

Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

INFORMATION TECHNOLOGY: COMPUTER SCIENCE, SOFTWARE ENGINEERING AND CYBER SECURITY

Випуск 2



Видавничий дім
«Гельветика»
2022

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР:

Удовик Ірина Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент, декан факультету інформаційних технологій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна.

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Алексєєв Михайло Олександрович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна;

Бердник Михайло Геннадійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна;

Кабак Леонід Віталійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна;

Корнієнко Валерій Іванович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна;

Корченко Анна Олександрівна, доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри безпеки інформаційних технологій, Національний авіаційний університет, Україна;

Лактіонов Іван Сергійович, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна;

Литвин Василь Володимирович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних систем та мереж, Національний університет «Львівська політехніка», Україна;

Любченко Віра Вікторівна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри системного програмного забезпечення, Одеський національний політехнічний університет, Україна;

Маттіас Реч, Ph.D, професор, кафедра мехатроніки, Університет Ройтлінгену, Німеччина;

Молоканова Валентина Михайлівна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри системного аналізу та управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна;

Мороз Борис Іванович, доктор технічних наук, професор, професор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна;

Мулеса Оксана Юріївна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних систем та мереж, Ужгородський національний університет, Україна;

Рак Тарас Євгенович, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційних технологій, ПЗВО «ІТ СТЕП Університет», Україна;

Савенко Олег Станіславович, доктор технічних наук, професор, декан факультету програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем, професор кафедри комп'ютерної інженерії та системного програмування, Хмельницький національний університет, Україна;

Семенов Сергій Геннадійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, Україна;

Сироткіна Олена Ігорівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент школи комп'ютерних наук, Віндзорський університет, Канада;

Швачич Геннадій Григорович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна.

Журнал ухвалено до друку Вченою радою
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

12 травня 2022 р., протокол № 5

Науковий журнал «Information Technology: Computer Science, Software Engineering
and Cyber Security» зареєстровано Міністерством юстиції України

(Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
серія KB № 24879–14819P від 17.06.2021 року)

Офіційний сайт видання: www.journals.politehnica.dp.ua/index.php/it

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення
StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

ISSN 2786-507X (Print)

ISSN 2786-5088 (Online)

© Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2022

УДК 004.89

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-1>

Віталій БРИДІНСЬКИЙ

аспірант, Національний університет «Львівська політехніка», вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79000, vbrydinskyi@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8583-9785

Spopus-Author ID: 57456880300

Бібліографічний опис статті: Бريدінський, В. (2022). Побудова системи ідентифікації мовців на основі бібліотеки аудіообробки PyAnnote. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 3–11, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-1>

ПОБУДОВА СИСТЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОВЦІВ НА ОСНОВІ БІБЛІОТЕКИ АУДІОБРОБКИ PYANNOTE

У галузі машинного навчання одним із основних напрямків є опрацювання та розпізнавання мовлення. Серед важливих завдань роботи з аудіоданими є діаризація. Діаризація визначає часові межі в аудіозаписі, що належать окремим мовцям, тобто образно кажучи, вирішує задачу «коли хто говорить?». Проте відомі комерційні та відкриті засоби діаризації використовують кластеризацію сегментів, але не відповідають на питання «хто саме зараз говорить?». Існують системи, які ідентифікують мовця, але такі системи розраховані на те, що у аудіозапису присутній є лише один мовець. Тому актуальним завданням є створення системи діаризації, яка уможливіє ідентифікацію багатьох мовців, які довільним чином змінюються у аудіозаписах. У даному дослідженні запропоновано дві архітектури систем ідентифікації мовців на основі діаризації, які працюють відповідно на засадах по-сегментного та по-кластерного аналізу. Для побудови системи використано бібліотеку PyAnnote, що є у відкритому доступі. Верифікація роботи системи ідентифікації мовців здійснювалася на відкритій базі аудіозаписів AMI Corpus, у якому зібрано 100 годин анотованих та транскрибованих аудіо- та відеоданих. Розглянуто різні метрики оцінювання точності діаризації та, враховуючи специфіку розробленої системи, обґрунтовано доцільність застосування такої оцінки як F-Міра ідентифікації. Описано методику проведення досліджень, яка передбачала проведення трьох експериментів. Перший експеримент націлений на дослідження архітектури системи ідентифікації, що базується на по-сегментному аналізі, а другий експеримент – на дослідження архітектури, що застосовує по-кластерний аналіз. Третій експеримент стосується визначення оптимальної тривалості навчальної вибірки для класифікаторів системи ідентифікації. Результати експериментів показали, що по-кластерний підхід показав кращі результати ідентифікації порівняно із по-сегментним підходом. Також встановлено, що оптимальною тривалістю вибірки аудіоданих для тренування класифікатора під кожного конкретного мовця становить 20 секунд.

Ключові слова: система діаризації, бібліотека PyAnnote, машинне навчання, кластеризація, класифікація, аналіз аудіо, ідентифікація мовця.

Vitalii BRYDINSKYI

Postgraduate Student, Lviv Polytechnic National University, Stepana Bandery str., 12, Lviv, Ukraine, 79000, vbrydinskyi@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8583-9785

Spopus-Author ID: 57456880300

To cite this article: Brydinskyi V. (2022). Pobudova systemy identyfikatsii movtsiv na osnovi biblioteky audioobrobky PyAnnote [Implementation of the speaker identification system based on the PyAnnote audio processing library]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 3–11, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-1>

IMPLEMENTATION OF THE SPEAKER IDENTIFICATION SYSTEM BASED ON THE PYANNOTE AUDIO PROCESSING LIBRARY

In the field of machine learning, one of the main areas is speech processing and recognition. One of the important tasks of working with audio data is diarization. Diarization determines the time boundaries in the audio recording belonging to individual speakers, that is, figuratively speaking, solves the problem of «who speaks when?». However, known commercial and open source diarization tools use segment clustering, but do not answer the question «who exactly is speaking now?». There are systems that identify the speaker, but such systems are designed for the fact

that there is only one speaker in the audio recording. Therefore, a relevant task is to create a diarization system that allows the identification of many speakers that arbitrarily change in audio recordings. In this study, we propose two architectures of speaker identification systems based on diarization, which work respectively on the per segment basis and per cluster analysis. To implement the system, we used the PyAnnote library, which is open source. The evaluation of the speaker identification system was carried out on the open audio database AMI Corpus, which contains 100 hours of annotated and transcribed audio and video data. Various metrics for assessing the accuracy of diarization are considered and, taking into account the specifics of the developed system, the expediency of using such an assessment as the F-Measure of identification is substantiated. The methodology of research is described, which included three experiments. The first experiment is aimed at studying the architecture of the identification system based on per segment analysis, and the second experiment is aimed at studying the architecture that uses per cluster analysis. The third experiment concerns the determination of the optimal training sample duration for the classifiers of the identification system. The experimental results showed that the cluster-based approach showed better identification results compared to the segment-based approach. It was also found that the optimal duration of audio data sampling for training the classifier for each specific speaker is 20 seconds.

Key words: *diarization system, PyAnnote library, machine learning, clustering, audio analysis, speaker identification.*

Актуальність проблеми. Діаризація (англ. diarization) є важливим етапом у процесі розпізнавання усної мови, а її завданням є це поділ вхідного аудіозапису на однорідні сегменти відповідно до особи мовця (англ. speaker). Традиційно діаризація мовців поєднує в собі сегментацію аудіозапису та кластеризацію одержаних сегментів. Сегментація спрямована на пошук точок зміни мовця в аудіозаписі, натомість кластеризація – на групування сегментів мовлення на основі характеристик мовця.

Застосування діаризації завдяки структуризації аудіозапису за чергами мовців дає змогу підвищити читабельність автоматичної транскрипції мовлення на текст, а її застосування у системах біометричної ідентифікації за голосом дає змогу встановити справжню особу мовця (Juang B., 2005; Nomayoon Beigi, 2011). Іншим прикладом застосування діаризації є її використання для розпізнавання мовлення у довгих аудіозаписах із декількома мовцями, де діаризація використовується для розділення довгого аудіозапису на коротші, які, в свою чергу, подаються на модель розпізнавання мовлення (Мао Нунгу, 2020). Також схожа система може бути використана для систем перекладу, де аудіозапис розділяється на сегменти мовлення за допомогою діаризації, і система перекладу виконує переклад для кожного із сегментів, таким чином збільшується швидкодія та точність таких систем (Inaguma Hirofumi, 2021; Ueda Yushi, 2022).

Хоча розроблення методів діаризації почалося понад десятиліття тому (Anguera Xavier, 2012), на цей час продовжуються інтенсивні дослідження, метою яких є підвищення достовірності та обчислювальної ефективності алгоритмів діаризації. Варто зазначити, що для діаризації переважно застосовуються алгоритми машинного навчання без вчителя

(unsupervised). Проте у деяких випадках для вирішення задачі діаризації виникає потреба в застосуванні машинного навчання з вчителем (supervised).

Основною відмінністю діаризації з вчителем є інший спосіб у індексації сегментів, який полягає не в групуванні схожих сегментів в окремі категорії (кластеризація), а співвіднесені сегмента до конкретного мовця на основі зразків його голосу (класифікація). Відтак останній етап перетворень для діаризації з вчителем здійснюватиметься за допомогою додаткового вихідного модуля – класифікатора мовців. Діаризація з учителем застосовується в задачах, коли потрібно ідентифікувати сегменти в аудіозаписі, які належать конкретному мовцю (тобто фактично здійснити пошук за голосом реплік розмови).

Натомість в діаризації без вчителя, сегменти розділяються між мовцями, але невідомо, яка із міток діаризації відноситься до конкретного мовця. Також може бути доцільно в умовах малих даних, коли треба додати підтримку нового мовця лише на основі одного короткого аудіозапису в кілька секунд. Наприклад, це може бути застосовано у відео конференції, для визначення мовця, котрий щойно доєднався до конференції, його голос буде записано та використано для підлаштування моделі діаризації, щоб у подальшому на цій конференції, його голос було визначено та ідентифіковано правильно.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд літературних джерел дає підстави стверджувати, що системи діаризації традиційно будуються на основі підходу без учителя (Bredin Herve, 2022; Jin Qin, 2004; Tanveer Md, 2022; Le Lan Gaël, 2016; Dawalatabad Nauman, 2020). Є також кілька досліджень присвячених діаризації, що спирається на методи з учите-

лем (Zhang Aonan, 2019; Fini Enrico, 2020; Xie Weidi, 2019).

На цей час відомо декілька проектів, які вирішують завдання діаризації, зокрема це комерційні продукти IBM Watson, Google STT (Herchovnicz Andrey L, 2019) та бібліотеки з відкритим кодом pyAudioAnalysis (Giannakopoulos Theodoros, 2015), SpeechBrain (Ravanelli Mirco, 2021), PyAnnote (Bredin Herve, 2020). Комерційні продукти насамперед є рішеннями для розпізнавання мови, діаризація у цих рішеннях є додатковою функцією. Перевагою цих рішень є простота використання, швидкість розгортання та налаштування системи, хороша точність. Але є й недоліки: відсутність можливості налаштування параметрів системи або окремих її компонент, ціна, прив'язка до інфраструктури надавача послуг. Тому актуальним завданням є пошук рішення з відкритим кодом, з модульною структурою і можливістю налаштування параметрів системи, та яке б не поступало за точністю комерційним засобам. На основі проведеного літературного огляду було встановлено, що найпопулярнішими системами, які задовольняють вищезгаданим вимогам, є фреймворки PyAnnote, SpeechBrain, pyAudioAnalysis.

PyAudioAnalysis – це бібліотека з відкритим кодом, призначена для опрацювання звуку, зокрема вилучення ознак (feature extraction) з аудіосигналу, з подальшою класифікацією та сегментацією аудіозаписів. Відтак цю бібліотеку можна використати для цілей діаризації з вчителем. Ця бібліотека має низку інструментів, призначених передовсім для аналізу даних та вилучення ознак з аудіозапису. У цієї бібліотеки також є інструменти для сегментування та класифікації аудіо, проте точність помітно поступається комерційним рішенням та іншим рішенням з відкритим кодом (Bredin Herve, 2020).

SpeechBrain – це набір програмних інструментів з відкритим кодом, які призначені для створення систем для аналізу аудіо, зокрема в таких задачах, як розпізнавання мови (automatic speech recognition), розпізнавання мовця (speaker identification), ідентифікація мови (language identification), тощо. Наразі ця бібліотека не містить у собі інструменту для сегментування аудіо, що ускладнює її застосування для задач діаризації (Ravanelli Mirco, 2021).

PyAnnote – бібліотека з відкритим кодом, розроблена безпосередньо для вирішення задачі діаризації (Bredin Herve, 2020; Bredin Herve, 2021; Mao Huanru 2020). Вона складається з навчених нейромережових модулів, на основі спільного використання яких, можна

імплементувати систему для діаризації без вчителя. Згадані модулі можна додатково переналаштовувати, замінити на інші модулі, або ж додавати нові. Така відкрита модульна структура забезпечує високу гнучкість і можливості для покращення характеристик системи. Окрім цього ця бібліотека містить інструменти для опрацювання та маніпуляції сегментами аудіо (Bredin Herve, 2020).

Таким чином, для досліджень автори обрали PyAnnote, оскільки серед розглянутих рішень потенційно забезпечує найвищу точність (зіставимо з існуючими комерційними рішеннями), а модульна структура і доступність налаштування гіперпараметрів відкриває можливості адаптації під завдання діаризації з учителем.

Визначення мети дослідження. Метою роботи є удосконалення відомої системи діаризації без вчителя на основі PyAnnote через додавання нових модулів для розпізнавання мовців, що сприятиме не лише розширенню функціональності системи, але також покращенню результатів діаризації шляхом налаштування параметрів окремих модулів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Опис стандартної системи діаризації на основі PyAnnote. У даному дослідженні за базову прийнято структуру системи діаризації без вчителя (з використанням кластеризації) на основі PyAnnote (Bredin Herve, 2020). До складу цієї системи діаризації входять такі модулі:

Виявлення голосової активності (voice activity detection) – модуль, який виконує функцію виявлення проміжків часу у аудіозаписі, де є присутній голос людини.

Виявлення зміни мовця (speaker change detection) – модуль, який виконує функцію виявлення моментів часу у аудіозаписі, де мовлення одного мовця завершилося і розпочалася мовлення іншого.

Виявлення накладеного мовлення (overlapped speech detection) – модуль, який виконує функцію виявлення проміжків часу у аудіозаписі, де два або більше мовців говорять одночасно. Такі сегменти зазвичай вилучають з аналізу, оскільки у таких випадках для виявлення конкретного мовця потрібно здійснювати додаткові перетворення пов'язані з розділення двох накладених в часі сигналів.

Векторне представлення мовця (Романюк Андрій, 2019) (speaker embedding) – модуль, який на основі фізіологічних параметрів голосу створює вектор із певною заданою розмірністю, числові значення якого, репрезентують характерні ознаки для кожного мовця. Таким чином відстань між векторами, які відповідають

фразам, що належать одній людині, буде менша ніж відстань до векторів, утворених із фраз сказаних іншими мовцями (Snyder David, 2018).

Кластеризація (clustering) – це модуль, який відповідає за групування сегментів, що відповідають мовцям, використовуючи їхнє векторне представлення (embeddings).

Ресегментація (resegmentation) – це модуль, який виконує завдання з уточнення/покращення меж та міток сегментації, передовсім для сегментів в межах яких спостерігається накладання голосів кількох мовців.

Таким чином, результатом роботи системи діаризації без вчителя є голосові сегменти згруповані в те чи інше число кластерів.

Пропонований підхід. Автори досліджували ідею адаптації PyAnnote під задачу діаризації з учителем шляхом заміни у базовій структурі системи (рис. 1) модуля кластеризації на модуль класифікації, а також можливість поєднання спільної роботи цих модулів. Структури цих двох варіантів систем діаризації з учителем наведено на рис. 1.

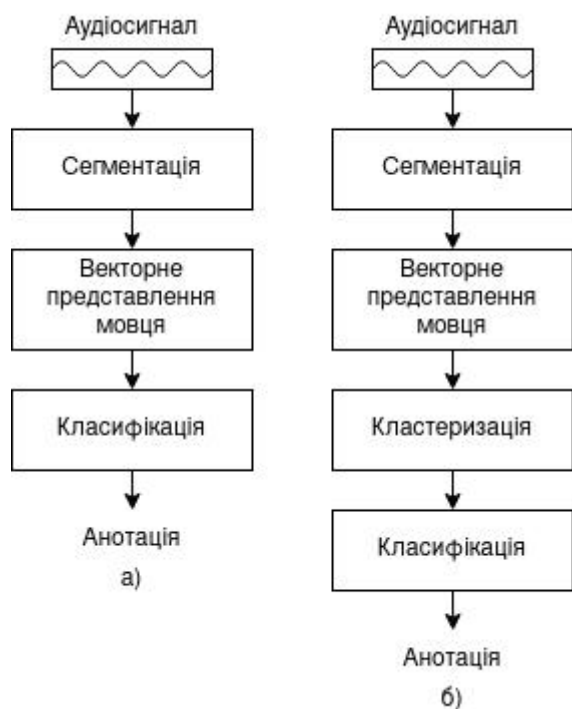


Рис. 1. Структури системи діаризації з учителем на основі PyAnnote:
а – ідентифікація за окремими сегментами; б – ідентифікація на основі групи (кластеру) сегментів

Як зазначалося вище, на виході системи діаризації без учителя вхідний аудіозапис розділений на сегменти та згрупований на кластери, проте невідомо, до якого конкретного

мовця належить конкретний кластер. Застосування класифікатора дасть змогу розпізнавати мовців, або іншими словами, присвоювати певні групи сегментів аудіо до конкретного мовця. Для цього, до базової системи діаризації, додається новий модуль натренований на розпізнавання мовця, а існуючі модулі системи та їхні параметри додатково підлаштовуються для кращого результату діаризації.

Досліджено чотири методи для розпізнавання мовця, зокрема такі поширені у машинному навчанні як випадковий ліс (random forest) і k-найближчих сусідів (k-nearest neighbors). Крім того, автори розробили два спеціалізовані методи класифікації сегментів мови:

відстань до векторного представлення цільового мовця (target speaker embedding) – сегменти аудіо, які відносяться до якогось конкретного мовця, вибираються залежно від відстані між векторним представленням цільового мовця та векторним представленням певного сегменту аудіо. Залежно від наперед заданого порогу, визначається, чи сегмент належить до мовця, чи ні.

Відстань до групи – перед тим як вибрати, які сегменти відносяться до певного мовця, спершу всі сегменти аудіо групуються, тобто по суті виконується діаризація без учителя. Після того, як ембедінги сегментів аудіо згруповано, для кожної групи визначається її центроїд (середнє значення з всіх ембедінгів у групі), а далі, обчислюється відстань від ембедінгу цільового мовця (target speaker) до кожного із центроїдів, тоді обирається найближчий центроїд, і сегменти аудіо його відповідної групи позначаються як сегменти, які належать до цільового мовця.

Принцип проведення експериментів. Кожен з експериментів досліджує вплив кожного із модулів або його параметрів на кінцеву точність діаризації. Тобто, для різних модулів системи відбувається незалежна оптимізація їх параметрів, або навіть заміна методу модуля як такого, причому параметри інших модулів зафіксовано значеннями за замовчуванням. Таким чином, можна оцінити вагу кожного з модулів та вплив його параметрів на точність системи діаризації. Експерименти проводяться як для діаризації без учителя, так і для діаризації з учителем.

Всі експерименти проводяться на одному і тому ж наборі даних – AMI Corpus. AMI Corpus, відкритий набір даних, який містить у собі аудіо- та відеозаписи робочих нарад та засідань, де мовлення є анотовано, і для кожного сегменту анотації присвоєно ідентифікаційний номер мовця, тому ці дані підходять для

діаризації як з вчителем, так і без вчителя. Аудіодані зберігаються у форматі WAV, а анотація – у форматі XML, який перетворюється в формат RTTM для роботи з бібліотекою pyAnnote. Формат RTTM (Rich Transcription Time Marked) – це текстовий формат, який містить інформацію про сегменти та ідентифікацію мовця для кожного з аудіофайлів. Розмір датасету становить 100 годин. Середня тривалість одного аудіо файлу – 2104,48 секунд. Середня тривалість одного анотованого сегменту – 4,1 секунд. Число унікальних мовців – 189 (серед них 65,1 % чоловіки). Середня тривалість аудіо на кожного мовця – 546,96 секунд.

Також для діаризації з учителем, експерименти проводяться для кожного мовця у кожному із аудіозаписів. Наприклад, аудіозапис з 4 мовцями буде аналізуватися по чергово 4 рази і точність оцінюватиметься для кожного учасника окремо.

Метрики для оцінювання точності. Для коректності точність методів з учителем та без учителя обчислювалась на одних і тих самих даних. Було розглянуто метрики які традиційно використовуються в задачах діаризації (Bredin Herve, 2017): F-Mіра виявлення (Detection F-Score), F-Mіра сегментування (Segmentation F-Score), Похибка діаризації (Diarization Error Rate), F-Mіра ідентифікації (Identification F-Score).

Основною метрикою обрано F-Mіру ідентифікації, як таку, що відображає правильність присвоєння ідентифікаторів мовців для кожного із сегментів у аудіозаписі, на відміну від похибки діаризації, що використовує автоматичне зіставлення сегментів, які не прив'язані до якогось із мовців.

Опис виконаних експериментів та представлення їх результатів. У дослідженні було виконано 3 експерименти, які мають на меті дослідити архітектурні питання діаризації з учителем. Перший експеримент мав на меті дослідити посегментний класифікатор (рис. 2, а) Другий експеримент мав на меті дослідити класифікатор для кластеризованих сегментів (рис. 2, б). Третій експеримент мав на меті оцінити оптимальну навчальну вибірку для класифікаторів. На етапі попередніх досліджень встановлено можливість використання у експериментах меншого набору аудіоданих (тривалістю 10 годин), оскільки різниця у результатах моделювання у порівнянні із повним набором (100 год.) не перевищувала відсотка. Це дало змогу заощадити обчислювальні ресурси.

Експеримент 1: Дослідження впливу функцій відстані між векторними представленнями на

точність ідентифікації мовця. Ціль цього експерименту полягає у визначенні, яка із функцій відстані дає найкращий результат за використання діаризації з учителем. Досліджувалися такі функції відстані: Евклідова відстань, відстань Манхетена (Manhattan), відстань Пірсона (Pearsons) та відстань Спірмена (Spearman's).

Функція відстані використовується для ідентифікації мовця, шляхом обчислення відстані між зразковим векторним представлення цього мовця та векторним представленням певного сегменту аудіозапису. Якщо ця відстань є меншою за попередньо встановлений поріг, тоді це означає, що голос на даному сегменті відповідає голосу цього мовця. Оскільки функцій відстані є кілька, є сенс оцінити, яку з них найкраще використати для діаризації з учителем. Архітектура діаризації з учителем у цьому експерименті відповідає ілюстрації на рис. 2, а.

У таблиці 1 наведено результати експерименту 1.

Таблиця 1
Результати дослідження функцій відстані на рівні сегментів

Функція відстані	F-Mіра ідентифікації, %
Euclidean (поріг=7)	58.30 %
Manhattan (поріг=7)	57.95 %
Pearsons (поріг=0.5)	24.41 %
Spearman's (поріг=0.5)	23.64 %

Результати цього експерименту показали, що евклідова відстань та відстань Манхетена краще підходять для діаризації з учителем. Проте обчислення Евклідової відстані є простішим порівняно із обчисленням відстані Манхетена.

Експеримент 2: Дослідження методів групування сегментів (кластеризація). Ціль цього експерименту є дослідження методу вибору кластера, відповідає архітектурі діаризації з учителем, яку зображено на ілюстрації б) на рис. 2.

Цей метод передбачає використання ще одного модуля - кластеризації (clustering), який виконується після створення векторного представлення (embedding) для кожного із сегментів аудіозапису і перед класифікацією створених векторних представлень. Модуль кластеризації об'єднає векторні представлення в групи, кожна з яких належить до якогось мовця на аудіозаписі. На стадії ідентифікації голосу мовця, обчислюється відстань між векторним представленням цього мовця на певному сегменті та

центроїдом кожного із кластерів, і тоді сегмент з голосом цього мовця відповідає кластеру, до якого відстань є найменшою.

Отже, перший крок цього експерименту полягає у визначенні оптимального алгоритму кластеризації/групування. Було досліджено такі алгоритми кластеризації: ієрархічна (Hierarchical), K-середніх (K-Means) та Спектральна (Spectral) кластеризація.

У таблиці 2 наведено результати дослідження алгоритмів кластеризації у методі вибору кластеру.

Таблиця 2
Результати дослідження алгоритмів кластеризації

Алгоритм кластеризації	F-Міра ідентифікації, %
Без кластеризації	58.30 %
Hierarchical (porig=2)	62.35 %
K-Means	63.01 %
Spectral	47.90 %

З результатів цього експерименту можна дійти висновку, що для діаризації з учителем за методом вибору кластерів, ієрархічний алгоритм та алгоритми кластеризації K-Means показують кращий результат ніж спектральний алгоритм кластеризації. Проте для кластеризації доцільно обрати K-Means алгоритм, оскільки його імплементація є значно простішою.

Другий крок цього експерименту полягає у визначенні, яка із функцій відстані дає найкращий результат діаризації з учителем, за методом вибору кластера. Цей крок аналогічний експерименту 1, але його було проведено на рівні кластерів, а не окремих сегментів. Тобто, у методі вибору кластера відстань обчислюється між всіма центроїдами кластерів, які відповідають кожному із голосів на аудіозапису, та векторним представленням певного сегменту аудіозапису.

У таблиці 3 наведені результати дослідження функцій відстані у методі вибору кластеру.

Таблиця 3
Результати дослідження функцій відстані на рівні кластерів

Функція відстані	F-Міра ідентифікації, %
Euclidean	63.01 %
Manhattan	62.75 %
Pearsons	51.43 %
Spearman	53.03 %

Подібно як і у експерименті 1 Евклідова відстань забезпечує кращий результат діаризації і до того не є вимогливою до обчислювальних ресурсів.

Третій та останній крок цього експерименту полягає у перевірці потреби використання класифікатора на основі методу k-найближчих сусідів (k-nearest neighbours), замість функції відстані. Класифікатор k-найближчих сусідів заснований на такій ідеї: після отримання векторних представлень мовців на всіх сегментах аудіозапису та кластеризації отриманих векторних представлень, відбувається навчання класифікатора, де входом є векторне представлення, а виходом – ідентифікатор одного із кластерів. Тоді отриманий навчений класифікатор використовується для визначення відповідності голосу мовця на певному сегменті аудіозапису до певного кластера, який відповідає до голосу одного із мовців присутніх у цьому аудіозаписі.

У таблиці 4 наведено результати дослідження класифікатора K-найближчих сусідів у методі вибору кластеру.

Таблиця 4
Результати дослідження класифікатора k-NN на рівні кластерів

Алгоритм класифікатора	F-Міра ідентифікації, %
Euclidean (+K-Means clustering)	63.01 %
k-NN (+K-Means clustering)	60.74 %

Як видно із експерименту, поєднання класифікації за Евклідовою відстанню та кластеризації за методом K-Means clustering дає кращий результат.

Експеримент 3: Дослідження впливу тривалості зразкового аудіозапису мовця на точність ідентифікації. Ціль цього експерименту полягає у виявленні оптимальної тривалості аудіозапису для додавання в систему діаризації з учителем нового користувача. Фактично на основі цього аудіозапису формується зразкове векторне представлення для конкретного мовця, з яким буде проводитися порівняння вкладень з інших сегментів для задачі ідентифікації. У експерименті досліджувались аудіозаписи тривалістю 10, 20, 30 та 60 секунд. Такі значення обрано з міркувань зручності інтерфейсу для кінцевого користувача (тривалість фраз зручна для запису зразкових фраз і калібрування системи).

У таблиці 5 наведені результати експерименту.

Таблиця 5

Результати дослідження довжини зразкового аудіозапису мовця

Довжина аудіо зразкового мовця, с	F-Міра ідентифікації, %
10 (+ K-Means)	63.01 %
20 (+ K-Means)	64.81 %
30 (+ K-Means)	64.10 %
60 (+ K-Means)	63.49 %

Хоча всі тривалості показали схожі результати, перевагу слід віддати тривалості 20 сек. З результатів цього експерименту можна дійти висновку, що найбільш оптимальною довжиною аудіо зразкового мовця становить 20 секунд. Хоча загалом всі значення в діапазоні 20–60 сек показали прийнятні результати.

