow q_3 \rightarrow q_4 \rightarrow q_5$ та $q_2 \rightarrow q_1 \rightarrow q_3 \rightarrow q_4 \rightarrow q_5$ по узагальненим координатам M .

Таблиця 2

Оцінка якісних показників виконання технологічних операцій маніпулятором АМР відносно зв'язаної системи координат $O_1X_1Y_1Z_1$

Послідовність переміщень	Якісні показники				
	$t_{пп}, c$	P, m	$\delta, \%$	$\Delta P, m$	P_Σ, m
$q_1 \rightarrow q_2 \rightarrow q_3 \rightarrow q_4 \rightarrow q_5$	13,85	0,0019	11,76	0,0038	0,0057
$q_2 \rightarrow q_1 \rightarrow q_3 \rightarrow q_4 \rightarrow q_5$	13,90	0,0008	162,50	0,0121	0,0129

Обчислення проведено відносно зв'язаної системи координат $O_1X_1Y_1Z_1$.

Моделювання послідовностей переміщень по узагальненим координатам M дозволило для кожного варіанту траєкторії схвату M оцінити час перехідного процесу, перерегулювання та точність позиціювання. На основі аналізу отриманих результатів проведено синтез оптимальної траєкторії схвату маніпулятора АМР, яка реалізується при послідовності переміщень $q_1 \rightarrow q_2 \rightarrow q_3 \rightarrow q_4 \rightarrow q_5$ по узагальненим координатам M і забезпечує задані значення якісних показників при виконанні технологічних операцій.

Висновки. Актуальність розглянутої науково-прикладної задачі обумовлена розширенням області застосування маніпуляторів і АМР, ускладненням їх технологічних операцій. Запропоновано метод синтезу оптимальної траєкторії схвату маніпулятора АМР з врахуванням особливостей динаміки конструкції.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- Уперше представлено метод синтезу оптимальної траєкторії схвату маніпулятора АМР з врахуванням особливостей динаміки конструкції.

- Удосконалено метод математичного моделювання послідовностей переміщень по узагальненим координатам маніпулятора АМР. Застосування даного методу дозволяє на етапі проектування розробити базу даних, яка містить оптимальні послідовності переміщень по узагальненим координатам з заданими початковими та кінцевими точками робочого простору.

- Одержало подальший розвиток метод оцінки якісних показників виконання маніпулятором АМР технологічних операцій. Обчислення точності позиціювання схвату, перерегулювання та часу перехідного процесу проведено з застосуванням Mathcad при визначених конфігураціях M для кожної послідовності переміщень по узагальненим координатам. Корекція точності позиціювання схвату враховує зсув платформи АМР обумовлений приростом будь-якої узагальненої координати Δq_i .

Застосування запропонованого методу дозволяє програмно проводити синтез оптимальної траєкторії схвату маніпулятора АМР, яка реалізується при визначеній послідовності переміщень по узагальненим координатам M і забезпечує задані значення якісних показників при виконанні технологічних операцій.

Список літератури:

1. *Ащенкова Н.С.* Динаміка моделі транспортного робота при поворотах / *Н.С. Ащенкова, С.А. Ащенков, С.А. Канера* // Science and Education in New Dimension. – 2018. – VI(19). – Issue 171. – P 26-29.
2. *Tkachev S.* Stabilization of nonminimum-phase multi-input affine system / *S. Tkachev* // Science and Education. Scientific periodical of the Bauman MSTU. – 2012. – №8.
3. *Andrianova O.* Path following simulation of wheeled vehicle / *O. Andrianova* // Science and Education. Scientific periodical of the Bauman MSTU. – 2011. – Vol.10. – № 77-30569/239840.
4. *Gilimyanov R.* Motion control for a wheeled robot following a curvilinear path / *R. Gilimyanov, A. Pesterev, L. Rapoport* // Journal of Computer and Systems Science International. – 2008. – Vol.47. – №6. – P. 987-994.
5. *Kanatikov A.* Features of transition to path coordinates in a problem of path stabilization / *A. Kanatikov, T. Kasatkina* // Science and Education. Scientific periodical of the Bauman MSTU. – 2012. – № 7.
6. *Bai S.* Manipulator Dynamics / *S. Bai, L. Zhou, G. Wu* // Handbook of Manufacturing Engineering and Technology. – Springer. – 2015. – P. 1855-1872.
7. *Orsag M.* Aerial Manipulator Dynamics / *M. Orsag, C. Korpela, P.Y. Oh., S. Bogdan* // Aerial Manipulation. – Springer. – 2018. – P. 33-85.
8. *Юревич Е.И.* Основы робототехники: учеб. пособие / *Е.И. Юревич* // СПб.: БХВ-Петербург, 2017. – 304 с.
9. *Колюбин С.А.* Динамика робототехнических систем. Уч. пособие / *С.А. Колюбин* // СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 117 с.
10. *Ащенкова Н.С.* Метод кинематического и динамического анализа манипулятора с использованием Mathcad / *Н.С. Ащенкова* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий – Харьков: – 2015. – № 5/7 (77). – С. 54-63.
11. *Ashchepkova N.* Divising a method to analyze the current state of the manipulator workspace / *N. Ashchepkova* // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 1/7 (109). – P. 63-74.
12. *Ащенкова Н.С.* Моделювання та аналіз точності позиціювання маніпулятора / *Н.С. Ащенкова* // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 19 (1241). – С. 34-42.
13. *Lloyd S.* A numeric derivation for fast regressive modeling of manipulator dynamics / *S. Lloyd, R. Irani, M. Ahmadi* // Mechanism and Machine Theory. – 2021. – № 156:104149.
14. *Khurpade J.* A Virtual Model of 2D Planar Manipulator Dynamics / *J. Khurpade, S.S. Dhami, S. Banwait* // International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT). – 2018.
15. *Tian S.X.* Dynamic Modeling and Simulation of a Manipulator with Joint Inertia / *S.X. Tian, S.Z. Wang* // International Symposium on Information and Automation, ISIA 2010: Information and Automation. – 2010. – P. 10-16.
16. *Никитин Н.Н.* Курс теоретической механики. Учебн. для ВУЗов / *Н.Н. Никитин* // М.: Лань, 2010. – 720 с.
17. *Павловський М.А.* Теоретична механіка. Підручник / *М.А. Павловський* // Київ: Техніка, 2002. – 512 с.
18. *Fausett L.V.* Numerical methods using Mathcad / *L.V. Fausett*. – Prentice Hall, 2002. – 702 p.
19. *Maxfield B.* Engineering with Mathcad: using Mathcad to create and organize your engineering calculation / *B. Maxfield*. – Butterworth-Heinemann. – 2006. – 512 p.
20. *Ащенкова Н.С.* Определение оптимальных конфигураций антропоморфного

манипулятора с шестью степенями подвижности / *Н.С. Ащепкова* // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 28 (1353). – С. 94-107.

References:

1. Ashchepkova, N., Ashchepkov, S. and Kapera, S. (2018), "Dynamics of transport robot model during the turns", *Science and Education in New Dimension*, VI(19), Issue 171, pp. 26-29.
2. Tkachev, S. (2012), "Stabilization of nonminimum-phase multi-input affine system, Science and Education", *Scientific periodical of the Bauman MSTU*, №8.
3. Andrianova, O. (2011), "Path following simulation of wheeled vehicle", *Science and Education. Scientific periodical of the Bauman MSTU*, Vol. 10, № 77-30569/239840.
4. Gilimyanov, R., Pesterev, A. and Rapoport, L. (2008), "Motion control for a wheeled robot following a curvilinear path", *Journal of Computer and Systems Science International*, Vol. 47, № 6, pp. 987-994.
5. Kanatkov, A. and Kasatkina, T. (2012), "Features of transition to path coordinates in a problem of path stabilization", *Science and Education. Scientific periodical of the Bauman MSTU*, №7.
6. Bai, S., Zhou, L. and Wu, G. (2015), "*Manipulator Dynamics*", in book: *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*, Springer, pp. 1855-1872.
7. Orsag, M., Korpela, C., Oh, P.Y. and Bogdan, S. (2018), "*Aerial Manipulator Dynamics*", in book: *Aerial Manipulation*, Springer, pp. 33-85.
8. Jurevich, E. (2017), *Basis of robot*, BHV-Petersburg, St. Petersburg, 304 p.
9. Kolyubin, S. (2017), *Dynamics of the robots systems*, Publishing house of ITMO University, St. Petersburg, 117 p.
10. Ashchepkova, N. (2015), "Mathcad in the kinematic and dynamic analysis of the manipulator", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 5/7 (77), pp. 54-63. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51105.
11. Ashchepkova, N. (2021), "Divising a method to analyze the current state of the manipulator workspace", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1/7 (109), pp. 63-74, DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225121.
12. Ashchepkova, N. (2019), "Determination of optimal configurations of an antropomorphic manipulator with six degress of mobility", *Herald of the National Technical University "KhPI". Series of: Informatics and Modeling*. Vol. 28 (1353), pp. 94-107, DOI: 10.20998/2411-0558.2019.28.01.
13. Lloyd, S., Irani, R. and Ahmad, M. (2021), "A numeric derivation for fast regressive modeling of manipulator dynamics", *Mechanism and Machine Theory*, № 156:104149, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104149.
14. Khurpade, J., Dharmi, S. S. and Banwait, S. (2018), "A Virtual Model of 2D Planar Manipulator Dynamics", *International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, DOI: 10.1109/ICSSIT.2018.8748674.
15. Tian, S. X. and Wang, S. Z. (2010), "Dynamic Modeling and Simulation of a Manipulator with Joint Inertia", *International Symposium on Information and Automation, ISIA 2010: Information and Automation*, pp. 10-16.
16. Nikitin, N. (2010), *Course of theoretical mechanics*, Lan, Moscow, 720 p.
17. Pavlovsky, M. (2002), *Theoretical mechanics*, Technics, Kyiv, 512 p.
18. Fausett, L.V. (2002), *Numerical methods using Mathcad*, Prentice Hall, 702 p.
19. Maxfield, B. (2006), *Engineering with Mathcad: using Mathcad to create and organize your engineering calculation*, Butterworth-Heinemann, 512 p.

20. Ashchepkova, N. (2019), "Determination of optimal configurations of an anthropomorphic manipulator with six degrees of mobility", *Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling*, Kharkov, NTU "KhPI", 2019, № 28, pp. 94-107.

*Статтю представил д-р техн. наук, проф. ДНУ ім. О. Гончара
Давидов С.О.*

Надійшла (received) 10.06.2021

Ashchepkova Natalja Sergeevna, PhD, Associate professor
Department of Mechanotronics
Oles Honchar Dnipro National University
Ave. Gagarin, 72, Dnipro, Ukraine, 49010
E-mail: ashchepkovanatalya@gmail.com
Contact tel.: (068)219-64-90,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1870-1062>

Koshevoy Nicolay Dmitrievich, Dr. Tech. Sci., Professor
Department of Intelligent Visual Systems and Engineering of Quality
National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute"
st. Chkalov, 17, Kharkov, Ukraine, 61070
E-mail: kafedraapi@ukr.net
Contact tel.: 050-76-90-92
ORCID: [http:// orcid.org/0000-0001-9465-4467](http://orcid.org/0000-0001-9465-4467)

УДК 629.7.615.3

Метод синтезу оптимальних траєкторій схвату маніпулятора автономного мобільного робота / Кошовий М.Д., Ащепкова Н.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2021. – № 1 (5). – С. 86 – 98.

Розглянуто особливості динаміки автономного мобільного роботу змінюваної конфігурації при відносному русі маніпулятора. Для ефективного виконання маніпулятором АМР технологічних операцій в екстремальних наперед не визначених умовах доцільно на етапі проектування розробити базу даних, що містить оптимальні послідовності переміщень по узагальнених координатах, які забезпечують пересування схвату між заданими початковими і кінцевими точками робочого простору. Ил.: 3. Табл.: 2. Бібліогр.: 20 назв.

Ключові слова: автономний мобільний робот; маніпулятор; динаміка; схват; траєкторія.

УДК 629.7.615.3

Метод синтеза оптимальных траекторий схвата манипулятора автономного мобильного робота / Кошовой Н.Д., Ащепкова Н.С. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2021. – № 1 (5). – С. 86 – 98.

Рассмотрены особенности динамики автономного мобильного робота изменяемой конфигурации при относительном движении манипулятора.

Для эффективного выполнения манипулятором АМР технологических операций в экстремальных заранее не известных условиях целесообразно на этапе проектирования разработать базу данных, содержащую оптимальные последовательности перемещений по обобщенным координатам, обеспечивающие перемещение схвата между заданными начальными и конечными точками рабочего пространства. Ил.: 3. Табл.: 2. Библиогр.: 20 назв.

Ключевые слова: автономный мобильный робот; манипулятор; динамика; схват; траектория.

UDC 629.7.615.3

Method of synthesis of optimal grip trajectories of a manipulator of an autonomous mobile robot / Koshovy M.D, Ashepkova N.S. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2021. – № 1 (5). – P. 86 – 98.

The features of the dynamics of an autonomous mobile robot of variable configuration with a relative motion of the manipulator are considered.

To effectively perform technological operations by the AMR manipulator in extreme previously unknown conditions, it is advisable at the design stage to develop a database containing the optimal sequences of movements along generalized coordinates that ensure the movement of the gripper between the given initial and final points of the working space. Figs.: 3. Tabl.: 2. Refs.: 20 titles.

Key words: autonomous mobile robot; manipulator; dynamics; grasping; trajectory.

УДК 004.9: 681.518

DOI: 10.20998/2411-0558.2021.01.08

О. В. МНУШКА, ст. викл. ХНАДУ, Харків,
С. Ю. ЛЕОНОВ, д-р. техн. наук, проф. НТУ "ХПІ", Харків,
О. П. ШАПОШНИКОВА, канд. техн. наук, доц., ХНАДУ, Харків,
В. М. САВЧЕНКО, канд. техн. наук, Globallogic Україна, Харків

МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДДАЛЕНОГО МОНІТОРИНГУ ІЗ МОЖЛИВІСТЮ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБ'ЄКТАМИ

Розглянуто питання моделювання інформаційної технології віддаленого моніторингу технологічних процесів та об'єктів із можливістю керування станом об'єктів моніторингу. Визначено основні задачі та обмеження у вигляді стандартів та рекомендацій ISO/IEC/JIS. Згідно з методологією структурного аналізу та дизайну визначено набір вхідних та вихідних параметрів, механізми та обмеження, що впливають на операції та потоки даних. Побудовано концептуальну модель інформаційної технології для систем моніторингу та виконано її декомпозицію у нотатії IDEF0 та показано можливість її реалізації на прикладі блоку отримання даних – інтелектуального роутера, що забезпечує збирання, обробку, тимчасове зберігання даних та комунікацію із сервером оброблення даних. Іл.: 4. Бібліогр.: 21 назв.

Ключові слова: моделювання інформаційної технології; технологічні процеси; концептуальна модель; системи моніторингу; інтелектуальний роутер.

Постановка проблеми. Впровадження систем моніторингу технологічних процесів та об'єктів є комплексом заходів, що включає вирішення науково-технічних та організаційних задач побудови цифрових підприємств Індустрії 4.0. Означений моніторинг є складовою загальної системи управління підприємством на рівні технологічних процесів основною метою яких є отримання, обробка та надання актуальної інформації про стан процесів або об'єктів. Інтелектуалізація процесу обробки даних на основі використання баз знань та штучних нейронних мереж надає інструменти для поглибленого аналізу та прогнозування як основи для систем підтримки прийняття рішень.

Різні аспекти цифрової трансформації підприємств на основі промислового Інтернету речей відображені у серії міжнародних стандартів та рекомендацій:

– ITU-T Series Y.3500-Y.3599: Cloud Computing, що визначають вимоги та архітектурні фреймворки хмарно-орієнтованих рішень включно із основними типами хмарних сервісів [1];

– ITU-T Series Y.4000-Y.4999: Global information infrastructure, Internet protocol aspects, next-generation networks, Internet of things and

smart cities. Internet of things and smart cities and communities. Requirements and use cases, вимоги, галузі застосувань, інфраструктуру, архітектурні фреймворки, питання менеджменту та безпеки рішень екосистеми "розумних рішень" у галузі застосування Інтернету речей до автоматизації процесів на місцевому, регіональному та глобальному рівнях [2];

– The Industrial Internet of Things Volume Gx, що визначають технічні, організаційні, бізнесові та інші питання, пов'язані із впровадженням рішень на основі промислового Інтернету речей. З практичної точки зору реалізації інформаційних технологій інтерес представляють рекомендації та best practices побудови загальної архітектури підприємств (організацій) та архітектури відповідних додатків [3];

– ISO/IEC 27000-27050 Information technology – Security techniques визначають перелік ризиків та методи менеджменту питань безпеки роботи підприємств, пов'язаних із інформацією та її обробкою, в тому числі із використанням сучасних хмарно-орієнтованих технологій [4];

– ISO/IEC 7498, ISO/IEC 8473, ISO/IEC 10589, ISO/IEC 11571-11579, ISO/IEC TR 12861, ISO/IEC TR 12862, які визначають архітектуру, способи та методи побудови мереж та міжмережного обміну даними у комп'ютерних та телекомунікаційних мережах [5].

Означені стандарти та рекомендації застосовують для аналізу та синтезу систем промислового призначення без прив'язки до конкретної галузі на різних етапах розробки систем. Галузево-орієнтовані стандарти, на кшталт IEC 61850 [6, 7] є основними документами для розробників систем автоматизації та віддаленого моніторингу в енергетиці на рівні розподільчих підстанцій та визначають коло технічних питань від моделювання до реалізації, включно із протоколом обміну даними GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event), орієнтованим на стек TCP/IP швидкісний промисловий Ethernet.