Висновки і перспективи подальших досліджень. PyAnnote – одне з найбільш поширених і функціональних рішень в галузі опрацювання аудіосигналів, зокрема діаризації. До основних її переваг над відомими альтернативами можна віднести: імплементація на популярній мові Python, відкритий вихідний код під ліцензією MIT, модульна архітектура з можливістю додавання до системи нових модулів та налаштування параметрів наявних компонент. Крім того, PyAnnote за точністю практично не поступається існуючим комерційним рішенням, таким як IBM Watson чи Google Speech.

Існуючі приклади імплементації бібліотеки PyAnnote заточені під задачу діаризації без учителя (unsupervised). Разом з тим існує можливість розширити функціональність системи і адаптувати PyAnnote до задач діаризації з учителем (supervised), що відкриває можливості ідентифікації мовців. Побудова такої системи і стала предметом дослідження, результати якого представлено в даній статті.

Пропонований в роботі підхід передбачає дві архітектурні реалізації системи ідентифі-

кації мовців – із заміною модуля кластеризації на модуль класифікатора та з поєднанням цих модулів. Фактично в першому випадку здійснюється ідентифікація мовця на рівні окремих сегментів аудіо, а в другому – ідентифікація проводиться на основі груп схожих між собою сегментів об'єднаних в кластери.

З метою дослідження запропонованих архітектур системи ідентифікації мовців було проведено три експерименти, а для оцінювання точності вибрано F-Міру ідентифікації. Перший експеримент мав на меті дослідити точність діаризації за різних варіантів реалізації посегментного класифікатора, а в рамках другого експерименту виконано дослідження оптимального поєднання класифікатора і кластеризатора. Третій експеримент націлений на вибір оптимальної тривалості зразкової вибірки з голосами мовців, необхідної для навчання моделей класифікаторів. Всі дослідження проводилися на відкритому наборі даних – AMI Corpus, який містить розмічені аудіо- та відеозаписи робочих нарад і засідань.

За результатами експериментів встановлено, що найвищу точність для по-сегментної класифікації забезпечує алгоритм на основі Евклідової відстані за порогового значення 7. У випадку архітектури з класифікатором згрупованих сегментів оптимальним алгоритмом кластеризації є K-Means, а оптимальним алгоритмом класифікатора – алгоритм на основі Евклідової відстані. Також встановлено, що оптимальна тривалість зразкового аудіозапису, за яким система зіставляє сегменти для ідентифікації мовця, становить 20 сек.

В подальшому виглядає доцільним провести додаткові дослідження з метою оптимізації інших модулів каналу перетворення PyAnnote (виявлення голосової активності, зміни мовця чи накладання мовлення, обчислення векторного представлення) під задачу діаризації з учителем.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Juang B., Rabiner Lawrence. Automatic Speech Recognition – A Brief History of the Technology Development. 2005.
2. Homayoon Beigi. Fundamentals of Speaker Recognition. New York: Springer. 2011.
3. Anguera Xavier, Bozonnet Simon, Evans Nicholas, та ін. Speaker Diarization: A Review of Recent Research. 2012. IEEE Transactions on Audio, Speech & Language Processing. DOI: 10.1109/TASL.2011.2125954.
4. Li Runxin, Schultz Tanja, Jin Qin. Improving speaker segmentation via speaker identification and text segmentation. 2009.
5. Bredin Herve, Yin Ruiqing, Coria Juan, Gelly Gregory, та ін. Pyannote.Audio: Neural Building Blocks for Speaker Diarization. 2020. DOI: 10.1109/ICASSP40776.2020.9052974.
6. Jin Qin, Laskowski Kornel, Schultz Tanja, Waibel Alex. Speaker segmentation and clustering in meetings. 2004.

7. Tanveer Md, Casabuena Diego, Karlgren Jussi, Jones Rosie. Unsupervised Speaker Diarization that is Agnostic to Language, Overlap-Aware, and Tuning Free. 2022. DOI: 10.21437/Interspeech.2022-10605.
8. Le Lan Gaël, Meignier Sylvain, Charlet Delphine, Deléglise Paul. Speaker diarization with unsupervised training framework. 2016. DOI: 10.1109/ICASSP.2016.7472741.
9. Dawalatabad Nauman, Madikeri Srikanth, Sekhar Chandra, Murthy Hema. Novel Architectures for Unsupervised Information Bottleneck based Speaker Diarization of Meetings. 2020.
10. Zhang Aonan, Wang Quan, Zhu Zhenyao, Paisley John, Wang Chong. Fully Supervised Speaker Diarization. 2019. DOI: 10.1109/ICASSP.2019.8683892.
11. Fini Enrico, Brutti Alessio. Supervised Online Diarization with Sample Mean Loss for Multi-Domain Data. 2020. DOI: 10.1109/ICASSP40776.2020.9053477.
12. Xie Weidi, Nagrani Arsha, Chung Joon Son, Zisserman Andrew. Utterance-level Aggregation for Speaker Recognition in the Wild. 2019. DOI: 10.1109/ICASSP.2019.8683120.
13. Herchovicz Andrey L., Franco Cristiano R., Jasinski Marcio G.. A comparison of cloud-based speech recognition engines. 2019. DOI: 10.14210/cotb.v0n0.p366-375.
14. Ravanelli Mirco, Parcollet Titouan, Plantinga Peter, Rouhe Aku, та ін. SpeechBrain: A General-Purpose Speech Toolkit. 2021.
15. Giannakopoulos Theodoros. pyAudioAnalysis: An Open-Source Python Library for Audio Signal Analysis. 2015. DOI: 10.1371/journal.pone.0144610.
16. Bredin Hervé, Laurent Antoine. End-to-end speaker segmentation for overlap-aware resegmentation. 2021.
17. Wang Keke, Mao Xudong, Wu Hao, Ding Chen, та ін. The ByteDance Speaker Diarization System for the VoxCeleb Speaker Recognition Challenge 2021. 2021.
18. Mao Huanru, McAuley Julian, Cottrell Garrison. Speech Recognition and Multi-Speaker Diarization of Long Conversations. 2020. DOI: 10.21437/Interspeech.2020-3039.
19. Inaguma Hirofumi, Yan Brian, Dalmia Siddharth, Guo Pengcheng, та ін. ESPnet-ST IWSLT 2021 Offline Speech Translation System. 2021.
20. Ueda Yushi, Maiti Soumi, Watanabe Shinji, Zhang Chunlei, та ін. EEND-SS: Joint End-to-End Neural Speaker Diarization and Speech Separation for Flexible Number of Speakers. 2022.
21. Bredin Hervé. pyannote.metrics: A Toolkit for Reproducible Evaluation, Diagnostic, and Error Analysis of Speaker Diarization Systems. 2017. DOI: 10.21437/Interspeech.2017-411.
22. Романюк Андрій. Векторні представлення слів для української мови. *Науковий журнал «Україна Модерна»*. 2019. №27. DOI: 10.30970/uam.2019.27.1062
23. Snyder David, Garcia-Romero Daniel, Sell Gregory, Povey Daniel, Khudanpur Sanjeev. X-Vectors: Robust DNN Embeddings for Speaker Recognition. 2018. DOI: 10.1109/ICASSP.2018.8461375.

REFERENCES:

1. Juang, B. & Rabiner, Lawrence. (2005). Automatic Speech Recognition - A Brief History of the Technology Development.
2. Homayoon, Beigi. (2011) Fundamentals of Speaker Recognition. *New York: Springer*.
3. Anguera, Xavier & Bozonnet, Simon & Evans, Nicholas & Fredouille, Corinne & Friedland, Gerald & Vinyals, Oriol. (2012) Speaker Diarization: A Review of Recent Research. *IEEE Transactions on Audio, Speech & Language Processing*. DOI: 10.1109/TASL.2011.2125954.
4. Li, Runxin & Schultz, Tanja & Jin, Qin. (2009). Improving speaker segmentation via speaker identification and text segmentation.
5. Bredin, Herve & Yin, Ruiqing & Coria, Juan & Gelly, Gregory & Korshunov, Pavel & Lavechin, Marvin & Fustes, Diego & Titeux, Hadrien & Bouaziz, Wassim & Gill, Marie-Philippe. (2020). Pyannote.Audio: Neural Building Blocks for Speaker Diarization. DOI: 10.1109/ICASSP40776.2020.9052974.
6. Jin, Qin & Laskowski, Kornel & Schultz, Tanja & Waibel, Alex. (2004). Speaker segmentation and clustering in meetings.
7. Tanveer, Md & Casabuena, Diego & Karlgren, Jussi & Jones, Rosie. (2022). Unsupervised Speaker Diarization that is Agnostic to Language, Overlap-Aware, and Tuning Free. DOI: 10.21437/Interspeech.2022-10605.
8. Le, Lan Gaël & Meignier, Sylvain & Charlet, Delphine & Deléglise, Paul. (2016). Speaker diarization with unsupervised training framework. DOI: 10.1109/ICASSP.2016.7472741.
9. Dawalatabad, Nauman & Madikeri, Srikanth & Sekhar, Chandra & Murthy, Hema. (2020). Novel Architectures for Unsupervised Information Bottleneck based Speaker Diarization of Meetings.

10. Zhang, Aonan & Wang, Quan & Zhu, Zhenyao & Paisley, John & Wang, Chong. (2019). Fully Supervised Speaker Diarization. DOI: 10.1109/ICASSP.2019.8683892.
11. Fini, Enrico & Brutti, Alessio. (2020). Supervised Online Diarization with Sample Mean Loss for Multi-Domain Data. DOI: 10.1109/ICASSP40776.2020.9053477.
12. Xie, Weidi & Nagrani, Arsha & Chung, Joon, Son & Zisserman, Andrew. (2019). Utterance-level Aggregation for Speaker Recognition in the Wild. DOI: 10.1109/ICASSP.2019.8683120.
13. Herchovnicz, Andrey L. & Franco, Cristiano R. & Jasinski, Marcio G.. (2019). A comparison of cloud-based speech recognition engines. DOI: 10.14210/cotb.v0n0.p366-375.
14. Ravanelli, Mirco & Parcollet, Titouan & Plantinga, Peter & Rouhe, Aku & Cornell, Samuele & Lugosch, Loren & Subakan, Cem & Dawalatabad, Nauman & Heba, Abdelwahab & Zhong, Jianyuan & Chou, Ju-Chieh & Yeh, Sung-Lin & Fu, Szu-Wei & Liao, Chien-Feng & Rastorgueva, Elena & Grondin, François & Aris, William & Na, Hwidong & Gao, Yan & Bengio, Y. (2021). SpeechBrain: A General-Purpose Speech Toolkit.
15. Giannakopoulos, Theodoros. (2015). pyAudioAnalysis: An Open-Source Python Library for Audio Signal Analysis. DOI: 10.1371/journal.pone.0144610.
16. Bredin, Hervé & Laurent, Antoine. (2021). End-to-end speaker segmentation for overlap-aware resegmentation.
17. Wang, Keke & Mao, Xudong & Wu, Hao & Ding, Chen & Shang, Chuxiang & Xia, Rui & Wang, Yuxuan. (2021). The ByteDance Speaker Diarization System for the VoxCeleb Speaker Recognition Challenge 2021.
18. Mao, Huanru & McAuley, Julian & Cottrell, Garrison. (2020). Speech Recognition and Multi-Speaker Diarization of Long Conversations. DOI: 10.21437/Interspeech.2020-3039.
19. Inaguma, Hirofumi & Yan, Brian & Dalmia, Siddharth & Guo, Pengcheng & Shi, Jiatong & Duh, Kevin & Watanabe, Shinji. (2021). ESPnet-ST IWSLT 2021 Offline Speech Translation System.
20. Ueda, Yushi & Maiti, Soumi & Watanabe, Shinji & Zhang, Chunlei & Yu, Meng & Zhang, Shi-Xiong & Xu, Yong. (2022). EEND-SS: Joint End-to-End Neural Speaker Diarization and Speech Separation for Flexible Number of Speakers.
21. Bredin, Hervé. (2017). pyannote.metrics: A Toolkit for Reproducible Evaluation, Diagnostic, and Error Analysis of Speaker Diarization Systems. DOI: 10.21437/Interspeech.2017-411.
22. Romanyuk, Andriy. (2019). Vektorni predstavlennia sliv dlia ukrainskoi movy [Vector representation of words for Ukrainian language]. *Naukovyi zhurnal «Ukraina Moderna»*. 27 [in Ukrainian]. DOI: 10.30970/uam.2019.27.1062
23. Snyder, David & Garcia-Romero, Daniel & Sell, Gregory & Povey, Daniel & Khudanpur, Sanjeev. (2018). X-Vectors: Robust DNN Embeddings for Speaker Recognition. DOI: 10.1109/ICASSP.2018.8461375.

УДК 681.5

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-2>

Юрій БУЦЕНКО

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри математичного аналізу та теорії ймовірностей, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056, armchairdoc@ukr.net

ORCID: 0000-0003-4806-9587

Володимир ЛАБЖИНСЬКИЙ

кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056, sergeant@aprodos.kpi.ua

ORCID: 0000-0003-0970-770X

Бібліографічний опис статті: Буценко Ю., Лабжинський, В. (2022). Машинний аналіз неконтрольованих параметрів промислових систем в режимі реального часу на основі нечіткої логіки. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 12–23, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-2>

МАШИННИЙ АНАЛІЗ НЕКОНТРОЛЬОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОМИСЛОВИХ СИСТЕМ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Проведено комплексне дослідження та визначено загальні теоретичні засади використання машинного аналізу неконтрольованих параметрів промислових систем в режимі реального часу на основі теорії нечіткої логіки. В основу запропонованої математичної моделі було покладено класифікацію, яка включає у себе три типи нечітких множин: нечітку множину першого порядку, нечітку множину другого порядку та інтервальну нечітку множину другого порядку. Для кожного зі згаданих типів множин було побудовано математичний апарат, що повною мірою відображає її особливості, але при цьому характеризується мінімальною ресурсомісткістю при роботі у режимі реального часу.

Метою дослідження є побудова комплексної методології розроблення FLS-бібліотек, математичний апарат якої передбачає застосування правила Мамдані та коефіцієнтів Такагі-Сугено для нечіткої множини першого порядку, нечіткої множини другого порядку та інтервальної нечіткої множини другого порядку.

Розроблено методику побудови бібліотек для систем нечіткої логіки, яка складається з трьох етапів. Першим етапом є фазифікація, що переводить вхідний набір значень у нечітку множину та передус етапу логічного виведення, який відповідає за представлення вхідного набору даних відповідно до встановленої системи правил. Останнім етапом є дефазифікація, що переводить нечітку множину вихідних даних у набір даних, які можуть бути використані системою керування промисловим комплексом. Визначено ефективність використання при вдосконаленні базової математичної моделі формулювання нечіткого правила для системи нечіткої логіки правила Мамдані та набору коефіцієнтів Такагі-Сугено. Розроблено узагальнений принцип побудови моделі формулювання нечіткого правила для системи нечіткої логіки.

Розроблена комплексна схема сценарію використання бібліотек систем нечіткої логіки, що може бути використана у мікроконтролерах роботизованих промислових систем, і включає у себе конфігурацію бібліотек та побудову системних алгоритмів.

Показано, що з допомогою представленої математичної моделі на базі однієї програмної платформи можна побудувати алгоритми аналізу неконтрольованих параметрів в режимі реального часу з різними конфігураціями, що включають у себе кілька бібліотек систем нечіткої логіки.

Ключові слова: нечітка логіка, фазифікація, інтервальна множина, правило Мамдані, коефіцієнти Такагі-Сугено.

Yurii BUTSENKO

Doctor of Philosophy in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Mathematical Analysis and Probabilities Theory, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky», Peremohy Avenue, 37, Kyiv, Ukraine, 03056, armchairdoc@ukr.net

ORCID: 0000-0003-4806-9587

Volodymyr LABZHYNISKIY

PhD, Associate Professor at the Department of Design Automation of Energy Processes and Systems, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named Igor Sikorsky», Peremohy Avenue, 37, Kyiv, Ukraine, 03056, sergeant@aprodos.kpi.ua
ORCID: 0000-0003-0970-770X

To cite this article: Butsenko Yu., Labzhunskiy, V. (2022). Mashynnyi analiz nekontrolovanykh parametriv promyslovykh system v rezhymy realnoho chasu na osnovi nechitkoi lohiky [Machine analysis of uncontrolled parameters of industrial systems in real time based on fuzzy logic]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 12–23, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-2>

MACHINE ANALYSIS OF UNCONTROLLED PARAMETERS OF INDUSTRIAL SYSTEMS IN REAL-TIME APPLICATIONS BASED ON FUZZY LOGIC

A comprehensive study was conducted and the general theoretical principles of using machine analysis of uncontrolled parameters of industrial systems in real time based on the theory of fuzzy logic were determined. The proposed mathematical model was based on the classification, which includes three types of fuzzy sets: fuzzy set of the first order, fuzzy set of the second order and interval fuzzy set of the second order. For each of the mentioned types of sets, a mathematical apparatus was built that fully reflects its features, but at the same time is characterized by minimal resource consumption when working in real time.

The aim of the study is to build a comprehensive methodology for the development of FLS-libraries, the mathematical apparatus of which involves the application of the Mamdani rule and Takagi-Sugeno coefficients for the first-order fuzzy set, second-order fuzzy set and interval fuzzy set of the second order.

A methodology for building libraries for fuzzy logic systems has been developed, which consists of three stages. The first stage is phasing, which translates the input set of values into a fuzzy set and precedes the stage of logical inference, which is responsible for representing the input data set in accordance with the established system of rules. The last stage is defuzzification, which converts the fuzzy set of output data into a set of data that can be used by the industrial complex control system. The effectiveness of using the Mamdani rule and the set of Takagi-Sugeno coefficients in improving the basic mathematical model of formulating a fuzzy rule for a fuzzy logic system is determined. A generalized principle of building a model of formulating a fuzzy rule for a fuzzy logic system has been developed.

A comprehensive scheme of the scenario of using libraries of fuzzy logic systems, which can be used in microcontrollers of robotic industrial systems, and includes the configuration of libraries and the construction of system algorithms, has been developed.

It is shown that with the help of the presented mathematical model on the basis of one software platform it is possible to build algorithms for the analysis of uncontrolled parameters in real time with different configurations, including several libraries of fuzzy logic systems.

Key words: fuzzy logic, phasing, interval set, Mamdani rule, Takagi-Sugeno coefficients.

1. Вступ.

Математичне моделювання некон-трольованих параметрів промислових систем у режимі реального часу є нетривіальною задачею. Процес виконання стандартних машинних алгоритмів, що працюють з невизначеним набором величин, є ресурсомістким з точки зору апаратного комплексу, а також вимагає значних часових витрат (Zgurovsky et al., 2017). Ефективним рішенням цієї проблеми є застосування систем нечіткої логіки (FLS: Fuzzy Logic Systems), що працюють з нечіткими множинами даних або з наборами даних, що пройшли процедуру фазифікації (Cardnes-Widma et al., 2019; Zadeh, 1975). Теорія нечітких множин була від початку запропонована як підхід, що поширює математичний апарат на аналіз лінгвістичних виразів та обрахунок ступенів істинності через показники

належності. Подальші дослідження показали, що коло задач теорії нечітких множин може бути поширено на аналіз поведінки складної системи, для якої неможливо розробити адекватну математичну модель з чітким визначенням функцій та їх показників. Таким чином, були запропоновані FLS другого порядку, що здатні ефективно обробляти невизначеності у вхідному наборі даних (Eich, 2020; Kara et al., 2013; Mendel, 2001), що надалі було використано при розробленні систем керування індустріальними роботизованими комплексами (Mendel, 2001; Sahab et al., 2011; Miyajima, et al., 2016; Mendel, et al., 2016; Li, et al., 2007; Biglarbejan, et al., 2011; Benetar, et al., 2013; Madhava, et al., 2016; Bakluti, et al., 2009; Guarino, et. Al, 2007; Oich, 2011; Lucian, et al., 2011). У той же час слід зазначити, що методологія розроблення контролерів

нечіткої логіки (FLC: Fuzzy Logic Controllers) є технологічно складною задачею, причому не існує універсального інструментарію, що міг би спростити реалізацію контролерів зазначеного типу. Задача побудови цієї методології розроблення, особливо для контролерів, що працюють з невизначеними множинами другого порядку є актуальною задачею, що становить як теоретичну, так і практичну значимість. На сьогоднішній день існують спеціалізовані середовища для розроблення FLS-бібліотек Lucian, et al., 2011; Rusu-Angel, et al., 2012; Koch, et al., 2008; Resnik, 1997; Patira, 1996; Serrano, et al., 2015; Mendel, 2009), але перспективи їх застосування обмежені класом контролеру, зокрема вони не підтримують роботу з інтервальними нечіткими множинами другого порядку та коефіцієнтами Такагі-Сугено.

Таким чином невирішеною частиною задачі дослідження є побудова комплексної методології розроблення FLS-бібліотек (у тому разі і FLC-бібліотек). Це надасть широкі можливості для роботи з актуальними для сучасних промислових систем класами контролерів та забезпечить необхідну функціональність для їх проектування і впровадження. Для цього необхідно запропонувати системний підхід до впровадження універсальної і конфігурованої бібліотеки систем нечіткої логіки. Математичний апарат у такому разі включає у себе застосування правила Мамдані (Xiang, 2009; Mamdami, 1975; Granter, et al., 2010) для нечіткої множини першого порядку, нечіткої множини другого порядку та інтервальної нечіткої множини другого порядку. Крім того, має бути застосована методика, що базується на коефіцієнтах Такагі-Сугено (Ma, et al., 2011). Розроблення зазначеної методології надасть можливість систематизувати процес моделювання архітектури програмного забезпечення, на базі загальної структури та вдосконаленої схеми FLS-бібліотеки. Отримані рішення можуть бути використані для контролерів роботизованих промислових систем на основі об'єктно-орієнтованої мови програмування та діаграм уніфікованої мова моделювання (UML: Unified Modeling Language) (Ma, et al., 2011).

Для створення модульної бібліотеки необхідно використовувати систему нечіткої логіки як єдиний клас, який охоплює інші класи функцій рівнів належності, фазифікації, логічного виведення і дефазифікації. Крім того, важливо визначити ефективність у математичній моделі нечіткої множини першого порядку, нечіткої множини другого порядку або інтервальної

нечіткої множини другого порядку відповідно до типу поставленої задачі. Так для інтервальної нечіткої множини другого порядку пропонується використати методологію агрегування та операцію редукції моделі (type reduction) (Ma, et al., 2011; Valashek-Babichenska, 2010). Налаштування конфігурації FLS-бібліотеки, що включає у себе набори входів та виходів, пропонується встановлювати в автономному режимі за допомогою міжплатформного графічного інтерфейсу, що суттєво спрощує задачу застосування розробленого інструментарію.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми.

У роботі наведено результати досліджень за темою побудови алгоритмів машинного аналізу неконтрольованих параметрів промислових систем в режимі реального часу (Zgurovsky, et al., 2017) включав у себе аналіз принципів математичного моделювання у вказаній галузі (Cardnes-Widma, et al., 2019). Так, у роботі (Zadeh, 1975) розглядаються загальні принципи роботи з нечіткими множинами даних або з наборами даних, що пройшли процедуру фазифікації.

Проведений аналіз (Eich, et al., 2020) включав у себе дослідження методів застосування теорії нечітких множин при роботі з широким колом проблем. Зокрема, у роботі (Kara, et al., 2013) були розглянуті задача поширення математичного моделювання на аналіз лінгвістичних виразів, надалі були визначено особливості обрахунку ступенів істинності через показники належності (Mendel, 2001) та аналіз поведінки складної системи (Sahab, et al., 2011). Особливість розглянутих підходів полягала у тому, що математичне моделювання цільових функцій розглядалося як ресурсомістка задача або було принципово неможливим. Значна увага була приділена FLS другого порядку (Miyajima, et al., 2016), як математичному апарату, який здатний ефективно обробляти невизначеності показників представлених вхідним набором даних (Mendel, et al., 2016). Показано, що при розробленні систем керування індустріальними роботизованими комплексами (Li, 2007), які працюють у режимі реального часу в умовах невизначеності середовища (Biglarbejan, et al., 2011), більш перспективним є застосування інтервальних FLS другого порядку (Benetar, et al., 2013). Такі FLS характеризуються меншими вимогами до програмно-апаратної платформи (Madhava, et al., 2016), на базі якої реалізуються системи зазначеного типу.

При цьому залишається невирішеною задача побудови методології розроблення FLC

(Bakluti, et al., 2009) та відповідного інструментарію математичного моделювання, що можна використовувати при реалізації контролерів (Guarino, et al., 2007). Як було показано у роботі (Oich, 2011) рішення у даному випадку найбільш важливо для роботи з невизначеними множинами другого порядку, а також інтервальними невизначеними множинами другого порядку (Lucian, et al., 2011). Розглянуто дослідження, що визначають ефективність роботи з середовищами для розроблення FLS-бібліотек (Rusu-Angel, et al., 2012), у котрих вказано на перспективи їх застосування окремими класами контролерів, ефективність роботи з коефіцієнтами Такагі-Сугено (Koch, et al., 2008) та загальну універсальність (Resnik, 1997). Було показано, що для створення модульної бібліотеки необхідно використовувати систему нечіткої логіки як єдиний клас, що охоплює класи функцій рівнів належності (Patira, 1996), фазифікації (Serrano, et al., 2015), логічного виведення (Mendel, 2009) і дефазифікації (Xiang, 2009). З іншого боку, для інтервальної нечіткої множини другого порядку також можливо застосувати методологію агрегування і операцію редукції моделі (Mamdani, 1975).

Визначення належного математичного апарату включало у себе ознайомлення з роботами, що спеціалізуються на особливостях побудови конфігурованої бібліотеки систем нечіткої логіки на базі правила Мамдані (Granter, et al., 2010) Іншим підходом є використання коефіцієнтів Такагі-Сугено (Valashek-Babichevska, 2010) для нечіткої множини першого порядку, нечіткої множини другого порядку та інтервальної нечіткої множини другого порядку. Крім того, для подальшого визначення загальної структури та вдосконаленої FLS-бібліотеки, контролерів промислових систем, було проведено аналіз робіт із застосування у цій галузі об'єктно-орієнтованої мови програмування та UML-діаграм (Ma., et al., 2011).

Таким чином, необхідно, вказати на необхідність побудови комплексної методології розроблення FLS-бібліотек, на базі яких можливо ефективно працювати з актуальними класами контролерів та забезпечити необхідну функціональність.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є побудова комплексної методології розроблення FLS-бібліотек, математичний апарат якої передбачає застосування правила Мамдані та коефіцієнтів Такагі-Сугено для нечіткої множини першого порядку, нечіткої множини другого порядку та інтервальної нечіткої множини другого порядку.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- визначити вимоги до систем керування роботизованими комплексами;
- узагальнити математичний апарат, що базується на теорії нечітких множин та є актуальним при розробленні систем керування роботизованими промисловими комплексами;
- побудувати базову модель формулювання нечіткого правила для системи нечіткої логіки;
- побудова узагальненої схеми сценарію використання FLS-бібліотек та конфігурації FLS-бібліотеки;
- розробити методіку побудови модульної бібліотеки на базі алгоритмів фазифікації, логічного виведення та дефазифікації FLS-бібліотеки.

4. Методи розроблення методології на основі теорії нечітких множин

У дослідженні були використані сучасні методи математичного моделювання на базі нечітких множин, зокрема:

- математичний апарат на базі нечіткої множини першого порядку;
- математичний апарат на базі нечіткої множини другого порядку;
- математичний апарат на базі інтервальної нечіткої множини другого порядку;
- методи фазифікації, логічного виведення та дефазифікації;
- формулювання нечіткого правила для системи нечіткої логіки;
- сценарій використання FLS-бібліотек;
- схема конфігурації FLS-бібліотеки;
- методи визначення конфігурації FLS-бібліотек через FLS-структури, що включають у себе набори входів та виходів;
- міжплатформний графічний інтерфейс;
- методологія агрегування;
- операція редукції моделі;
- методи ручного конфігурування шляхом редагування файлу конфігурації, представленому у форматі XML.

5. Результати дослідження систем аналізу на основі нечіткої логіки

5.1. Побудова математичної моделі на основі нечітких множин

Розроблення математичного апарату, що базується на теорії нечітких множин має починатися з визначення основних елементів, що будуть надалі застосовані при використанні цього апарату. У рамках математичної моделі, що використовувалась при проведенні цього дослідження, було запропоновано взяти за основу загально прийняту класифікацію. Зазначена класифікація включає у себе два типи

нечітких множин, і для кожного з типів побудувати систему рівнянь, що повною мірою відображає його особливості (Zgurovski, et al., 2017; Cardnes-Widma, et al., 2019).