Веб-орієнтовані інформаційні технології віддаленого моніторингу із можливістю керування поступово витісняють традиційні системи керування, але їх розробка вимагає урахування багатьох факторів, серед яких в першу чергу питання безпеки та можливість використання у режимі реального часу.

Розробка інформаційних технологій сучасних веб-орієнтованих систем моніторингу із можливістю керування є актуальною науково-технічною задачею, спрямованою на побудову ефективних систем підтримки прийняття рішень для систем керування підприємства на

основі використання методів штучного інтелекту та інших методів інтелектуальної обробки даних моніторингу.

Для рішення поставлених задач потрібно проаналізувати сучасний стан питання із урахуванням тенденцій Індустрії 4.0, Інтернету речей та переходу на швидкісний мобільний Інтернет, що дозволить побудову систем реального часу на основі використання веб-орієнтованих технологій за рахунок суттєвого збільшення швидкості та надійності мобільних мереж передавання даних.

Аналіз літератури. Методологія структурного проектування (SADT) надає засоби для представлення моделі системи (або процесу) у вигляді послідовності операцій, що виконуються системою включно із описом взаємозв'язків між даними, та використовується для моделювання бізнес-процесів у складних системах [8 – 10].

Комбінування IDEFx та UML методів моделювання оперативних задач дозволяє описати процеси точніше, включаючи різні типи часових та логічних взаємозв'язків між різними операціями [11].

У [12] функціональний підхід на основі методології IDEF0 застосовано для визначення функцій програмної системи для автоматизації управління газотранспортною системою, а також показано, що отримана модель є основою для розробки архітектури програмних систем автоматизації управління.

У [13] функціональний підхід та IDEF0 використано для моделювання динамічної частини системи.

У [14] на основі методології IDEF0 представлено інформаційну технологію керування обладнанням із використанням нейронних мереж та у відповідності до стандарту IEC61850.

Якість даних та їх аналіз є одними із основних складових систем підтримки прийняття рішень та є визначним фактором для розвитку Індустрії 4.0. У [15] аналізується питання готовності систем до автоматичної обробки даних та якість даних. Запропоновано використовувати наступні категорії для оцінки процесу роботи із даними: Data acquisition, Data sources, Data formats, Data coding, Sample size, Temporal consistency. Показано, що основними напрямками покращення роботи із даними є автоматизація та централізоване зберігання даних, стандартизація форматів представлення даних, збільшення терміну зберігання (як основа якісної аналітики), забезпечення підтримки цілісності даних.

Аналіз публікацій показує можливість застосування технологій структурного проектування до розробки моделей інформаційних технологій різного призначення та дозволяє точно описати процеси, для управління якими розробляють інформаційну технологію.

Метою публікації є розробка функційної моделі інформаційної технології веб-орієнтованої системи віддаленого моніторингу із можливістю керування технологічними процесами та об'єктами.

Модель інформаційної технології віддаленого моніторингу із можливістю керування. Попит на системи віддаленого моніторингу постійно зростає, що обумовлено сталим розвитком технологій Інтернету речей та промислового Інтернету речей. Архітектура таких систем та виконувані функції [16 – 18] визначаються набором факторів серед яких відзначимо вимоги до системи (Requirements) серед яких:

1) на наш погляд найбільше значення мають вимоги замовника (Customer Reqs), що визначають загальні вимоги до майбутньої системи, як з точки зору технічних характеристик, так і з точки зору економічної ефективності проекту.

2) вимоги безпеки (Safety Reqs) визначають обмеження системи з точки зору її безпечного впливу на людину та/або оточуючого середовища. Ці вимоги не розповсюджуються на питання кібербезпеки, економічної безпеки та інше [19].

3) вимоги до кібербезпеки (Cyber Security Reqs.) визначають обмеження системи з точки зору безпеки під час обміну загальними каналами комунікацій та визначають використання захищених протоколів обміну, а також інших апаратно-програмних рішень, в залежності від спрямованості системи.

4) вимоги до енергоефективності (Power Consumption Reqs) визначають обмеження до апаратної частини віддалених систем (сенсорів, актуаторів, розумних сенсорів та інше).

5) вимоги до продуктивності (Performance Reqs) визначають обмеження до апаратної частини та програмного забезпечення серверного та інших компонентів системи.

Додатково обмеженнями таких систем є набір протоколів обміну даними (Data Exchange Protocols) [20], що є характерними для даної предметної галузі, набір специфікацій параметрів (Parameters Specification), які належить моніторити; міжнародні, державні та галузеві стандарти, регламенти, технічні умови та інші регулюючі документи (Standards and Technical Regulations), частину яких було розглянуто вище.

З точки зору уніфікації системи моніторингу важливо відмовитись від орієнтації на конкретний тип обладнання, і в якості вхідного параметру використовувати дані визначених типів, які попередньо можуть бути конвертовані у цифровий формат відповідними сенсорами [21], або безпосередньо отриманими з обладнання, за станом якого здійснюється моніторинг (Parameters, Equipment Parameters).

Інформаційна технологія, що проектується, призначена для формування вихідних даних в залежності від потреб замовника (клієнта) та щонайменше повинна містити інформацію про поточний стан системи (Reports) та попередження про вихід параметрів за встановлені межі (Alarms). Також можливо формування повідомлень (Notifications) сигналів керування (Controls) та інформації про можливий майбутній стан системи (State (Faults) Prediction). Це є неов'язковим, але надає системі деякі інтелектуальні можливості з обробки даних.

Розробка інформаційної технології базується на знаннях експертів у даній предметній галузі, використовує методи обробки даних імітаційного моделювання процесів та систем. Апаратним забезпеченням таких систем є технологічне обладнання, локальні SCADA-системи, комп'ютерні мережі промислового та загального призначення. З урахуванням вищесказаного, концептуальна модель інформаційної технології віддаленого моніторингу із можливістю керування може мати вигляд представлений на рис. 1.

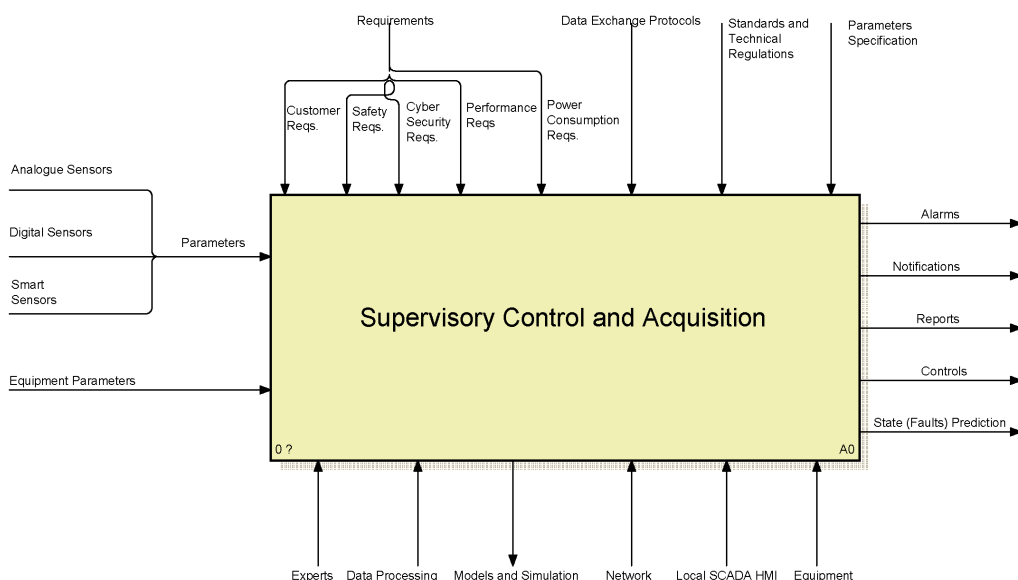


Рис. 1. Концептуальна модель інформаційної технології віддаленого моніторингу із можливістю керування

Питання віддаленого керування є складним з технічної точки зору та залежить від призначення системи. Реалізація цього механізму вимагає більш жорстких обмежень, в першу чергу з точки зору безпеки системи та забезпечення гарантованої системи доставки сигналів керування до системи.

Проведено декомпозицію запропонованої інформаційної технології віддаленого моніторингу із можливістю керування за допомогою засобів функціонального моделювання засобів та систем (рис. 2).

Дані у систему (Parameters) потрапляють двома каналами: дані ІІ (Parameters) та параметри з обладнання І2 (Equipment Parameters) через блок отримання даних А2 (Data Acquisition) на виході якого формується параметризований сигнал (Parameterized Data) та безпосередньо від обладнання. Блок отримання даних А1 (Data Acquisition) використовує стандартні та промислові мережі для отримання даних, а також локальні Scada для безпосереднього контролю, для нього у якості обмежень використовують специфікації параметрів С8 (Parameters Specification), вимоги до кібербезпеки С3 (Cyber Security Reqs.), рівень енергоспоживання С5 (Power Safety Reqs. Consumption Reqs.) та протоколи обміну даними С6 (Data Exchange Protocols).

Ці сигнали є вхідними для модуля обробки та зберігання даних А2 (Data Processing and Storing). У цьому блоці відбувається обробка даних з метою виявлення можливих помилок (Faults) та підготовка даних для наступного етапу (Cleared Data). Обмежуючими факторами для цього блоку є: вимоги до продуктивності С4 (Performance Reqs.), специфікація параметрів С8 (Parameters Specification), вимоги до безпеки С2 (Safety Reqs.) та протоколи С6 (Data Exchange Protocols). У цьому блоці аналізуються отримані сигнали. Як механізм використовуються методи обробки даних М2 (Data Processing) та експертна оцінка отриманих даних М1 (Experts).

У блоці прийняття рішень А3 (Decision Making) на основі експертної оцінки даних М1 та з урахуванням відповідних стандартів та технічних регламентів С7 (Standards and Technical Regulations) формуються дані про поточний стан системи (States), події (Events) та за необхідності сигнали керування (Controls). Події (Events) можуть бути двох типів: повідомлення О2 (Notifications) та попередження О1 (Alarms).

Визначення типу події та його розшифровка відбуваються у блоці підготовка звітів А4 (Reports Generation) на виході якого дані представлені у вигляді зручному для розуміння людиною (Human-Ready Data). Всі попередньо підготовлені дані поступають на вход блоку підготовки та публікації результатів А5, який є веб інтерфейсом системи та може формувати на виході інформацію про п'ять основних станів: у вигляді таблиць, графіків, мнемосхем тех. процесів та інше. Вигляд інформації залежить від вимог користувача С1 (Customer Reqs.) та має відповідати прийнятим у галузі стандартам та регламентам С7. За необхідності локальні Scada можуть мати пріоритет над внутрішньою обробкою даних, особливо у системах реального часу.

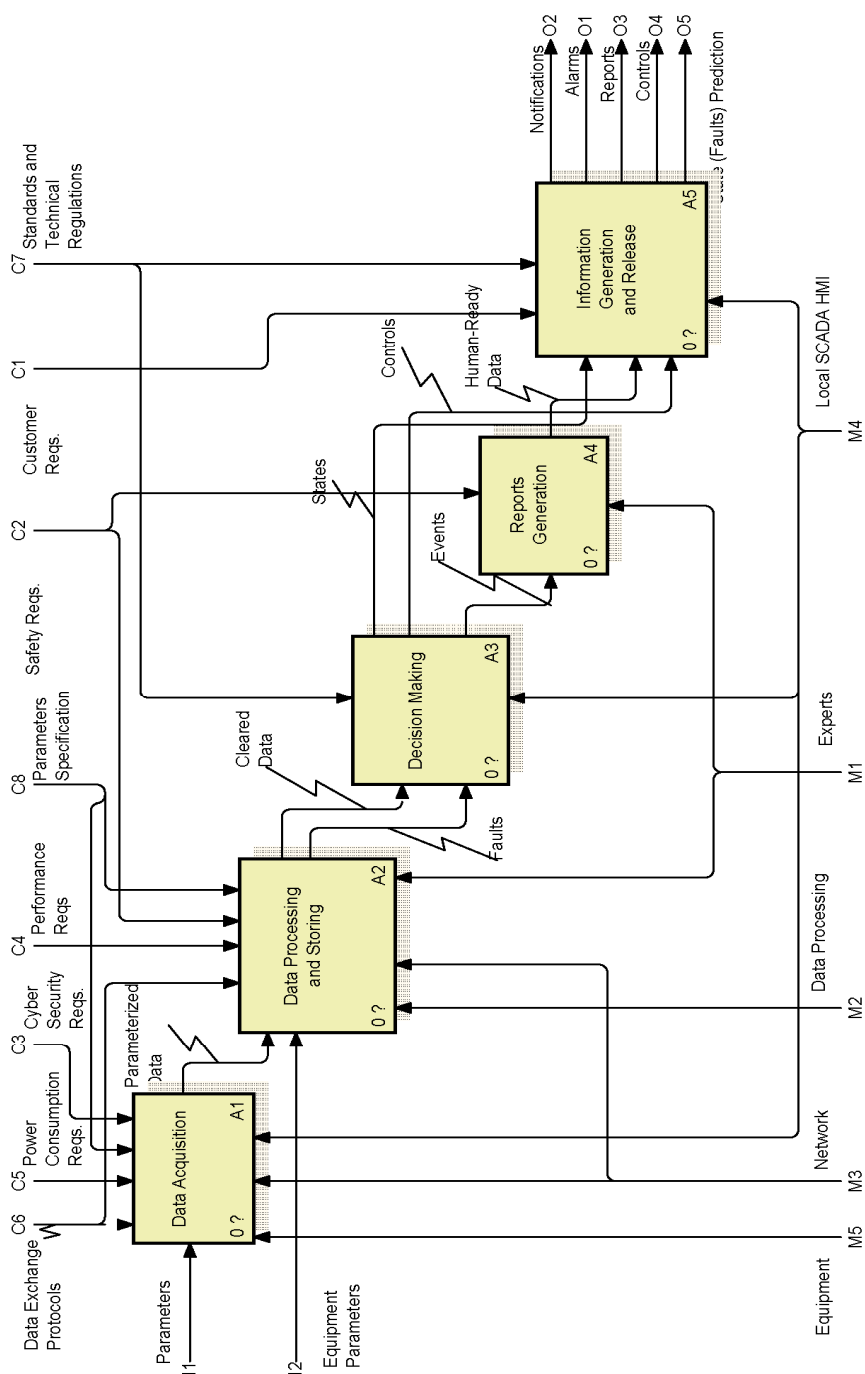


Рис. 2. Декомпозиція інформаційної технології віддаленого моніторингу із можливістю керування

Продуктування інформації про можливий майбутній стан системи дозволяє забезпечити більший термін безаварійної роботи обладнання, покращення планування технічного сервісу, що є основою для підвищення якості прийнятих рішень у системах підтримки прийняття рішень.

Для деяких застосувань більш зручним способом представлення є функціональна декомпозиція інформаційної технології у вигляді деревовидної діаграми (рис. 3) на якій інформаційну технологію представлено у стислому вигляді, що дозволяє оцінити призначення блоків інформаційної технології без урахування потоків даних, вхідних і вихідних сигналів, тощо.

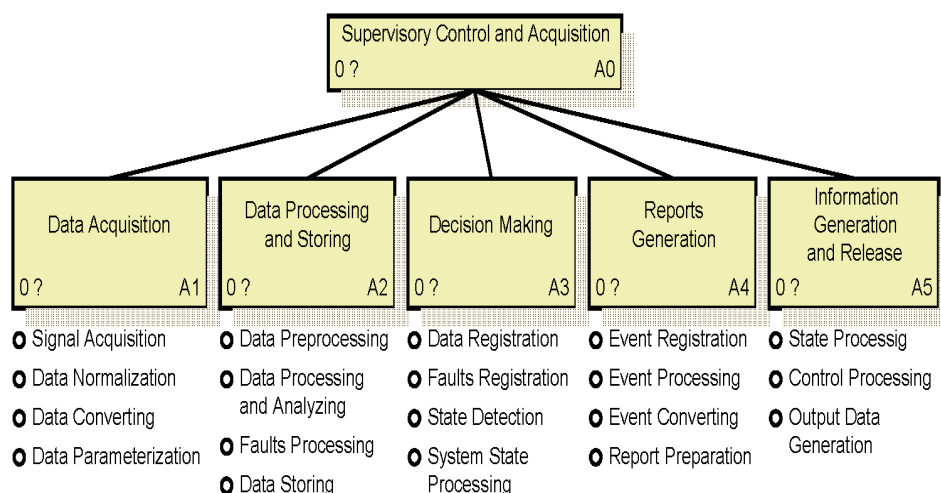


Рис. 3. Функціональна декомпозиція інформаційної технології у вигляді деревовидної діаграми

Як приклад реалізації компонентів інформаційної технології розглянемо операцію Data Acquisition A1 (рис. 4).

Для таких систем оптимальним є використання проміжних пристроїв, що мають забезпечити підключення обладнання з використанням промислових протоколів обміну даними, а також передавання даних на сервер обміну та обробки даних. Також такі пристрої можуть бути використані для підключення за бездротовою технологією розумних сенсорів та актуаторів.