Нехай F_1 є нечіткою множиною першого порядку (type-1 fuzzy set), що включає у себе сам набір елементів x та функцію $m_{F_1}(x)$, яка визначає їх рівні належності (corresponding membership values)

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = \sum_x (x, m_{F_1}(x)) \\ \left[\begin{array}{l} x \in X \\ m_{F_1}(x) \in [0;1] \end{array} \right. \end{array} \right. , \quad (1)$$

де X відповідає повному набору елементів, що розглядаються у межах математичного моделювання, а алгебраїчна сума $\sum(x, m_{F_1}(x))$ відповідає поняттю колекції множини об'єктів (collection). При побудові програмних алгоритмів машинного аналізу це використовується як клас для роботи з множиною об'єктів (Zadeh, 1975).

У свою чергу, нечітка множина другого порядку F_2 включає у себе набір елементів x , показник первинної належності (primary membership value) та функцію вторинної належності $m_{F_2}(x, u)$ яка як аргументи використовує два попередні показники. Визначення нечіткої множини другого порядку та повний набір обмежень, можуть бути наведені у наступній формі (Eich, 2020; Kara et al., 2013; Mendel, 2001):

$$\left\{ \begin{array}{l} F_2 = \sum_{u(x)} \sum_x ((x, u(x)), m_{F_2}(x, u(x))) \\ \left[\begin{array}{l} x \in X \\ m_{F_2}(x, u(x)) \in [0;1] \\ u(x) \in J(x) \\ J(x) \subseteq [0;1] \end{array} \right. \end{array} \right. , \quad (2)$$

де $J(x)$ становить повний набір значень показника первинної належності для заданого елемента нечіткої множини x .

Слід також зазначити, що у випадку коли для нечіткої множини другого порядку виконується наступна рівність:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{F_2}(x, u) = 1 \\ \left[\begin{array}{l} \forall x \in X \\ \forall u(x) \in J(x) \end{array} \right. \end{array} \right. , \quad (3)$$

таку множину слід відносити до інтервальної нечіткої множини другого порядку F_{2i} . Для неперервних значень елементів множин X та $J(x)$ функція F_{2i} визначається як:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{2i} = \int \left(\frac{\int \frac{du}{u(x)}}{x} \right) dx \\ \left[\begin{array}{l} x \in X \\ u(x) \in J(x) \\ J(x) \subseteq [0;1] \end{array} \right. \end{array} \right. , \quad (4)$$

Аналогічно, для дискретних значень елементів множин X та $J(x)$ та множини кортежів функція F_{2i} може бути наведена у такому вигляді (Sahab, et al., 2011; Miyajima, et al., 2016; Mendel, et al., 2006; Li, et al., 2007):

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{2i} = \sum_x \left(\frac{\sum_{J(x)} \frac{1}{u(x)}}{x} \right) = ((x, u(x)), 1) \\ \left[\begin{array}{l} x \in X \\ u(x) \in J(x) \\ J(x) \subseteq [0;1] \end{array} \right. \end{array} \right. . \quad (5)$$

За допомогою F_{2i} так само, як і на базі F_2 , можна визначати рівень невизначеності належності елементів, але використання інтервальної множини надає можливість спростити математичний апарат (Biglarbejan, et al., 2011; Benetar, et al., 2013; Madhava, et al., 2016; Bakluti, et al., 2009; Guarino, et. Al, 2007; Oich, 2011; Lucian, et al., 2011).

Розроблення FLS для нечітких множин як першого так і другого порядку включає у себе наступні етапи (Rusu-Angel, et al., 2012; Koch, et al., 2008; Resnik, 1997; Patira, 1996; Serrano, et al., 2015; Mendel, 2009):

– фазифікацію, як процес, що за допомогою функції визначення рівнів належності переводить вхідний набір значень у нечітку множину;

– логічне виведення, що відповідає за процес відображення вхідного набору даних, представленого у вигляді нечіткої множини, у вихідний набір даних, що також представлений у вигляді нечіткої множини, відповідно до встановленої системи правил;

– дефазифікацію, як процес, що переводить нечітку множину вихідних даних у набір даних, які можна використовувати надалі.

У рамках цієї моделі співвідношення між наборами входів та виходів системи може бути визначено на основі правила Мамдані для FLS (Xiang, 2009; Mamdani, 1975). Нехай система складається з P входів – набір $\{x_1, x_2, \dots, x_p, \dots, x_P\}$ і Q виходів – набір $\{y_1, y_2, \dots, y_p, \dots, y_Q\}$. Тоді можна сказати, що окреме правило R^i виконується,

якщо за умови, коли кожен вхід x_p відповідає антецеденту нечіткої множини A_p^i , кожен вихід y_p відповідає консеквенту нечіткої множини C_q^i (рис. 1).

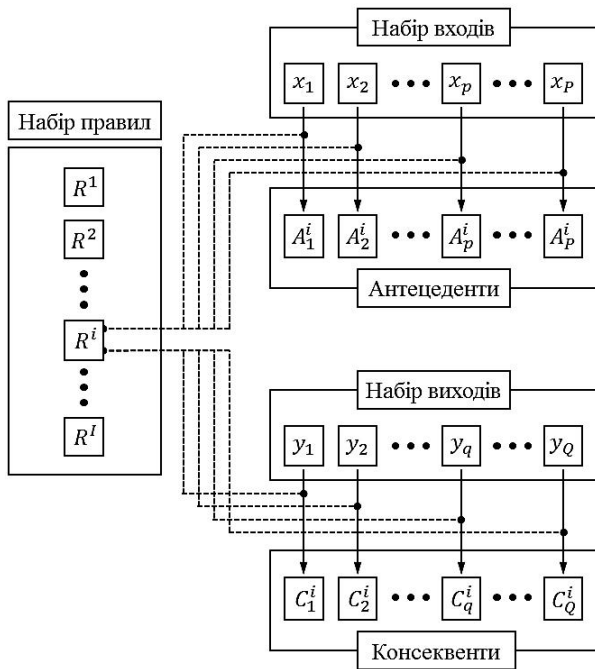


Рис. 1. Базова модель формулювання нечіткого правила для системи FLS

Таким чином, виконання окремого правила R^i можна визначити як t -норму ініціалізації множини антецедентів A_p^i .

Подальший розвиток базової математичної моделі формулювання нечіткого правила для системи FLS зумовлює використання набору коефіцієнтів Такагі-Сугено $c_{p,1}^i$ та $c_{p,q}^i$ (Valashek-Babichavska, 2010; Ma, et al., 2011). Такий набір відповідає за визначення набору виходів y_q системи, що моделюється, у відповідності до набору входів x_p та окремого нечіткого правила R^i :

$$\begin{cases} y_1^i = c_{0,1}^i + c_{1,1}^i \cdot x_1 + c_{2,1}^i \cdot x_2 + \dots + c_{p,1}^i \cdot x_p + \dots + c_{p,1}^i \cdot x_p \\ y_2^i = c_{0,2}^i + c_{1,2}^i \cdot x_1 + c_{2,2}^i \cdot x_2 + \dots + c_{p,2}^i \cdot x_p + \dots + c_{p,2}^i \cdot x_p \\ \dots \\ y_q^i = c_{0,q}^i + c_{1,q}^i \cdot x_1 + c_{2,q}^i \cdot x_2 + \dots + c_{p,q}^i \cdot x_p + \dots + c_{p,q}^i \cdot x_p \\ \dots \\ y_1^i = c_{0,q}^i + c_{1,q}^i \cdot x_1 + c_{2,q}^i \cdot x_2 + \dots + c_{p,q}^i \cdot x_p + \dots + c_{p,q}^i \cdot x_p \end{cases} \quad (6)$$

Надалі для нечіткої множини першого порядку слід використати метод дефазифікації на основі зваженого середнього, а для множини другого порядку – алгоритми, які працюють з невизначеними границями (uncertainty bounds output processing). Такий підхід надасть змогу отримати чіткі значення на виході FLS.

5. 2. Побудова програмних алгоритмів на базі FLS-бібліотек

Розроблення математичного апарату є першим етапом створення алгоритмів машинного аналізу неконтрольованих параметрів промислових систем в режимі реального часу на основі нечіткої логіки, наступні етапи включають у себе розроблення системного програмного забезпечення (ПЗ). Узагальнена схема сценарію використання FLS-бібліотек при побудові модуля керування роботизованими промисловими системами представлена на рис. 2.

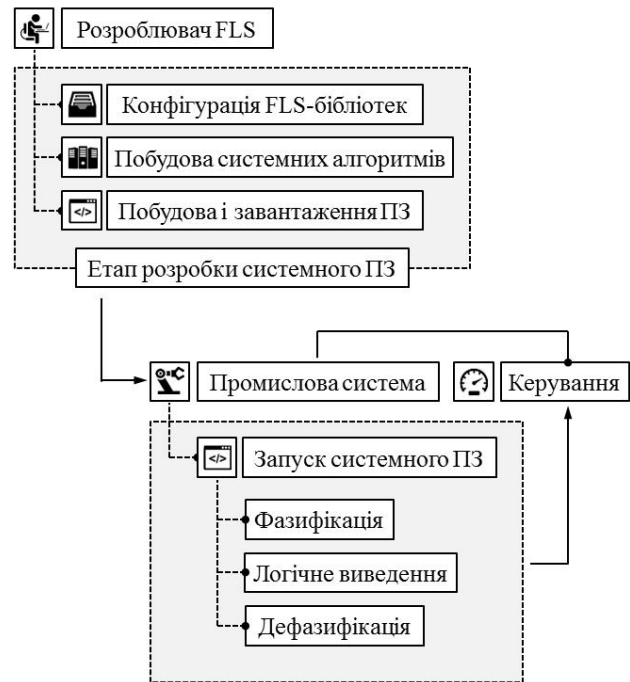


Рис. 2. Узагальнена схема сценарію використання FLS-бібліотек

Представлена діаграма базується на наборі етапів розроблення системного ПЗ, що використовується у мікроконтролерах роботизованих промислових систем, яка включає у себе конфігурацію FLS-бібліотек, побудову системних алгоритмів і ПЗ. Відповідно, етапи фазифікації, логічного виведення і дефазифікації, на основі яких здійснюється контроль за нечіткими правилами, розкриваються під час використання ПЗ, що включає у себе FLS-бібліотеки.

Узагальнена схема конфігурації FLS-бібліотеки включає у себе наступні набори (рис. 3):

- FLS, що містить механізм формування логічного виведення, методи логічної кон'юнкції та диз'юнкції, метод агрегації даних, метод імплікації, метод обробки вихідних даних, правила, а також має включати тип системи;

- множина входів, що складається з набору даних та функції, яка визначає рівні належності елементів цього набору;
- множина виходів, елементи якої визначають з допомогою правила Мамдані або коефіцієнтів Такагі-Сугено;
- множина виходів Такагі-Сугено, що можуть бути отримані для нечітких множин першого порядку або інтервальних нечітких множини другого порядку;

- множина правил, що складається з антецедентів нечіткої множини, консеквентів нечіткої множини, ваг та логіки зв'язків;

- набір функцій рівнів належності елементів набору, що складається з наборів функцій для нечітких множин першого порядку або інтервальних нечітких множин другого порядку.

Запропонована схема надає можливість розробити універсальну методику налаштування конфігурації FLS-бібліотек.

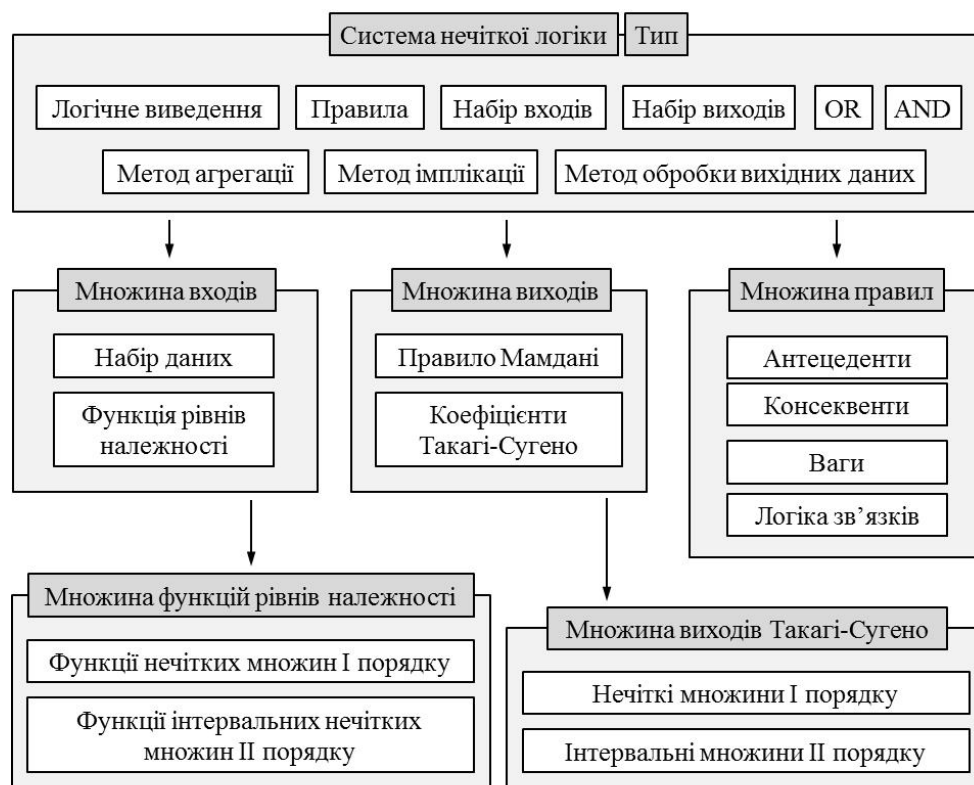


Рис. 3. Узагальнена схема конфігурації FLS-бібліотеки

5. 3. Налаштування конфігурації та структури FLS-бібліотек

Конфігурація FLS-бібліотек, тобто властивості FLS-структур, що включають у себе набори входів та виходів, встановлюється в автономному режимі за допомогою міжплатформного графічного інтерфейсу (GUI-редактора). Іншим підходом може бути редагування файлу конфігурації, представленому у форматі розширюваної мови розмітки (XML) у ручному режимі. Збережений файл конфігурації надалі може бути завантажений до розробленої FLS-бібліотеки, що дозволяє використовувати розроблений підхід у інших реалізаціях алгоритмів машинного аналізу неконтрольованих параметрів промислових систем.

FLS-бібліотеки розробляють на основі об'єктно-орієнтованого підходу, у рамках якого застосовуються класи, що включають у себе

методи для виконання операцій фазифікації, логічного виведення та дефазифікації для FLS першого та другого порядку. Таким чином, на базі однієї програмної платформи можна побудувати FLC-алгоритми аналізу неконтрольованих параметрів в режимі реального часу з різними конфігураціями, що включають у себе кілька FLS-бібліотек. Виділення функції визначення рівнів належності та методів фазифікації, логічного виведення і дефазифікації як окремих класів з власними атрибутами надає можливість виконувати кожну з FLS-операцій незалежно від інших. При цьому у FLS-бібліотеці чіткі входи і чіткі виходи представлені як елементи вектора, отже чіткі вхідні дані передаються до операцій FLS-бібліотеки як вектор, і всі чіткі виходи з операцій FLS-бібліотеки також є векторами. Розглянемо складові методики побудови FLS-бібліотеки

для машинного аналізу неконтрольованих параметрів промислових систем в режимі реального часу на основі об'єктно-орієнтованого підходу. У запропонованому методі, базовий клас включає у себе підклас, який відповідає за операцію фазифікації (рис. 4). Вказаний підклас у свою чергу включає у себе підкласи функції визначення рівнів належності для нечіткої множини першого порядку та інтервальної нечіткої множини другого порядку.

Підклас функції логічного виведення, у свою чергу, будується на основі правил конфігурації, методу виконання нечітких логічних операцій, методів імплікації і агрегації, а також метод відображення вхідного набору нечітких даних у вихідний набір нечітких даних. Для того, щоб вихідний набір нечітких даних був придатним для дефазифікації, процес імплікації має виконуватися для кожного правила, що стосується опису вихідного набору, а процес агрегації – для кожного FLS-виходу. У запропонованій структурі FLS-бібліотеки для виконання операції нечіткого виводу клас має формуватися на основі класу логічного виведення. Таким чином, клас логічного виведення складається з підкласів функції визначення рівнів належності для

цій, методів імплікації і агрегації, а також метод відображення вхідного набору нечітких даних у вихідний набір нечітких даних. Для того, щоб вихідний набір нечітких даних був придатним для дефазифікації, процес імплікації має виконуватися для кожного правила, що стосується опису вихідного набору, а процес агрегації – для кожного FLS-виходу. У запропонованій структурі FLS-бібліотеки для виконання операції нечіткого виводу клас має формуватися на основі класу логічного виведення. Таким чином, клас логічного виведення складається з підкласів функції визначення рівнів належності для

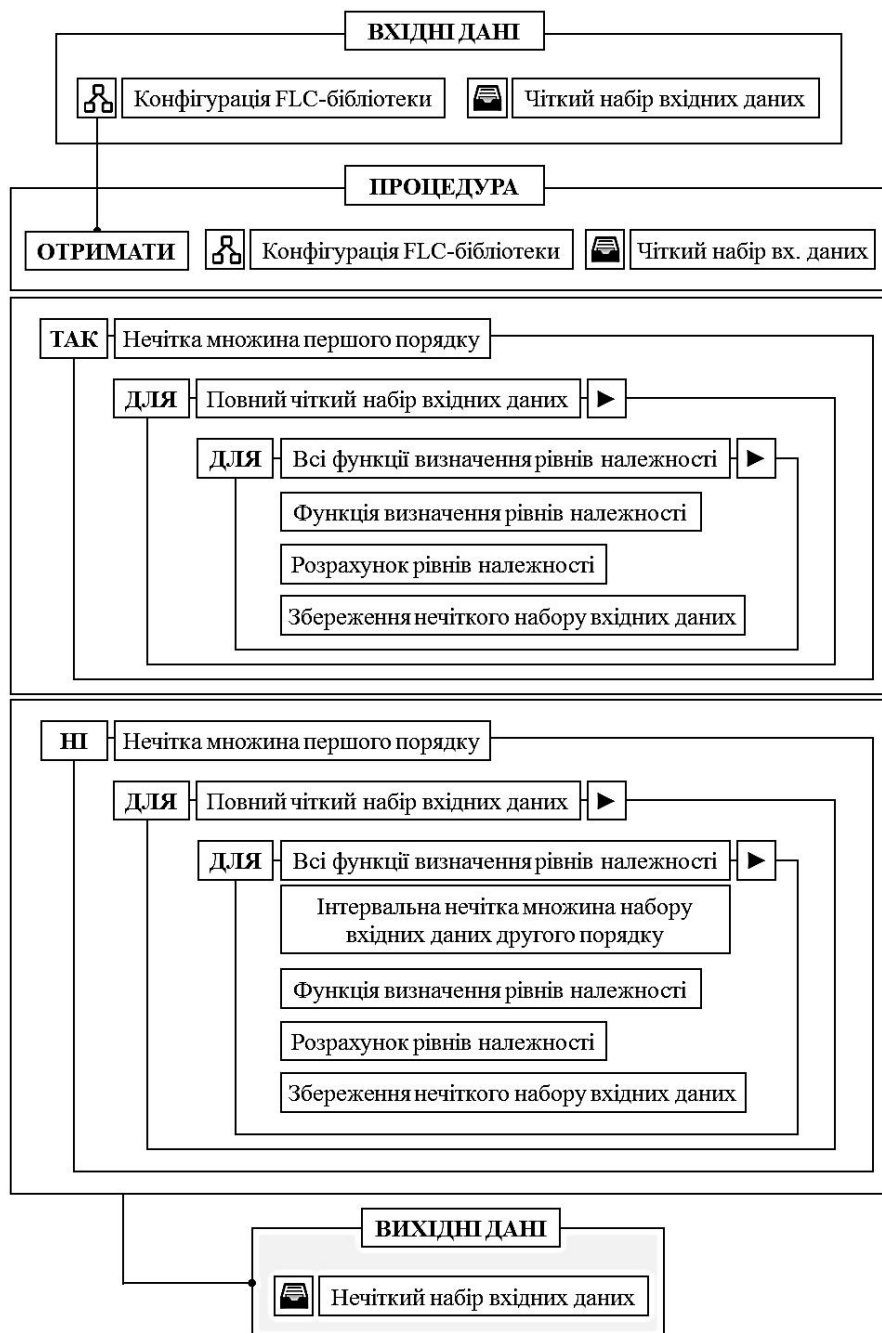


Рис. 4. Структура алгоритму фазифікації FLS-бібліотеки

нечіткої множини першого порядку та інтервальної нечіткої множини другого порядку, що використовуються у процесах імплікації і агрегації за правилами Мамдані.

Нарешті, для FLS-бібліотеки необхідно визначити клас дефазифікації вихідних даних. Якщо нечіткої множини першого порядку останній етап включає у себе лише процес дефазифікації, то для інтервальної нечіткої множини другого порядку цьому процесу передують операції редукації моделі. Причому обом операціям відповідають набори методів, що обираються залежно від конфігурації FLS-бібліотеки. Так, наприклад, для нечіткої множини першого порядку пропонується використовувати метод дефазифікації центроїда та методики середнього зваженого дефазифікації. Кінцева архітектура поєднує операції фазифікації, логічного виведення та дефазифікації і дозволяє застосувати декілька FLC-алгоритмів у межах однієї програми з незалежними конфігураціями.

6. Обговорення результатів дослідження методик конфігурації FLS-бібліотек

У результаті проведеного дослідження було розроблено математичний апарат, що базується на теорії нечітких множин. За основу визначення базових елементів математичного моделювання було запропоновано взяти класифікацію, яка включає у себе нечіткі множини першого порядку, нечіткі множини другого порядку та інтервальні нечіткі множини другого порядку. Для кожного з типів нечітких множин була представлена система рівнянь, що повною мірою відображає його особливості та при цьому є зручною для подальшого моделювання. При цьому співвідношення між наборами входів та виходів системи нечітких множин було визначено на основі правила Мамдані, а подальший розвиток математичної моделі формулювання нечіткого правила для базувався на використанні набору коефіцієнтів Такагі-Сугено. Була представлена узагальнена схема сценарію використання FLS-бібліотек при побудові модуля керування роботизованими промисловими системами, діаграма якої базується на наборі етапів розроблення системного ПЗ і включає у себе конфігурацію FLS-бібліотек та побудову системних алгоритмів. При цьому узагальнена схема конфігурації FLS-бібліотеки складається з наборів FLS, множини входів, множини виходів, множини виходів Такагі-Сугено, множини правил, а також набору функцій рівнів належності елементів. Було показано, що налаштування конфігурації FLS-бібліотеки, можна встановлювати в автономному режимі за допомогою міжплатформного графічного інтерфейсу, що суттєво

спрощує задачу застосування розробленого інструментарію. Була розроблена структура алгоритму фазифікації FLS-бібліотеки, а також запропоновано засади побудови модулів логічного виведення та дефазифікації. Проведене дослідження дозволило сформувати основні положення для побудови комплексної методології розроблення і FLS-бібліотек для нечіткої множини першого порядку, нечіткої множини другого порядку та інтервальної нечіткої множини другого порядку.

7. Висновки

1. Відповідно вимогам до систем керування роботизованими комплексами вказано на необхідність побудови математичного апарату, що базується на теорії нечітких множин. Запропоновано загальну методику, що включає у себе два типи нечітких множин, для кожного з яких побудується система рівнянь, що відображає його особливості.

2. Побудовано математичний апарат, що включає у себе нечіткі множини першого порядку, нечіткі множини другого порядку та інтервальні нечіткі множини другого порядку. При розробці математичного апарату було визначено правило Мамдані і набори коефіцієнтів Такагі-Сугено.

3. Розроблено модель формулювання нечіткого правила для системи нечіткої логіки. Зазначена модель включає у себе схему сценарію використання FLS-бібліотек, діаграма якої містить конфігурацію FLC-бібліотек та методику побудову системних алгоритмів.

4. Побудовано узагальнену схему конфігурації FLS-бібліотеки, що складається з наборів FLS, множини входів, множини виходів, множини виходів Такагі-Сугено, множини правил, а також набору функцій рівнів належності елементів.

5. Розроблено методику побудови модульної бібліотек, у якій система нечіткої логіки використовується як єдиний клас, що охоплює інші класи функцій рівнів належності, фазифікації, логічного виведення і дефазифікації. Вказано на необхідність визначення ефективності математичної моделі кожного з типів нечіткої множини та необхідність застосування методології агрегування та операцію редукації моделі.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Згуровський М.З., Зайченко І.П. *The Fundamentals of Computational Intelligence: System Approach*. – Springer International Publishing, 2017. – 375 с.
2. Карднес-Бідма М., Марін Р. (2019). FTCLogic: Fuzzy Temporal Constraint Logic. *Fuzzy Sets and Systems*, 363, 84–112. doi:10.1016/j.fss.2018.05.014.

3. Задех Л.А. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning ii. *Information sciences*, 8 (4): 301–357, 1975
4. Ейох І., Ейох Дж. (2020). Interval Type-2 Intuitionistic Fuzzy Logic System for Time Series and Identification Problems – A Comparative Study. *International Journal of Fuzzy Logic Systems*, 10(1), 1–17. doi: 10.5121/ijfls.2020.10101.
5. Кара А.Б., Вагнер С., Харпас Х. (2013). Multiobjective Optimization and Comparison of Nonsingleton Type-1 and Singleton Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 21(3), 459–476. doi: 10.1109/tfuzz.2012.2236096.
6. Мендель Дж.М. Uncertain rule-based fuzzy logic system: introduction and new directions. *Prentice–Hall PTR*, 2001.
7. Сахаб Н., Харпас, Х. (2011). A type-2 nonsingleton type-2 fuzzy logic system to handle linguistic and numerical uncertainties in real world environments. *2011 IEEE Symposium on Advances in Type-2 Fuzzy Logic Systems (T2FUZZ)*. doi:10.1109/t2fuzz.2011.5949565.
8. Міядзіма Х., Сірей Н. (2016). System identifications by SIRM models with linear transformation of input variables. *Artificial Intelligence Research*, 5(2). doi: 10.5430/air.v5n2p55.
9. Мендель Дж.М., Лю Ф. Interval type-2 fuzzy logic systems made simple. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 14 (6) :808–821, 2006.
10. Лі М., Джін Т (2007). An Adaptive Tracking Control for Robotic Manipulators based on RBFN. *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, 7 (2), 96–101. doi:10.5391/ijfis.2007.7.2.096.
11. Бірларбеджан М., Мелік В., Мендель Дж.М. Design of novel interval type-2 fuzzy controllers for modular and reconfigurable robots: theory and experiments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (4): 1371–1384, 2011.
12. Бенетар Б, Айкелін У. (2013). Performance Measurement Under Increasing Environmental Uncertainty in the Context of Interval Type-2 Fuzzy Logic Based Robotic Sailing. *SSRN Electronic Journal*. 8 (4): 17–25 doi: 10.2139/ssrn.2828470
14. Мадхава М., Мегана Н, Сунпрія М. (2016). Automatic Train Control System Using Fuzzy Logic Controller. *Bonfring International Journal of Research in Communication Engineering*, 6(Special Issue), 56–61. doi: 10.9756/bijrce.8201
15. Баклуті Н. Алімі А.М. The geometric interval type-2 fuzzy logic approach in robotic mobile issue. P. 1971–1976, 2009.
16. Гуаріно Д., Сафіотті А. (2007). A Study on Intelligent System Design of U-Business Service by Using Ubiquitous Component Technologies. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 9(1), 10. doi: 10.5772/45857
17. Ойх Дж. (2011). Fuzzy Logic Deadzone Compensation for a Mobile Robot. *Fuzzy Controllers, Theory and Applications*. doi:10.5772/13676.
18. Люсіан Т., Міхаела Р. (2011). New Applications of Fuzzy Logic Methodologies in Aerospace Field. *Fuzzy Controllers, Theory and Applications*. doi:10.5772/14540
19. Русу-Ангел С., Герм Л. (2012). Embedded Fuzzy Logic Controllers in Electric Railway Transportation Systems. *Fuzzy Controllers- Recent Advances in Theory and Applications*. doi:10.5772/48588.
20. Кох М, Шаферс Л., Кляйнийохан Б. An efficient data flow oriented fuzzy library. P. 3159–3162, 2008.
21. Резнік Л. (1997). Fuzzy Sets, Logic and Control. *Fuzzy Controllers Handbook*, 3–18. doi:10.1016/b978-075063429-8/50006-3.
22. Патіра М.Дж. (1996). Design Considerations of Digital Fuzzy Logic Controllers. *Fuzzy Logic*, 143–175. doi:10.1007/978-3-322-88955-3_5
23. Сепрано Ф.Є, Флорес М.А.. C++ library for fuzzy type-2 controller design with particle swarm optimization tuning. P. 1–7, 2015.
24. Мендель Дж. Systems, controls, and control theory. *Handbook of Fuzzy Computation*. doi: 10.1887/0750304278/b438c3
25. Сянг Н. (2009). Cooperative Evolutionary Learning of Linguistic Fuzzy Rules and Parametric Aggregation Connectors for Mamdani Fuzzy Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 15(6), 1162–1178. doi: 10.1109/tfuzz.2007.904121.
26. Мамдані Є. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7 (1): 1–13, 1975.
27. Грантер Дж.Л., Фодор Дж.А. (2010). Takag Sugeno type fuzzy automaton model. *International Journal of Man-Machine Studies*, 5 (2):. doi:10.1109/fuzzy.2010.5583982.