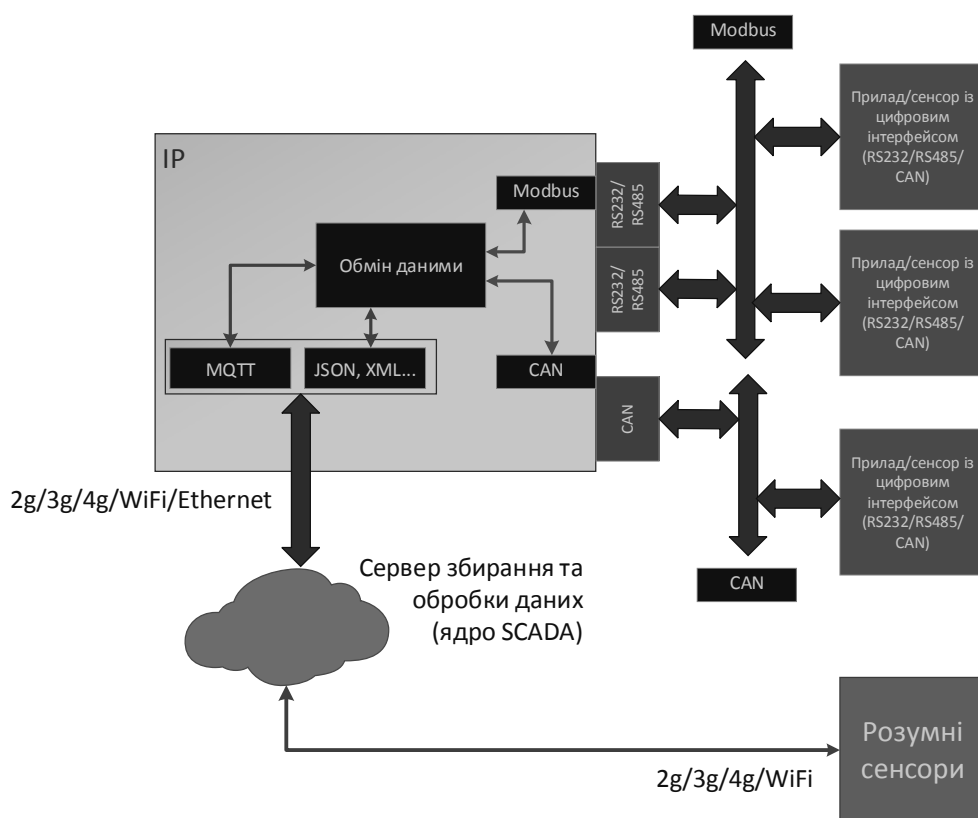


Рис. 4. Реалізація операції A1 Data Acquisition

Дані в систему збираються за допомогою сенсорів, що мають цифровий вихід та можуть бути підключеними до одного із стандартних промислових інтерфейсів, або формується промисловим обладнанням та передаються наприклад по протоколу Modbus. Для деяких застосувань роутер можна застосовувати протокол CAN. Для всіх цих пристроїв роутер може виступати ініціатором збору даних або ретранслятором.

Поширене промислове обладнання часто у якості стандартного використовує послідовні протоколи обміну даними і підключення через інтерфейс RS485, CAN і тому подібне. У нашому випадку пристрої працюють за протоколом Modbus RTU та підключаються через загальну шину. Для такої мережі роутер виступає у якості мастера та здійснює періодичне опитування обладнання (або за запитом із веб-клієнта), обробку отриманих даних та передачу їх на сервер.

Основні вимоги до роутера:

1. Забезпечення роботи із стандартними промисловими

протоколами.

2. Апаратне забезпечення роутера повинне бути розраховано на промисловий діапазон температур.

3. Мати достатню обчислювальну потужність для тимчасового збереження результатів опитування, у випадку неможливості передачі цих даних на сервер.

Обмін даними із сервером може відбуватися за стандартним протоколом (MQTT, https), або спеціально розробленим протоколом для обміну даними. Вартість такого пристрою не повинна перевищувати 100-120 доларів. У нашому випадку використовується система на чіпі на основі процесору i.MX6UL/6ULL, що має достатні потужності для поставлених задач. Також він забезпечує підключення до сервера із використанням технології Ethernet а також технології 2G-4G.

Таким чином роутер є проміжною ланкою що забезпечує збирання даних, їх попередню обробку та зберігання у разі тимчасових розривів зв'язку із сервером. 2G-4G та WI-FI модулі є опціональними та можуть бути реалізованими у вигляді окремих модулів або розміщеними на друкованій платі роутера.

На рис. 4 представлено процес обміну даними компонентів системи. Сервер обміну даними забезпечує підключення клієнтів за протоколом TCP. Також у системі є веб-сервер, що разом з клієнтським додатком забезпечує відображення веб-інтерфейсу. MQTT брокер дозволяє підключити пристрої за стандартним протоколом MQTT, який працює у режимі publisher/subscriber.

Висновки. Розроблено функційну модель інформаційної технології віддаленого моніторингу технологічних процесів та об'єктів, що дозволяє поєднувати у якості об'єктів моніторингу як стандартні промислові контролери, так і пристрої Інтернету речей. На прикладі модуля збирання даних показано можливість її реалізації.

Основною метою запропонованої інформаційної технології є надання інструментів з інтелектуального оброблення даних та допомога експертам у відповідній предметній галузі з формування рішень на основі аналізу поточного стану системи (обладнання) даних про прогнозований стан системи або інших у зручному для використання вигляді. Зазначимо, що функція керування (Controls) є не обов'язковою у даному випадку у зв'язку з тим, що важко забезпечити гарантовану доставку сигналів керування через інтернет. Додавання функції керування також може призводити до значного ускладнення системи, що обумовлено необхідністю урахування значної кількості факторів впливу і в першу чергу питань безпеки у всіх її проявах.

Інформаційна технологія також може використовуватися як

додатковий елемент із традиційними системами керування. Самостійне значення система має для проектів орієнтованих на забезпечення моніторингу стану будинків, складських приміщень, територій, а також моніторингу технологічних процесів.

Перспективами подальших досліджень є реалізація модулів прийняття рішень на основі використання бази знань у системі.

Список літератури:

1. ITU-T Recommendations [Електронний ресурс] – Режим доступу: [www. URL: https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/index.aspx?ser=Y](http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/index.aspx?ser=Y).
2. ITU-T Recommendations. ITU-T Y.4000/Y.2060 (06/2012) [Електронний ресурс] – Режим доступу: [www. URL: https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=11559](http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=11559).
3. The Industrial Internet of Things Volume G1: Reference Architecture. IEC:PUB:G1:V1.80:20170131 – IEC, 2017. – 58 p. [Електронний ресурс] – Режим доступу: [www. URL: https://www.iiconsortium.org/IEC_PUB_G1_V1.80_2017-01-31.pdf](http://www.iiconsortium.org/IEC_PUB_G1_V1.80_2017-01-31.pdf).
4. ISO/IEC 27000:2018 Information technology – Security techniques – Information security management systems [Електронний ресурс] – Режим доступу: [www. URL: https://www.iso.org/ru/ics/35/x/](http://www.iso.org/ru/ics/35/x/).
5. Publicly Available Standards [Електронний ресурс] – Режим доступу: [www. URL: https://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/](http://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/).
6. IEC 61850 Tissue Database [Електронний ресурс] – Режим доступу: [www. URL: https://iec61850.tissue-db.com/parts.msp](http://iec61850.tissue-db.com/parts.msp).
7. IEC 61850 – Communication Networks and Systems in Substations: An Overview of Computer Science [Електронний ресурс] – Режим доступу: [www. URL: http://seclab.illinois.edu/wp-content/uploads/2011/03/iec61850-intro.pdf](http://seclab.illinois.edu/wp-content/uploads/2011/03/iec61850-intro.pdf).
8. *Islamova O.V.* SADT technology as a tool to improve efficiency in the use of process approach in management of engineering enterprise / *O.V. Islamova, A.A. Zhilyaev, A.M. Bozieva* // 2016 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&MQ&IS). – 2016. – P. 65-68. – doi: 10.1109/ITMQIS.2016.7751903.
9. *Марка Д.А.* Методология структурного анализа и проектирования / *Д.А. Марка, МакГоуэн*. – К.: М.: МетаТехнология, 1993. – 240 с.
10. *Турлакова С.С.* Информационно-коммуникационные технологии развития "умных" производств / *С.С. Турлакова* // Экономика промышленности. – 2019. – № 1 (85). – С. 101-123.
11. *Fu M.* Modeling Method of Operational Task Combined with IDEF and UML / *M. Fu, Wang J. Wang and M. Li* // 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). – 2018. – P. 1443-1447..
12. *Чекурін В.Ф.* Моделювання функцій програмного комплексу для автоматизації управління газотранспортними системами / *В.Ф. Чекурін, О.М. Химко* // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2018. – Т. 29 (68). – № 2. – С. 192-197.
13. *Sklyar V.* Assurance Case Driven Design for Internet of Things / *V. Sklyar, V. Kharchenko* // WSEAS transactions on computer research. – 2016. – Vol. 4. – P. 173-182.
14. *de Vasconcellos Praxedes A. B.* Intelligent Monitoring Equipment in Power Plants using IEC61850 Sample Values, Paraconsistent Artificial Neural Networks and Condition Based Maintenance / *A.B. de Vasconcellos Praxedes, A.J. Alvares* // 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering. – 2015.

15. Bernerstätter R. Data maturity for smart factory applications – an assessment model / R. Bernerstätter // *Acta Technica Corviniensis = Bulletin of Engineerin.* – 11.2018. – No. 1. P. 31-35.
16. Мнушка О.В. Архітектура веб-орієнтованої SCADA-системи / О.В. Мнушка // *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання.* – Харків, НТУ "ХПІ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 117-128.
17. Badii C. Analysis and assessment of a knowledge based smart city architecture providing service APIs / C. Badii, P. Bellini, D. Cenni et al. // *Futur. Gener. Comput. Syst.* – 2017. – Vol. 75. – P. 14–29.
18. Ray P.P. A survey on Internet of Things architectures / P.P. Ray // *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences.* 2018, King Saud bin Abdulaziz University – Vol. 30. – No. 3. – P. 291–319.
19. Mnushka O. Security Model of IOT-based Systems / O. Mnushka, V. Savchenko // 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine. – 2020. – P. 398-401.
20. Мнушка О.В. Прикладний протокол обміну даними в Інтернеті речей / О.В. Мнушка, О.А. Півенєва, В.М. Савченко // *Вісник ХНАДУ.* – Харків. – 2019. – Вип. 87. – С. 54-58.
21. Savchenko V. High-Sensitive Sensors Based on QCR for Smart Devices / V. Savchenko, O. Mnushka // 2020 IEEE XVIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Lviv, Ukraine. – 2020. – P. 72-75.

References:

1. ITU-T Recommendations (2021), available at: www.itu.int/ITU-T/recommendations/index.aspx?ser=Y (accessed May 2021).
2. ITU-T Recommendations. ITU-T Y.4000/Y.2060 (2012), available at: www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=11559 (accessed May 2021).
3. The Industrial Internet of Things Volume G1: Reference Architecture. IIC:PUB:G1:V1.80:20170131 (2017), IIC, 2017, 58 p. available at: www.iiconsortium.org/IIC_PUB_G1_V1.80_2017-01-31.pdf (accessed May 2021).
4. ISO/IEC 27000:2018 Information technology – Security techniques – Information security management systems (2018), available at: www.iso.org/ru/ics/35/x/ (accessed May 2021).
5. Publicly available standards (2021), available at: <https://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/> (accessed May 2021).
6. IEC 61850 Tissue Database (2021), URL: <https://iec61850.tissue-db.com/parts.msp> (accessed May 2021).
7. Zhang, J. and Gunter, C.A. (2011), "IEC 61850 - Communication Networks and Systems in Substations: An Overview of Computer Science", available at: <http://seclab.illinois.edu/wp-content/uploads/2011/03/iec61850-intro.pdf> (accessed May 2021).
8. Islamova, O.V., Zhilyaev, A.A. and Bozieva, A.M. (2016), "SADT technology as a tool to improve efficiency in the use of process approach in management of engineering enterprise", *2016 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&MQ&IS)*, 2016, pp. 65-68.
9. Marca, D.A. and McGowan, K. (1993), *Structural Analysis and Design Methodology*, M.: MetaTechnology, 240 p.
10. Turlakova, S.S. (2019). "Information and communication technologies for the development of "smart" industries", *Econ. promisl.*, 1 (85), pp. 101-123.
11. Fu, M., Wang, D., Wang, J. and Li, M (2018), "Modeling Method of Operational Task Combined with IDEF and UML", *2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, pp. 1443-1447.

12. Chekurin, V.F. and Kimko, O.M. (2018), "Modeling of functions of the software complex for automation of gas transportation systems management", *Academic notes of Vernadsky Taurida National University. Series : Technical Sciences*, Vol. 29 (68), No. 2, pp. 192-197.
13. Sklyar, V. and Kharchenko, V. (2016), "Assurance Case Driven Design for Internet of Things", *WSEAS transactions on computer research*, Vol. 4, pp. 173-182.
14. de Vasconcellos Praxedes, A.B. and Alvares, A.J. (2015) "Intelligent Monitoring Equipment in Power Plants using IEC61850 Sample Values, Paraconsistent Artificial Neural Networks and Condition Based Maintenance", *3rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering*.
15. Bernerstätter, R. (2018), Data maturity for smart factory applications – an assessment model, *Acta Technica Corviniensis = Bulletin of Engineering*, No 1, pp. 31-35.
16. Mnushka, O.V. (2018), "The architecture of a web-based SCADA system", *Bulletin of the National Technical University KhPI. Series of Informatics and Modeling*, Kharkiv: NTU "KhPI", No. 24 (1300), pp 117-128.
17. Badii, C., Bellini, P., Cenni, D., Difino, A., Nesi, P. and Paolucci, M. (2017), "Analysis and assessment of a knowledge based smart city architecture providing service APIs", *Futur. Gener. Comput. Syst.*, Vol. 75, pp. 14-29.
18. Ray, P.P. (2018), "A survey on Internet of Things architecture" *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 30, no. 3. King Saud bin Abdulaziz University, pp. 291–319.
19. Mnushka, O. and Savchenko, V. (2020), "Security Model of IOT-based Systems", *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, pp. 398-401.
20. Mnushka, O.V., Pivnieva, O.A. and Savchenko, V.M. (2019), "Application protocol of data transfer in the Internet of Things", *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, Vyp. 87, Kharkiv, pp. 123-127.
21. Savchenko, V. and Mnushka, O. (2020), "High-Sensitive Sensors Based on QCR for Smart Devices", *2020 IEEE XVIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*, Lviv, Ukraine, pp. 72-75.

Статтю представив доктор техн. наук, проф. кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій ХНАДУ Гурко О.Г.

Надійшла (received) 10.05.2021.

Mnushka Oksana, Senior Lecturer, M.S.
Kharkiv National Automobile and Highway University,
Str. Yaroslava Mudrogo, 25, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.:(+38057)707-37-47, e-mail: mnushka.ov@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-7756-9260

Leonov Sergey, Dr. Tech. Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Politechnical Institute"
Str. Kirpichova, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (099) 911-911-3, e-mail: serleomail@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-8139-0458

Shaposhnikova Olena, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor
Kharkiv National Automobile and Highway University,
Str. Yaroslava Mudrogo, 25, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.:(+38057)707-37-47, e-mail: shaposhnikovaep@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-0405-8205

Savchenko Volodymyr, Candidate of Science (Engineering),
Globallogic Ukraine, Software Engineer, consultant, Kharkiv, Ukraine
Tel.:(+38067)576-78-83, e-mail: savchenko@live.com
ORCID ID: 0000-0001-6548-0891

УДК 004.9: 681.518

Модель інформаційної технології віддаленого моніторингу із можливістю керування технологічними процесами та об'єктами / Мнушка О.В., Леонов С.Ю., Шапошнікова О.П., Савченко В.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2021. – № 1 (5). – С. 99 – 114.

Розглянуто питання моделювання інформаційної технології віддаленого моніторингу технологічних процесів та об'єктів із можливістю керування станом об'єктів моніторингу. Визначено основні задачі та обмеження у вигляді стандартів та рекомендацій ISO/IEC/ІІС. Згідно з методологією структурного аналізу та дизайну визначено набір вхідних та вихідних параметрів, механізми та обмеження, що впливають на операції та потоки даних. Побудовано концептуальну модель інформаційної технології для систем моніторингу та виконано її декомпозицію у нотації IDEF0 та показано можливість її реалізації на прикладі блоку отримання даних – інтелектуального роутера, що забезпечує збирання, обробку, тимчасове зберігання даних та комунікацію із сервером оброблення даних. Іл. 4. Бібліогр. 21 назв.

Ключові слова: моделювання інформаційної технології; технологічні процеси; концептуальну модель; системи моніторингу; інтелектуальний роутер.

УДК 004.9: 681.518

Модель информационной технологии удаленного мониторинга с возможностью управления технологическими процессами и объектами / Мнушка О.В., Леонов С.Ю., Шапошнікова Е.П., Савченко В.Н. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2021. – № 1 (5). – С. 99 – 114.

Рассмотрены вопросы моделирования информационной технологии удаленного мониторинга технологических процессов и объектов с возможностью управления состоянием объектов мониторинга. Определены основные задачи и ограничения в виде стандартов и рекомендаций ISO/IEC/ІІС. Согласно методологии структурного анализа и дизайна, определен набор входных и выходных параметров, механизмы и ограничения, влияющие на операции и потоки данных. Построена концептуальная модель информационной технологии для систем мониторинга и выполнена ее декомпозиция в нотации IDEF0, показана возможность ее реализации на примере блока получения данных – интеллектуального роутера, обеспечивающего сбор, обработку, временное хранение данных и коммуникацию с сервером обработки данных. Ил. 4. Библиогр. 21 назв.

Ключевые слова: моделирование информационной технологии; технологические процессы; концептуальную модель; системы мониторинга; интеллектуальный роутер.

UDC 004.9: 681.518

Model of information technology of remote monitoring with a possibility of control of technological processes and objects / Mnushka O.V., Leonov S.Yu., Shaposhnikova E.P., Savchenko V.M. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2021. – № 1 (5). – P. 99 – 114.

In the paper, the issues of modeling information technology for remote monitoring of technological processes and objects with the ability to control the state of monitoring objects are considered. The main objectives and constraints in the form of ISO/IEC/IIC standards and recommendations have been defined. According to the structural analysis and design

methodology, a set of input and output parameters, mechanisms, and constraints affecting operations and data flows have been defined. A conceptual model of information technology for monitoring systems has been built and decomposed in the IDEF0 notation, the possibility of its implementation is shown using the example of a data acquisition unit in the form of an intelligent router that provides collection, processing, temporary storage of data and communication with a data processing server. Figs.: 4, Refs.: 21 titles.

Keywords: information technology modeling; technological processes; conceptual model; monitoring systems; intelligent router.

УДК 004.9

DOI: 10.20998/2411-0558.2021.01.09

С. А. ПОКРИШКА, асп., СХУ ім. В. Даля, Сєверодонецьк,
Л. О. ШУМОВА, канд. техн. наук, доц., СХУ ім. В. Даля,
Сєверодонецьк

УДОСКОНАЛЕННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙНОЇ ВЕБОРІЄНТОВАНОЇ СИСТЕМИ З ВИКОРИСТАННЯМ КОЛАБОРАТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ

Представлено вирішення задачі удосконалення рекомендаційної веборієнтованої системи за рахунок колаборативної фільтрації для надання рекомендацій користувачу вебсервісу зі статтями на тему ігор. В ході досліджень систематизовано сукупність етапів розробки та удосконалення рекомендаційної веборієнтованої системи. Представлена структура бази даних та метод колаборативної фільтрації з запропонованою мірою подібності для формування рекомендацій користувачам. Використано попереднє структурування статей за категоріями для виявлення вподобань користувачів та надання рекомендацій. Використання колаборативної фільтрації з запропонованою мірою подібності дозволило підвищити кількість переглянутих користувачами статей. Іл.: 2. Табл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: рекомендаційна веборієнтована система; колаборативна фільтрація; бази даних; структурування статей за категоріями; міра подібності.

Постановка проблеми. Зростання кількості різноманітних вебсервісів обумовлює все більш жорсткі вимоги до їх конкурентоспроможності. Надання користувачу вебсервісу персоналізованого контенту є одним із методів, що робить взаємодію користувача з ресурсом більш комфортним. Застосування технології формування рекомендацій призводить до того, що споживачі все частіше віддають переваги ресурсам, що пропонують їм цікавий персоналізований контент. У сучасному інтернет-просторі використання рекомендацій контенту є важливою складовою популярності ресурсу, а їх відсутність може вважатись недоліком.

У зв'язку зі стрімко зростаючим числом вебсервісів, користувачу складно орієнтуватися у величезному обсязі інформації, тому актуальним завданням можна вважати удосконалення рекомендаційної веборієнтованої системи, орієнтованої на користувача.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Формування рекомендацій – це одне із важливих завдань інтелектуального вебсервісу будь-якого напрямку. Рекомендації дозволяють підбирати найкращі варіанти товару, музики чи фільму для користувача. Одна із важливих частин розробки – це вибір ефективного методу надання рекомендацій у

відповідності до індивідуальних завдань вебсервісу, тому варіантів реалізації безліч і кожен має як переваги та недоліки. Більшість досліджень у галузі рекомендаційних систем для надання рекомендацій використовують метод колаборативної фільтрації [1, 2] з опціональною мірою подібності, що використовується при фільтрації. Метод колаборативної фільтрації надає наступні переваги. Застосування цього методу не потребує детального опису досліджуваних елементів. Також, метод колаборативних фільтрації не залежить від відсутності інформації про елемент і дозволяє реєструвати зміну інтересів користувачів з плином часу і відстежувати приховані чинники, що забезпечують гнучкість щодо переваг користувача.

Розрізняють три типи методів формування рекомендацій [1]: фільтрація на основі вмісту, фільтрація на основі знань та колаборативна фільтрація, які можуть давати рекомендації від великих інформаційних груп відповідно до вподобань користувача.

Підходи до фільтрації на основі змісту [2] враховуються тільки минулі вподобання окремого користувача і намагаються вивчити модель вподобань, засновану на функціональному поданні вмісту рекомендованих елементів.

Метод фільтрації, заснований на знаннях, рекомендує елемент, обчислюючи вподобання користувача, базуючись на інформації про елементи рекомендацій, критерії вподобань користувача та критерії рекомендацій [3].

Колаборативна фільтрація – це метод автоматичного прогнозування (фільтрування) інтересів користувача шляхом збирання інформації про вподобання багатьох користувачів. Основна ідея колаборативної фільтрації заснована на ідентифікації шаблонів вподобань в співтоваристві користувачів та полягає в тому, що коли два користувачі з однаковими інтересами обрали один і той же елемент, ймовірність того, що в них буде однаковий інтерес в майбутньому, буде високою. Колаборативна фільтрація є широко використовуваним методом формування рекомендацій завдяки тому, що цей метод враховує тільки вподобання користувача та не враховує особливості або зміст рекомендованих об'єктів [4]. Також, метод колаборативної фільтрації надає наступні переваги. Застосування цього методу не потребує детального опису досліджуваних елементів. Також, метод колаборативних фільтрації не залежить від відсутності інформації про елемент і дозволяє реєструвати зміну інтересів користувачів з плином часу і відстежувати приховані чинники, що забезпечує гнучкість щодо переваг користувача.

У дослідженні [3] представлено розроблений алгоритм на основі k -means та обґрунтовано його переваги в порівнянні з алгоритмом k -means та сингулярним розкладом матриці. Новий алгоритм базується на зменшенні розмірності та кластерних технологіях. Для оцінки якості рекомендацій автор використовує середньоквадратичну помилку.

У роботі [4] автор досліджує застосування сингулярного розкладу матриці, кластерного аналізу в алгоритмах колаборативної фільтрації. Автором застосовано вдосконалені методи вимірювання схожості, які використовуються для пошуку найближчого сусіда користувача та набору рекомендованих кандидатів у кластері. Результати показали перевагу алгоритма формування рекомендацій з використанням методу колаборативної фільтрації на основі кластеризації.

В дослідженні [5] запропоновано алгоритми рекомендацій на основі інтегрованої колаборативної фільтрації та стохастичного градієнтного спуску на прикладі формування рекомендацій в соціальній кіберфізичній системі. Запропонований алгоритм використовує співвідношення між даними та враховує схожість між елементами, схожість між користувачами та два типи довіри серед користувачів для вибору найближчих сусідів обох користувачів та елементів, що надають найціннішу інформацію для рекомендацій. Ефективність використаних алгоритмів оцінено з використанням показників середньої абсолютної помилки та середньоквадратичної помилки.

В роботі [6] представлено розробку методів колаборативної фільтрації з використанням асоціативних правил на основі генетичного алгоритму. Порівнюють їх через характеристики точності, F1-міри та часу виконання.

Більшість проаналізованих досліджень використовують для визначення подібності користувачів алгоритми, основані на методах машинного навчання. Зазвичай застосування методів машинного навчання має певні обчислювальні обмеження, що можуть впливати на швидкість завантаження контенту. Тому використання методів машинного навчання для визначення подібності не завжди є доцільним, особливо для невеликих вебресурсів. Це обумовлює актуальність дослідження методу колаборативної фільтрації для надання рекомендацій та мір подібності без застосування методів машинного навчання.

Метою дослідження є удосконалення вказаної рекомендаційної веборієнтованої системи, контент якої складають статті на тему ігор, з використанням колаборативної фільтрації та запропонованої міри визначення подібності.

Основна частина передбачає удосконалення вказаної рекомендаційної веборієнтованої системи, контент якої складають статті на тему ігор.

Етап 1. Розробка бази даних. База даних є частиною вебсервісу. Розробка бази даних включає визначення сутностей та зв'язків між ними. Сутності визначено наступним чином: користувачі (users) і статті (article). Кожну сутність характеризує набір залежних підсутностей.

Етап 2. Налаштування категорій статей. В базу даних було додано та розподілено відповідно до категорій множина статей. Для більш швидкого обчислення в базу даних для кожного користувача додається лічильник перегляду кожної з категорій.

Етап 3. Визначення схожих користувачів та генерування рекомендацій. Цей етап складається з наступних кроків:

- визначення подібності користувачів;
- генерування рекомендацій.

В якості критерію схожості s запропоновано використання коефіцієнту, що розраховується як сума різниць переглядів між обраним користувачем u та іншими. Чим менша різниця, тим більша схожість користувачів.

Для генерування рекомендації статей використовується показник історії переглядів категорій, після чого виключаються з рекомендацій спільні статті та рекомендуються статті відсортовані по часу публікації.

Для персоналізації контенту на основі попередньої історії переглядів користувача удосконалено метод колаборативної фільтрації: колаборативна фільтрація застосовується до даних перегляду статей за категоріями (1):

$$r_{u,i} = \frac{\sum_{u' \in U} s(u, u') r_{u',i}}{\sum_{u' \in U} |s(u, u')|}, \quad (1)$$

де $r_{u',i}$ – переглянута стаття користувачем u' в категорії i ;

$r_{u,i}$ – рекомендована стаття в категорії i ;

U – множина подібних користувачів;

u' – користувач, подібний до користувача u з множини U ;

$s(u, u')$ – критерій подібності користувача u та користувача u' .

В якості критерію схожості s запропоновано міру, що розраховується як сума різниць переглядів між обраним користувачем u та іншими наступним чином (2):

$$s = \sum_{i=1 \dots n, j=1 \dots m} (|u_{i,j} - u_{i+1,j}|, \dots, |u_{i,j} - u_{n,j}|), \quad (2)$$

де $u_{j,i}$ позначає j -го користувача, що переглянув статтю категорії i .

Результати експерименту.

Експеримент проведено з використанням розробленої рекомендаційної веборієнтованої системи. В статті наведено дані на момент проведення експерименту, але вказані параметри є масштабованими і можуть бути збільшені у майбутньому.

Розробка бази даних. Складовою частиною розробленої рекомендаційної веборієнтованої системи є база даних, яка містить дані про зареєстрованих користувачів (рис. 1) та про статті по ігровій тематиці (рис. 2).

id	login	pass	email	dota2	minecraft	csgo	gta	fortnite	lol	wow
int	varchar(40)	varchar(100)	varchar(100)	int	int	int	int	int	int	int

Рис. 1. Структура сутності users

id	name	text	category
int	varchar(100)	varchar(2000)	varchar(200)

Рис. 2. Структура сутності article

Налаштування категорій статей. На цьому етапі на розробленому вебсервісі визначено 7 категорій статей на тему комп'ютерних ігор. Визначені категорії статей представлені в табл. 1.

Таблиця 1.

Відповідність категорій до тематики статей

Тематика статті	Категорія статті
Dota 2	dota2
Counter Strike	csgo
Fortnite	fortnite
Minecraft	minecraft
League of Legend	lol
World of Warcraft	wow
Grand Theft Auto	gta

Всім існуючим статтям вручну було присвоєно категорію.

Визначення схожих користувачів та генерування рекомендацій.

Застосування методу колаборативної фільтрації для відслідковування активності зареєстрованих користувачів вебсервісу. Для персоналізації контенту на основі попередньої історії перегляду використано метод колаборативної фільтрації. Колаборативна фільтрація застосовується до даних переглянутих статей за категоріями. Коли користувач переходить до статті, в базі даних інкримінується показник відповідної категорії. Таким чином чим більше користувач переглядає статті в категорії, тим більше показник категорії в таблиці даного користувача. Після чого потрібно обрати найбільш схожого користувача. Для цього розраховується коефіцієнт s як сума різниць модулів даного користувача з кожним зареєстрованим на вебсервісі, наступним чином:

$$s = |dota2_user - dota2_similar| + |csgo_user - csgo_similar| + |fortnite_user - fortnite_similar| + |minecraft_user - minecraft_similar| + |lol_user - lol_similar| + |wow_user - wow_similar| + |gta_user - gta_similar|$$

На вебсервісі зареєстровано близько 1000 користувачів, таким чином процедура повторюється 1000 разів.

В результаті отримано найменшу різницю і найбільш схожого користувача. Знайдемо модуль різниці кожної з категорій користувача з найбільш схожим користувачем.

Дані поточного користувача:

Dota2 = 16; Csgo = 77; Fortnite = 66; Minecraft = 22; Lol = 1; Wow = 4;
Gta = 1;

Дані схожого користувача:

Dota2 = 21; Csgo = 79; Fortnite = 62; Minecraft = 43; Lol = 38; Wow = 1;
Gta = 14.

Отримуємо суму різниць модулів
 $|16 - 21| + |77 - 79| + |66 - 62| + |22 - 43| + |1 - 38| + |4 - 1| + |1 - 14| = 85.$

В результаті отримано суму різниць модулів категорій 85.

Ефективність запропонованого методу визначається за допомогою середнього показника прочитаних статей зареєстрованими користувачами на вебсервісі. Для визначення продуктивності запропонованого міри подібності для надання рекомендацій використано дані за 10 днів без застосування методу колаборативної фільтрації для рекомендування статей та з використанням методу колаборативної фільтрації.

Статистика вебсервісу:

Кількість зареєстрованих користувачів: ~ 1000,

Кількість статей на сайті: 105.

Середній показник читання статей без використання рекомендаційного модулю на 1 користувача за 1 сесію: 1, 3.

Середній показник читання після впровадження рекомендаційного модулю: 2, 1.

Висновки.

В роботі представлено розробку та удосконалення рекомендаційної веборієнтованої системи з використанням колаборативної фільтрації. В роботі запропоновано міру визначення подібності користувачів для застосування в методі колаборативної фільтрації для надання рекомендацій. За результатами проведеного експерименту, запропонований коефіцієнт подібності дозволив удосконалити надання рекомендацій. Ефективність надання рекомендацій оцінена на підставі кількості прочитаних користувачами статей. Середній показник читання після впровадження системи збільшився з 1.3 до 2.1 статті на одного користувача за одну сесію перебування на сайті.

Таким чином, запропонований коефіцієнт подібності, що використовується в методі колаборативної фільтрації з метою надання рекомендацій, дозволив удосконалити рекомендаційну веборієнтовану систему та підвищити ефективність надання рекомендацій. Підвищення ефективності рекомендацій та збільшення залученості користувача надає перспективи збільшення часу перебування користувача на сайті, що є складовим критерієм пошукової оптимізації сайту для підняття позиції сайту в результатах пошукових систем.

Напрямок майбутніх досліджень спрямований на дослідження та аналіз критеріїв точності та ефективності наданих рекомендацій.

References:

1. Kato, Y., and Yamamoto, K. (2020), "A sightseeing spot recommendation system that takes into account the visiting frequency of users", *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Vol. 9, No. 7, pp. 1-21.
2. Lops, P. et al. (2019), "Trends in content-based recommendation", *User Modeling and User-Adapted Interaction*, Vol. 29, No. 2, pp. 239-249.
3. Laseno, F.U.D., and Hendradjaya, B. (2019), "Knowledge-Based Filtering Recommender System to Propose Design Elements of Serious Game", *2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, pp. 158-163.
4. Gorakala, S.K. (2015), *Usuelli M. Building a recommendation system with R*, Packt Publishing Ltd.
5. Collaborative filtering | Stanford University. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=h9gpufJFF-0> (accessed 31.03.2021)
6. Collaborative filtering. URL: <https://www.coursera.org/lecture/machine-learning/collaborative-filtering-2WoBV> (accessed 05.03.2021)
7. Zarzour, H. et al. (2018), "A new collaborative filtering recommendation algorithm based on dimensionality reduction and clustering techniques", *2018 9th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS)*, pp. 102-106. doi:10.1109/iacs.2018.8355449
8. Xiaojun, L. (2017), "An improved clustering-based collaborative filtering recommendation algorithm", *Cluster Computing*, Vol. 20, No. 2, pp. 1281-1288, doi:10.1007/s10586-017-0807-6.
9. Xu, J. et al. (2017), "Integrated collaborative filtering recommendation in social cyber-physical systems", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Vol. 13, No. 12, 1550147717749745. doi:10.1177/1550147717749745.
10. Neysiani, B. S., Soltani, N., Mofidi, R., and Nadimi-Shahraki, M.H. (2019), "Improve performance of association rule-based collaborative filtering recommendation systems using genetic algorithm", *Int. J. Inf Technol. Comput. Sci.*, Vol. 2, pp. 48-55. doi: 10.5815/ijitcs.2019.02.06.

Статтю представив д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПІ" Леонов С.Ю.

Надійшла (received) 14.04.2021

Pokryshka Sergey, PhD student

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

59-a Central avenue, Severodonetsk, Luhansk region, Ukraine, 93400

tel./phone: (064) 522-89-97, e-mail: xakermans@gmail.com

Shumova Larisa, Candidate of Engineering Sciences

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

59-a Central avenue, Severodonetsk, Luhansk region, Ukraine, 93400

tel./phone: (064) 522-89-97, e-mail: shumova@ukr.net

ORCID ID: 0000-0001-8113-5115

УДК 004.9

Удосконалення рекомендаційної веборієнтованої системи за рахунок колаборативної фільтрації / Покришка С.А., Шумова Л.О. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2021. – № 1 (5). – С. 115 – 123.

Представлено вирішення задачі удосконалення рекомендаційної веборієнтованої системи за рахунок колаборативної фільтрації для надання рекомендацій користувачу вебсервісу зі статтями на тему ігор. В ході досліджень систематизовано сукупність етапів розробки та удосконалення рекомендаційної веборієнтованої системи. Представлена структура бази даних та метод колаборативної фільтрації з запропонованою мірою подібності для формування рекомендацій користувачам. Використано попереднє структурування статей за категоріями для виявлення вподобань користувачів та надання рекомендацій. Використання колаборативної фільтрації з запропонованою мірою подібності дозволило підвищити кількість переглянутих користувачами статей. Іл.: 2. Табл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: рекомендаційна веборієнтована система; колаборативна фільтрація; база даних: структурування статей за категоріями; міра подібності.

УДК 004.9

Совершенствование рекомендательной вебориентированной системы за счет колаборативной фильтрации / Покришка С.А., Шумова Л.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2021. – № 1 (5). – С. 115 – 123.