28. Валашек-Бабічевська А. (2010). Takagi Sugeno-Kang type fuzzy models with fuzzy equations in the consequence part. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 3 (2) doi:10.1109/mmars.2010.5587260
29. Ма З., Жанг Ф., Ян Л., Ченг Дж. (2011). Representing and reasoning on fuzzy UML models: A description logic approach. *Expert Systems with Applications*, 38 (3), 2536–2549. doi:10.1016/j.eswa.2010.08.042

REFERENCES:

1. Zgurovsky, M.Z., Zaychenko, I.P. (2017). The Fundamentals of Computational Intelligence: System Approach. Springer International Publishing, 375 p.
2. Cardnes-Widma, M., Marin, R. (2019). FTC Logic: Fuzzy Temporal Constraint Logic. *Fuzzy Sets and Systems*, 363, 84–112. doi:10.1016/j.fss.2018.05.014.
3. Zadeh, L.A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning ii. *Information sciences*, 8 (4): 301–357.
4. Eich, I., Eich, J. (2020). Interval Type-2 Intuitionistic Fuzzy Logic System for Time Series and Identification Problems – A Comparative Study. *International Journal of Fuzzy Logic Systems*, 10(1), 1–17. doi: 10.5121/ijfls.2020.10101.
5. Kara, A.B., Wagner, S., Hagrass, H. (2013). Multiobjective Optimization and Comparison of Nonsingleton Type-1 and Singleton Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 21(3), 459–476. doi: 10.1109/tfuzz.2012.2236096.
6. Mendel, J.M. Uncertain rule-based fuzzy logic system: introduction and new directions. Prentice–Hall PTR, 2001.
7. Sahab, N., Hagrass, H. (2011). A type-2 non-singleton type-2 fuzzy logic system to handle linguistic and numerical uncertainties in real world environments. 2011 IEEE Symposium on Advances in Type-2 Fuzzy Logic Systems (T2FUZZ). doi:10.1109/t2fuzz.2011.5949565.
8. Miyajima, H., Shigei, N. (2016). System identifications by SIRMs models with linear transformation of input variables. *Artificial Intelligence Research*, 5(2). doi: 10.5430/air.v5n2p55.
9. Mendel, J.M., Liu, F. (2006). Interval type-2 fuzzy logic systems made simple. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 14 (6) :808–821 p.
10. Li, M., Jin, T. (2007). An Adaptive Tracking Control for Robotic Manipulators based on RBFN. *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, 7 (2), 96–101. doi:10.5391/ijfis.2007.7.2.096.
11. Biglarbejan, M., Melik, V., Mendel J.M. Design of novel interval type-2 fuzzy controllers for modular and reconfigurable robots: theory and experiments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (4): 1371–1384, 2011.
12. Benetar B, Aikelin, U. (2013). Performance Measurement Under Increasing Environmental Uncertainty in the Context of Interval Type-2 Fuzzy Logic Based Robotic Sailing. *SSRN Electronic Journal*. 8 (4): 17–25 doi: 10.2139/ssrn.2828470.
13. Madhava, M, Meghana, N, Supriya, M. (2016). Automatic Train Control System Using Fuzzy Logic Controller. *Bonfring International Journal of Research in Communication Engineering*, 6(Special Issue), 56–61. doi: 10.9756/bijrce.8201.
14. Bakluti, N., Alimi, A.M. The geometric interval type-2 fuzzy logic approach in robotic mobile issue. P. 1971–1976, 2009.
15. Guarino, D., Safiotti, A. (2007). A Study on Intelligent System Design of U-Business Service by Using Ubiquitous Component Technologies. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 9(1), 10. doi: 10.5772/45857.
16. Oich, J. (2011). Fuzzy Logic Deadzone Compensation for a Mobile Robot. *Fuzzy Controllers, Theory and Applications*. doi:10.5772/13676.
17. Lucian, T., Michaela, R. (2011). New Applications of Fuzzy Logic Methodologies in Aerospace Field. *Fuzzy Controllers, Theory and Applications*. doi:10.5772/14540.
18. Rusu-Angel, S., Herm, L. (2012). Embedded Fuzzy Logic Controllers in Electric Railway Transportation Systems. *Fuzzy Controllers- Recent Advances in Theory and Applications*. doi:10.5772/48588.
19. Koch, M., Schaefer, L., Kleinjohan, B. (2008). An efficient data flow oriented fuzzy library. P. 3159–3162, 2008.
20. Resnik, L. (1997). Fuzzy Sets, Logic and Control. *Fuzzy Controllers Handbook*, 3–18. doi:10.1016/b978-075063429-8/50006-3.
21. Patira, M.J. (1996). Design Considerations of Digital Fuzzy Logic Controllers. *Fuzzy Logic*, 143–175. doi:10.1007/978-3-322-88955-3_5.

22. Serrano, F.E., Flores, M.A. (2015). C++ library for fuzzy type-2 controller design with particle swarm optimization tuning. 1–7 p.
23. Mendel, J. Systems, controls, and control theory. Handbook of Fuzzy Computation. doi: 10.1887/0750304278/b438c3.
24. Xiang, N. (2009). Cooperative Evolutionary Learning of Linguistic Fuzzy Rules and Parametric Aggregation Connectors for Mamdani Fuzzy Systems. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 15(6), 1162–1178. doi: 10.1109/tfuzz.2007.904121.
25. Mamdani, E. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. International Journal of Man-Machine Studies, 7 (1): 1–13 p.
26. Granter, J.L., Fodor, J.A. (2010). Takagi-Sugeno type fuzzy automaton model. International Journal of Man-Machine Studies, 5 (2):. doi:10.1109/fuzzy.2010.5583982.
27. Valashek-Babichevska, A. (2010). Takagi-Sugeno Kang type fuzzy models with fuzzy equations in the consequence part. International Journal of Advanced Robotic Systems, 3 (2) doi:10.1109/mmar.2010.5587260.
28. Ma, Z., Zhang, F., Yang, L., Cheng, J. (2011). Representing and reasoning on fuzzy UML models: A description logic approach. Expert Systems with Applications, 38 (3), 2536-2549. doi:10.1016/j.eswa.2010.08.042.

УДК 004.03

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-3>

Олександр ГУСЕВ

кандидат фізико-математичних наук, професор кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького 19, Дніпро, Україна, 49005, gusev1950@ukr.net

ORCID: 0000-0002-0548-728X

Scopus-Author ID: 53163943300

Владислав СІДАНЧЕНКО

аспірант кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, sidanchenko.vl.v@ntu.one

ORCID: 0000-0001-5581-9177

Бібліографічний опис статті: Гусев, О., Сіданченко, В. (2022). Фрактальний аналіз реальних даних про хімічний склад чавуну на випуску доменної печі. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 24–31, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-3>

ФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ РЕАЛЬНИХ ДАНИХ ПРО ХІМІЧНИЙ СКЛАД ЧАВУНУ НА ВИПУСКУ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ

До характерних особливостей доменного виробництва належать:

- випадковий характер змін у часі фізичних та хімічних властивостей шихтових матеріалів;
- велика кількість чинників (зокрема неконтрольованих), які впливають на кінцевий результат доменної плавки.

Мета роботи. Зазначені особливості зумовлюють необхідність проведення досліджень властивостей часових рядів, якими представлені результати хімічного аналізу чавуну на випуску. Такі дослідження необхідні для розробки рекомендацій зі створення методик прогнозування хімічного складу чавуну за умов діючого виробництва, адекватних характеру прогнозованого процесу.

Методологія. Як правило, часовими рядами є випадкові зміни величин, що дозволяють послідовно уявити еволюцію складних систем на основі отриманих даних (Boffetta, Cencini, Falconi, Vulpiani, 2002). Такий аналіз зводиться до обчислення кореляційних функцій векторів станів – часових послідовностей величин, що характеризують систему. Найбільш поширені методи використовують кореляційний та спектральний аналізи, згладжування та фільтрацію даних, моделі авторегресії та прогнозування (Тюрин, Макаров, 1998; Kornienko, Gerasina, Gusev, 2013). Найчастіше статистичний аналіз ґрунтується на припущенні, що досліджувана система є випадковою, тобто причинний процес, що створив часовий ряд, має багато складових частин або ступенів свободи. Взаємодія цих компонентів настільки комплексна, що детермінічне пояснення неможливе. При цьому об'єктом дослідження є клас моделей, які відповідають класу випадкового гаусівського процесу. Однак багато реальних часових рядів характеризуються інваріантністю щодо масштабних перетворень (властивість самоподібності), у зв'язку з чим стандартна гаусова статистика виявляється неспроможною і проблема дослідження часових рядів зводиться до аналізу стохастичних самоподібних процесів, які можуть бути описані фрактальними множинами (Мандельброт, 2002; Федер, 1991).

Наукова новизна. Дане дослідження передбачає обґрунтування гіпотези про фрактальний характер часових рядів, якими представлені результати хімічного аналізу чавуну на випуску доменної печі.

Ключові слова: стохастичні сигнали, випадковий процес, прогнозування, оцінка, фрактальний аналіз, динамічна система.

Oleksandr GUSEV

Candidate of Physics and Mathematics scientific, Professor at the Department of Information Security and Telecommunications, National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dmytro Yavornytskyi ave., 19 Dnipro, Ukraine, 49005, gusev1950@ukr.net

ORCID: 0000-0002-0548-728X

Scopus-Author ID: 53163943300

Vladyslav SIDANCHENKO

Postgraduate Student at the Department of Information Security and Telecommunications, National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dmytro Yavornytskyi ave., 19 Dnipro, Ukraine, 49005, sidanchenko.vl.v@nmu.one

ORCID: 0000-0001-5581-9177

To cite this article: Gusev, O., Sidanchenko, V. (2022). Fraktalniy analiz realnykh danykh pro khimichnyi sklad chavunu na vypusku domennoi pechi [Fractal analysis of real data on the chemical composition of cast iron at the output of a blast furnace]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 24–31, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-3>

FRACTAL ANALYSIS OF REAL DATA ON THE CHEMICAL COMPOSITION OF CAST IRON AT THE OUTPUT OF A BLAST FURNACE

The characteristic features of blast furnace production include:

- the random nature of changes over time in the physical and chemical properties of the charge materials;
- a large number of factors (especially uncontrolled ones) that affect the final result of blast furnace melting.

The goal of the work. The specified features make it necessary to conduct studies of the properties of time series, which present the results of the chemical analysis of cast iron at the release. Such studies are necessary for the development of recommendations for the creation of methods for forecasting the chemical composition of cast iron under the conditions of current production, adequate to the nature of the predicted process.

Methodology. As a rule, time series are random changes in values that allow us to consistently visualize the evolution of complex systems based on the received data (Boffetta, Cencini, Falconi, Vulpiani, 2002). Such an analysis comes to the calculation of correlation functions of state vectors - time sequences of values characterizing the system. The most common methods use correlation and spectral analyses, data smoothing and filtering, autoregression and forecasting models (Tiurnyn, Makarov, 1998; Kornienko, Gerasina, Gusev, 2013). Statistical analysis is very often based on the assumption that the studied system is random, the causal process, that created the time series and has many constituent parts or degrees of freedom. The interaction of these components is so complex that a deterministic explanation is impossible. At the same time, the object of research is a class of models that correspond to the class of a random Gaussian process. However, many real time series are characterized by invariance of scale transformations (property of self-similarity), due to which standard Gaussian statistics are untenable and the problem of studying time series comes to the analysis of stochastic self-similar processes that can be described by fractal sets (Mandelbrot, 2002; Feder, 1991).

Scientific novelty. This research involves substantiating the hypothesis about the fractal nature of time series, which present the results of chemical analysis of cast iron at the output of a blast furnace.

Key words: stochastic signals, random process, forecasting, estimation, fractal analysis, dynamical system.

Актуальність дослідження. Математичне моделювання нелінійних динамічних систем є міждисциплінарним інструментом дослідження різноманітних процесів у природі та суспільстві. У цьому реалізується єдиний методологічний підхід, що дозволяє з урахуванням об'єктивних законів аналізувати рух різноманітних динамічних систем різного рівня складності – від механічних до соціальних.

Аналіз попередніх досліджень. Спочатку основні математичні моделі динамічних систем були розроблені для технічних і природничих додатків. Згодом з'ясувалося, що аналогічні ефекти, закономірності поведінки притаманні іншим системам – метеорологічним, економічним, фінансовим, соціальним. Складні господарські системи охоплюють майже всі перелічені напрями. Наприклад, енергетика включає технічні аспекти динамічної поведінки апаратів, систем передачі енергії, взаємозв'язок з метеорологічною ситуацією, охоплює велике коло економічних і фінансових проблем, які при невдалому вирішенні можуть спровокувати

втрату стійкості в соціальному середовищі. Основна проблема при математичному моделюванні динамічної системи полягає у розробці моделі, адекватної реальним процесам із прийнятною похибкою. Перші результати досліджень динамічних систем було отримано під час аналізу моделей природничо-наукових дисциплін – механіки, біології, метеорології, фізики. Для простих механічних систем існують доступні для огляду моделі на основі нелінійних диференціальних рівнянь, які повністю відображають динаміку процесу з урахуванням складних нелінійних ефектів. Нетрадиційні результати, одержувані у таких моделях (нелінійні ефекти при коливаннях, залежність амплітуди від частоти, втрата динамічної стійкості, біфуркації рішень, перехід до хаосу, дивний атрактор) повністю повторюються в реальних експериментах.

Згадані вище нетривіальні результати отримані чисельно, і чисельні експерименти останнім часом є основним інструментом, що дозволяє продовжити дослідження та розвинути

результати, одержувані за допомогою якісної теорії нелінійних диференціальних рівнянь.

У суттєво нелінійних моделях, поряд зі звичними циклічними коливаннями, виявляються складні полігармонічні стійкі та нестійкі режими, дивний атрактор – це ті режими, які принципово не можуть бути досліджені в рамках лінійного та квазілінійного підходу, але які отримані при аналізі, суттєво не стійко повторюються у чисельних та натурних експериментах.

Узагальнюючи ці результати, можна вважати, що хаос є природною динамічною формою еволюції складної системи та часто зустрічається (можливо як перехідний режим) у простих динамічних системах. Штучне усунення хаосу (в механіці – за рахунок великої дисипації енергії, в економіці – за рахунок надмірної зарегульованості, плановості, високого оподаткування, у соціумі – за рахунок законодавчих обмежень та самообмежень, пов'язаних з ментальністю) веде до усунення складних динамічних режимів та переходу рішенням, деградації системи (Петров, 2010).

Висновок. Перелічені фактори, перш за все, вказують на необхідність альтернативного підходу до аналізу даних про роботу складних нелінійних систем.

Виклад основного матеріалу.

Фрактальний підхід до оцінки значень часових рядів, якими представлені результати хімічного аналізу чавуну на випуску доменної печі. Поняття фрактал було вперше запроваджено Бенуа Мандельбротом у 1975 році. Слово утворене від латинського fractus – що складається із фрагментів. З математичної точки зору фрактальний об'єкт, перш за все, має дробову (нецілу) розмірність. Інша важлива властивість, яку мають майже всі

фрактали – властивість самоподібності (масштабна інваріантність). Фрактал можна розбити на скільки завгодно малі частини так, що кожна частина виявиться просто зменшеною частиною цілого. Прикладом природного фрактального об'єкта представлені на рисунку 1, крижані візерунки на склі (Veres, Boda, 2000; Kugiumtzis, Boudourides, 1998).

Насправді випадкові процеси зберігають властивість самоподібності лише до певної межі. Ця міра статистичної стійкості процесу при багаторазовому масштабуванні визначається показником Херста H чи параметром самоподібності.

Аналіз часових рядів на самоподібність проводився на основі реальних даних про вміст кремнію в чавуні, отриманих у різні часові періоди на доменній печі №3 (ДП-3) Маріупольського металургійного комбінату ім. Ілліча (ММК) за допомогою показника Херста H .

Аналіз фрактальних властивостей часових рядів, зокрема властивостей самоподібності, виконувався із застосуванням програми Fractan 4.4. [9]

Основна кількісна характеристика фракталів – топологічна розмірність D , запроваджена Хаусдорфом. Для більшості природних часових рядів аналітичне знаходження топологічної фрактальної розмірності неможливе, тому D визначають чисельно: або у вигляді кореляційної оцінки, або через величини, пов'язані з нею простими співвідношеннями (наприклад, через показник Херста H). Для калібрування часових вимірів Херст ввів безрозмірне відношення. Цей спосіб аналізу стали називати методом нормованого розмаху або R/S – аналізом (Федер, 1991, с. 262).



Рис. 1. Крижані візерунки на склі

Результат R/S – аналізу є обчислення показника Херста H , який є статистичною характеристикою структури та визначається для часових рядів за рівнянням:

$$R/S = \left(\frac{\tau}{2}\right)^H \quad (1)$$

де R – нормований розмах варіації (різниця максимального та мінімального значень вимірюваного параметра);

S – стандартне відхилення (корінь квадратний від дисперсії);

τ – період (довжина низки) спостережень.

Однією з основних властивостей фрактального (самоподібного) процесу є повільне зменшення автокореляційної функції (АКФ) (рисунк 2). Ця властивість має ключове значення в теорії самоподібних процесів і фактично визначає найважливішу з погляду прогнозування характеристику випадкового процесу – тривалість пам'яті процесу.

З рисунка 2 видно, що АКФ має повільно спадаючий характер, а в «хвості» відсутня тенденція прагнення нуля. Така поведінка АКФ є характерною для самоподібних процесів.

Показник Херста H інтерпретується наступним чином (Федер, 1991; Кузнецов, 2002, с. 296):

$H = 0.5$ – передбачає часовий ряд у вигляді білого шуму (незалежний, випадковий процес);

$0 \leq H < 0.5$ – означає рожевий шум або антиперсистентність (часовий ряд змінює напрямки частіше, ніж ряд випадкових незалежних величин);

$0.5 < H \leq 1$ – означає чорний шум або персистентність (часовий ряд характеризується ефектом довготривалої пам'яті і має схильність до трендів). Трендостійкість поведінки процесу збільшується при наближенні до одиниці.

Зазначимо, що показник Херста пов'язаний із топологічною фрактальною розмірністю співвідношенням $D = 2 - H$.

Розрахункові значення показника Херста для досліджуваного часового ряду склали $H = 0,5966 \pm 0,1662$, що також підтверджує самоподібний характер процесів. Оцінка H виконувалася методом R/S – аналізу. Графік R/S – статистики аналізованого ряду наведено на рисунку 3.

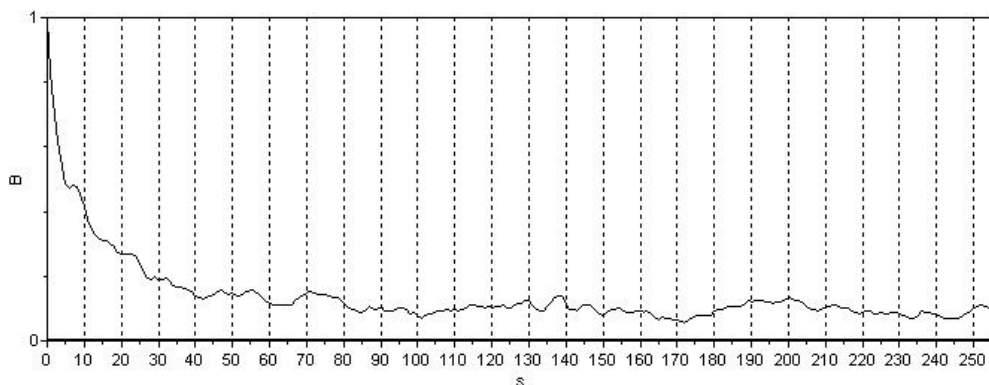


Рис. 2. АКФ досліджуваного часового ряду

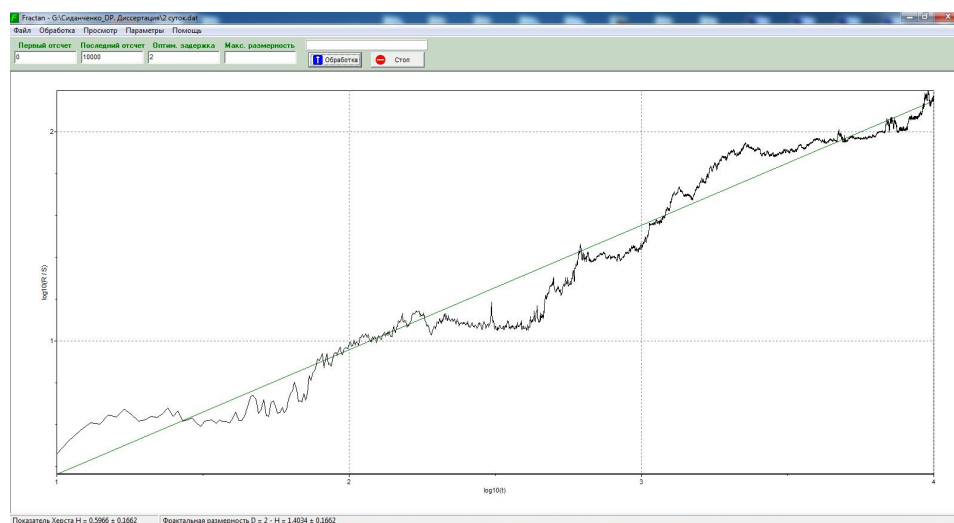


Рис. 3. Показник Херста для досліджуваного часового ряду

Таким чином встановлено, що досліджувані часові ряди носять фрактальний характер і мають властивість самоподібності. Отже, подальше дослідження необхідно проводити не з використанням класичних методів, а з використанням фрактальних методів і методів стохастичної динаміки, які адекватні характеру досліджуваних процесів. Ідея застосування методів хаотичної динаміки до аналізу часових рядів полягає в тому, що структура хаотичної системи, що містить у собі всю інформацію про систему, а саме, її аттрактор може бути відновлена через вимір тільки однієї динамічної системи, що спостерігається, фіксованої як часовий ряд (Кузнецов, 2002)

Відповідно до методу Грасбергера і Прокаччіа (Grassberger, Procaccia, Characterization, 1983), процедура реконструкції фазового простору та відновлення хаотичного аттрактора системи при динамічному аналізі часового ряду зводиться до побудови так званого лагового або відновленого простору за допомогою методу затримки.

Вектори $\overline{S}_k$ в новому просторі вкладення сформовані з значень часового ряду скалярних вимірювань з часовим запізненням:

$$\overline{S}_k = (S_{k-(m-1)\tau}, S_{k-(m-2)\tau}, \dots, S_k) \quad (2)$$

де: k – розмір часового ряду; m – розмірність вкладення; τ – затримка (лаг).

Для кількісної характеристики та виявлення закономірностей, пов'язаних з динамікою системи, необхідний детальний аналіз геометричного образу динамічного режиму – аттрактора, що є так званим притягуючим безліччю траєкторій системи в D – мірному фазовому (або псевдофазовому) просторі. Координатами фазового простору є динамічні змінні процеси. Кожному типу динамічного поведінки відповідає власний аттрактор і, звідси, його геометричний образ – фазовий портрет. Наприклад, динаміка

звичайної хімічної реакції відповідає аттрактору типу стійкої точки. Регулярним коливанням відповідає стійкий граничний цикл. Цим класичним аттракторам відповідають класичні геометричні області: точка, замкнута крива (коло, еліпс тощо) або поверхня у формі тора. На противагу цьому, невпорядковані траєкторії фазового портрета вказують на наявність хаотичного аттрактора. До цього класу аттракторів відноситься і так званий дивний аттрактор, геометричним образом якого фазовому простору є фрактальний об'єкт.

У теоремах Такенса (Takens, 1981) і Соєра (Sauer, 1991) показано, що послідовність $\{S_k\}$ складається з скалярних вимірів структури динамічної системи, тоді, за певних припущень, таке відновлення фазового портрета є точною картиною реальної множини $\{x\}$ (якщо m досить велике). Іншими словами, реальний аттрактор динамічної системи і аттрактор відновлений в лаговому просторі по часовому ряду згідно з зазначеним вище правилом (псевдоаттрактор), при адекватному підборі розмірності вкладення m , є топологічно еквівалентними і має однакові узагальнені фрактальні розміри.

У тому випадку, якщо аналізований часовий ряд є реалізацією випадкового процесу, то відновлений псевдоаттрактор буде походити на безструктурну хмару точок, яка при послідовному нескінченному збільшенні розмірності вкладення лагового простору m , подібно до газу, заповнює весь наданий йому обсяг (Кузнецов, 2002).

Вигляд дивного аттрактора (фазовий простір 2D) для досліджуваного часового ряду у нормованих координатних осях наведено на рисунку 4. Тут чітко видно область тяжіння, що є щільним «ядром». У той самий час для випадкової послідовності, як зазначалося вище, точки відновленого псевдоаттрактора утворюють безструктурну хмару в лаговому просторі.

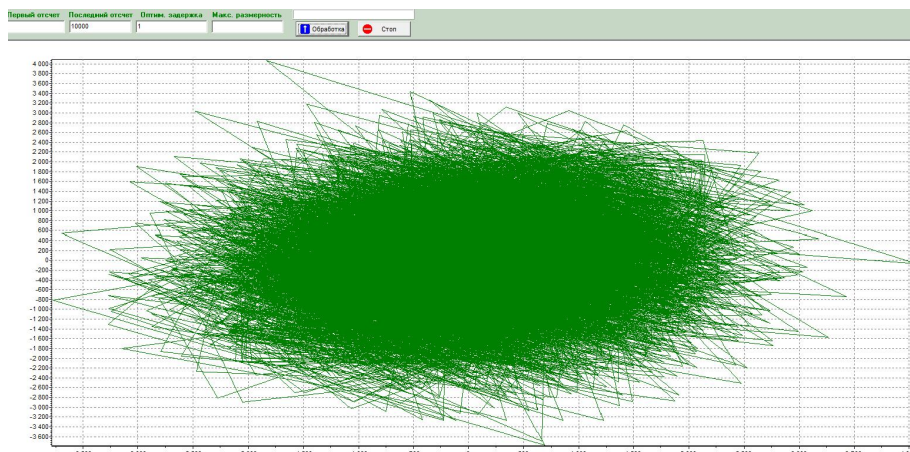


Рис. 4. Фазовий портрет дивного аттрактора

На основі досліджуваного часового ряду можна побудувати кореляційну ентропію K , яка показує ступінь розбігання близьких фазових траєкторій та дозволяє оцінити кількість інформації, необхідної для прогнозу поведінки процесу в майбутньому. Кореляційна ентропія визначає нижню межу ентропії Колмогорова – Сина K (визначає швидкість втрати інформації про стан системи та дозволяє судити про те, наскільки динамічна система хаотична).

На рисунку 5 наведено залежність кореляційної ентропії від розмірності простору вкладення n досліджуваного часового ряду.

Кореляційна ентропія не зростає, що свідчить про наявність хаотичної складової. Величина K достатня мала ($K = 0,636$), що визначає хорошу трендостійкість і передбачуваність процесу на 4–6 кроків уперед.

Одна з основних і найінформативніших характеристик хаотичних процесів – кореляційна розмірність відновленого атратора D показує ступінь складності системи, що породжує процес, який спостерігається. Чим складніша система, тим більше рівнянь потрібно для її опису, тим більша кореляційна розмірність, а сам процес ближчий за своїми характеристиками до білого шуму. Таким чином, цю величину можна розглядати як міру стохастичності процесу. $D = 9,867$, рисунок 6. Відомо, що кореляційна розмірність більше п'яти передбачає істотний вплив випадкових складових. Тоді можна залишити гіпотезу про те, що досліджувані ряди мають детермінований хаотичний характер зі стохастичними компонентами, а їх фазовий портрет є дивним атратором.