Представлено решение задачи усовершенствования рекомендательной вебориентированной системы за счет использования колаборативной фильтрации для представления рекомендаций пользователям вебсервиса со статьями на игровую тематику. В ходе исследований систематизирована совокупность этапов разработки и усовершенствования рекомендательной вебориентированной системы. Представлена структура базы данных и метод колаборативной фильтрации использованием предложенной меры сходства для формирования рекомендаций пользователям. Использовано предварительное структурирование статей по категориям для выявления предпочтений пользователей и предоставления рекомендаций. Использование колаборативной фильтрации с предложенной мерой сходства позволило повысить количество просмотренных пользователями статей. Ил.: 2. Табл.: 1. Библиогр.: 10 названий.

Ключевые слова: рекомендационная вебориентированная система, колаборативная фильтрация, база данных; структурирование статей по категориям; мера сходства.

UDC 004.9

Improving the web-based recommender system through collaborative filtering / Pokrishka S.A., Shumova L.A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2021. – № 1 (5). – P. 115 – 123.

The solution to the problem of improving the recommendation web-oriented system through the use of collaborative filtering to provide recommendations to users of the web service with articles on gaming topics is presented. In the course of the research, a set of stages of development and improvement of the recommendatory web-oriented system was systematized. The structure of the database and the method of collaborative filtering using the proposed similarity measure to form recommendations for users are presented. The preliminary structuring of articles by categories was used to identify user preferences and provide recommendations. The use of collaborative filtering with the proposed similarity measure allowed us to increase the number of articles viewed by users. Ill.: 2. Bibliography: 10 titles.

Keywords: recommendation web-oriented system; collaborative filtering; database; structuring of articles by categories; measure of similarity.

УДК 577.344 + 612.014.481

DOI: 10.20998/2411-0558.2021.01.10

О. Б. АЛМАЗОВА, ст. викл., НТУ "ХПІ", Харків,

М. Л. ЛИСИЧЕНКО, д-р техн. наук, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені П. Василенка, Харків

ВПЛИВ УЛЬТРАФІОЛЕТОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА КІНЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ В ЕРИТРОЦИТАХ

Еритроцити опромінювали ультрафіолетовою лампою типу ВМТ ($\lambda = 253,7\text{нм}$). Методами кислотних (хімічних) еритрограмм і зустрічного транспорту порівнювали кінетичні характеристики в опромінених і неопромінених зразках крові.

Отримано, що в опромінених ультрафіолетом зразках крові відбувається зменшення часу напівгемолізу, а також ультрафіолетове випромінювання збільшує швидкість зустрічного переміщення іонів через еритроцитарні мембрани. Ці зміни обумовлені зменшенням "ефективної" товщини примембранного дифузійного шару – неперемішаного шару води, що примикає до мембрани еритроцита. Іл.: 4. Табл.: 3. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: еритроцит; зразки крові, що опромінені ультрафіолетом; метод кислотних (хімічних) еритрограмм; примембранний дифузійний шар.

Постановка проблеми. У світі широко відомі такі види фототерапевтичного опромінення крові:

1. *Внутрішньовенне лазерне опромінення крові.* Внутрішньовенне лазерне опромінення крові (ВЛОК) здійснюється *in vivo* шляхом подачі світла низькоінтенсивного лазера в судинний канал, як правило, в вену передпліччя, в припущенні, що терапевтичний ефект буде поширюватися через кровоносну систему [1, 2]. ВЛОК терапія посилює регенерацію тканин, знімає запальний процес, покращує оксигенну функцію, розслабляє стінки судин та м'язів, коригує продуктивність кісткового мозку, зв'язує токсини, зменшує циркуляцію вірусів, що знаходяться в організмі, тим самим протистоїть і коронавірусу COVID-19. Призначається в складі комплексної терапії.

2. *Крізьшкірне (надвенне) лазерне опромінення крові.* При крізьшкірному (надвенному) впливі лазерний промінь спрямований на неушкоджену шкіру в область великих кровоносних судин [1].

3. *Екстракорпоральне опромінення крові.* Використовується для ультрафіолетового опромінення крові, включає в себе забір крові через вену і опромінення її поза тілом, в спеціальній кюветі. Раніше кров опромінювали за допомогою УФ (ультрафіолетових) ламп, зараз за допомогою лазера (екстракорпоральне лазерне опромінення крові) –

ЕЛОК. Екстракорпоральне ультрафіолетове опромінення крові (ЕУФОК) і подальша її внутрішньовенна реінфузія є найбільш відомим, поширеним і вивченим методом гемотерапії [3, 4]. Метод УФОК – це очищення крові УФ опроміненням, з метою поліпшення її якості, профілактики лікування захворювань. Багато хвороб на клітинному рівні погано піддаються медикаментозної дії (діабет, тромбоз, хронічні хвороби органів дихання). УФОК крові відкриває нові можливості для відновлення якості її складу, поліпшення самопочуття хворих [3, 4]. В умовах підвищеної захворюваності в зимовий час і міжсезоння метод дає відмінну можливість захистити організм від вірусної атаки. Під дією УФ опромінювання клітини крові оновлюють захисну мембрану, необхідну при вірусному навантаженні для збереження імунітету. В даний час при активному поширенні коронавірусу, УФОК крові став відмінним засобом запобігання зараження COVID-19 і частиною комплексної терапії. Забезпечує синтез вітаміну Д та інтерферону, блокує внутрішньоклітинний механізм вірусів, а головне перешкоджає виникненню тромбозу, що дуже важливо в період захворювання, а також при постковіді.

Аналіз літератури. Одна з найбільш поширених версій, що пояснює позитивну дію ЕУФОК, полягає в тому, що опромінені клітини крові, введені в вену хворому, виконують роль своєрідного подразника. У відповідь на це організм мобілізує свої ресурси, що і забезпечує лікувальний ефект [4 – 6]. Звідси випливає, що існує якийсь оптимальний режим опромінення, що забезпечує достатні для запуску механізму відповідного реагування зміни в опроміненому біоматеріалі. Як критерій ефективності біологічної дії опромінюючого світла пропонується використовувати товщину неперемішуваного шару води, що примикає до мембрани еритроцита [6, 7]. За цим критерієм проведено і порівняння рівня біологічного впливу повного потоку світла УФ лампи та різних спектральних інтервалів ртутного випромінювача.

Методом ядерного магнітного резонансу (ЯМР) (спінове відлуння) авторами були проведені дослідження щодо ефективного впливу електромагнітного випромінювання (ЕМВ) ультрафіолетового і оптичного діапазону на еритроцити людини. Об'єктом дослідження був примембранний водний шар еритроцитів [5, 6]. Досліджувалася вплив ЕМВ УФ і оптичного діапазону на "ефективну" товщину примембранного шару еритроцитів (δ), (в неопромінених зразках $\delta = 2,57 \times 10^{-5}$ (м) [5, 6]. Було встановлено, що УФ опромінення (опромінення велось газорозрядною ртутною лампою типу ВМТ) ($\lambda = 253,7$ нм) зменшує товщину примембранного шару на 25%; селективне опромінення спектральними лініями (газорозрядної ртутної лампи типу ВМТ)

($\lambda = 312,6$ нм) і ($\lambda = 577$ нм) дають зменшення примембранного шару на 18% [5]. Зменшення "ефективної товщини" примембранного водного шару змінює швидкість обмінних процесів в системі "клітина - міжклітинне середовище", змінюючи режим функціонування клітини, який є біологічною відповіддю на опромінення вище переліченими довжинами хвиль. Еритроцити зі зміненим режимом функціонування, є сигналами-подразниками, які змушують організм мобілізувати ресурси на боротьбу з хворобою.

Практично вся сучасна фототерапевтична апаратура, якою впливають на кров людини і на організм в цілому створена із застосуванням лазерів і громіздких УФ ламп. Прилади на основі лазерів і УФ ламп небезпечні, досить дорогі, вимагають спеціальної підготовки персоналу. Існує необхідність вивчення можливості заміни лазерів і УФ ламп в апаратурі для фототерапії на більш безпечні, дешеві, більш прості в експлуатації джерела ЕМВ – світлодіоди.

У даній роботі ми порівнюємо результати отримані методами кислотних еритрограмм і зустрічного транспорту з результатами, отриманими методом ЯМР по впливу ультрафіолетового випромінювання на примембранний шар в зразках крові, а також визначимо ефективні довжини хвиль, що найбільше впливають на еритроцити для подальшого створення фототерапевтичної апаратури на світлодіодах.

Мета статті. 1. Вивчення впливу ультрафіолетового випромінювача (УФ лампи типу ВМТ ($\lambda = 253,7$ нм)) методом кислотних еритрограмм і методом зустрічного транспорту на "ефективну" товщину примембранного шару в еритроцитах. Визначення фізичного механізму впливу УФ на зразки крові.

2. Визначення найбільш безпасного діапазону довжин хвиль УФ діапазону, що ефективно впливають на зразки крові для подальшого створення універсальної фототерапевтичної апаратури для екстракорпорального опромінення крові на базі світловипромінювальних діодів.

Матеріали і методи дослідження. Метод хімічних (кислотних) еритрограмм. У даній роботі досліджували еритроцити донорської крові людини методом хімічних (кислотних) еритрограмм, який дозволяє визначити якісний склад крові, заснований на фотоелектричному виміру гемолізу під дією кислоти. Параметрами, за якими визначали біологічну відповідь на вплив акустичних випромінювань, були мода (максимум функції розподілу статистичного ансамблю), ширина на напіввисоті (характеризує ступінь однорідності еритроцитів по їх кислотній стійкості), час напівгемолізу (час, протягом якого руйнується половина

клітин крові), і коефіцієнт асиметрії (що характеризує ступінь однорідності клітин крові за віком).

Принцип методу дослідження розподілу еритроцитів по їх кислотній стійкості (метод еритрограмм) складається з фотоелектричній реєстрації зменшення кількості числа еритроцитів в процесі гемолізу (за зменшенням оптичної густини D суспензії клітин), що розвивається під дією розчину соляної кислоти в стабільних умовах [8] (рис. 1).

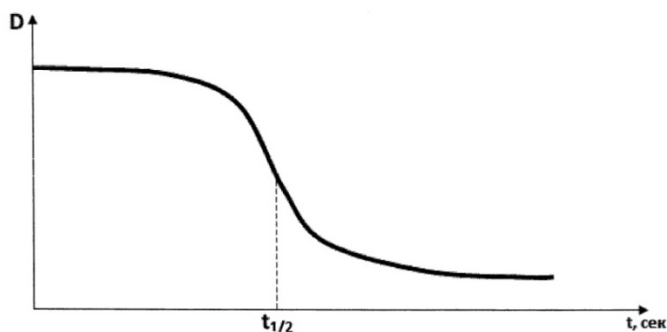


Рис. 1. Крива гемолізу

Для дослідження кінетики гемолізу застосовувався фотоелектричний колориметр типу КФК-2. Знімалася залежність оптичної густини D від часу t . Отримана крива – статистична диференціальна функція розподілу червоних клітин крові по кислотній стійкості – кислотна еритрограмма [4, 8] (рис. 2).

Встановлено, що найбільш стабільно йде гемоліз, обумовлений простими неорганічними кислотами, кращою є соляна кислота HCl . Час гемолізу знаходиться в прямій залежності від концентрації кислотного гемолітика. Найбільш прийнятну тривалість гемолізу нормальної людської крові (7 – 8 хвилин) можна забезпечити шляхом її контакту з 0,012 N розчином HCl .

Для спостереження кислотного гемолізу досить 2 мм³ крові, яку розводять фізрозчином у відношенні 1:100. Отримана суспензія еритроцитів придатна для аналізу протягом 3 – 4 годин при кімнатній температурі. Вимірювання проводяться на установці, основою якої є колориметр фотоелектричний концентраційний (КФК-2) (рис. 3). Використовується промінь світла, пропущений через світлофільтр, з максимумом пропускання на довжині хвилі 670 нм.

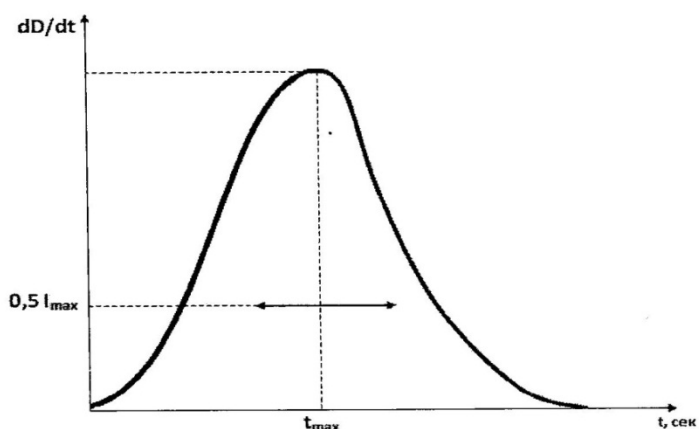
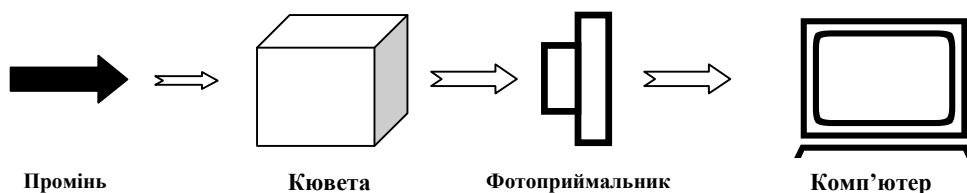
Рис. 2. Диференціальна функція розподілу ($S = 1$)

Рис. 3. Схема КФК-2

У вимірвальну комірку приладу поміщається скляна кювета з фізрозчином; на шкалі колориметра, проградуйованого в одиницях оптичної густини, встановлюється "нуль". Додаванням суспензії еритроцитів, оптична густина доводиться до значення $D = 0,7$, після цього додається розчин HCl . Потім включається комп'ютер, сполучений з колориметром і протягом 10 – 15 хвилин записується крива ходу гемолізу еритроцитів.

В основі реєстрованого падіння оптичної густини лежить той факт, що еритроцити мають відмінності в стійкості до гемолізу і залучаються до цього процесу, відповідно їх розподілу по стійкості. Еритрограмми здорових людей показали, що розподіл еритроцитів за стійкістю у людини в нормі постійний. При порушенні рівноваги в системі крові виникають відхилення від норми в розподілі еритроцитів за стійкістю. Отримання ряду еритрограмм дозволяє стежити за динамікою якісних змін в системі крові.

При вивченні властивостей еритрограмм: часу напівгемолізу, моди, ширини на напіввисоті, коефіцієнта асиметрії обчислювалося відносне відхилення δ^x "досвіду" від "контролю" (у відсотках) за формулою:

$\delta^x = (x - x^0)/x^0$, де x и x^0 – величина одного з параметрів "досвіду" і "контролю", відповідно.

Дослідження методом зустрічного іонного транспорту. Ще одним параметром, за яким визначали рівень біологічної відповіді на вплив ультрафіолетового опромінення, була швидкість зустрічного переміщення іонів хлору (Cl^-) і гідроксилу (OH^-) через еритроцитарну мембрану. Зустрічний транспорт іонів реалізується при розміщенні еритроцитів в незабуферену ізотонічну середу зі зниженою концентрацією іонів хлору. При цьому відбувається вихід з еритроцитів деякої кількості зазначених іонів через мембрану; натомість, для підтримки електричної рівноваги в клітинах в еритроцити, входять іони гідроксилу. При цьому знижується рН міжклітинного середовища, а оскільки в середовищі відсутній буфер, то зміна концентрації іонів OH^- в точності відповідає зміни концентрації іонів Cl^- . Концентрацію іонів в розчинах вимірювали за допомогою іономіра [9, 10]. Вимірюючи рН середовища водневим електродом іономіра, визначаємо кількість іонів хлору, що залишили еритроцити.

Експеримент виконувався в такий спосіб. Еритроцити донорської крові (2 мл) відмивали в стандартному фізрозчині (0,85% NaCL) (5 мл). За допомогою центрифугування (3 рази по 15 хвилин (3000 об/хв.)) формувалася еритромаза, яка містилася на льоду. Відбирався фіксований обсяг еритромаси (2 мкл) і вводився в вимірювальну комірку іономіра (типу ЕВ-74) в якій знаходилося 5 мл водного розчину сахарози (0,29 М) – незабуференого середовища. Далі, шляхом вимірювання концентрації іонів водню (величини рН середовища) водневим електродом іономіра (типу ЕСЛ-43-07) визначалась кількість іонів Cl^- , які залишили еритроцити. Кінетику зміни рН середовища реєстрували за допомогою персонального комп'ютера. Типова крива наведена на рис. 4.

Відразу ж після введення еритромаси в розчин сахарози в середовищі різко зменшується рН; його значення проходить через мінімум, після чого закислення середовища змінюється зворотним залуженням.

Початкову швидкість закислення можна визначити, вимірюючи час τ , за який відбувається закислення на величину $(1 - e^{-1})$ від повної амплітуди ΔpH , тобто за час, протягом якого значення рН зменшується від стартового значення $\text{pH}_{\text{поч}}$ до величини $\text{pH}_\tau = \text{pH}_{\text{поч}} - \Delta\text{pH}(1 - e^{-1})$.

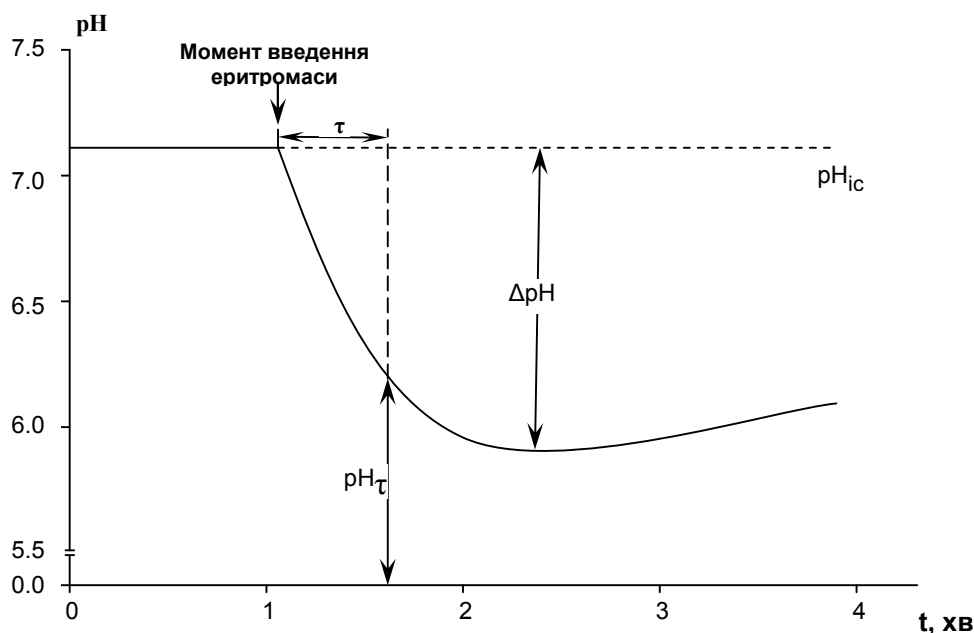


Рис. 4. Крива зміни рН середовища

Швидкість спадання рН дозволяє визначити сумарний (від всіх еритроцитів, що містяться в комірці) потік J іонів Cl^- , що обмінюються на сумарний потік іонів OH^- :

$$J = jS. \quad (1)$$

Тут S – сумарна поверхня мембран всіх еритроцитів, що містяться в вимірювальній комірці, а j – поверхнева густина потоку речовини в напрямку x з градієнтом концентрації уздовж цього напрямку dc/dx :

$$j = -D \, dc/dx,$$

де D – коефіцієнт дифузії (закон Фіка). У разі, якщо стаціонарний транспорт йде через тонку мембрану, то похідну dc/dx можна замінити кінцевою різницею концентрацій, віднесеної до товщини мембрани L . Тоді

$$j = -D\Delta c/L = P(c_I - c_{II}), \quad (2)$$

Тут введена проникність мембрани для речовини, що дифундує $P = D/L$ і конкретизовані концентрації речовини: зліва від мембрани – c_I (відсік I) і праворуч від мембрани – c_{II} (відсік II). В реальній ситуації до мембрани завжди примикає неперемішуваний примембранний шар води, який залишається абсолютно нерухомим навіть при наявності сильного конвективного руху поблизу нього. Перенесення речовини через цей шар

здійснюється дифузійним шляхом, тому його прийнято називати примембранним неперемішуваним дифузійним водним шаром.

Розглянемо, слідуючи [7], більш докладно переміщення речовини А (іонів) з відсіку (I) з постійною концентрацією c_I в розчин по іншу сторону мембрани (відсік (II)). Молекули речовини А повинні подолати послідовно три дифузійних бар'єра: перший (по ходу) примембранний шар води завтовшки δ_1 (густина потоку j_{IM}), власне саму мембрану товщиною L (густина потоку j_M) і другий примембранний шар води завтовшки δ_2 (густина потоку j_{MI}).

Відповідно до закону Фіка, (2) відповідні густини потоків записуються у вигляді

$$j_{IM} = P_{IM}(c_I - c_{IM}); j_M = P_M(c_I - c_{IM}); j_{MI} = P_{MI}(c_{IM} - c_{II}), \quad (3)$$

де P_{IM} , P_M , P_{MI} – проникності відповідних бар'єрів; c_{IM} і c_{II} – концентрації на протилежних сторонах мембрани. У стаціонарному стані густини всіх потоків рівні: $j_{IM} = j_M = j_{MI} = j$.

Так як, згідно (2), $c_I - c_{II} = j/P$, де P – проникність системи в цілому, то

$$P^{-1} = P_{IM}^{-1} + P_M^{-1} + P_{MI}^{-1}. \quad (4)$$

Величину P^{-1} можна назвати "опором" потоку речовини. Опори потоку примембранних неперемішуваних шарів пропорційні товщині цих шарів. Дійсно, згідно з визначенням проникності (2)

$$P_{IM}^{-1} + P_{MI}^{-1} = (\delta_1 + \delta_2)/D_w,$$

де D_w – коефіцієнт дифузії молекул речовини А в воді.

Якщо прийняти наближення, що товщини цих примембранних шарів однакові, тобто $\delta_1 = \delta_2 = \delta_D$, маємо

$$P_{IM}^{-1} + P_{MI}^{-1} = 2 \delta_D/D_w. \quad (5)$$

Підставляючи (5) в (3) з урахуванням того, що $j_M = P_M(c_I - c_{IM}) = D_m L^{-1}(c_I - c_{IM})$, тобто $P_M = D_m L^{-1}$, отримаємо вираз для товщини дифузійного примембранного шару

$$\delta_D = 0,5 D_w(P^{-1} - L/D_m). \quad (6)$$

Тут D_m – коефіцієнт дифузії молекул речовини через ліпідний подвійний шар мембрани товщиною L . Маючи інформацію про параметри D_w , D_m , P і L , можна визначити товщину примембранного шару δ_D . Однак, оскільки в експерименті ми вимірюємо поверхневу густину потоку через все еритроцитарні мембрани в комірці ($J = j S$), а дані про чисельні значення сумарної поверхні S ми не маємо в своєму розпорядженні, то визначити величину δ_D не представляється можливим.

Проте, якщо при виконанні кожного вимірювання J забезпечувати ідентичні умови (включаючи однакову швидкість перемішування рідини в комірці), то можна визначити відношення товщини дифузійного примембранного шару еритроцитів, що не зазнали опромінення ($\delta_D(0)$), до товщини зазначеного шару еритроцитів, що зазнали УФ опромінення ($\delta_D(*)$). Дійсно, можна вважати, що в ході опромінення сумарна поверхня мембран еритроцитів зберігається без змін, тобто $S(0) = S(*)$. Тоді використовуючи рівняння (1) і (2), можна записати

$$J(*)/J(0)=j(*)/j(0)=[D(*)/\delta_D(*)]:[D(0)/\delta_D(0)]=[D(*)/D(0)]\cdot[\delta_D(0)/\delta_D(*)]. \quad (7)$$

Результати дослідження та їх обговорення. Результати вимірювання методом кислотних еритрограмм. Були виконані вимірювання кислотних еритрограмм для неопроміненої і опроміненої за допомогою ультрафіолетової лампи типу ВМТ ($\lambda = 253,7$ нм) (експозиції 15 і 30 хвилин) крові 5 донорів.

Для узагальнення величин змін в параметрах за зразками крові всіх донорів, перейшли до порівняння відносних змін часу напівгемолізу (δ^{H-T}) (часу, протягом якого руйнується половина клітин крові), моди (δ^M) (максимуму функції розподілу статистичного ансамблю), ширини на напіввисоті (δ^W) (характеризує ступінь однорідності еритроцитів по їх кислотній стійкості) шляхом відповідного усереднення.

Таблиця 1

Зміни часу напівгемолізу від експозиції, усереднені за зразками крові всіх донорів

Експозиція τ , хв.	15	30
Відносна зміна $t_{1/2}$, $\delta^{H-T} = (t_{1/2} - t_{1/2}^0)/t_{1/2}^0$, %	-9,42	-13,42

З табл. 1 випливає, що зі збільшенням тривалості часу опромінення час напівгемолізу монотонно зменшується.

Таблиця 2

Зміни моди в залежності від УФ-експозиції, усереднені за зразками крові всіх донорів

Експозиція τ , хв.	15	30
Відносна зміна t_{max} , $\delta^M = (t_{max} - t_{max}^0)/t_{max}^0$, %	-10,46	-14,52

З табл. 2 випливає, що зі збільшенням тривалості часу опромінення величина переміщення моди в більш "ранню" область монотонно зростає.

Таблиця 3

Зміни ширини функції розподілу еритроцитів (виміряної на напіввисоті) від експозиції, усереднені за зразками крові всіх донорів

Експозиція τ , хв.	15	30
Відносна зміна $\Delta_{1/2}$, $\delta^{\text{III}} = (\Delta_{1/2} - \Delta_{1/2}^0) / \Delta_{1/2}^0$, %	-9,2	-12,5

З табл. 3 випливає, що зі збільшенням тривалості часу опромінення ширина напіввисоті (характеризує ступінь однорідності еритроцитів по їх кислотній стійкості) монотонно зменшується.

Отримані результати відповідають добре відомим уявленням про перенесення молекул через клітинну мембрану, викладеним в [2, 7]. Величина потоку молекул через мембрану обернено пропорційна товщині мембрани. Оскільки в реальних умовах шари водного розчину, що безпосередньо прилягають до мембрани, практично не перемішуються (так звані неперемішувані (дифузійні) шари Нерста), то і концентрації молекул, що дифундують до мембрани в цих шарах істотно відрізняються від концентрації аналогічних молекул в обсязі, що залишився (на безумовно великій відстані від клітини). Сукупність мембрани з дифузійними шарами можна розглядати як ефективну мембрану, товщину якої прийнято визначати за формулою:

$$L_{\text{еф}} = L_{\text{мембр}} + \Delta X_{\text{внутр}} + \Delta X_{\text{зовніш}},$$

де $\Delta X_{\text{внутр}}$ і $\Delta X_{\text{зовніш}}$ – товщини неперемішуваних (дифузійних) водних шарів з внутрішньої і зовнішньої сторони мембрани відповідно.

Як показано в [11, 12] УФ промені за рахунок своєї деструктивної дії забезпечують відділення від еритроцита значної частини гликокаликсу. Гликокаликс має вигляд пухкого волокнистого шару, товщиною 3 – 5 нм, що покриває всю поверхню клітини. Шар гликокаликсу сильно обводнений, має желеподібну консистенцію, що значно ускладнює дифузію різних речовин в клітину (і з клітини). Після УФ опромінення через руйнування частини гликокаликса, протяжність шляху молекулам, що рухаються у напрямку до клітинної мембрани (або з клітини), зменшується на величину рівну товщині шару гликокаликсу.

Застосування методу кислотних еритрограм передбачає введення в суспензію клітин розчин соляної кислоти. Молекули HCl дифундують крізь шар гликокаликсу, після чого контактують з мембраною, руйнуючи її. Якщо гликокаликс, завдяки руйнівній дії УФ променів відокремився від клітин, то протяжність шляху, який слід пройти молекулам, що дифундують, зменшується. Молекули HCl за більш короткий час приходять до мембрани, ніж у випадку, коли клітини не піддавалися УФ

опроміненню. Через це гемоліз в опроміненних клітинах починається раніше; через це мода кривої розподілу еритроцитів по кислотній стійкості зсувається в більш ранню область за шкалою часу.

В проведених дослідках спостерігалось збільшення ступеня однорідності статистичного ансамблю еритроцитів (за кислотною стійкістю). Цей результат стає зрозумілим, якщо припустити, що величини товщин гликокаліксу еритроцитів в неопроміненних зразках були розподілені в більш-менш широкому інтервалі значень. Після обробки УФ променями, практично всі клітини втрачають гликокалікс, через що виникає ситуація, коли оголені мембрани прикриті тільки водними примембранними шарами. Мабуть, слід вважати, що товщини залишившихся (після УФ опромінення) примембранних водних шарів розподілені в більш вузькому інтервалі значень, ніж товщини гликокаліксів еритроцитів в неопроміненних зразках. Ця обставина і забезпечує спостережуване збільшення ступеня однорідності (за кислотною стійкістю) статистичного ансамблю еритроцитів, підданих впливу УФ променів.

Методом кислотних еритрограмм отримано:

1. УФ опромінення зразків крові призводить до зменшення часу напівгемолізу, що відбувається при введенні кислоти в суспензію крові. При тривалості опромінення час напівгемолізу монотонно зменшується. (Експозиції: 15 хв. на 9,42%; 30 хв. на 13,42%) (див.табл.1).

2. Мода кислотних еритрограмм зсувається після ультрафіолетового опромінювання. Зі збільшенням часу опромінення зміщення моди в більш "ранню" область монотонно зростає. (Експозиції: 15 хв. на 10,46%; 30 хв. на 14.52%) (див.табл.2)

3. УФ опромінення зразків крові призводить до зменшення ширини кривої розподілу, яка вимірюється на половині висоти, тобто УФ опромінення підвищує ступінь однорідності статистичного ансамблю еритроцитів. Зі збільшенням часу опромінення ширина кривої розподілу монотонно зменшується. (Експозиції: 15 хв. на 9,2%; 30 хв. на 12,5%) (див. табл. 3).

Результати, що отримані методом зустрічного транспорту іонів.

Були виконані вимірювання неопроміненої і опроміненої УФ лампою типу ВМТ ($\lambda = 253,7$ нм) крові від 5 донорів.

Вимірювання показали, що, хоча індивідуальні значення обмінних потоків J (тобто зустрічного транспорту іонів Cl^- / OH^-) у зразків, отриманих від різних донорів різнилися в певних межах, проте, у всіх зразках потоки через опромінені клітини перевищували потоки через неопромінені клітини. Отримано, що в результаті 20-хвилинного

опромінення відношення величин потоків, усереднених по 5 донорам, дорівнює

$$J(*)/J(0) = 1,17 \pm 0,05. \quad (8)$$

Отже, згідно з (7),

$$[D(*)/D(0)] \cdot [\delta_D(0)/\delta_D(*)] = 1,17. \quad (9)$$

В отримане співвідношення входять як коефіцієнт дифузії, так і товщина дифузійного шару. Немає підстав вважати, що в ході УФ опромінення змінилося значення коефіцієнта дифузії. Поклавши $D(0) = D(*)$ в (9), маємо $\delta_D(*) = 0,85 \delta_D(0)$, тобто виявляється, що товщина дифузійного прикордонного шару зменшилася, завдяки УФ опроміненню, в $(1,17 \pm 0,05)$ рази.

Цей результат корелює з результатом, отриманим при вимірюванні, опромінених УФ еритроцитів за допомогою методу парамагнітного допінгу, де показано, що після 4 хвилинного опромінення повним потоком лампи ВМТ товщина дифузійного прикордонного шару зменшилася в $(1,41 \pm 0,06)$ рази (25%). А також 4-х хвилинне опромінення селективним освітленням спектральних ліній ртутної лампи $\lambda = 312,6$ нм та $\lambda = 577,0$ нм дає зменшення примембранного дифузійного водного шару в $(1,22 \pm 0,06)$ рази (18%) [5].

Отримано, що в результаті УФ опромінення примембранний дифузійний водний шар стає тоншим і для дифузії молекул води і для дифузії іонів (Cl^- и OH^-). Це дає підставу стверджувати, що зменшення товщини зазначеного шару призводить до прискорення перенесення і інших речовин через мембрану еритроцита. Відповідно, в живому організмі при опроміненні крові хвилями УФ діапазону (або відразу після припинення опромінення) в одиницю часу обмін речовин між еритроцитами і міжклітинним середовищем відбувається більш інтенсивно.

Розглянемо фізичний механізм, завдяки якому УФ опромінення забезпечує появу біологічної відповіді. Так як товщина дифузійного примембранного шару на кілька порядків більше товщини ліпідного шару мембрани, то практично весь час, що витрачається молекулами на дифузійний рух в клітину, йде на подолання примембранного водного шару. УФ випромінювання сприяє зменшенню ефективної товщини зазначеного шару. У цьому процесі беруть участь повітряні бульбашки. Відомо, що в біологічній рідині міститься розчинене повітря і повітря в бульбашках [6]. Бульбашки, що знаходяться в біотканині, присутні і в дифузійному примембранному водному шарі. Рухаючись в примембранному шарі, бульбашки грають роль своєрідних "перемішувачів". Під дією УФ повітряні бульбашки збільшуються в

розмірах. Оскільки швидкість переміщення бульбашки більшого радіусу вище, ніж швидкість бульбашки, з меншим радіусом, то бульбашки, що збільшились, рухаються в примембранному водному шарі швидше. Через це реалізується більш активне перемішування зазначеного шару; "ефективна" товщина його стає менше, ніж була до опромінення УФ. Зрозуміло, що і процес перенесення іонів в клітину (і з клітини) та інші процеси обміну речовин в системі "клітина-міжклітинне середовище" йдуть швидше. Очевидно, завдяки УФ опроміненню ефективна проникність системи "клітинна мембрана плюс примембранний водний шар" збільшується.

Висновки.

1. Отримано, що опромінення зразків крові УФ випромінюванням призводить до зменшення часу напівгемолізу, що відбувається при введенні кислоти в суспензію крові. Зі збільшенням тривалості опромінення час напівгемолізу монотонно зменшується.

2. УФ випромінювання збільшує швидкість зустрічного переміщення іонів через еритроцитарні мембрани.

3. Зменшення часу напівгемолізу і збільшення швидкості зустрічного перенесення іонів обумовлено зменшенням "ефективної" товщини примембранного дифузійного водного шару.

4. Опромінення досліджуваних зразків крові велось "жорстким" ультрафіолетом ($\lambda = 253,7$ нм), його дія більш бактерицидна, але й більш руйнівна. Методом ЯМР автори визначали зменшення "ефективної" товщини примембранного дифузійного водного шару, опромінюючи кров не тільки повним світлом ртутного випромінювача, а й селективними лініями опромінювання. При довжині хвилі ($\lambda = 312,6$ нм) спостерігалось зменшення товщини примембранного дифузійного водного шару на 18%. Тобто, якщо для створення апаратури на базі світлодіодів використовувати діапазон 310 – 320 нм (лежить в прикордонному діапазоні між "середньо-жорстким" і "м'яким") можна отримати водночас і бактерицидний, і менш руйнівний вплив ультрафіолету.