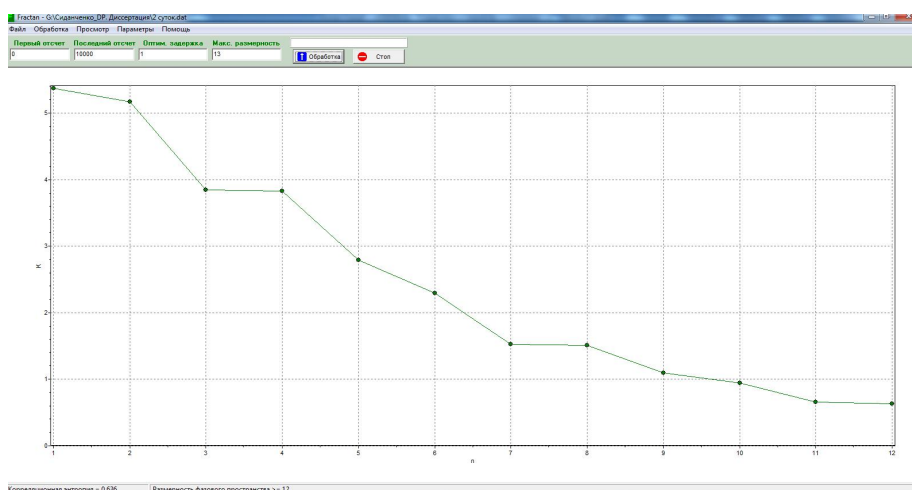


Рис. 5. Залежність кореляційної ентропії від розмірності вкладення

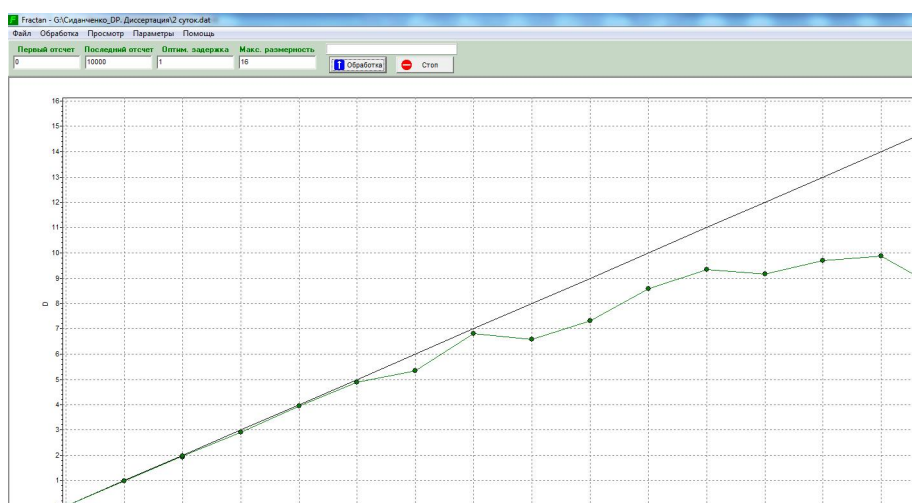


Рис. 6. Залежність кореляційної розмірності від розмірності вкладення

Висновки. Експериментально встановлено, що часові ряди, якими представлений відсотковий вміст кремнію в чавуні на випуску, мають фрактальний характер і мають властивість самоподібності. Це означає, що часова еволюція системи, що вивчається, являє собою стійкий динамічний стан, званий дивним аттрактором. Проведено оцінку показників Херста та встановлено значення кореляційних та фрактальних розмірностей аттрактора у багатовимірних псевдофазових просторах. Показано, що в системі яка досліджується, відбуваються явища нелінійної динамічної

самоорганізації, що підтверджується також *RS* – аналізом часових рядів.

Доведено, що часові ряди, які досліджуються, є персистентними (трендостійкими), тобто мають довготривалу пам'ять і мають дивний аттрактор з однією зоною тяжіння.

Наявність довгострокової пам'яті в часових рядах доводить можливість розробки системи середньо – та довгострокового прогнозування. При цьому система повинна використовувати фрактальні фільтри-прогнозатори, характеристики яких адекватні характеру часових рядів, що прогножуються.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Boffetta G., Cencini M., Falconi M., Vulpiani A. Predictability: a way to characterize complexity. *Phys. Rep.* 2002. V. 356. P. 367-374.
2. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Статистический анализ данных на компьютере. М.: ИНФРА-М, 1998.
3. Kornienko V.I., Gerasina A.V., Gusev A.Yu. Methods and principles of control over the complex objects of mining and metallurgical production. *Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems*, Taylor & Francis Group, London, 2013, p.p. 183-192.
4. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002.
5. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 262 с.
6. Петров Л.Ф. Методы динамического анализа экономики. М., Инфра-М, 2010.
7. Veres A., Boda M. The Chaotic Nature of TCP Congestion Control // *Proceedings of IEEE INFOCOM*, March 2000.
8. Kugiumtzis D. Boudourides M. Chaotic Analysis of Internet Ping Data: Just a Random Generator, SOEIS meeting at Bielefeld, March 27–28, 1998
9. Сычев В. Фрактальный анализ. Программа Fractan 4.4. URL: <http://impb.ru/~sychyov/>.
10. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 262 с.
11. Кузнецов С.П. Динамический хаос. М.: Физматлит, 2002. 296 с.
12. F. Takens, Detecting Strange Attractors in Turbulence. *Lecture Notes in Math.* Vol. 898, Springer, New York (1981).
13. T. Sauer, J. Yorke, M. Casdagli, Embedology. *J. Stat. Phys.* 65, 579 (1991).
14. Grassberger P., Procaccia I. Characterization of strange attractors. *Phys. Rev. Lett.* 50, 346-349 (1983).

REFERENCES:

1. Boffetta G., Cencini M., Falconi M., Vulpiani A. Predictability: a way to characterize complexity // *Phys. Rep.* – 2002. – V. 356. – P. 367-374.
2. Tiurn Yu.N., Makarov A.A. (1998). Statysticheskyi analiz dannykh na kompiutere [The statistical analysis of data on a computer] – M.: INFRA-M, [in Russian].
3. Kornienko V.I., Gerasina A.V., Gusev A.Yu. Methods and principles of control over the complex objects of mining and metallurgical production. *Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems*, Taylor & Francis Group, London, 2013, p.p. 183–192.
4. Mandelbrot B. (2002). *Fraktalnaya geometriya prirody* [Fractal geometry of nature] – M.: Institut kompyuternykh issledovaniy, The institute of Computer Research. [in Russian].
5. Feder E. (1991). *Fraktaly* [Fractals] – M.: Mir, – 262, [in Russian].
6. Petrov L.F. (2010). *Metody dinamicheskogo analiza ekonomiki* [Methods of the dynamic analysis of the economy]. M., Infra-M, [in Russian].
7. Veres A., Boda M. The Chaotic Nature of TCP Congestion Control // *Proceedings of IEEE INFOCOM'2000*, March 2000.
8. Kugiumtzis D. Boudourides M. Chaotic Analysis of Internet Ping Data: Just a Random Generator? // SOEIS meeting at Bielefeld, March 27–28, 1998

9. Syichev V. Fraktalnyiy analiz. Programma Fractan [Fractal analysis. Fractan Program 4.4.] – [http:// impb.ru/~sychyov/](http://impb.ru/~sychyov/).
10. Feder E. Fractals. – M.: Mir, 1991. – 262 p.
11. Kuznetsov S.P. (2002) Dynamical chaos [Dinamicheskiy haos]. – M.: Fizmatlit. – M.: Fizmatlit, – 296, [in Russian].
12. F. Takens, Detecting Strange Attractors in Turbulence // Lecture Notes in Math. Vol. 898, Springer, New York (1981).
13. T. Sauer, J. Yorke, M. Casdagli, Embedology // J. Stat. Phys. 65, 579 (1991).
14. Grassberger P., Procaccia I. Characterization of strange attractors. // Phys. Rev. Lett. 50, 346–349 (1983).

УДК 004.942 : 004.023

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-4>

Тімур ЖЕЛДАК

кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри системного аналізу та управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, zheldak.t.a@ntu.one

ORCID: 0000-0002-4728-5889

Scopus Author ID: 55602208300

Ілля ЗІБОРОВ

аспірант кафедри системного аналізу та управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, ziborov.il.k@ntu.one

ORCID: 0000-0002-3118-387X

Бібліографічний опис статті: Желдак, Т., Зібров, І. (2022). Самонавчання підсистеми оператора конвертера в процесі рафінації сталі в складі СППР керування металургійним виробництвом. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 32–40. doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-4>

САМОНАВЧАННЯ ПІДСИСТЕМИ ОПЕРАТОРА КОНВЕРТЕРА В ПРОЦЕСІ РАФІНАЦІЇ СТАЛІ В СКЛАДІ СППР КЕРУВАННЯ МЕТАЛУРГІЙНИМ ВИРОБНИЦТВОМ

Інформаційна система підтримки прийняття рішень, яка в реальному режимі часу може забезпечувати операторів конвертерного цеху металургійного підприємства рекомендаціями щодо ведення технологічного процесу, може значно допомогти знизити виробничі витрати і підвищити рентабельність виробництва. Актуальною вбачається розробка такої інформаційної системи на основі самонавчання – з використанням досвіду попередніх вдалих плавов.

Метою роботи є розробка алгоритму навчання підсистеми керування плавкою інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень у контурі управління кисневим конвертером. Дана підсистема автоматизує дії оператора, оптимізує процес за економічним критерієм, а також зменшує вплив на результат людського фактору, що призводить до покращення економічних показників виробництва.

Методологія забезпечення рішення полягає у формуванні рекомендацій підсистеми оператора конвертера на основі вибору і усереднення кращих з прецедентів з пам'яті, найближчих за нормалізованою метрикою. Остання включає як бажані характеристики готової сталі, так і контрольовані збурення, до яких віднесені початкові умови ведення плавки. Вектори збурень і керованих змінних розділені на ті, що визначають відстань до прецедентів, і ті, що є критеріями оптимальності рішення.

Наукова новизна отриманих у роботі результатів полягає в запропонованому алгоритмі самонавчання, який на відміну від відомих раніше підходів використовує не всю сукупність навчальних прикладів з бази даних попередніх плавов, а лише «найкращі» за зведеним зовнішнім критерієм серед обмеженої підмножини найближчих до поточної плавки за нормалізованою метрикою умов ведення плавки. Запропоновані вигляд зовнішнього критерію та метрика порівняння плавов у нормалізованому просторі.

Висновки. Застосування запропонованого алгоритму самонавчання підсистеми оператора конвертера інтегрованої СППР металургійного виробництва дозволяє за умов наявності достатньої кількості прикладів у базі даних попередніх плавов, що охоплюють поточне замовлення, зменшити собівартість виплавленої сталі на 2,5–3,8 %.

Ключові слова: металургія, інформаційна система, самонавчання, керування, технологія, оператор, сценарій.

Timur ZHELDAK

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the System Analysis and Control Department, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho av., Dnipro, Ukraine, 49005, zheldak.t.a@ntu.one

ORCID: 0000-0002-4728-5889

Scopus Author ID: 55602208300

Illia ZIBOROV

Postgraduate Student at the System Analysis and Control Department, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho av., Dnipro, Ukraine, 49005, ziborov.il.k@nmu.one

ORCID: 0000-0002-3118-387X

To cite this article: Zheldak, T., Ziborov, I. (2022). Samonavchannia pidsystemy operatora konvertera v protsesi rafinatsii stali v skladi SPPR keruvannia metalurhiinym vyrobnyctvom [Self-learning of the converter operator subsystem in the steel smelting process as part of the metallurgical production managing DMSS]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 32–40. doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-4>

SELF-LEARNING OF THE CONVERTER OPERATOR SUBSYSTEM IN THE STEEL SMELTING PROCESS AS PART OF THE METALLURGICAL PRODUCTION MANAGING DMSS

The decision-making support information system, which can provide the BOF operators with recommendations for conducting the technological process in real time at the metallurgical enterprise, can significantly help reduce production costs and increase the profitability. The development of the aforementioned information system, basing on self-learning and using the experience of some previous successful melts is considered to be relevant.

The purpose of the work is to develop a learning algorithm for the smelting control subsystem of the intelligent decision-making support system in the BOF control circuit. The subsystem automates the operator's actions, optimizes the process according to an economic criterion, and reduces the influence of the human factor on the result. The last one leads to the improvement of production economic indicators.

The methodology of providing a solution consists of the recommendation formation for the BOF operator subsystem, based on the selection and averaging of the best precedents from memory, which are the closest according to the normalized metric. The metric includes both the desired characteristics of the finished steel and controlled disturbances, particularly the initial conditions of melting. The vectors of disturbances and controlled variables are divided into two groups. The first group is to determine the distance to precedents, and the second one is to form the criterion for the optimality of the solution.

The scientific novelty of the results obtained in the work consists in the proposed self-learning algorithm. The algorithm, in contrast to previously known approaches, does not use the entire set of training examples from the previous melt database, but only the "best" ones according to a consolidated external criterion. Best examples are a limited subset of closest melts in history to the current melt according to a normalized metric condition. The external criterion form and the metric of the melt comparison in the normalized space are proposed.

Conclusions. The application of the proposed self-learning algorithm of the converter operator's subsystem of the integrated metallurgical production DMSS allows reducing the molten steel cost by 2.5–3.8 %. The result is possible if there are a sufficient number of examples in the database of some previous melts, covering the current order.

Key words: metallurgy, information system, self-learning, management, technology, operator, scenario.

Актуальність проблеми. Понад 70 % світового виробництва сталі припадає на конвертерне виробництво (World Steel Association, 2016). Металевий брут і гарячий чавун завантажуються в конвертер, а струмінь кисню з надзвуковою швидкістю впорскується зверху фурму на поверхню металевої ванни. Під дією кисню всі решта елементів у металевій ванні окислюються та утворюють менш щільний шар шлаку. Вапно (вапняк) додається для запобігання зносу вогнетривкої футеровки та сприяння утворенню шлаку.

У оператора киснево-конвертерного цеху, що керує процесом продувки, час для прийняття управлінських рішень про збільшення/зменшення інтенсивності продувки, підняття/опускання фурми, закінчення продувки тощо вкрай обмежений. Час продувки в 100-350-тонних конвертерах не перевищує 20–25 хвилин,

а тривалість усієї плавки в конвертерах ємністю 100–350 тон (з наступними операціями повалки та розкислення) становить близько 40–50 хвилин (Демидов, 2014; Чернятевич А.Г., 2012). Відповідно оператор працює, спираючись на власний досвід, при цьому кількість можливих помилок в його роботі залежить від фізичного та морального стану оператора, виконання цехом плану виробництва тощо. Найбільш характерними наслідками помилок оператора є отримання параметрів, що виходять за інтервал, необхідний для даної марки сталі, підвищена витрата кисню та присадок, перевищення температури готової сталі. Як наслідок, за статистикою (Чернега, 2006), до 40 % плавок вимагають корекції після завершення процесу.

Процес рафінації сталі в конвертері обмежено автоматизований, його протікання суттєво залежить від знань і досвіду оператора.

Без інформаційної системи, яка може постійно допомагати операторам у прийнятті рішень щодо керування процесом, деякі складні взаємодії між змінними процесу можуть бути пропущені, що зрештою призводить до неоптимальної роботи. Отже, інформаційна система підтримки прийняття рішень, яка в реальному режимі часу може забезпечувати операторів конвертерного цеху рекомендаціями щодо ведення процесу, може значно допомогти знизити виробничі витрати і підвищити рентабельність виробництва. Актуальним вбачається розробка такої інформаційної системи на основі самонавчання – з використанням досвіду попередніх вдалих плавов.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Традиційно (Богушевський, 2008) головним завданням керування конвертерною плавкою є одержання сталі заданої марки за вмістом вуглецю. За великим рахунком, це завдання зводиться до правильності визначення часу припинення продування. Але подібний «однокоординатний» підхід дуже спрощений, оскільки зазвичай немає прямої інформації про вміст вуглецю у ванні по ходу продування. Швидкість вигорання вуглецю така, що на заключному етапі продування одна зайва хвилина відповідає переходу до іншої марки сталі (Васильев, 2009). Додатковим фактором, що ускладнює подібний «прямий» розрахунок, є суттєва нелінійна залежність вигорання вуглецю не тільки від часу продування, а й від температури розплаву (Графов, 2011).

Проведені раніше дослідження (Желдак, 2012) показали, що комплексна задача керування плавкою передбачає отримання в момент закінчення плавки (підняття фурми) не тільки заданого вмісту вуглецю, але і необхідної температури сталі. Забезпечується це як правильним вибором режимів продування, правильним розрахунком кількості охолоджувачів. Останнє особливо актуально при великій інтенсивності продування, коли конвертер працює в режимі з обмеженням на час плавки, адже тоді охолодження частково здійснюється за рахунок присадок руди, брехту та вапняку по ходу продування, а також внаслідок зміни висоти розташування кисневої фурми (Мокринський, 2005).

За останні роки було розроблено кілька динамічних моделей конвертерного виробництва. Зокрема, (Jalkanen, 2006) розробив для оператора конвертерного цеху симулятор CONSIM 5, в якому передбачається, що всі реакції відбуваються в одній зоні, а кисень поділяється відповідно до його спорідненості до певного елемента. Модель враховує шлакоутворення,

енергетичний баланс, плавлення та зневуглювання брехту. Інша динамічна модель процесу, створена (Sarkar, 2015) передбачає, що реакції окислення відбуваються лише в зоні емульсії, між елементами, розчиненими в краплях, і FeO в шлаку. Кисень розподіляється між елементами у верхній частині металевої ванни відповідно до їх концентрації. Модель не включає енергетичний баланс, і припускає, що температура зростає лінійно весь час продувки.

Іншу динамічну модель для конвертерної плавки представили (Lytvynyuk, 2014). Згідно з нею, весь кисень, що подається, використовується для утворення оксиду заліза, а всі інші реакції окислення відбуваються через реакцію з FeO. Швидкість реакцій, що протікають у металевій ванні і в шлаку в першу чергу залежить від кінетики масообміну. Для енергетичного балансу передбачається, що шлакова і металева ванна мають однакову температуру. Дана модель забезпечує точне прогнозування складу шлаку, хімічний склад сталі та температуру в кінці продування.

Також були розроблені декілька динамічних моделей, що базуються переважно на емпіричних взаємозв'язках. Зокрема, (Kattenbelt, 2008) використовують ступінчасті зміни висоти фурми та швидкості подачі кисню при моделюванні основного продування. Проаналізувавши реакцію металевої ванни на ступінчасті зміни висоти фурми, швидкості потоку кисню та додавання охолоджувача (у авторів – залізна руда), автори пропонують відійти від суто хімічного опису процесів, замінивши їх емпіричними зв'язками.

Дуже повна динамічна модель динаміки зневуглювання в кисневому конвертері розроблена в (Dogan, 2011). Ця динамічна модель враховує окислення вуглецю в двох зонах: як у шлаку, так і в зоні продувки. В другому випадку вуглець у металевій ванні безпосередньо реагує з киснем, а в емульсійній зоні вуглець у металевих краплях окислюється FeO в шлаку. Припускається, що температура металевої ванни та шлаку зростає лінійно під час продування. В (Rout, 2018) продовжено дослідження (Dogan, 2011), яке доповнено формулами окислення марганцю, фосфору та кремнію, що дозволяє спрогнозувати склад шлаку в будь-який момент продувки. Також автори наголошують, що модель рафінації сталі має враховувати енергетичний та тепловий баланси в конвертері.

В роботі (Dering, 2021) запропоновано додати мовою Python, що оснований на динамічній моделі процесу рафінації сталі. Модель використовують гібридний підхід, коли початкові стани описуються системою диференціально-алге-

браїчних рівнянь, а подальші стани розглядаються з певною дискретизацією. Як зазначають автори, запропонований додаток потенційно може допомогти виробникам сталі значно знизити виробничі витрати, одночасно досягаючи цільових показників виробництва та якості.

Мета дослідження: розробка алгоритму навчання підсистеми керування плавкою інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень у контурі управління кисневим конвертером задля автоматизації дій оператора, оптимізації процесу за економічним критерієм, а також зменшення впливу на результат людського фактору, що в свою чергу призводить до покращення економічних показників виробництва.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленої мети пропонується розділити контрольовані параметри технологічного процесу на статичні та динамічні, а також на керовані та некеровані. До статичних характеристик технологічного процесу конвертерної плавки слід зарахувати величини, які підсистема керування плавкою отримує від підсистеми шихтування плавки (маса і температура шлаку, склад шлаку, масу чавуну, сталевих брухту та вапна (вапняку) тощо). Водночас ключовими координатами, впливаючи на які можна покращити техніко-економічні показники готової продукції, є динамічні характеристики протікання процесу плавки. До останніх слід віднести масу і температуру металу, склад і температуру конвертерних газів, висоту фурми над рівнем ванни і витрату кисню, а також час продувки.

Представимо технологічний процес плавки схематично у вигляді об'єкта управління, як показано на рисунку 1 (Желдак, 2011).

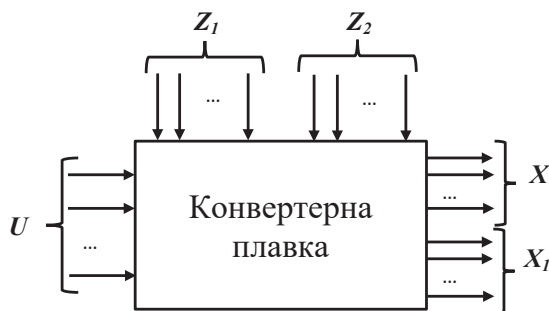


Рис. 1. Конвертерна плавка як об'єкт управління

У даному представленні керуючі величини об'єднані у вектор U . Оператор може керувати під час плавки інтенсивністю подачі кисню, висотою фурми, додавати охолоджуючі речовини (окатиші, вапняк тощо) чи інтенсифікатори. Також до вектору керування входить час продувки.

Збурення, які можна виділити в даному процесі, поділяються на два вектори: Z_1 — контрольовані збурення (вміст у чавуні кремнію, марганцю, сірки, фосфору, температура чавуну, вміст кисню в дутті, інтервал часу між плавками тощо) і Z_2 — неконтрольовані збурення (якість сипких матеріалів, склад, розміри та температура брухту, маса і склад міксерного шлаку, що потрапляє в конвертер і т. д.).

Результатом управління є параметри технологічного циклу, які також пропонується розділити на два вектори: X — технологічні характеристики одержаної сталі (її кількість, хімічний склад і температура на повалці) та X_1 — параметри, що визначають економічні показники технологічного процесу (кількість використаного кисню, час продування, кількості використаних охолоджувачів та присадок).

Від відстані наконечника фурми до рівня ванни залежить ступінь засвоєння кисню ванною, температурний та шлаковий режими плавки. Водночас, як було показано в попередніх розділах, надмірний перегрів ванни, висока основність розплаву та суттєвий викид металу в шлак призводять до значного скорочення терміну роботи футеровки, його зупинки на профілактику, а відтак підвищення собівартості продукції.

Висота фурми, час введення охолоджувачів та їх об'єми, а також інтенсивність подачі кисню є головними динамічними параметрами, управління якими дозволяє вирішити два основні завдання: забезпечити отримання сталі необхідної марки незалежно від випадкових вхідних факторів і разом з тим мінімізувати витрату кисню та присадок у процесі продування, тим самим зменшивши собівартість одержуваної сталі.

Пропонується здійснити це шляхом моделювання поведінки реального оператора з урахуванням результатів його попередніх дій. Для цього в базі даних «Плавки», яка фіксує проведення попередніх плавок, відшукуються всі протоколи, які відповідають поточним початковим умовам шихтування та завданню на вид сталі, що має бути виготовлений. Числові дані на вході описують, крім масових, також хімічні характеристики чавуну та брухту, використаного на плавку, та готової сталі, яка має бути отримана. Формат вхідних даних модулю описує фрагмент розрахункової таблиці на рисунку 2.

Наведені на рис. 2 величини разом з масовими показниками шихтування створюють вектор контрольованих збурень Z , а параметри готової сталі — вектор цільових змінних внаслідок керування X^* .

	C	Si	Mn	S	P	t
Чавун рідкий	4.3	0.8	0.7	0.035	0.05	1290
Чавун в чушках	4.2	0.8	0.7	0.035	0.05	
Брухт чавуну	4.25	0.9	0.65	0.035	0.05	
Брухт (10% Кремнію)	0.2	10	0.5	0.200	0.05	
Брухт сталевий	0.2	0.1	0.5	0.040	0.025	Тпрост
Шихта загалом	4.045	0.765	0.734	0.049	0.051	29
Готова сталь	C	Mn	S	P	t	Маса
	0.18	0.15	0.03	0.009	1630	59

Рис. 2. Вхідні дані підсистеми керування плавкою

В базі даних попередніх плавок відшуковуються протоколи, які мають найменшу зважену відстань до поточного Z та X^* в просторі координат. Критерій близькості D вираховується за нормованою метрикою

$$D = \alpha \sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i - z_i^0}{z_i^0} \right)^2 + \sum_{j=1}^m \left(\frac{x_j^* - x_j^{*0}}{x_j^{*0}} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

де α – ваговий коефіцієнт початкових умов, який зрівноважує вектори Z та X^* в просторі координат; n – кількість елементів вектору початкових умов; m – кількість елементів вектору що описує готову сталь; z_i – числове значення i -тої координати початкових умов попередньої плавки (зразка), $i = \overline{1, n}$; z_i^0 – числове значення i -тої координати початкових умов поточної плавки; x_j^* – значення j -того параметру готової сталі для плавки-зразка, $j = \overline{1, m}$; x_j^{*0} – значення j -того параметру готової сталі для поточної плавки (приймаються граничні згідно ДСТУ).

На практиці до вектора Z слід віднести запаси охолоджуючих речовин основних типів (їх шість), час очікування конвертера після попередньої плавки, зважений хімічний склад шихти (5 складових), температуру чавуну та масу шиткування. При цьому різна розмірність координат не має значення, адже вони нормуються через наявність поточної координати в знаменнику.

Коефіцієнт α має приймати значення більше 1, якщо виплавляється традиційна марка сталі, прецедентів виготовлення якої (в тому числі вдалих) в базі даних плавок велика кількість. В цьому випадку друга складова в (1) фактично має перетворюватись на 0, адже нас цікавлять вдалі приклади з пам'яті виплавки саме такої марки сталі, яка задана. Якщо ж виплавляється нова сталь, вдалих випадків виготовлення якої в базі даних плавок мало або вони відсутні, слід приймати $\alpha = 0,1..0,25$, аби підтягувалися протоколи плавки, у яких була отримана сталь з максимально близькими параметрами (вектор X^*).

Серед найближчих аналогів обираються ті протоколи попередніх плавки, які мають найменшу нормовану відстань за (1) та найкращі економічні показники – вектор X_1 . Кращими вважаються: якомога менша витрата кисню, менше відхилення від планового часу продувки, відсутність додувок, відсутність перевищення кількості охолоджувачів, відсутність порушення умови основності шлаку. Згортка економічних критеріїв має вигляд

$$C = c_1 V'_{O_2} + c_2 t' + c_3 N_d t_d + \sum_{k=1}^p (c_{4k} m'_k) + c_5 p H' \rightarrow \min, \quad (2)$$

де c_i – приведена до грошової оцінки вартість додаткових витрат на плавку за i -тою причиною, грн, $i = \overline{1, 5}$; V'_{O_2} – понаднормова витрата кисню, м³; t' – перевищення запланованого часу продувки, сек; N_d – кількість додувок; t_d – загальний час додувок, сек; m'_k – маса додаткових витрати охолоджувача k -того виду, тон, $k = \overline{1, p}$; p – кількість доступних видів охолоджувачів, зазвичай $p = 3..6$; $p H'$ – відхилення основності шлаку від заданого значення.

В «ідеального» аналогу з бази даних плавки критерій (2) дорівнює 0.

Як показано в (Богушевський, 2014), відхилення хімічного складу чи температури готової сталі від заданих значень також збільшує собівартість, тому оцінка «кращих» зразків ведення плавки з бази даних виконується за рівноважною згортокою відповідності за нормалізованими відносно математичного очікування значеннями векторів Z , X та X_1 :

$$F = c_{st} M_{st} D + C \rightarrow \min \quad (3)$$

де c_{st} – вартість 1 тони готової сталі, грн; M_{st} – розрахункова маса плавки, тон.

Якщо декілька попередніх плавки мають однакову якість за (3), вони всі беруться до розгляду, інакше за зразок обирається обмежена підмножина найкращих варіантів ведення плавки в минулому, для яких показник за (3) не перевищує заданого порогового рівня. Останній встановлюється емпіричним шляхом

і зменшується з накопиченням в пам'яті великої кількості вдалих прецедентів.

Сценарій поведінки оператора конвертера будується як усереднений за найкращими відібраними зразками з пам'яті вектор вигляду, представленого у таблиці 1.

Якщо в якості зразків обираються сценарії з різною кількістю зміни висоти фурми, зміни рівня подачі кисню та кількості внесень охолоджувачів, приймається сценарій з більшою кількістю моментів за базовий, а у сценарій з меншою кількістю зміни керуючих впливів вносяться рядки, які не містять дій.

Вектори однакової довжини усереднюються з урахуванням вагових коефіцієнтів, зворотно пропорційних відстані сценарію-зразка від початкового стану поточної плавки в просторі станів вектора X

$$t'_i = \sum_{l=1}^v \left(\frac{t_{il}}{F_l} \right) / \sum_{l=1}^v F_l^{-1}, \quad (4)$$

$$W'_i = \sum_{l=1}^v \left(\frac{W_{il}}{F_l} \right) / \sum_{l=1}^v F_l^{-1}, \quad (5)$$

де t'_i – зважений час виконання i -тої дії, сек; W'_i – зважений числовий показник виконання i -тої дії у відповідних одиницях виміру; t_{il} – час виконання i -тої дії в сценарії $l=1, v$, сек; W_{il} – числовий показник виконання i -тої дії в сценарії $l=1, v$; v – кількість «кращих» сценаріїв, віді-

браних за (3); F_l – значення зведеного критерію оптимальності l -того сценарію.

Послідовність рекомендацій щодо дій оператора виводиться на інтерфейс користувача робочого місця оператора. Як було зазначено, оператор може не дотримуватись порад СППР, а виконувати плавку спираючись на власний досвід і враховуючи неконтрольовані збурення (вектор змінних Z_1). В кожному випадку, протокол ведення плавки і її результати зберігаються в БД «Плавки».

Запропонований підхід був реалізований на одному з підприємств Дніпропетровщини. В якості тестової вибірки були обрані 196 послідовних плавок, виконаних на двох конвертерах протягом шести змін в вересні 2021 року. В ході експериментальної перевірки виплавлялася сталь марок 3пс (84 плавки), 5сп (62 плавки) та ст45 (40 плавок).

В таблиці 2 наведені вимоги до хімічного складу названих марок сталі та цільові значення, що приймалися за бажані в складі вектору X^* у формулі (1). В якості бажаних значень вектору економічних показників плавки приймалися мінімальні спостережені показники серед множини v відібраних для порівняння «найближчих» за початковими даними протоколів. Значення v становило від 4 до 7 сценаріїв-прикладів, при цьому більші значення зустрічаються у випадках повторюваних за (1) та (3) плавок.

Таблиця 1

Приклад вектору, що описує сценарій ведення плавки оператором конвертера

№ елемента	Позначення	Значення	Сенс елемента
U1	t_{Σ}	800	загальний час продувки – 800 секунд
U2	N_f	8	кількість змін висоти фурми – 8
U3	N_{O_2}	5	кількість змін рівня подачі кисню – 6
U4	N_t	6	кількість моментів внесення охолоджувачів – 6
U5	t_{1f}	0	перший час зміни висоти фурми, сек
U6	H_{1f}	4.20	перша висота фурми, м
U7	t_{2f}	120	другий час висоти фурми, сек
U8	H_{2f}	3.50	друга висота фурми, м
...	...	...	...
U17	t_{Nf}	645	останній час зміни висоти фурми, сек
U18	H_{Nf}	1.96	остання висота фурми, м
U19	t_{1O_2}	0	перший час зміни подачі кисню, сек
U20	V_{1O_2}	1380	перший рівень подачі кисню, м³/хв
U21	t_{2O_2}	249	другий час зміни подачі кисню, сек
U22	V_{2O_2}	1330	другий рівень подачі кисню, м³/хв
...	...	...	...
U27	t_{NO_2}	660	останній час зміни подачі кисню, сек
U28	V_{NO_2}	1380	останній рівень подачі кисню, м³/хв
U29	T_{Nt1}	69	Час першого введення охолоджувача, сек
U30	V_{Nt1}	10	Об'єм охолоджувача, що вводиться, т
U31	M_{Nt1}	m1	тип охолоджувача, що вводиться (m1 – вапно ГГ)
...	...	...	...
U44	T_{Nt1}	730	Час останнього введення охолоджувача, сек
U45	V_{Nt1}	0.1	Об'єм охолоджувача, що вводиться, т
U46	M_{Nt1}	m7	тип охолоджувача, що вводиться (m7 – вугілля)

Таблиця 2

Вимоги до хімічного складу марок сталі, розглянутих в експерименті

Марка сталі	Хімічний склад за ДСТУ																			
	C		S		P		Si		Mn		Ni		Cr		Cu		As		N	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Ст3пс	0,14	0,22	0	0,05	0	0,04	0,05	0,15	0,4	0,65	0	0,3	0	0,3	0	0,3	0	0	0	0
Ст5сп	0,28	0,37	0	0,05	0	0,04	0,15	0,3	0,5	0,8	0	0,3	0	0,3	0	0,3	0	0,08	0	0,01
Ст45	0,42	0,5	0	0,035	0	0,03	0,17	0,37	0,5	0,8	0	0,3	0	0,25	0	0,3	0	0	0	0

Для порівняння результатів застосування розробленої підсистеми оператора конвертерного цеха з попереднім режимом роботи було обрано для порівняння по 100 випадкових плавов для кожної з марок сталі, проведених без використання порад. Результати оцінювались за складовими додаткових витрат у натуральному та грошовому еквіваленті. Порівняння результатів ілюструє таблиця 3, де дані експерименту позначені як «з СППР», а дані щодо ведення аналогічних плавов у минулому – як «без СППР».

Отримані в результаті експериментів результати свідчать про те, що використання підсистеми оператора конвертера, що навчається

на найбільш близьких прикладах з бази даних попередніх плавов дозволяє уникнути випадків отримання сталі, яка не відповідає заданій марці за хімічним складом; зменшити відсоток плавов з порушенням основності в середньому на 42 %, плавов з перевищенням температури – на 79 %; зменшити середні витрати охолоджувача на плавку на 6 %, а середню витрату кисню на плавку – на 4 %; зменшити кількість додувок в 2,88 рази, а середній час плавки – на 19 %.

Як наслідок перелічених позитивних явищ, середня собівартість сталі на розглянутих плавках із застосуванням підсистеми оператора конвертера із самонавчанням зменшилась на 2,5 % – для сталі Ст45, а для сталі Ст3пс – на 3,8 %.

Таблиця 3

Порівняння результатів застосування розробленої підсистеми з веденням плавов без порад оператору

Показник	Ст3пс		Ст5сп		Ст45	
	Без СППР	З СППР	Без СППР	З СППР	Без СППР	З СППР
Кількість плавов	100	84	100	62	100	40
Середній час плавки, сек	1321	1081	1299	1055	1381	1060
Кількість додувок, %	14	5,95	19	6,45	21	7,5
Середня витрата охолоджувачів на плавку, тон	6,55	6,98	6,69	5,11	6,31	6,01
Середня витрата кисню на плавку, тис. м ³	210,44	202,20	199,27	191,84	219,99	208,86
Плавов з перевищенням температури, %	22	5,95	27	4,84	23	2,5
Плавов з порушенням основності, %	6	3,57	4	1,62	3	2,5
Порушення хімічного складу готової сталі	4	0	1	0	0	0
Середня собівартість 1 тони сталі, грн*	9114,4	8768,0	9086,3	8831,9	8996,3	8771,4

* – в цінах березня-липня 2021 року.

Висновки і перспективи подальших досліджень. В роботі запропонований алгоритм навчання підсистеми керування плавкою інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень у контурі управління кисневим конвертером. Дана підсистема автоматизує дії оператора, оптимізує процес за економічним критерієм, а також зменшує вплив на результат людського фактору, що призводить до покращення економічних показників виробництва. Алгоритм навчання полягає у виборі та усередненні кращих з прецедентів попередніх плавов, найближчих до поточної за нормалізованою метрикою. Остання включає як бажані характеристики готової сталі, так і початкові умови ведення плавки.

Запропонований алгоритм самонавчання на відміну від відомих раніше використовує не всю сукупність навчальних прикладів з бази даних попередніх плавов, а лише «найкращі» за зведеним зовнішнім критерієм серед обмеженої підмножини найближчих до поточної плавки за нормалізованою метрикою умов ведення плавки. Запропонований вигляд зовнішнього критерію та метрика порівняння плавов у нормалізованому просторі.

Застосування запропонованого алгоритму самонавчання підсистеми оператора конвертера інтегрованої СППР металургійного виробництва дозволяє за умови наявності достатньої кількості попередніх плавов, що охоплюють поточне замовлення, зменшити собівартість виплавленої сталі на 2,5–3,8 %.

ЛІТЕРАТУРА:

1. World Steel Association. Fact Sheet: Steel and Raw Materials. 2016. URL: <https://www.worldsteel.org/publications/fact-sheets.html> (accessed on 27/03/2019).
2. Демидов В.А. Производство конвертерной стали. Технологическая инструкция. ТИ-233-СТ. КК-02-2014. Днепропетровск: ПАО «Евраз – ДМЗ им. Петровского», 2014. 95 с.
3. Чернятевич А. Г. Выплавка конвертерной стали. Технологическая инструкция. ТИ-230-С320-12. Днепропетровск: ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Дзержинского», 2012. – 53 с.
4. Чернега, Д.Ф. Основы металлургического производства металлов и сплавов / Д.Ф. Чернега, В.С. Богушевский, Ю.Я. Готвянский и др. Под ред. Д.Ф. Чернеги, Ю.Я. Готвянского. К.: Высшая школа., 2006 503 с.
5. Богушевський В.С. Виробництво низькосірчаних марок сталі в конвертерах / В.С. Богушевський, Л.О. Бредун // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра: Збірник праць «Фізико-хімічні основи технології металів». К.: ІВЦ „Видавництво «Політехніка». 2008. с. 84–91.
6. Васильев Д.Б. Исследование эффективности замены стального лома железорудными брикетами при выплавке / Д.Б. Васильев, С.В. Куберский, В.М. Кравченко. Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. 2009. Вып. 28. С. 269–275.
7. Графов А. В. Металлоемкость продукции металлургического производства и оценка эффективности инновационных технологий переработки лома и отходов черных металлов: Монография. Воронеж: Изд-во «Наука–Юнипресс». 2011. 306 с.
8. Желдак Т.А. Математична модель матеріально-теплого балансу плавки в кисневому конвертері та критерій її оптимізації / Т.А. Желдак, Д.О. Воловенко. Інформаційні технології в освіті, науці й техніці (ІТОНТ-2012): матеріали міжнар. наук.-практ. конф.: Черкаси, 25-27 квітня 2012 р. Черкаси: ЧДТУ, 2012. т.1. С. 23–24.
9. Мокринский А.В. Гидродинамические режимы взаимодействия кислородных струй с конвертерной ванной / А.В. Мокринский, Е.В. Протопов, А.Г. Чернятевич. К: Черная металлургия. 2005. №4. С. 11–17
10. Jalkanen, H. Experiences in physicochemical modelling of oxygen converter process (BOF). Adv. Process. Met. Mater. 2006, 2, 541–554.
11. Kattenbelt, C., Roffel, B. Dynamic Modeling of the Main Blow in Basic Oxygen Steelmaking Using Measured Step Responses. Metall Mater Trans B 39, 764–769 (2008). <https://doi.org/10.1007/s11663-008-9184-0>
12. Dogan, N.; Brooks, G.A.; Rhamdhani, M.A. Comprehensive model of oxygen steelmaking part 1: Model development and validation. ISIJ Int. 2011, 51, 1086–1092. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1086>
13. Lytvynuk, Y.; Schenk, J.; Hiebler, M.; Sormann, A. Thermodynamic and Kinetic Model of the Converter Steelmaking Process. Part 1: The Description of the BOF Model. Steel Res. Int. 2014, 85, 537–543. <https://doi.org/10.1002/srin.201300272>
14. Sarkar, R., Gupta, P., Basu, S. et al. Dynamic Modeling of LD Converter Steelmaking: Reaction Modeling Using Gibbs' Free Energy Minimization. Metall Mater Trans B 46, 961–976 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0245-2>
15. Rout, B.K., Brooks, G., Rhamdhani, M.A. et al. Dynamic Model of Basic Oxygen Steelmaking Process Based on Multi-zone Reaction Kinetics: Model Derivation and Validation. Metall Mater Trans B 49, 537–557 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11663-017-1166-7>
16. Dering D. A dynamic optimization framework for basic oxygen furnace operation / D. Dering, C. Swartz, N. Dogan // Chemical Engineering Science, Volume 241, 2021, 116653, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116653>.
17. Желдак Т.А. Подходы к построению интеллектуальной системы, управляющей кислородным конвертером / Т.А. Желдак, Д.А. Воловенко. Науковий вісник Національного гірничого університету. 2011. № 5. С. 133–136.
18. Богушевський В.С. Керування киснево-конвертерною плавкою в замкненому режимі / В.С. Богушевський, С.В. Жук, Є.К. Бондаренко, О.О.Капусняк. Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2014. № 5. С. 76–83.
19. Бойко В.С. Оптимизация раскисления стали с использованием данных об активности растворенного кислорода / В.С. Бойко, М.Н. Якин, С.А. Коваль, А.В. Стефанец, И.Н. Фентисов, А.А. Годынский, Е.А. Чичкарев // Металл и литье Украины. 2012. № 2–3. С. 12–15.

REFERENCES:

1. World Steel Association (2016). Fact Sheet: Steel and Raw Materials. URL: <https://www.worldsteel.org/publications/fact-sheets.html> (accessed on 27.03.2019).
2. Demidov V.A. (2014) Proyzvodstvo konverternoi staly. Tekhnolohycheskaia ynstruktsyia. [BOF converter steel production. Technological instruction] TU-233-ST. KК-02-2014. Dnepropetrovsk: PAO «Evraz – DMZ». – 95p. [in Russian]

3. Cherniatevich A.H. (2012). Vyplavka konverternoi staly. Tekhnolohycheskaia ynstruktsyia. [BOF converter steel melting. Technological instruction] TU-230-S320-12. Dneprodzerzhynsk: PAO «Dneprovskiy metallurhicheskyi kombynat im. Dzerzhynskoho». – 53 p. [in Russian]
4. Cherneha, D.F. (2006). Osnovy metallurhicheskoho proizvodstva metallov i splavov [Fundamentals of metallurgical production of metals and alloys] / D.F. Cherneha, V.S. Bohushevskiy, Y.I. Hotvianskiy. – K.: Vysshaya shkola. – 503p. [in Russian]
5. Bohushevskiy V.S. (2008) Vyrobnystvo nyzkosirchanystykh marok stali v konverterakh [Production of low-sulphur steel grades in converters] / V.S. Bohushevskiy, L.O. Bredun // Spetsialna metalurhiia: vchora, sohodni, zavtra: Zbirnyk prats. – K.: Vydavnytstvo «Politehnika». – 84–91. [in Ukrainian]
6. Vasylev D.B. (2009) Issledovaniie effektivnosti zameny stalnoho loma zhelezorudnymi briketami pri vyplavke [Study of the efficiency of replacing steel scrap with iron ore briquettes during smelting] / D.B. Vasylev, S.V. Kuberskiy, V.M. Kravchenko // Sbornik nauchnykh trudov Donbasskoho hosudarstvennoho tekhnicheskoho universiteta. – V. 28. – P. 269–275. [in Russian]
7. Hrafov A. V. (2011). Metalloemkost produktov metallurhicheskoho proizvodstva i otsenka effektivnosti innovatsionnykh tekhnolohiy pererabotki loma i otkhodov chernykh metallov: Monograph [Metal consumption of products of metallurgical production and evaluation of the effectiveness of innovative technologies for processing scrap and waste of ferrous metals]. – Voronezh: «Nauka–lunypress». – 306 p. [in Russian]
8. Zheldak T.A. (2012). Matematychna model materialno-teplovoho balansu plavky v kysnevomu konverteri ta kryterii yii optymizatsii [Mathematical model of material-heat balance of melting in an oxygen converter and criterion for its optimization] / T.A. Zheldak, D.O. Volovenko // Informatsiini tekhnolohii v osviti, nautsi y tekhnitsi (ITONT-2012): – Cherkasy: ChDTU. – V.1. – P. 23–24. [in Ukrainian]
9. Mokrynskiy A.V. (2005). Hidrodinamicheskie rezhimy vzaimodeystviia kislorodnykh strui s konverternoy vannoy [Hydrodynamic modes of interaction between oxygen jets and a converter bath] / A.V. Mokrynskiy, E.V. Protopov, A.H. Cherniatevych – K.: Chernaya metallurhiya. – 2005. №4. – S. 11–17 [in Russian]
10. Jalkanen, H. (2006). Experiences in physicochemical modelling of oxygen converter process (BOF). Adv. Process. Met. Mater. V.2, 541–554.
11. Kattenbelt, C. (2008). Dynamic Modeling of the Main Blow in Basic Oxygen Steelmaking Using Measured Step Responses / C. Kattenbelt, B. Roffel // Metall Mater Trans B 39, 764–769 <https://doi.org/10.1007/s11663-008-9184-0>
12. Dogan, N. (2011). Comprehensive model of oxygen steelmaking part 1: Model development and validation / N. Dogan; G.A. Brooks; M.A. Rhamdhani // ISIJ Int. 2011, 51, 1086–1092. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1086>
13. Lytvynuk, Y. (2014). Thermodynamic and Kinetic Model of the Converter Steelmaking Process. Part 1: The Description of the BOF Model. Steel Res. / Y. Lytvynuk; J. Schenk; M. Hiebler; A. Sormann // Int. 2014, 85, 537–543. <https://doi.org/10.1002/srin.201300272>
14. Sarkar, R. (2015). Dynamic Modeling of LD Converter Steelmaking: Reaction Modeling Using Gibbs Free Energy Minimization. / R. Sarkar, P. Gupta, S. Basu et al. // Metall Mater Trans B 46, 961–976 <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0245-2>
15. Rout, B.K. (2018) Brooks, G., Rhamdhani, M.A. et al. Dynamic Model of Basic Oxygen Steelmaking Process Based on Multi-zone Reaction Kinetics: Model Derivation and Validation. / Rout, B.K., Brooks, G., Rhamdhani, M.A. et al. // Metall Mater Trans B 49, 537–557. <https://doi.org/10.1007/s11663-017-1166-7>
16. Dering D. (2021) A dynamic optimization framework for basic oxygen furnace operation / D. Dering, C. Swartz, N. Dogan // Chemical Engineering Science, Volume 241, 2021, 116653, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116653>.
17. Zheldak T.A. (2011) Podkhody k postroeniiu intellektualnoy sistemy, upravliaiushchei kislorodnym konverterom [Approaches to building an intelligent system that controls an oxygen converter] / T.A. Zheldak, D.A. Volovenko // Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu. V.5 – P. 133–136. [in Russian]
18. Bohushevskiy V.S. (2014) Keruvannia kysnevo-konverternoiu plavkoiu v zamknomu rezhymi [Control of oxygen-converter melting in closed mode] / V.S. Bohushevskiy, S.V. Zhuk, Ye.K. Bondarenko, O.O.Kapusniak // Naukovi visti NTUU «KPI». – V.5. – P. 76–83. [in Ukrainian]
19. Boiko V.S. Optimizatsiia raskisleniia stali s ispolzovaniem dannykh ob aktivnosti rastvorennoho kisloroda [Optimization of steel deoxidation using data on the activity of dissolved oxygen] / V.S. Boiko, M.N. Yakyn, S.A. Koval et al // Metall i litie Ukrainy. V.2–3. – P. 12–15. [in Russian]

УДК 004.94 (072)

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-5>

Іван ЛАКТИОНОВ

доктор технічних наук, доцент, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005, Laktionov.I.S@nmu.one

ORCID: 0000-0001-7857-6382

Scopus Author ID: 57194557735

Олександр ЖАБКО

магістрант, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», вул. Софії Ковалевської, 29, м. Луцьк, Україна, 43024, oleksandr.zhabko.kita@donntu.edu.ua

Бібліографічний опис статті: Лактіонов, І., Жабко, О. (2022). Обґрунтування вимог до структурно-алгоритмічної організації IoT-технології моніторингу концентрацій парникових газів. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 41–51, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-5>

ОБґРУНТУВАННЯ ВИМОГ ДО СТРУКТУРНО-АЛГОРИТМІЧНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ ІОТ-ТЕХНОЛОГІЇ МОНІТОРИНГУ КОНЦЕНТРАЦІЙ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ

Актуальність. У останні десятиліття особливо актуальними стають питання збереження та захисту довколишнього середовища. Одним зі значних викликів є боротьба з явищем парникового ефекту із використанням різних науково-технічних і організаційних прийомів. На сьогоднішній день одним із найбільш ефективних підходів до вирішення проблеми боротьби зі стрімкою динамікою парникового ефекту є отримання інтелектуально інтерпретованих даних щодо динаміки парникових газів у режимі реального часу. Отже, розробка і впровадження технологій Інтернету речей, які призначено для комп'ютеризованого агрегування і предикативного автоматичного аналізу концентрацій парникових газів, є актуальною науково-прикладною задачею. **Метою роботи** є синтез науковообґрунтованих прийомів із розробки структурно-алгоритмічної організації IoT-технології, що спроможна в режимі реального часу реалізовувати комплекс функціональних перетворень вимірюваних даних із комп'ютеризованого моніторингу концентрацій парникових газів. **Об'єктом дослідження** виступають існуючі підходи до організації систем збору, способів передачі та обробки вимірювальних даних із моніторингу концентрацій парникових газів. **Предметом дослідження** є інфокомунікаційні програмно-апаратні рішення в галузі моніторингу концентрацій парникових газів. **Висновки.** Доведено, що розробка і впровадження концептуальних рішень у галузі інформаційних технологій моніторингу концентрацій парникових газів є актуальною науково-прикладною задачею у теперішній час. У статті вирішено науково-прикладне завдання з обґрунтування сукупності вимог до структурно-алгоритмічної організації технології IoT-моніторингу прикладного екологічного спрямування. Проаналізовано існуючі підходи до побудови та виконано вибір відповідних технічних апаратно-програмних рішень, проведено логічне узагальнення систем збору і аналітики даних, а також синтезовано загальну архітектуру досліджуваної технології. На базі архітектури технології було обґрунтовано її функціональну схему і деталізований алгоритм роботи, описано основні компоненти та сформульовано базові функції системи.

Ключові слова: IoT-технологія, моніторинг, mesh-мережа, алгоритм, маршрутизація, парниковий ефект.

Ivan LAKTIONOV

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Software Engineering, Dnipro University of Technology, av. Dmytra Yavornytskoho, 19, Dnipro, Ukraine, 49005, Laktionov.I.S@nmu.one

ORCID: 0000-0001-7857-6382

Scopus-Author ID: 57194557735

Oleksandr ZHABKO

Master's student, SHEI 'Donetsk National Technical University', str. Sofia Kovalevska, 29, Lutsk, Ukraine, 43024, oleksandr.zhabko.kita@donntu.edu.ua

To cite this article: Laktionov, I., Zhabko, O. (2022). Obgruntuvannya vymoh do strukturno-alhorytmichnoi orhanizatsii IoT-tekhnologii monitorynhu kontsentratsii parnykovykh haziv [Rationale

of the requirements of IoT-technology structural and algorithmic organization on greenhouse gases concentrations monitoring]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 41–51, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-5>

RATIONALE OF THE REQUIREMENTS OF IOT-TECHNOLOGY STRUCTURAL AND ALGORITHMIC ORGANIZATION ON GREENHOUSE GASES CONCENTRATIONS MONITORING

Relevance. *The issues of environment preservation and protection have become especially relevant in recent decades. One of the significant challenges is the fight against the greenhouse effect phenomenon using various scientific, technical and organizational methods. To date, one of the most effective approaches for solving the problem of combating the greenhouse effect rapid dynamics is to obtain intelligently interpreted data on the dynamics of greenhouse gases in real time. Therefore, the development and implementation of Internet of Things technologies designed for computerized analysis of greenhouse gases concentrations is a relevant scientific and applied task. The main goal is a synthesis of scientifically based methods for the development of IoT-technology structural and algorithmic organization, which is capable of real-time implementation of a complex of measurement data functional transformations on greenhouse gases concentrations computerized monitoring. The research object is the existing approaches to collection systems organization, methods of transmission and processing of measurement data on greenhouse gases concentrations monitoring. The research subject is infocommunication software and hardware solutions in the field of greenhouse gases concentrations monitoring. Conclusions.* It has been proven that the development and implementation of conceptual solutions in the field of information technologies on greenhouse gases concentrations monitoring is a relevant scientific and applied task at the present time. The article solves the scientific and applied task of the requirements set rationale for the structural and algorithmic organization of the applied environmental IoT-monitoring technology. The existing approaches to construction have been analyzed and the selection of appropriate technical hardware and software solutions has been performed, a logical generalization of data collection and analysis systems has been carried out and the general architecture of the researched technology has been synthesized. Based on the architecture of the technology its functional diagram and detailed work-algorithm have been substantiated, the main components have been described and the basic functions have been formulated.

Key words: IoT-technology, monitoring, mesh-network, algorithm, routing, greenhouse effect.

Актуальність науково-прикладної задачі дослідження. В останні десятиліття особливо актуальними стають питання збереження та захисту довколишнього середовища. Одним зі значних викликів є боротьба з явищем парникового ефекту [1]. Парниковий ефект виникає у результаті накопичення в атмосфері Землі парникових газів: вуглекислий газ (CO_2), метан (CH_4), оксид азоту (N_2O), озон (O_3) і фторовані гази. До джерел природного походження таких газів відносять: випаровування водяної пари в атмосферу, виділення вуглекислого газу під час дихання, поява метану в результаті розкладання та інше. До джерел штучного походження: спалювання викопного палива різноманітними об'єктами транспортної інфраструктури, вирубування лісів та викиди промислових підприємств. Все це обумовлює підвищення температури на Землі та навіть незначне підвищення середньої глобальної температури має значні наслідки, насамперед, це підвищення рівня моря через танення льодовиків. Також підвищення температури впливає на глобальну зміну клімату планети, що порушує нормальні умови життя для живих істот і руйнує екосистеми. Додатковий негативний ефект включає зміни в рівнях опадів [2].

Боротьба зі зміною клімату вимагатиме постійного контролю й керування викидами парникових газів у атмосферу, що, в свою чергу, потребуватиме вищої точності та оперативності моніторингу, звітності та перевірки. Реалізація технологій вискоєфективного інтелектуального моніторингу кліматичних параметрів позитивно впливає на численні критичні для національної безпеки й економіки сектори [3]. На сьогоднішній день одним із найбільш ефективних підходів до вирішення проблеми боротьби зі стрімкою динамікою парникового ефекту є отримання інтелектуально інтерпретованих даних щодо динаміки парникових газів у режимі реального часу. Отже, розробка і впровадження технологій Інтернету речей, які призначено для комп'ютеризованого аналізу концентрацій парникових газів, є актуальною науково-прикладною задачею.