Отже, дані, отримані за впливом ультрафіолетового діапазону на примембранний водний шар еритроцитів, виміряний трьома біофізичними методами, збігаються. Зменшення "ефективної товщини" примембранного водного шару змінює швидкість обмінних процесів в системі "клітина – міжклітинне середовище", тим самим змінюючи режим функціонування клітини, що є біологічною відповіддю на вплив УФ опромінення з діапазоном довжин хвиль 310 – 320 нм. Клітини крові зі зміненим режимом функціонування, є сигналами-подразниками, які змушують організм мобілізувати ресурси на боротьбу з патологією. Дані обставини можуть прогнозувати створення універсальної

фототерапевтичної апаратури для екстракорпорального опромінення крові на базі світлодіодів з певними параметрами впливу, зокрема з певним ефективним діапазоном довжин хвиль.

Метод екстракорпорального опромінення крові, наряду з плазморефлексом та озонотерапією, виступає в якості як профілактики, так і комплексного лікування від COVID-19, а також допомагає організму відновитися після перенесення цієї хвороби. Тому універсальна апаратура для екстракорпорального опромінення крові стає особливо актуальною в наш час.

Список літератури:

1. Гейниц А.В. Внутривенное лазерное облучение крови / А.В. Гейниц, С.В. Москвин, А.А. Ачилов. – Москва; Тверь: Триада, 2012. – 334 с.
2. Кару Т.Й. Первичные и вторичные клеточные механизмы лазерной терапии / Т.Й. Кару // Низкоинтенсивная лазерная терапия / Под ред. С.В. Москвина и В.А. Буйлина. – М.: ТОО "Фирма "Техника", 2000. – С. 71-94.
3. Knott E.K. Development of ultraviolet blood irradiation / E.K. Knott // American Journal of Surgery. – 1948. – 76 (2). – С. 165-171.
4. Ганелина И.Е. Механизмы влияния облученной ультрафиолетовыми лучами крови на организм человека и животных / И.Е. Ганелина. Сб. науч. тр. / Под ред. И.Е. Ганелиной, К.А. Самойловой. – Л.: Наука, 1986. – 284 с.
5. Алмазова Е.Б. О механизме влияния излучения газоразрядной ртутной ультрафиолетовой лампы на толщину примембранного водного слоя эритроцитов человека / Е.Б. Алмазова, Б.Г. Емец // Биофизический вестник. – 2008. – Вып. 21 (2). – С. 88-94.
6. Емец Б.Г. Эффекты взаимодействия низкоинтенсивных электромагнитных волн с наноразмерными газовыми включениями в жидких средах / Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, Харьков, 2004. – 336 с.
7. Котык А. Мембранный транспорт. / А. Котык, К. Яначек. – М.: Мир, 1980. – 338 с.
8. Терсков И.А. Метод химических (кислотных) эритрограмм / И.А. Терсков, И.И. Гутельзон // Биофизика. – 1957. – Т. 2. – № 2. – С. 259-266.
9. Baskurt O.K. In vitro effects of thyroxine on mechanical properties of erythrocytes / O.K. Baskurt // Life Sci. – 1990. – 46. – P. 1471-1477.
10. Конев С.В., Действие УФ света на белки в растворе и составе биологических мембран. Фотобиология животной клетки / С.В. Конев, И.Д. Вологовский. – Л.: 1979. – С. 5-16.
11. Камман С. Работа с ионоселективными электродами / С. Камман. – М.: Мир, 1982. – 203 с.
12. Путвинский А.В. Электрический пробой мембран эритроцитов за счет диффузной разности потенциалов / А.В. Путвинский и др. / Биофизика. – 1983. – Т. 28. – № 3. – С. 505-506

References:

1. Geynits, A.V., Moskvina, S.V. and Achilov A.A. (2012), *Intravenous laser irradiation of blood. (Basics of laser therapy)*. Moscow, Tver: Triada, 334 p.
2. Karu, T.Y. (2000), *Primary and secondary cellular mechanisms of laser therapy Low-intensity laser therap.* Ed. Moskvina, S.V. and Builin, V.A., Firm Tekhnika LLP, Moscow, pp. 71-94.

3. Knott, E.K. (1948), "Development of ultraviolet blood irradiation". *American Journal of Surgery*. Vol. 76 (2), pp. 165-171.
4. Ganelina, I.E. and Samoilova, K.A. (1986), *Mechanisms of the influence of blood irradiated with ultraviolet rays on the human and animal organism. Collection of scientific articles*. Ed. Ganelina, I.E. and Samoilova K.A., Nauka, Leningrad, 284 p.
5. Almazova, E.B. and Yemets, B.G. (2008), "On the mechanism of the influence of the radiation of a gas-discharge mercury ultraviolet lamp on the thickness of the near-membrane water layer of human erythrocytes". *Biophysical Bulletin*, Is. 21 (2), pp. 88-94.
6. Yemets, B.G. (2004), *Effects of interaction of low-intensity electromagnetic waves with nanoscale gas inclusions in liquid media: dissertation*, Kharkov, 336 p.
7. Kotyk, A. and Janacek K. (1980), *Membrane transport*, Mir, Moscow, 338 p.
8. Terskov, I.A. (1957), "Method of chemical (acid) erythrograms", *Biophysics*, Vol. 2, No. 2., pp. 259-266.
9. Baskurt, O.K. et al (1990), "In vitro effects of thyroxin on mechanical properties of erythrocytes", *Life Sci.*, Vol. 46, pp. 1471-1477.
10. Konev, S.V. and Volotovskiy, I.D. (1979), *Effect of UV light on proteins in solution and composition of biological membranes. Photobiology of an animal cell*, Leningrad, pp. 5-16.
11. Kamman, S. (1982), *Work with ion-selective electrodes*, Mir, Moscow, 203 p.
12. Putvinsky, A.V. (1983), "Electrical breakdown of erythrocyte membranes due to diffuse potential difference", *Biophysics*, Vol. 28, N 3, pp. 505-506.

Статтю представив д-р техн. наук, проф. Семенов О.В.

Надійшла (received) 23.03.2021

Almazova Olena, senior lecture,
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",
O. Yarosh str., 11a, ap.16, Kharkiv, Ukraine, 61045
Tel.: 099 626 54 84, e-mail: alonushka.alona27@gmail.com
ORCID ID:0000-0003-3226-6703

Lysychenko Mykola, professor, doctor of technical sciences,
Kharkov National Technical University of Agriculture named after P. Vasilenko,
Alchevskikh str, 44, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: 050 229 87 43, e-mail: 1prlysychenko@ukr.net
ORCID ID:0000-0002-4424-0159

УДК 577.344 + 612.014.481

Вплив ультрафіолетового випромінювання на кінетичні характеристики в еритроцитах / Алмазова О.Б., Лисиченко М.Л. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2021. – № 1 (5). – С. 125 – 141.

Еритроцити опромінювали ультрафіолетовою лампою типу ВМТ ($\lambda = 253,7\text{nm}$). Методами кислотних (хімічних) еритрограмм і зустрічного транспорту порівнювали кінетичні характеристики в опромінених і неопромінених зразках крові. Отримано, що в опромінених ультрафіолетом зразках крові відбувається зменшення часу напівгемолізу, а також ультрафіолетове випромінювання збільшує швидкість зустрічного переміщення іонів через еритроцитарні мембрани. Ці зміни обумовлені зменшенням "ефективної" товщини примембранного дифузійного шару – неперемішуваного шару води, що примикає до мембрани еритроцита. Ил.: 4. Табл.: 3. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: еритроцит; опромінені ультрафіолетом зразки крові; метод кислотних (хімічних) еритрограмм; примембранний дифузійний шар.

УДК 577.344 + 612.014.481

Влияние ультрафиолетового излучения на кинетические характеристики в эритроцитах / Алмазова О.Б., Лисиченко М.Л. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2021. – № 1 (5). – С. 125 – 141.

Эритроциты облучали ультрафиолетовой лампой типа ВМТ ($\lambda = 253,7\text{nm}$). Методами кислотных (химических) эритрограмм и встречного транспорта сравнивали кинетические характеристики в облученных и необлученных образцах крови. Получено, что в облученных ультрафиолетом образцах происходит уменьшение времени полугемолиза, а также ультрафиолетовое излучение увеличивает скорость встречного перемещения ионов через эритроцитарные мембраны. Эти изменения обусловлены уменьшением "эффективной" толщины примембранного диффузионного слоя – неперемешиваемого слоя воды, примыкающего к мембране эритроцита. Ил.: 4. Табл.: 3. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: эритроцит; облученные ультрафиолетом образцы крови; метод кислотных (химических) эритрограмм; примембранном диффузный слой.

UDC 577.344 + 612.014.481

Influence of ultraviolet radiation on kinetic characteristics in erythrocytes / Almazova O.B., Lisichenko M.L. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2021. – № 1 (5). – P. 125 – 141.

Erythrocytes were irradiated with an ultraviolet lamp of the VMT type ($\lambda = 253.7\text{ nm}$). The kinetic characteristics in irradiated and non-irradiated blood samples were compared by the acid (chemical) erythrogram method and by the counter transport method. Obtained:

- by the method of acidic erythrograms it was found that in ultraviolet-irradiated blood samples there is a decrease in the time of half hemolysis.

- ultraviolet radiation increases the speed of counter movement of ions through erythrocyte membranes.

- a decrease in the time of half hemolysis and an increase in the rate of counter transfer of ions, irradiated blood samples, is due to a decrease in the "effective" thickness of the near-membrane diffusion layer - an immiscible layer of water adjacent to the erythrocyte membrane.

A decrease in the "effective thickness" of the near-membrane water layer changes the rate of metabolic processes in the "cell - intercellular medium" system, changing the mode of

cell functioning. The altered mode of functioning is a biological response to light radiation. Red blood cells with an altered mode of functioning are stimulus signals that force the body to mobilize resources to fight pathology. These circumstances can predict the creation of a universal phototherapeutic equipment for extracorporeal blood irradiation based on LEDs with certain exposure parameters. Figs.: 4. Tabl.: 3. Refs.: 12 titles.

Keywords: erythrocyte; ultraviolet irradiated blood samples; method of acid (chemical) erythrograms; submembrane diffusion layer.

UDC 681.5.015.52

DOI: 10.20998/2411-0558.2021.01.11

V. D. PAVLENKO, DSc Eng, Professor Full, ONPU, Odessa,

T. V. SHAMANINA, Magister, ONPU, Odessa,

V. V. CHORI, Graduate student, ONPU, Odessa

BIOMETRIC METHOD OF PERSONALITY AUTHENTICATION BASED ON THE EYE TRACKING DATA

A new method of biometric identification of a computer user is proposed based on the Volterra model and eye tracking data in dynamics (eye tracking technology). The instrumental computational and software tools for constructing a nonparametric nonlinear dynamic model (Volterra model) of the human oculo-motor system have been developed on the basis of data from experimental studies "input-output" using innovative eye tracking technology. The obtained multidimensional transition functions are used to construct a biometric identification system for individuals. Figs.: 10. Tabl.: 1. Refs.: 9 titles.

Keywords: method of biometric identification; authentication; oculo-motor system; Volterra model; eye tracking technology; multidimensional transient functions; software tools.

Introduction. Based on the analysis of information security threats and existing means of identification and authentication of information system users, it can be argued that password protection is currently one of the most common ways to protect information from unauthorized access in individual computers and systems and networks worldwide. However, without the use of other protection mechanisms, password protection, in itself, is not reliable, because it cannot provide the required level of protection [1]. Various electronic keys (tokens, cards, etc.) are also quite common as identifiers. Recently, identification systems that use human biometric characteristics in solving the problem of access to information systems are becoming more common [2 – 4].

The aim of the research is to increase the efficiency (reliability) of information protection on the computer through the development of hardware and software identification of human oculo-motor system (OMS) based on nonlinear dynamic model and data of experimental input-output research using innovative eye tracking technology. The Volterra model in the form of multidimensional transition functions (MTF) is used for identification.

The object of research is the process of biometric identification of a computer user on the basis of eye tracking data in dynamics - responses to given test visual stimuli (the process of eye tracking).

The subject of research is software tools for constructing the Volterra model – evaluation of multidimensional transient functions of OMS according to the data eye tracking, determination based on transient functions of

informative features and construction of defining rules of optimal classification.

Volterra model and the method of the identification OMS. The "input-output" ratio for a nonlinear dynamical system (NDS) with an unknown structure (such as a "black box") with a single input and a single output can be represented by a discrete Volterra series in the form [5]:

$$\begin{aligned}
 y[m] = & \sum_{n=1}^{\infty} y_n[m] = \sum_{k_1=0}^m w_1[k_1]x[m-k_1] + \\
 & + \sum_{k_1=0}^m \sum_{k_2=0}^m w_2[k_1, k_2]x[m-k_1]x[m-k_2] + \\
 & + \sum_{k_1=0}^m \sum_{k_2=0}^m \sum_{k_3=0}^m w_3[k_1, k_2, k_3]x[m-k_1]x[m-k_2]x[m-k_3] + \dots,
 \end{aligned} \tag{1}$$

where $w_1[k_1]$, $w_2[k_1, k_2]$, $w_3[k_1, k_2, k_3]$ are discrete weight functions (Volterra kernels) of the 1st, 2nd and 3rd orders; $x[m]$, $y[m]$ are input (stimulus) and output (response) function (signals) of the system, respectively; $y_n[m]$ is partial components of the response (convolution of n -th order sequences $w_n[k_1, \dots, k_n]$ and $x[m]$); m is a discrete time variable.

The Volterra series is replaced by a polynomial and is usually limited to the first few terms of the series in practice. In this study we limited ourselves to the first three terms of the series (we chose the degree of the Volterra polynomial model $N=3$).

The problem of identification is to choose test signals $x[m]$ and develop an algorithm that allows to identify partial components $y_n[m]$, ($n=1,2,3$) based on the responses received $y[m]$ and determine on their multidimensional Volterra kernels: $w_1[k_1]$, $w_2[k_1, k_2]$, $w_3[k_1, k_2, k_3]$.

Taking into account the specifics of the studied OMS, test step signals are used for identification. If the test signal $x[m] = \theta[m]$, where $\theta[m]$ is the unit function (Heaviside function), then the partial components of the response $y_1[m]$, $y_2[m]$, $y_3[m]$ are the first order transition function and diagonal sections of the second and third order transition functions, respectively:

$$\begin{aligned}
y_1[m] &= h_1[m] = \sum_{k_1=0}^m w_1[m-k_1], \\
y_2[m] &= h_2[m, m] = \sum_{k_1, k_2=0}^m w_2[m-k_1, m-k_2], \\
y_3[m] &= h_3[m, m, m] = \sum_{k_1, k_2, k_3=0}^m w_3[m-k_1, m-k_2, m-k_3].
\end{aligned} \tag{2}$$

In this case, the responses of the Volterra model of the OMS are calculated based on the expression:

$$\tilde{y}_i[m] = a_i \hat{y}_1[m] + a_i^2 \hat{y}_2[m] + a_i^3 \hat{y}_3[m], \quad i = \overline{1, N}, \tag{3}$$

where $\hat{y}_1[m] = \hat{h}_1[m]$, $\hat{y}_2[m] = \hat{h}_2[m, m]$, $\hat{y}_3[m] = \hat{h}_3[m, m, m]$ are obtained estimates of the partial components of the model (MTF).

The research uses an approximation identification method [6]. The approximation method of identification in domain time is based on the allocation of the n -th partial component in the OMS response by constructing linear combinations of responses to test signals with different amplitudes [6, 7].

Let at system input test signals are given successively $a_1 x[m]$, $a_2 x[m], \dots, a_N x[m]$ (N is approximation model order, $a_1, a_2, \dots, a_N$ are different real numbers, which satisfy the term $|a_j| \leq 1$ for $\forall j=1, 2, \dots, N$; $x[m]$ is arbitrary function). Then the linear combination of the OMS responses with the coefficients c_j is amount to the n -th partial component of the OMS response to the input signal $x[m]$. In this case, a methodical error arises in the selection of the n -th partial component, due to the partial components of the OMS response of higher orders $n > N$:

$$\sum_{j=1}^N c_j y(a_j x[m]) = y_n(x[m]) + \sum_{j=1}^N c_j \sum_{n=N+1}^{\infty} y_n(a_j x[m]), \tag{4}$$

where $y_n(x[m]) = y_n[m]$;

$$y(a_j x[m]) = \sum_{n=1}^{\infty} a_j^n \sum_{k_1=0}^m \dots \sum_{k_n=0}^m w_n[k_1, \dots, k_n] \prod_{i=1}^n x[m - k_i];$$

if c_j is real coefficients such that

$$A_N \mathbf{c} = \mathbf{b}, \tag{5}$$

where

$$A_N = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_N \\ a_1^2 & a_2^2 & \dots & a_N^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1^N & a_2^N & \dots & a_N^N \end{bmatrix}, \quad c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_N \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_N \end{bmatrix},$$

and $b_l = 1$ at $l = n$ and $b_l = 0$ at $l \neq n$, $\forall l \in \{1, 2, \dots, N\}$.