Мета і задачі статті. Основною метою роботи є синтез науковообґрунтованих прийомів із розробки структурно-алгоритмічної організації IoT-технології, що спроможна в режимі реального часу реалізовувати комплекс функціональних перетворень вимірюваних даних із комп'ютеризованого моніторингу концентрацій парникових газів. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

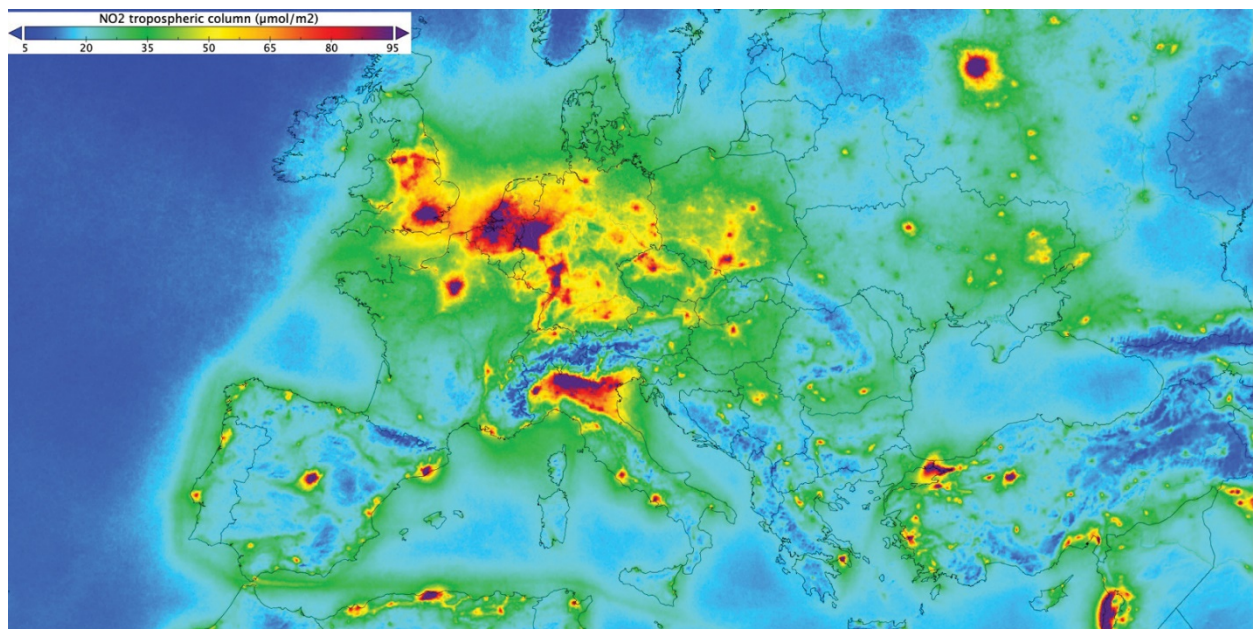
- критичний аналіз і логічне узагальнення існуючих підходів щодо моніторингу викидів парникових газів;
- виявлення та вивчення найбільш ефективних сучасних програмно-технічних рішень із побудови інфокомунікаційних мереж кліматичного моніторингу;
- розробка архітектури та алгоритмів функціонування досліджуваної IoT-технології;
- обґрунтування сукупності критеріїв для подальшого проєктування, моделювання, розробки та впровадження IoT-технології моніторингу концентрацій парникових газів із використанням mesh-мереж;
- обґрунтування подальших напрямків пріоритетних досліджень у заявленій предметній області.

Критичний аналіз та логічне узагальнення останніх досліджень, публікацій і науково-технічних розробок. Проведений аналіз концепцій щодо моніторингу параметрів довколишнього середовища дозволив виокремити три загальні підходи: за допомогою систем супутникового зв'язку, з використанням атмосферних зондів та розгортання наземних систем збору і передачі даних.

Технології на базі супутникового зв'язку здатні забезпечити покриття в усьому світі

з високою точністю й роздільною здатністю як, наприклад, наведено на рисунку 1.

Як показує аналіз сучасних літературних джерел, супутники, що розміщені на орбіті, містять комплекси давачів, які детектують відбиту або випромінювану енергію та гази від поверхні Землі (див. рис. 2). Уряди та державні установи більшості країн світу підтримали програми реалізації моніторингу викидів парникових газів шляхом запуску супутникових систем для агрегування національних і глобальних баз даних щодо динаміки викидів парникових газів [5]. Завдяки відкритому доступу до цих даних академічні, урядові та комерційні установи отримали змогу надавати важливі функції з оцінки таких даних ширшій спільноті. Прикладами супутникових систем є незалежні та надійні платформи, які можуть опрацьовувати та об'єднувати величезні обсяги даних для створення відповідних баз знань. Ці місії мають потенціал зробити внесок у національні кадастри викидів парникових газів, зосереджуючись на трьох основних газах, перерахованих у Паризької угоді для цілей звітності сторін: вуглекислий газ (CO_2), метан (CH_4) і оксид азоту (N_2O). Реалізація такого підходу дозволила згенерувати загальну карту парникових газів у масштабах планети [6].



According to the Air Quality in Europe report published in 2018 by the European Environment Agency (EEA), 19 EU Member States recorded nitrogen dioxide concentration above the annual permissible limit. Imagery from Sentinel-5P

Рис. 1. Приклад результату моніторингу викидів парникових газів на території Європи за допомогою супутників [4]

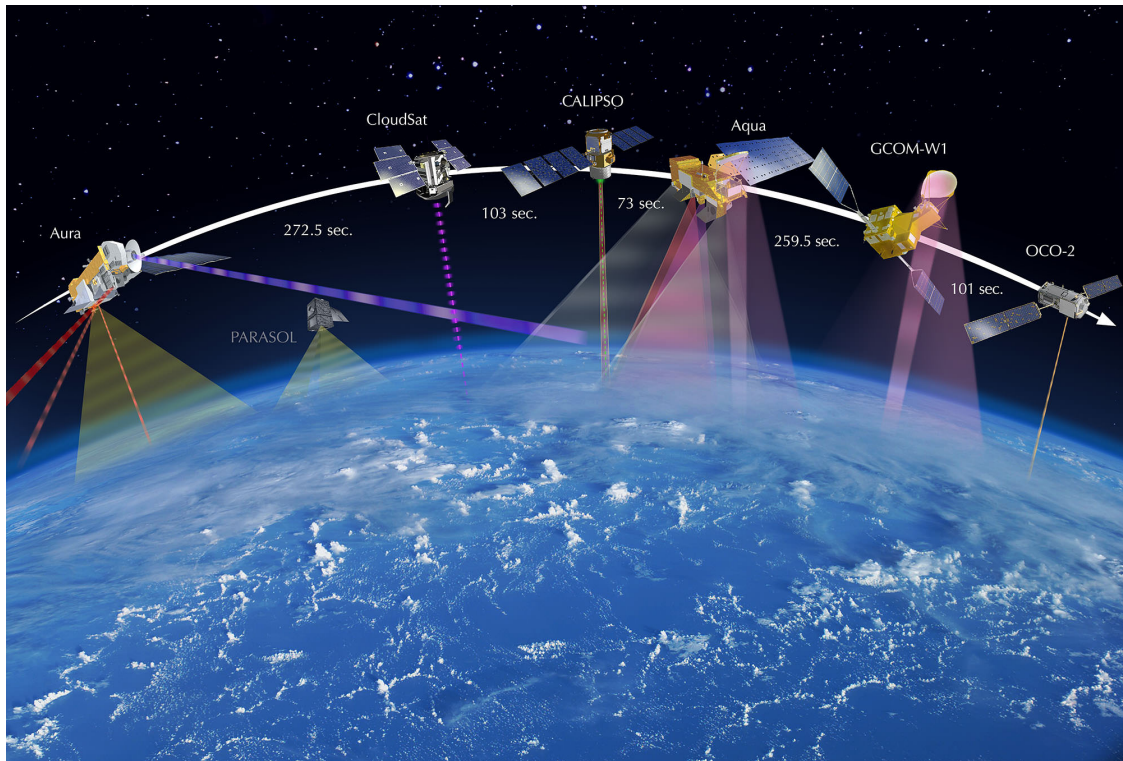


Рис. 2. Приклад організації процесу моніторингу концентрацій парникових газів за допомогою супутників [5]

Другим широко апробованим і використовуваним підходом щодо збору інформації відносно динаміки концентрацій парникових газів є застосування безпілотних літальних апаратів із інтегрованими пристроями неруйнівного інструментального моніторингу. Типовим прикладом такого технічного рішення є Fast Response Atmospheric Turbulence (FRAT) [7]. Цей зонд є автономним програмно-апаратним комплексом, який придатний до використання під час проведення атмосферного вимірювального контролю й надання даних, які можуть бути використані для оцінки потоків детектованих газів та / або інших фізико-хімічних параметрів. Основною характерною особливістю конструкції FRAT є її здатність поглинати навколишнє повітря з рівномірною швидкістю без дестабілізуючого впливу турбулентності. Такий підхід має наступні істотні переваги: підвищення точності вимірювань; економія часу та ресурсів на відносно невеликих відстанях; усунення необхідності виконувати додаткові аналізи з урахуванням руху зонду [7].

Третім широко розповсюдженим видом технологій моніторингу кліматичного призначення є використання наземних розподілених

систем датчиків і мережевих пристроїв. Існує велика кількість фірмових стандартів, що розроблені для впровадження під час наземного моніторингу. Узагальнено наземні системи можна представити трьома ключовими складовими: вузол детектування і агрегування даних, мережа передачі даних та система обробки й аналізу отриманої інформації [8] як, наприклад, показано на рисунку 3.

Важливим є зауваження відносно того, що саме якісне обґрунтування компонентної бази і функціонального забезпечення сенсорного і мережевого рівнів у подальшому впливає на якість функціонування всієї технології. Для наземного збору даних необхідним є визначення виду топології мережі, середовища передавання й алгоритму організації взаємодії між вузлами мережі.

Під час проведення порівняльного аналізу технологій комп'ютеризованого моніторингу концентрацій парникових газів, які деталізовано вище, було зроблено проміжні висновки, які наведено в таблиці 1. Якісні градації параметрів «високий», «середній» та «низький» є результатами співставлення технологій одна з одною на якісному рівні.

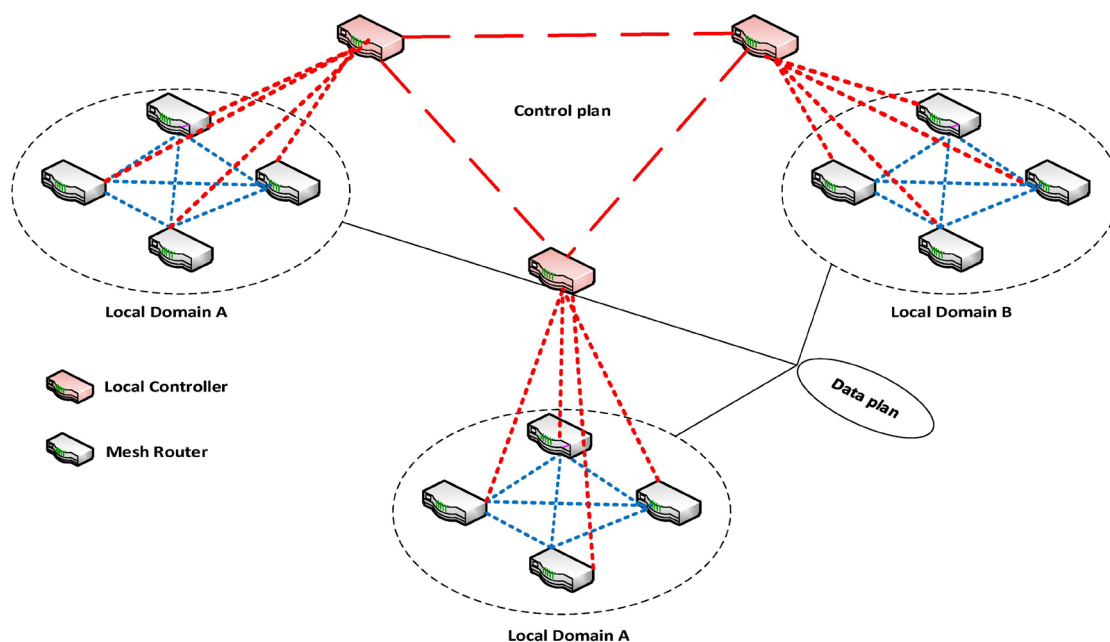


Рис. 3. Приклад мережевої організації наземної технології моніторингу кліматичних даних [8]

Таблиця 1

Результати порівняння технологій кліматичного моніторингу

Параметр	Супутники	Зонди	Наземні мережі
Покриття	Високе	Низьке	Високе
Точність	Середня	Середня	Висока
Складність технології	Висока	Середня	Середня
Мобільність	Низька	Висока	Середня
Масштабованість	Висока	Низька	Висока
Вартість	Висока	Середня	Середня

Таким чином, під час аналізу відомих результатів у досліджуваній предметній області було встановлено, що організація системи моніторингу парникових газів із використанням наземних сенсорних і мережевих технологій є на даний момент оптимальним рішенням із точки зору інтегральних техніко-економічних показників. Пояснюється це тим, що супутникові системи загалом використовуються для отримання більш глобальної картини відносно парникових газів та їх впливу на планету, тобто відображають інтегральну тенденцію, що не є таким актуальним під час організації інфо-комунікаційного рішення для локальних завдань моніторингу, а атмосферні зонди наразі мають велику кількість варіантів реалізацій і у багатьох випадках реалізуються не за рахунок утворення стабільної телекомунікаційної мережі. Наземні мережеві рішення мають наступні переваги:

- ергономічність під час упровадження та обслуговування у реальних умовах експлуатації;

- висока точність і дискретність детектування;

- здатність до масштабування під час розширення переліку детектованих фізико-хімічних параметрів.

Також можна зазначити основні обмеження, що притаманні програмно-апаратним рішенням таких систем і обумовлюють необхідність проведення додаткових досліджень:

- облік можливості розгортання та стабільного функціонування у різноманітних кліматичних умовах;

- обмеження, що пов'язані з адаптацією мережевих алгоритмів;

- захист цілісності даних під час передачі;

- потреба у розробці моделей обробки значних об'ємів вимірювальних даних у режимі реального часу.

Наступним реалізованим етапом аналізу була деталізація характеристик розповсюджених наземних мережевих технологій кліматичного моніторингу. При цьому для більш ґрунтовного аналізу, окрім систем моніторингу

концентрацій парникових газів, були розглянуті аналогічні рішення для інших галузей. Це дозволило більш детально сформулювати основні вимоги до мережевого рівня проєктованої технології. Під час аналізу були розглянуті наступні технології: Tevatronic, WoRShIP та Ribbit Network.

Tevatronic використовується в аграрному секторі та базується на бездротових мережах [9]. Tevatronic – це технологія, яка повністю автоматизує процедури зрошення та внесення добрив, що налаштовані для досягнення бажаної глибини кореневої системи, а також прийняття рішень за вимірювальними даними. Бездротові датчики збирають прецизійні дані щодо стану ґрунту в кожній характерній зоні аграрного об'єкту. Мікроконтролерний блок після первинної цифрової обробки відправляє вимірювальну інформацію до хмарного середовища інтелектуального опрацювання даних, що синхронізовано з циклами зрошення / внесення добрив без втручання людини. Таким чином, Tevatronic є повністю автономним мережевим рішенням.

WoRShIP є більш глобальним проєктом із програмно-апаратної реалізації задач моніторингу промислового призначення. Це рішення базується на фотоакустичному принципі дії щодо виявлення газів від фірми-розробника WoePal. Така система спроможна виявляти низку парникових газів і забруднювачів повітря, а також аналізувати потоки та концентрації парникових газів на рівні мікроконцентрацій у режимі онлайн. Ця технологія узгоджена з протоколами зв'язку Bluetooth і Wi-Fi. Програмна компонента такого рішення може бути адаптована під різні сценарії функціонування мереж динамічного моніторингу детектування й аналізу потоків парникових газів.

Одним із альтернативних напрямків є створення некомерційних проєктів на базі концепції Інтернету речей як, наприклад, мережа Ribbit, що являє собою значну мережу бюджетних сенсорів парникових газів із відкритим кодом [10]. Цей науковий проєкт має на меті створити найбільшу в світі базу даних щодо викидів парникових газів, що дасть змогу будь-кому приєднатися до роботи над задачами аналізу змін клімату та надавати обґрунтовані рекомендації з поліпшення глобальної кліматичної ситуації.

Таким чином, на підставі деталізованого аналізу вищенаведених рішень із кліматичного моніторингу було сформовано основні вимоги до IoT-технології, яка розробляється і досліджується в даній статті, а саме:

- автономність і надійність мережевого рішення;
- інтеграція датчиків з існуючими стандартами побудови інфокомунікаційних мереж;
- побудова бездротової мережі сенсорів із доступом до глобальної мережі обміну й трансформації даних;
- розробка алгоритмів адаптивного обміну даними в складних кліматичних умовах;
- використання моделей штучного інтелекту для аналізу даних від розподілених сенсорів.

Результати досліджень. З обліком результатів критичного аналізу та логічного узагальнення відомих наукових досліджень і прикладних рішень [11] було розроблено узагальнену структурну схему інфокомунікаційної мережі моніторингу концентрацій парникових газів, яку наведено на рисунку 4.

На рисунку 4 введено такі позначення:

- processing center – інфраструктура для обробки інформації (рівень аналітики);
- node – вузли мережі передачі даних (мережевий рівень);
- sensor – давачі збору вимірювальних даних (польовий рівень).

Інфраструктура для обробки інформації представляє собою серверне середовище для отримання, обробки та зберігання даних, надання доступу до інформації для користувачів із різними правами, оновлення вузлів мережі та датчиків за необхідності.

Основні функції вузлів передачі полягають в маршрутизації трафіку в напрямку до середовища обробки та спеціальної інформації до давачів моніторингу, побудові стабільної топології мережі за допомогою резервних маршрутів та обміні службовою інформацією між собою.

Дачі представляють собою кінцеві пристрої технології, які під час взаємодії з довколишнім середовищем передають дані до мережі та обмінюються службовою інформацією з вузлами мережі.

Подальше висування вимог до досліджуваної IoT-технології потребує встановлення переліку основних складових елементів парникових газів [12], як це показано на рисунку 5 і деталізовано в таблиці 2.

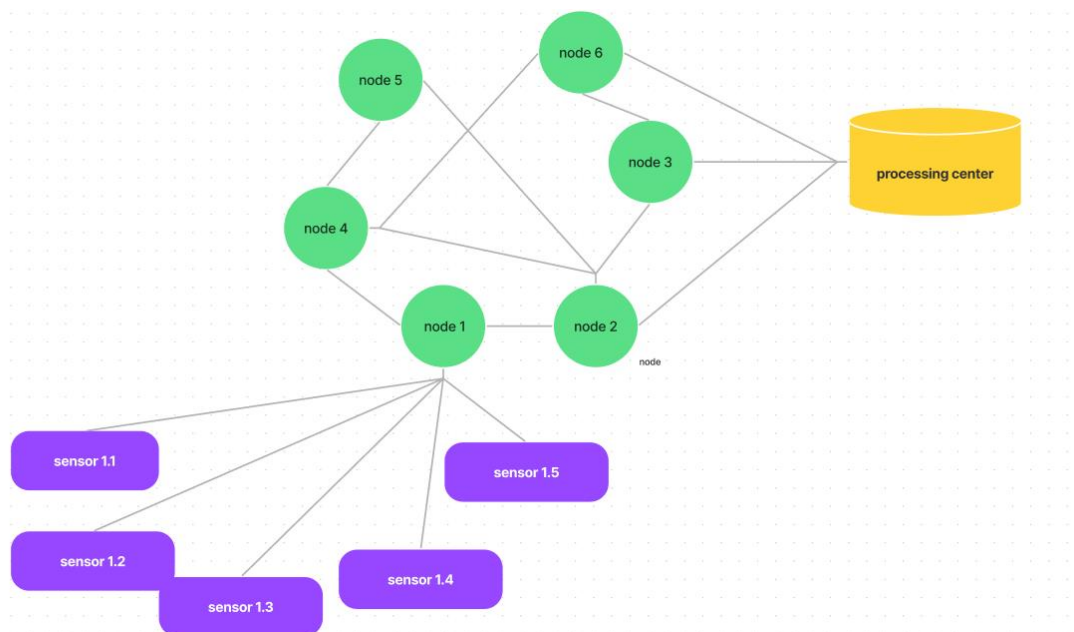


Рис. 4. Структурна схема інфокомунікаційної мережі моніторингу концентрацій парникових газів

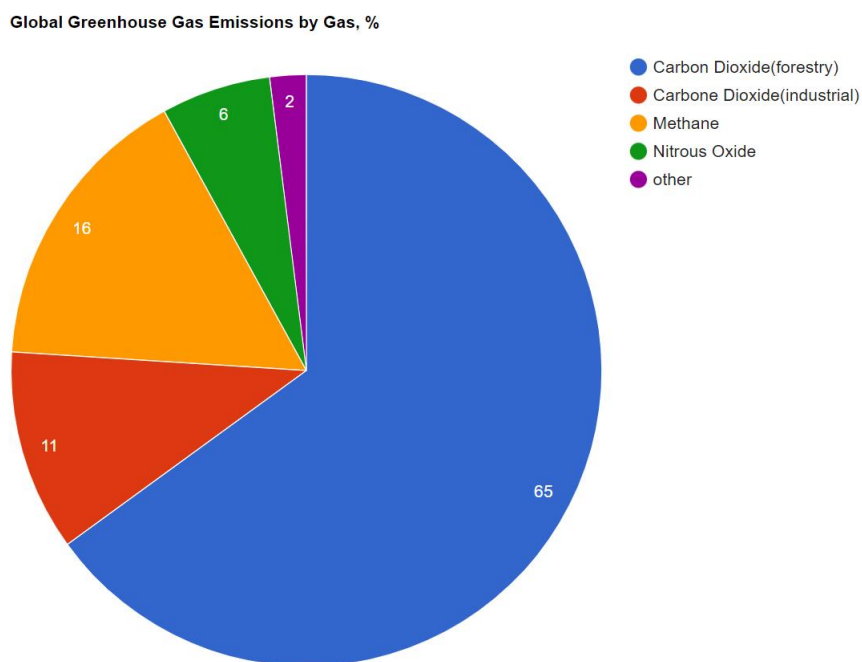


Рис. 5. Діаграма розподілу співвідношення концентрацій парникових газів у довколишньому середовищі

Таблиця 2

Деталізована інформація щодо розподілу концентрацій парникових газів

Назва	Хімічна формула	Концентрація в атмосфері, ppm	Відсоткове співвідношення, %
Водяна пара	H ₂ O	від 10 до 50 тис.	від 36 до 72
Вуглекислий газ	CO ₂	приблизно 400	від 9 до 26
Метан	CH ₄	приблизно 1,8	від 4 до 9
Озон	O ₃	від 2 до 8	від 3 до 7

Виходячи з поставлених у попередніх розділах вимог було встановлено, що необхідним є задоволення умови автономності інфокомунікаційної мережі. Для цього запропоновано три основні види алгоритмів взаємодії:

- алгоритм початкового налаштування технології;
- алгоритм збору та передачі інформації;
- алгоритм оновлення системи.

Алгоритм початкового налаштування працює у випадку першого встановлення технології або її повного перезавантаження. У такому випадку послідовність дій після фізичного з'єднання та активації усіх складових системи є наступною:

- ініціалізація давачів та обмін службовою інформацією з вузлами входу до мережі;
- налаштування маршрутів між мережевими вузлами та побудова статичної топології;
- перевірка зв'язку між вузлами мережі та середовищем обробки інформації;
- передача тестової послідовності від давачів до середовища передавання та очікування відповіді.

Алгоритм збору та передачі інформації виконується впродовж всього активного сеансу використання технології моніторингу та складається з реалізації таких процедур:

- обмін та маршрутизація пакетів вимірювальних даних;
- налаштування динамічної топології між вузлами мережі.

Алгоритм передачі пакетів зводиться до стандарту побудови мережі. Серед відомих серійних стандартизованих протоколів налаштування оптимальної топології одним із найкращих є принцип побудови mesh-мережі [13]. Такий бездротовий стандарт mesh-мережі може розгортатися на базі декількох технічних рішень, які було проаналізовано в цій статті та наведено в таблиці 3.

Проаналізувавши дані, які наведено в таблиці 3, у якості вузлів передачі вимірювальної інформації було обрано модулі ZigBee [14]. Такі модулі (див. рис. 6) є оптимальними з точки зору часу автономної роботи і характеризуються достатніми показниками якості та

швидкості передачі даних невеликих обсягів. ZigBee-пристрої суміжні з більшістю серійних мікроконтролерів на апаратному, програмному і конструктивному рівнях.

Алгоритм оновлення полягає в постійному самонавчанні та корегуванні технології під час її роботи. Такий підхід стає можливим за рахунок розробки та інтегрування до архітектури досліджуваної технології моделей нейронних мереж та нечіткої логіки. Нейронні мережі під час впровадження в якості алгоритму побудови топології сприяють пришвидшенню первинної побудови системи та оперативної її перебудови у випадках аварійних ситуацій. Апарат нечіткої логіки задіяний на кінцевих пристроях із метою більш якісного збору й аналітики вимірювальних даних у реальному часі під час протікання процесу роботи системи. Загальне оновлення алгоритмів та відповідних їм програмних компонентів реалізується через центр обробки і має дискретний характер.

Під час обґрунтування вимог до апаратних засобів досліджуваної IoT-технології моніторингу концентрацій парникових газів була встановлена сукупність придатних за метрологічними і функціональними параметрами бюджетних давачів, а саме: озон – MQ131, метан – MQ-4, водяна пара – YL-83, вуглекислий газ – MH-Z19B. Зазначені сенсори обрані на підставі міркувань із можливості їх інтеграції з бюджетними мікроконтролерними платформами сімейства Arduino, на які у поєднанні з додатковими модулями розширення, покладаються функції збору, первинної цифрової трансформації та передачі даних на мережеві вузли.

Кожен мережевий вузол представляє собою мікрокомп'ютер на базі Raspberry Pi і підключеного до нього модуля ZigBee. Мікрокомп'ютерна платформа Raspberry Pi має достатні обчислювальні потужності для вирішення задач агрегування даних із Arduino, інтелектуального опрацювання вимірювальних даних і паралельної діагностики топології мережі та ретрансляції інформації до центру аналітичної обробки.

Таблиця 3

Результати порівняння бездротових мережевих технологій

Характеристика технології (стандарту)	ZigBee (IEEE 802.15.4)	Wi-Fi (IEEE 802.11b)	Bluetooth (BLE) (IEEE 802.15.1)
Частотний діапазон, ГГц	від 2,4 до 2,483		
Пропускна здатність, Кбіт/сек	250	11000	723,1
Розмір стеку протоколу, Кбайт	від 32 до 64	понад 1000	понад 250
Час безперервної автономної роботи від акумулятора, дні	від 100 до 1000	від 0,5 до 5	від 1 до 10
Максимальна кількість вузлів у мережі	65536	10	7
Діапазон дії, м	від 10 до 100	від 20 до 300	від 10 до 100



Рис. 6. Типовий вигляд модуля ZigBee

Інфраструктура центру обробки виноситься до хмарного середовища. Для цього може бути використана комерційна публічна хмара AWS, яка надає інструменти для організації серверного середовища, реалізації моделей автоматизованої обробки інформації, вирішення проблем зберігання даних, оновлення алгоритмів мережі та генерування й підтримки

рішень. Аналогічними за своїм функціоналом також є платформи Google Cloud та Microsoft Azure, які також можуть бути використанні під час реалізації досліджуваної прикладної IoT-технології. Таким чином, розроблена з обліком вищезазначених вимог функціональна схема IoT-технології моніторингу концентрацій парникових газів наведена на рисунку 7.

Основні виконувані технологією функції, яку у вигляді функціональної схеми наведено на рисунку 7, є наступними:

- детектування вихідних сигналів бездротової мережі датчиків парникових газів;
- організація послідовної передачі вимірювальних даних на мікроконтролерний вузол на базі Arduino;
- приймання та передача інформації за допомогою бездротової технології ZigBee;
- побудова маршрутів та організація топології на базі мікрокомп'ютерного пристрою Raspberry Pi;
- хмарна інтелектуальна обробка інформації та оновлення системи за допомогою середовища AWS.

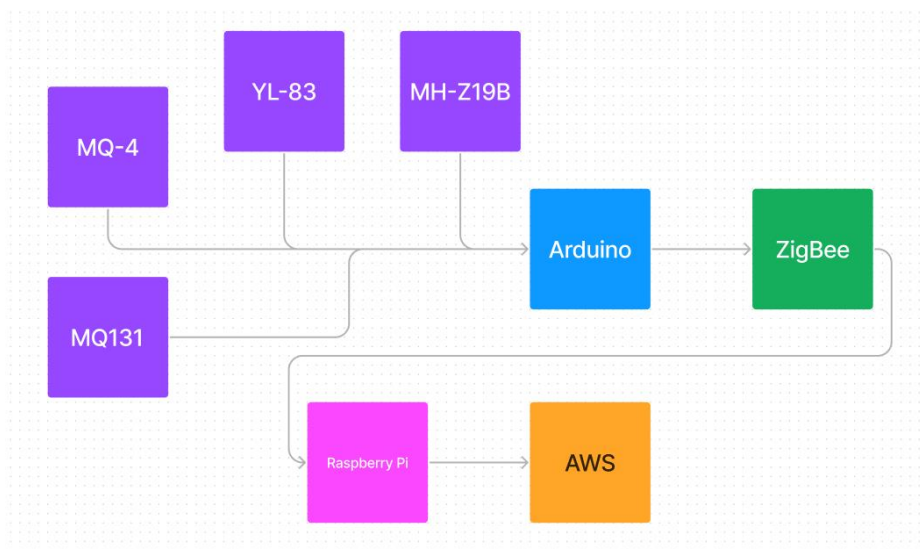


Рис. 7. Узагальнена функціональна схема IoT-технології моніторингу концентрацій парникових газів

Отже, на підставі проведених досліджень було встановлено, що зазначена структурно-алгоритмічна організація IoT-технології моніторингу концентрацій парникових газів корелює з загальними концептуальними тенденціями в галузі інформаційних технологій за критеріями масштабності, адаптивності й комплексності агрегування й трансформації вимірювальних даних.