For example for $N = 2$:

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_1^2 & a_2^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_1^{(1)} \\ c_2^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_1^2 & a_2^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_1^{(2)} \\ c_2^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix};$$

for $N = 3$:

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_1^2 & a_2^2 & a_3^2 \\ a_1^3 & a_2^3 & a_3^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_1^{(1)} \\ c_2^{(1)} \\ c_3^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_1^2 & a_2^2 & a_3^2 \\ a_1^3 & a_2^3 & a_3^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_1^{(2)} \\ c_2^{(2)} \\ c_3^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_1^2 & a_2^2 & a_3^2 \\ a_1^3 & a_2^3 & a_3^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_1^{(3)} \\ c_2^{(3)} \\ c_3^{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

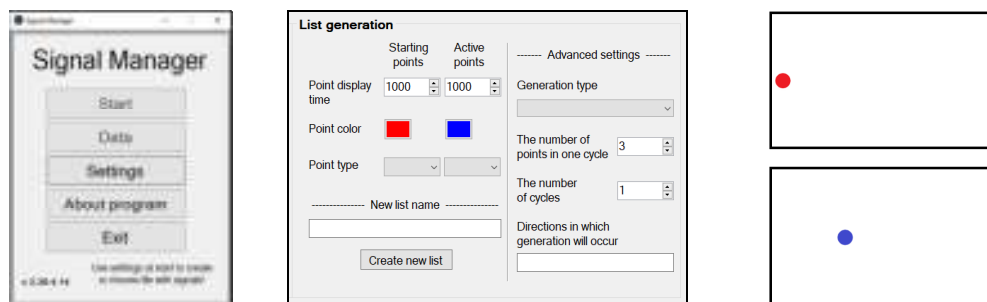
The evaluation of transient functions can be set in general as follows:

$$\begin{aligned} \hat{h}_n[m, \dots, m] &= \hat{y}_n[m] = \sum_{j=1}^N c_j^{(n)} y(a_j \theta[m]) = \\ &= c_1^{(n)} y_{a_1}[m] + c_2^{(n)} y_{a_2}[m] + \dots + c_N^{(n)} y_{a_N}[m], \quad n = 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (6)$$

where $y_{a_j}[m] = y(a_j \theta[m])$ – OMS response to a test signal with an amplitude a_j .

Results. To identify the OMS in the form of MTF according to the data eye tracking program Signal Manager was created to generate test visual stimuli on the computer monitor screen (Fig. 1). The obtained physiological features of the OMS, in experiments on eye movement tracking, step signals (bright dots) with different distances a_j ($j = 1, 2, \dots, N$; N is number of experiments) from the starting position are used. Thus, visual stimuli can be

considered as functions $x_j[m] = a_j \theta[m]$, where $\theta[m]$ is a unit a unit function of avicide. With the help of an eye tracker, the responses of the OMS are recorded, which are used to determine the MTF [8]. Signal Manager can generate a visual test of any given complexity.



The main menu of the program

Setting up a visual stimulus generator

Starting and test visual stimuli

Fig. 1. The interface of the program for generating test visual stimuli Signal Manager

In the studies of each respondent, three experiments were performed sequentially for the three amplitudes a_1, a_2, a_3 ($N = 3$) of the test signals in the horizontal direction. The distance between the starting position and the test stimuli is: $(1/3) l_x$, $(2/3) l_x$ and $(1.0) l_x$, where l_x is the length of the monitor screen. Coordinates of the starting position ($x = 0, y = (1/2) l_y$), where l_y is the width of the monitor screen. Experimental studies of OMS were conducted using high-tech equipment – eye tracker TOBII PRO TX300 (300 Hz).

The experiments were organized to identify individuals based on MTF data [9].

The OMS modeling process based on the Volterra model is shown in Fig. 2.

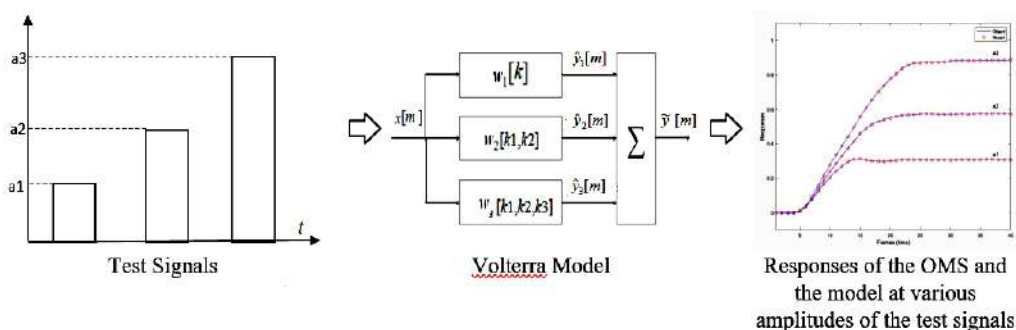


Fig. 2. The OMS modeling process based on the Volterra model

In Fig. 3 and Fig.4 OMS responses to test visual stimuli with amplitudes a_1 , a_2 and a_3 . in two individuals are shown that were obtained on different days and at different times of the day.

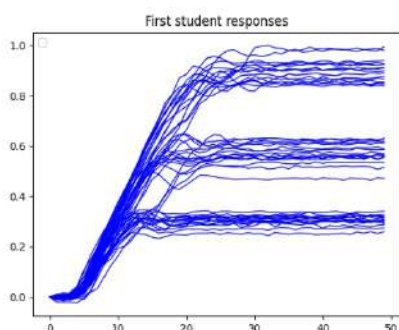


Fig. 3. 1st student's OMS responses to visual stimuli with amplitudes a_1 , a_2 , a_3

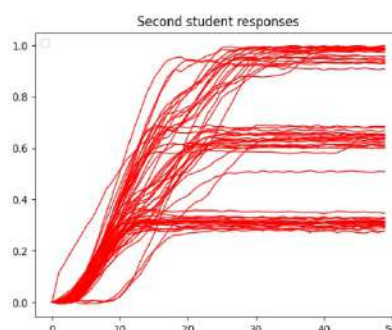


Fig. 4. 2nd student's OMS responses to visual stimuli with amplitudes a_1 , a_2 , a_3

According to the averaged data of OMS responses to visual stimuli (Fig. 5), the transient functions of OMS when using Volterra models of different degree N ($N = 1, 2, 3$) were determined. Graphs of transition functions for two individuals based on the model at $N = 1$ are presented in Fig. 6, at $N = 2$ – in Fig. 7 and at $N = 3$ – in Fig. 8. As it can be seen from Fig. 6 – 8, the obtained transient functions of the 1st order almost coincide for two individuals. However, the diagonal intersections of the transition functions of the 2nd (Fig. 7, 8) and third (Fig. 8) orders in two individuals change significantly in size, therefore, can be effectively used as a source of primary data in building a system of recognition of individuals with application of machine learning.

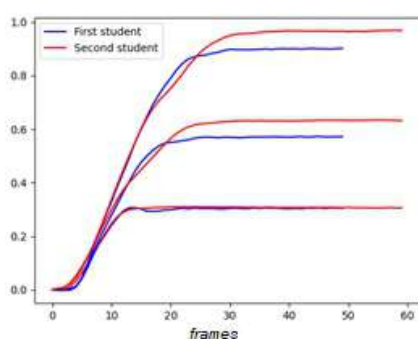


Fig. 5. Average responses of OMS of two students

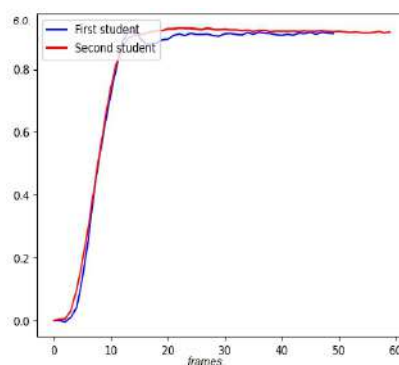


Fig. 6. Transition functions 1st orders of two individuals

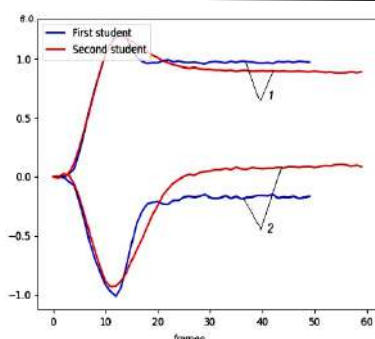


Fig. 7. Transition functions: 1 – 1st; 2 – 2nd orders of two individuals

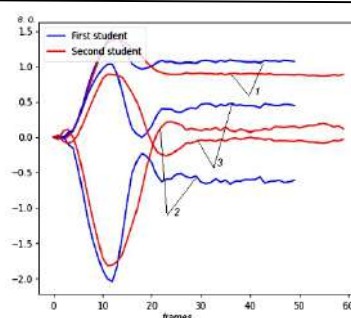


Fig. 8. Transition functions: 1 – 1st; 2– 2nd; 3 – 3rd orders of two individuals

Received responses with the help of calculations on models at $N = 3$ from various amplitudes of test signals. Graphs these are presented in comparison with similar responses OMS for premier and second of the students in Fig. 9 and 10, respectively.

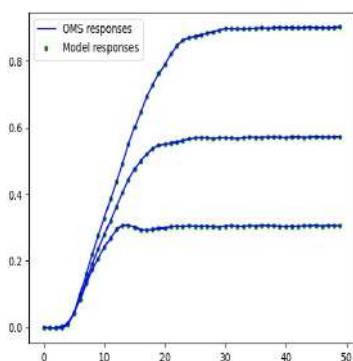


Fig. 9. Average responses of the OMS and of model Volterra for $N=3$ of premier student

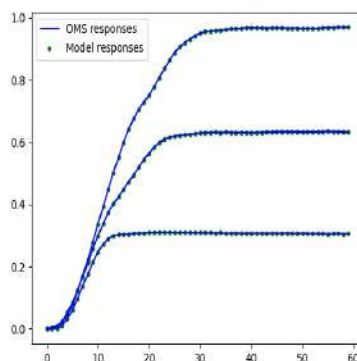


Fig. 10. Average responses of the OMS and of the model Volterra for $N=3$ of second student

The analysis of the MTF variability. The variability (deviation) of transient functions of different orders n ($n=1,2,\dots,N$) of OMS models for $N=1, 2, 3$ of two individuals – the respondent #1 $\hat{h}_{1n}^{(N)}[m]$ and the respondent #2 $\hat{h}_{2n}^{(N)}[m]$ is quantified using indicators:

σ_{nN} is maximum deviation

$$\sigma_{nN} = \max_{m \in [0, M]} |\hat{h}_{1n}^{(N)}[m] - \hat{h}_{2n}^{(N)}[m]|, \quad (7)$$

ε_{nN} is standard deviation

$$\varepsilon_{nN} = \left(\frac{1}{M} \sum_{m=0}^M \left(\hat{h}_{1n}^{(N)}[m] - \hat{h}_{2n}^{(N)}[m] \right)^2 \right)^{1/2}, \quad (8)$$

where M is the number of measurements.

Indicators of deviations of transient functions of different orders of n models of OMS of respondents #1 and #2 for $N = 1, 2, 3$ are given in Table 1.

Table 1

The deviation indicators of MTF

N	ε_1	σ_1	ε_2	σ_2	ε_3	σ_3
1	0.025	0.056	-	-	-	-
2	0.066	0.118	0.489	0.264	-	-
3	0.158	0.22	0.83	0.808	1.182	0.66

Building a classifier of the individuals. For identity recognition of the individuals based on the OMS nonlinear dynamical model conducted researche:

- Building a feature space for designing classifier of the individe with using machine learning.
- Classifiers construction with using statistical methods of learning the pattern recognition based on the data obtained using eye tracking technology.

The analysis of the reliability of personality recognition in the space of features calculated on the basis of the MTF consists in forming various combinations of features and evaluating their informativeness based on the classification results on the data sample under study using criteria for the probability of correct recognition (P).

Bayesian classifier of a individuals in two-dimensional features space is provided of the maximum recognition reliability at the combinations by the following of the features:

$$\left\{ x_{13} = \min_m h'_1(m) \ \& \ x_{15} = \min_m h'_3(m, m, m) \right\} \quad (9)$$

or

$$\left\{ x_{13} = \min_m h'_1(m) \ \& \ x_{11} = \max_m h'_2(m, m) \right\} \quad (10)$$

Evaluation of the confidence index of personality recognition in the first and second cases: $P=0.974$ and $P=0.947$, respectively.

Conclusion. Instrumental computing and software tools for building a nonparametric nonlinear dynamic model of the human oculomotor system based on experimental data "input-output" using innovative technology of eye

tracking have been developed. In the future, the obtained transition functions will be used in the construction of a system of biometric identification of individuals. Software tools for identifying OMS in the time domain in the form of multidimensional transition functions are implemented in the Python IDLE programming environment.

References:

1. Koshevaya, N.A., and Maznichenko, N.I. (2013), "Identification of users of the informative computer systems: analysis and prognostication of approaches", *Information processing systems*, Issue 6 (113), pp. 215-223.
2. Rigas, I., Komogortsev, O., and Shadmehr R. (2016), "Biometric recognition via the complex eye movement behavior and the incorporation of saccadic vigor and acceleration cues", *ACM Trans. on Applied Perception*, Vol. 13 (2), pp.1-21.
3. Komogortsev, O., and Rigas, I. (2015), "BioEye 2015: Competition on Biometrics via Eye Movements", *IEEE Seventh International Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems (BTAS 2015)*, pp. 1-8.
4. Komogortsev, O.V., Karpov, A., Price, L., and Aragon, C. (2012), "Biometric Authentication via Oculomotor Plant Characteristic", *Proc. IEEE/IARP Int. Conf. on Biometrics (ICB)*, New Delhi, India, pp. 1-8.
5. Doyle, F.J., Pearson, R.K., and Ogunnaikie, B.A. (2002), *Identification and control using Volterra models*, Germany: Springer Publ., 314 p.
6. Pavlenko, V., Pavlenko, S., and Speranskyy, V. (2014), "Identification of Systems using Volterra Model in Time and Frequency Domain", In book V. Haasz and K. Madani (Eds.). *Advanced Data Acquisition and Intelligent Data Processing*, River Publishers, pp. 233-270.
7. Pavlenko, V., and Pavlenko, S. (2018), "Deterministic identification methods for nonlinear dynamical systems based on the Volterra model", *Applied Aspects of Information Technology*, No 01 (01), pp. 9-29.
8. Pavlenko, V., Salata, D., Dombrovskiy, M., and Maksymenko, Y. (2017), "Estimation of the multidimensional transient functions oculo-motor system of human", *Mathematical Methods and Computational Techniques in Science and Engineering: AIP Conf. Proc. MMCTSE. – UK, Cambridge*, Vol. 1872, Melville, New York, 2017. – pp. 110-117.
9. Pavlenko, V., Milosz, M., and Dzienkowski, M. (2020), "Identification of the oculo-motor system based on the Volterra model using eye tracking technology", *4th Int. Conf. on Applied Physics, Simulation and Computing (APSAC 2020)* 23-25 May, Rome, Italy. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1603, IOP Publishing, 2020, pp. 1-8.

Pavlenko Vitaliy, Dr.Sci.Tech, Professor Full
Odessa National Polytechnical University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
Tel./phone: +3(8-048) 705-8-436, e-mail: pavlenko_vitalij@ukr.net
ORCID ID: 0000-0002-5655-4171

Shamanina Tetyana, Magister
Odessa National Polytechnical University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
Tel./phone: +3(8-093) 284-84-23, e-mail: tatanatv8@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-0864-3839

Chori Vladislav, Graduate student
Odessa National Polytechnical University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
Tel./phone: +3(8-096) 611-71-21, e-mail: vladyslav.chori@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-7823-8383

УДК 681.5.015.52

Біометричний метод аутентифікації особистості за даними айтрекінга / Павленко В.Д., Шаманіна Т.В., Чорі В.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2021. – № 1 (5). – С. 142 – 152.

Пропонується новий метод біометричної ідентифікації користувача комп'ютера на основі моделі Вольтерри і даних відстеження погляду в динаміці (технологія айтрекінга). Інструментальні обчислювальні і програмні засоби для побудови непараметричної нелінійної динамічної моделі (моделі Вольтерри) окуло-моторної системи людини були розроблені на основі даних експериментальних досліджень "вхід-вихід" з використанням інноваційної технології айтрекінгу. Отримані багатовимірні перехідні функції використовуються для побудови системи біометричної ідентифікації фізичних осіб. Іл.: 10. Табл.: 1. Бібліогр.: 9 назв.

Ключеві слова: метод біометричної ідентифікації; автентифікація; очно-рухова система; модель Вольтерри; технологія відстеження очей; багатовимірні перехідні функції; програмні засоби.

УДК 681.5.015.52

Биометрический метод аутентификации личности по данным айтрекинга / Павленко В.Д., Шаманина Т.В., Чори В.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2021. – № 1 (5). – С. 142 – 152.

Предлагается новый метод биометрической идентификации пользователя компьютера на основе модели Вольтерра и данных отслеживания взгляда в динамике (технология айтрекинга). Инструментальные вычислительные и программные средства для построения непараметрической нелинейной динамической модели (модели Вольтерра) окуломоторной системы человека были разработаны на основе данных экспериментальных исследований "вход-выход" с использованием инновационной технологии айтрекинга. Полученные многомерные переходные функции используются для построения системы биометрической идентификации физических лиц. Ил.: 10. Табл.: 1. Библиогр. : 9 назв.

Ключевые слова: метод биометрической идентификации; аутентификация; окуло-моторная система; модель Вольтерры; технология айтрекинга; многомерные переходные функции; программные средства.

UDC 681.5.015.52

Biometric method of personality authentication based on the eye tracking data / Pavlenko V.D., Shamanina T.V., Chori V.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2021. – № 1 (5). – P. 142 – 152.

A new method of biometric identification of a computer user is proposed based on the Volterra model and eye tracking data in dynamics (eye tracking technology). The instrumental computational and software tools for constructing a nonparametric nonlinear dynamic model (Volterra model) of the human oculo-motor system have been developed on the basis of data from experimental studies "input-output" using innovative eye tracking technology. The obtained multidimensional transition functions are used to construct a biometric identification system for individuals. Figs.: 10. Tabl.: 1. Refs.: 9 titles.

Keywords: method of biometric identification; authentication; oculo-motor system; Volterra model; eye tracking technology; multidimensional transient functions; software tools.