Пріоритетні напрямки подальших досліджень. За результатами аналізу та формування основних вимог подальшими кроками є вирішення трьох ключових задач:

- розробка і моделювання мережі, що здатна якісно, надійно та продуктивно виконувати покладені на неї функції й утворювати стабільну інфокомунікаційну інфраструктуру обміну вимірювальною інформацією;

- експериментальні випробування давачів для детектування концентрацій парникових газів та вирішення проблеми їх синтезу зі загальною мережею, а також оптимізація алгоритмів взаємодії компонентів інфокомунікаційної мережі;

- розробка програмних компонент хмарних обчислень на основі інтелектуальних алгоритмів трансформації вимірювальних даних та тестування сценаріїв обробки потенційно великих обсягів фізичних даних, що надходять від розподілених засобів інструментального комп'ютеризованого моніторингу.

Висновки. Доведено, що розробка і впровадження концептуальних рішень у галузі інформаційних технологій моніторингу концентрацій парникових газів є актуальною науково-прикладною задачею у теперішній час. У статті вирішено науково-прикладне завдання з обґрунтування сукупності вимог до структурно-алгоритмічної організації технології IoT-моніторингу прикладного екологічного спрямування. Проаналізовано існуючі підходи до побудови та виконано вибір відповідних технічних апаратно-програмних рішень, проведено логічне узагальнення систем збору і аналітики даних, а також синтезовано загальну архітектуру досліджуваної технології. На базі архітектури технології було обґрунтовано її функціональну схему і деталізований алгоритм роботи, описано основні компоненти та сформульовано базові функції системи.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Стаття Climate Change Indicators: Greenhouse Gases організації USEPA. URL: epa.gov/climate-indicators/greenhouse-gases (дата звернення: 12.09.2022).
2. Althor G. et al. Global mismatch between greenhouse gas emissions and the burden of climate change. *Sci. Rep.* 2016. Vol. 6 (20281). P. 1 – 6.
3. Shindell D.T. et al. Improved attribution of climate forcing to emissions. *Science*. 2009. Vol. 326. P. 716 – 718.
4. Стаття Eye from the Sky: Satellites to pinpoint greenhouse emissions and air pollution сайту Geospatial world. URL: geospatialworld.net/article/satellites-greenhouse-emissions/ (дата звернення: 11.09.2022).
5. Стаття Earth Science Missions сайту NASA. URL: climate.nasa.gov/nasa_science/missions/ (дата звернення: 11.09.2022).
6. Стаття Greenhouse Gas (GHG) Management Program сайту NASA. URL: nasa.gov/emd/ghg (дата звернення: 12.09.2022).
7. Telionis D. Et al. A Fast-Response Probe Capable of Atmospheric Sampling in Harsh Conditions. In: *AIAA Infotech@Aerospace*. Ohio, 2013. P. 1 – 23.
8. Elzain H., Wu Y. Software Defined Wireless Mesh Network Flat Distribution Control Plane. *Future Internet*, 2019. Vol. 11 (166). P. 1 – 17.
9. Стаття IoT and Autonomous Irrigation with Tevatronic сайту Open Learning Campus. URL: olc.worldbank.org/content/iot-and-autonomous-irrigation-tevatronic (дата звернення: 14.09.2022).
10. Головна сторінка проєкту Ribbit Network. URL: ribbitnetwork.org/ (дата звернення: 14.09.2022).
11. Saha S., Acharjee U., Tahzib-Ul-Islam Md. A Survey on Wireless Mesh Network and its Challenges at the Transport Layer. *International Journal of Computer Engineering and Technology*, 2014. Vol. 5 (8). P. 169 – 177.
12. Стаття Overview of Greenhouse Gases USEPA. URL: epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases (дата звернення: 15.09.2022).
13. Стаття Mesh Networking сайту IEEE. URL: standards.ieee.org/ieee/802.11s/4243/ (дата звернення: 12.09.2022).
14. Стаття ZigBee сайту CSA. URL: csa-iot.org/all-solutions/zigbee/ (дата звернення: 11.09.2022).

REFERENCES:

1. Web-Article: Climate Change Indicators: Greenhouse Gases USEPA. URL: epa.gov/climate-indicators/greenhouse-gases (accessed: 12.09.2022).
2. Althor G. et al. Global mismatch between greenhouse gas emissions and the burden of climate change. Sci. Rep. 2016. Vol. 6 (20281). P. 1 – 6.
3. Shindell D.T. et al. Improved attribution of climate forcing to emissions. Science. 2009. Vol. 326. P. 716 – 718.
4. Web-Article: Eye from the Sky: Satellites to pinpoint greenhouse emissions and air pollution сайту Geospatial world. URL: geospatialworld.net/article/satellites-greenhouse-emissions/ (accessed: 11.09.2022).
5. Web-Article: Earth Science Missions сайту NASA. URL: climate.nasa.gov/nasa_science/missions/ (accessed: 11.09.2022).
6. Web-Article: Greenhouse Gas (GHG) Management Program сайту NASA. URL: nasa.gov/emd/ghg (accessed: 12.09.2022).
7. Telionis D. Et al. A Fast-Response Probe Capable of Atmospheric Sampling in Harsh Conditions. In: AIAA Infotech@Aerospace. Ohio, 2013. P. 1 – 23.
8. Elzain H., Wu Y. Software Defined Wireless Mesh Network Flat Distribution Control Plane. Future Internet, 2019. Vol. 11 (166). P. 1 – 17.
9. Web-Article: IoT and Autonomous Irrigation with Tevatronic Open Learning Campus. URL: olc.worldbank.org/content/iot-and-autonomous-irrigation-tevatronic (accessed: 14.09.2022).
10. Web-Article: Ribbir Network. URL: ribbitnetwork.org/ (accessed: 14.09.2022).
11. Saha S., Acharjee U., Tahzib-UI-Islam Md. A Survey on Wireless Mesh Network and its Challenges at the Transport Layer. International Journal of Computer Engineering and Technology, 2014. Vol. 5 (8). P. 169 – 177.
12. Web-Article: Overview of Greenhouse Gases USEPA. URL: epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases (accessed: 15.09.2022).
13. Web-Article: Mesh Networking сайту IEEE. URL: standards.ieee.org/ieee/802.11s/4243/ accessed: 12.09.2022).
14. Web-Article: ZigBee сайту CSA. URL: csa-iot.org/all-solutions/zigbee/ (accessed: 11.09.2022).

УДК 004.896

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-6>

Leonid MESHCHERIAKOV

Doctor of Engineering, Professor, Department of Software Engineering, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, meshcheriakov.l.i@nmu.one

ORCID: 0000-0002-9579-19701970

Scopus-Author ID: 57205282540

Anton KOZHEVNYKOV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Information Technology and Computer Engineering, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, kozhevnykov.a.v@nmu.one

ORCID: 0000-0002-0078-2546

Svitlana KOSTRYTSKA

Head of the Department of Foreign Languages, Professor, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, kostrytska.s.i@nmu.one

ORCID: 0000-0001-8604-6146

Scopus-Author ID: 57202759632

Anna STESHENKO

Master at the Department of Software Engineering, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, steshenko.a.a@nmu.one

To cite this article: Meshcheriakov, L., Kozhevnykov, A., Kostrytska, S., Steshenko, A. (2022). Analytychne modeliuvannia otsiniuvannia ta upravlinnia operatyvnym stanom potuzhnykh barabannykh mlyniv yak intelektualnykh ahentiv [Analytical modeling evaluation and management of operational state of powerful drum mills as intelligent agents]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 52–60, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-6>

ANALYTICAL MODELING EVALUATION AND MANAGEMENT OF OPERATIONAL STATE OF POWERFUL DRUM MILLS AS INTELLIGENT AGENTS

The use of intelligent multi-agent systems in the technological processes of mining and processing enterprises, taking into account the complexity and power of the units used here, requires research and analytical justification for the functioning of assessment and management systems in this environment. A promising approach is the ability to present each technological unit, namely a powerful drum mill with a control system, as an intelligent agent in the whole set of technological and technical processes actually existing here.

The aim of the work is to study the possibility of analytical modeling of evaluation and management of the operational state of powerful drum mills as intelligent agents using an observer.

The methodology for ensuring the solution of the presented problem is to apply the reflection of the operational state of a powerful drum mill through the internal state of the agent in state variables, which to minimizes the resources for the formation of initial assessment and control solutions.

The scientific novelty is in the application of analytical modeling in state variables, using the principle of dynamic programming by R. Bellman to present the internal technical and technological state of the drum mill through the state of the agent, using a discrete observer for operational evaluation and control. This allows optimization according to a given criterion for the accuracy and energy consumption of the initial solutions that are formed in the system.

Conclusions. The justified application of equations in state variables written in the normal Koshi form to represent the internal state of the agent of a powerful drum mill presents an opportunity to more effectively work out the formation of optimal laws of decisions made according to a given criterion for accuracy and energy consumption.

Key words: multi-agent systems, intellectual agents, drum mill, dynamic programming, state variables, optimization of evaluation and management.

Леонід МЕЩЕРЯКОВ

доктор технічних наук, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005, meshcheriakov.l.i@ntnu.one

ORCID: 0000-0002-9579-1970

Scopus-Author ID: 57205282540

Антон КОЖЕВНИКОВ

кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005, kozhevnykov.a.v@ntnu.one

ORCID: 0000-0002-0078-2546

Світлана КОСТРИЦЬКА

завідувачка кафедри іноземних мов, професор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005, kostrytska.s.i@ntnu.one

ORCID: 0000-0001-8604-6146

Scopus-Author ID: 57202759632

Анна СТЕШЕНКО

магістр кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005, steshenko.a.a@ntnu.one

Бібліографічний опис статті: Мещеряков, Л., Кожевников, А., Кострицька, С., Стешенко, А. (2022). Аналітичне моделювання оцінювання та управління оперативним станом потужних барабанних млинів як інтелектуальних агентів. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 52–60, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-6>

АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОЦІНЮВАННЯ ТА УПРАВЛІННЯ ОПЕРАТИВНИМ СТАНОМ ПОТУЖНИХ БАРАБАНИХ МЛИНІВ ЯК ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АГЕНТІВ

Застосування інтелектуальних мультиагентних систем в технологічних процесах гірничо-збагачувальних підприємств, враховуючи складність та потужність агрегатів, що тут використовуються, вимагає дослідження та аналітичного обґрунтування функціонування в цьому середовищі систем оцінювання та управління. Перспективним підходом при цьому виступає можливість представити кожний технологічний агрегат, а саме потужний барабанний млин з системою керування, як інтелектуальний агент у всій множині реально існуючих тут технологічних та технічних процесів.

Метою роботи є дослідження можливості аналітичного моделювання оцінювання та управління оперативним станом потужних барабанних млинів як інтелектуальних агентів з використанням спостерігача.

Методологія забезпечення рішення представленого завдання складається в застосуванні відображення оперативного стану потужного барабанного млина через внутрішній стан агенту в змінний стану, що дозволяє мінімізувати ресурси формування вихідних рішень оцінювання та управління.

Наукова новизна. Складається в застосуванні аналітичного моделювання в змінний стану, з використанням принципу динамічного програмування Р. Беллмана до представлення внутрішнього техніко-технологічного стану барабанного млина через стан агенту, з використання дискретного спостерігача для оперативної оцінки і управління, що дозволяє здійснити оптимізацію відповідно заданого критерію по точності та енерговитратам вихідних рішень, які формуються в системі.

Висновки. Обґрунтоване застосування рівнянь в змінний стану, записаних в нормальній формі Коши, для представлення внутрішнього стану агенту потужного барабанного млина представляє можливість більш ефективно відпрацювати формування оптимальних відповідно заданого критерію по точності та енерговитратам закону рішень, що приймається.

Ключові слова: мультиагентні системи, інтелектуальні агенти, потужний барабанний млин, динамічне програмування, змінний стану, оптимізація оцінювання і управління.

Urgency of the problem. If we consider every single powerful drum mill as an agent of mining and processing enterprise, and there are dozens of them located in the shops parallel to each other, then it is quite possible to introduce such an enterprise as a complex multi-agent system. Moreover, each drum mill that unites a whole stack of various technological, physical and chemical processes, taking into account automatic control systems is essentially an intellectual agent. Depending on the physical and chemical properties of the ore, which comes to the grinding, and the current technical condition of the mill units is carried out the operative intellectual adaptation of the control system according to the formed control criteria (is carried out). This is where application of analytical modeling to the estimation and management of the operational state of powerful drum mills as intellectual agents is a perspective approach with the purpose to increase the accuracy and reliability of functioning of technological process of grinding.

Analysis of recent research and publications. A wide study of existing sources revealed examples of the use of multi-agent systems for planning the work of various production complexes (Griffin, 2001; Meshcheriakov, 2018; Doudlya, 2004; Parunak, 1997; Karaboga, 2005). The main advantages of such systems are respectively: a clear formalization of decision-making points in the form of agents; basic scheduler, which accordingly operates in real time; the formed network of agents that is connected by specific relationships and independently coordinate their functional actions.

In general, the most significant practical results of the use of modern multi-agent systems include the solution of a number of problems of forming an apparatus of needs and capabilities (PM networks). Software-implemented in the form of MAGENTA technology, this apparatus of PM networks (developed by V.A. Vittikh, P.O. Skobelev, G.A. Rzhevsky (Meshcheriakov, 2018)) has found wide use in applied intelligent planning systems for various technological processes and distributed throughout network of objects.

The simulation modeling apparatus also uses a multi-agent approach to formalize the behavior of objects as agents. Currently, there are approaches and appropriate models of multi-agent planning on active and passive converters (developed by B.I. Klebanov and I.M. Moskalev (Parunak, 1997; Karaboga, 2005))), as well as approaches implemented in the AnyLogic environment and when modeling the technological processes of resource transformation (Meshcheriakov, 2018; Doudlya, 2004).

In the identified existing directions of application of modern multi-agent systems and, accordingly, intelligent agents, no significant attention has yet been paid to the operational internal state of powerful drum mills as agents, the assessment of this state and the management of the first on the basis of observers. Obviously, in the future this is one of the promising areas of consideration of generally complex powerful technological units as intelligent agents.

The purpose of the article is to explore the possibility of analytical modeling of evaluation and management of the operational state of powerful drum mills as intelligent agents using a discrete observer.

Presentation of the main material. Solving the problem of identification and optimal joint control of the technical and technological condition of powerful drum mills is an important task, and practice requires such a comprehensive approach. Therefore, considering the architecture of a powerful drum mill on the examples of a mill of the MMS 90 * 30 type, as a single closed technical and technological system, it is quite acceptable to carry out its presentation with a block diagram presented in fig.1, where typical links with unknown values of coefficients reflecting the actual inertia of the corresponding functional technological channels are taken (Meshcheriakov, 2009; Meshcheriakov, 2015).

The control algorithm is formed in the following form. It is necessary to form such control actions U_1, U_2, U_3, U_4 , to ensure optimal stabilization at the specified levels of the total friction value in the support bearing units of the drum mill, the total friction value of the ore filling mass in the drum and the timely stop of the powerful drum mill before the emergency (on the supports and lining).

Based on Fig. 1, differential equations describing the operational dynamics of the state variables of a powerful drum mill will be presented in the technological state as following:

$$\dot{x}_1^* + \alpha_1 x_1^* = b_1 U_1, \quad x_1 = x_1^* + x_1^{**} = x_1^* + k_1 U_2 \quad (1)$$

$$\dot{x}_2^* + \alpha_2 x_2^* = b_2 U_3, \quad x_2 = x_2^* + x_2^{**} = x_2^* + k_2 U_4,$$

$$y_1^* = x_1 + x_2.$$

And according to the technical condition

$$\dot{x}_3^* + \alpha_3 x_3^* = b_3 U_1, \quad x_3 = x_3^* + x_3^{**} = x_3^* + k_3 U_2,$$

$$\dot{x}_4^* + \alpha_4 x_4^* = b_4 U_3,$$

$$x_4 = x_4^* + x_4^{**} = x_4^* + k_4 U_4, \quad y_2^* = x_3 + x_4.$$

After replacing x_i with z_i expressions (1) on the technological and technical conditions, respectively, will look like

$$\begin{cases} \dot{z}_1 + \alpha_1 z_1 = b_1 U_1 \\ \dot{z}_2 + \alpha_2 z_2 = b_2 U_3 \end{cases}, \quad \begin{cases} \dot{z}_3 + \alpha_3 z_3 = b_3 U_1 \\ \dot{z}_4 + \alpha_4 z_4 = b_4 U_3 \end{cases}, \quad (2)$$

$$y_1^* = z_1 + z_2 + k_1 U_2 + k_2 U_4, \quad y_2^* = z_3 + z_4 + k_3 U_2 + k_4 U_4.$$

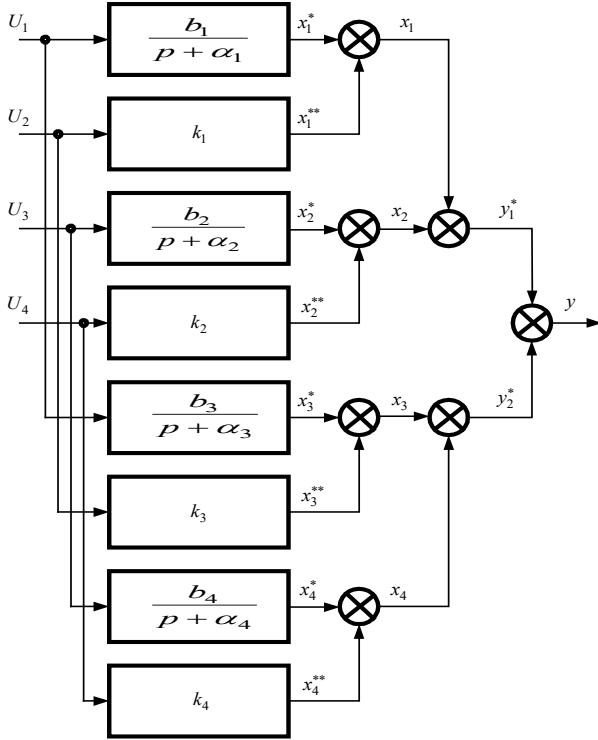


Fig. 1. Complex technical and technological architecture of a powerful drum mill in regular mode

As a result of combining the equations (1) and (2), the complete system for displaying a powerful drum mill in state variables with this representation will be presented in the following form

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= -\alpha_1 z_1 + b_1 U_1, & z_1(0) &= z_{10}; \\ \dot{z}_2 &= -\alpha_2 z_2 + b_2 U_3, & z_2(0) &= z_{20}; \\ \dot{z}_3 &= -\alpha_3 z_3 + b_3 U_1, & z_3(0) &= z_{30}; \\ \dot{z}_4 &= -\alpha_4 z_4 + b_4 U_3, & z_4(0) &= z_{40}; \end{aligned} \quad (3)$$

Accordingly, the output equations will have the form

$$y_1^* = z_1 + z_2 + k_1 U_2 + k_2 U_4, \quad y_2^* = z_3 + z_4 + k_3 U_2 + k_4 U_4, \\ y = y_1^* + y_2^* = z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + (k_1 + k_3)U_2 + (k_2 + k_4)U_4 \quad (4)$$

Or in vector-matrix form

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\alpha_4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_2 & 0 \\ b_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_4 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix}, \\ y = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1] \times \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} + [0 \quad k_1 + k_3 \quad 0 \quad k_2 + k_4] \times \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix}.$$

Transients in the mathematical model of the system for evaluating and controlling a powerful drum mill as an intelligent agent will be absent at the following values of controls

$$U_1 = U_{10}; \quad U_2 = U_{20}; \quad U_3 = U_{30}; \quad U_4 = U_{40},$$

where $U_{10}, U_{20}, U_{30}, U_{40}$ – are constant values, and respectively

$$z_{10} = \frac{b_1 U_{10}}{\alpha_1}; \quad z_{20} = \frac{b_2 U_{30}}{\alpha_2}; \quad z_{30} = \frac{b_3 U_{10}}{\alpha_3}; \quad z_{40} = \frac{b_4 U_{30}}{\alpha_4}.$$

Because it is required to stabilize the values of controls $y_1^* = c_1$, $y_2^* = c_2$ and $y = c$, where c, c_1 i c_2 – are taken as constant values, then the initial control levels can be found from the relations

$$c_1 = z_{10} + z_{20} + k_1 U_{20} + k_2 U_{40} = \frac{b_1 U_{10}}{\alpha_1} + \frac{b_2 U_{30}}{\alpha_2} + k_1 U_{20} + k_2 U_{40},$$

$$c_2 = z_{30} + z_{40} + k_3 U_{20} + k_4 U_{40} = \frac{b_3 U_{10}}{\alpha_3} + \frac{b_4 U_{30}}{\alpha_4} + k_3 U_{20} + k_4 U_{40}, \quad (5)$$

$$c = \frac{b_1 U_{10}}{\alpha_1} + \frac{b_2 U_{30}}{\alpha_2} + \frac{b_3 U_{10}}{\alpha_3} + \frac{b_4 U_{30}}{\alpha_4} + (k_1 + k_3)U_{20} + (k_2 + k_4)U_{40}.$$

When changing control actions by the amount of magnification, the mathematical model of the system of equations (3) and (4) can be written as

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = -\alpha_1 z_1 + b_1 (U_{10} + \Delta U_1) \\ \dot{z}_{10} = -\alpha_1 z_{10} + b_1 U_{10} \end{cases}, \quad z_1(0) = z_{10},$$

$$z_{10}(0) = \frac{b_1 U_{10}}{\alpha_1};$$

$$\begin{cases} \dot{z}_2 = -\alpha_2 z_2 + b_2 (U_{30} + \Delta U_3) \\ \dot{z}_{20} = -\alpha_2 z_{20} + b_2 U_{30} \end{cases}, \quad z_2(0) = z_{20}$$

$$z_{20}(0) = \frac{b_2 U_{30}}{\alpha_2}$$

$$\begin{cases} \dot{z}_3 = -\alpha_3 z_3 + b_3 (U_{10} + \Delta U_1) \\ \dot{z}_{30} = -\alpha_3 z_{30} + b_3 U_{10} \end{cases}, \quad z_3(0) = z_{30},$$

$$z_{30}(0) = \frac{b_3 U_{10}}{\alpha_3}$$

$$\begin{cases} \dot{z}_4 = -\alpha_4 z_4 + b_4 (U_{30} + \Delta U_3) \\ \dot{z}_{40} = -\alpha_4 z_{40} + b_4 U_{30} \end{cases}, \quad z_4(0) = z_{40},$$

$$z_{40}(0) = \frac{b_4 U_{30}}{\alpha_4}$$

$$\begin{cases} y_1 = z_1 + z_2 + k_1 (U_{20} + \Delta U_2) + k_2 (U_{40} + \Delta U_4) \\ y_{10} = z_{10} + z_{20} + k_1 U_{20} + k_2 U_{40} \end{cases}$$

$$\begin{cases} y_2 = z_3 + z_4 + k_3 (U_{20} + \Delta U_2) + k_4 (U_{40} + \Delta U_4) \\ y_{20} = z_{30} + z_{40} + k_3 U_{20} + k_4 U_{40} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} y = z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + (k_1 + k_3)(U_{20} + \Delta U_2) + (k_2 + k_4)(U_{40} + \Delta U_4) \\ y_0 = z_{10} + z_{20} + z_{30} + z_{40} + (k_1 + k_3)U_{20} + (k_2 + k_4)U_{40} \end{cases}$$

When subtracting from the upper equations of the lower equations of the systems (6), you can get the corresponding expressions

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_1 &= -\alpha_1 \varepsilon_1 + b_1 \Delta U_1, & \varepsilon_1(0) &= z_{10} - \frac{b_1 U_{10}}{\alpha_1}; \\ \dot{\varepsilon}_2 &= -\alpha_2 \varepsilon_2 + b_2 \Delta U_3, & \varepsilon_2(0) &= z_{20} - \frac{b_2 U_{30}}{\alpha_2}; \\ \dot{\varepsilon}_3 &= -\alpha_3 \varepsilon_3 + b_3 \Delta U_1, & \varepsilon_3(0) &= z_{30} - \frac{b_3 U_{10}}{\alpha_3}; \\ \dot{\varepsilon}_4 &= -\alpha_4 \varepsilon_4 + b_4 \Delta U_3, & \varepsilon_4(0) &= z_{40} - \frac{b_4 U_{30}}{\alpha_4};\end{aligned}\quad (7)$$

$$y_1 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + k_1 \Delta U_2 + k_2 \Delta U_4,$$

$$y_2 = \varepsilon_3 + \varepsilon_4 + k_3 \Delta U_2 + k_4 \Delta U_4,$$

$$y = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 + (k_1 + k_3) \Delta U_2 + (k_2 + k_4) \Delta U_4.$$

де $\varepsilon_i = z_i + z_{i0}$, $(i = \overline{1,4})$.

To determine the unknown coefficients of the system (7), it is possible to conduct a comparative analysis of it with other normal systems of equations in state variables [2, 3, 5, 6, 8]. Then the systems in the state variables in general can be represented as follows:

– model of electromechanical system of powerful drum mill in vector-matrix form

$$\dot{x} = Ax + BU,$$

$$y = Cx + DU, \quad x(0) = x_0; \quad (8)$$

– adopted technical and technological model of a powerful drum mill in vector-matrix form

$$\dot{\varphi} = M\varphi + NU,$$

$$y = S\varphi + RU, \quad \varphi(0) = \bar{x}_0. \quad (9)$$

Then using the Laplace transform we get for the system (8)

$$(pE - A)x(p) = BU(p) + x_0$$

$$x(p) = (pE - A)^{-1}BU(p) + (pE - A)^{-1}x_0 \quad (10)$$

$$Y(p) = Cx(p) + DU(p) =$$

$$= [C(pE - A)^{-1}B + D]U(p) + C(pE - A)^{-1}x_0.$$

And accordingly for the system (9)

$$(pE - M)\varphi(p) = NU(p) + \bar{x}_0$$

$$\varphi(p) = (pE - M)^{-1}NU(p) + (pE - M)^{-1}\bar{x}_0 \quad (11)$$

$$Y(p) = S\varphi(p) + RU(p) =$$

$$= [S(pE - M)^{-1}N + R]U(p) + S(pE - M)^{-1}\bar{x}_0.$$

Based on the supposed identity of the systems considered in comparison, it can be assumed that

$$C(pE - A)^{-1}B + D = S(pE - M)^{-1}N + R \quad (12)$$

$$C(pE - A)^{-1}x_0 = S(pE - M)^{-1}\bar{x}_0.$$

And then respectively

$$\begin{aligned}& (k_{11} + k_{31} + k_{23} + k_{43})p^3 + \\& [(k_{11} + k_{31} + k_{23})\alpha_{11} + k_{31}\alpha_{21} - k_{23}\alpha_{31} - \\& - k_{11}\alpha_{41} - k_{31} - k_{23} - k_{43}]p^2 + \\& + [(-k_{31} - k_{23})\alpha_{11} + (k_{23} + k_{11})\alpha_{21} + \\& + (k_{31} + k_{23})\alpha_{31} + (k_{23} - k_{11})\alpha_{41} + k_{31} + k_{43}]p + \\& + k_{31}\alpha_{11} + k_{23}\alpha_{21} + k_{11}\alpha_{31} + (k_{11} + k_{31} + k_{23})\alpha_{41} - \\& - k_{43} + k_{01} + k_{03} + k_{04} = (b_1 + b_2 + b_3 + b_4)p^3 + \\& + [-\alpha_1(b_2 + b_3 + b_4) - \alpha_2(b_1 + b_3 + b_4) - \\& - \alpha_3(b_1 + b_2 + b_4) + \alpha_4(b_1 + b_2 + b_3)]p^2 + \\& + [\alpha_1\alpha_2(b_3 + b_4) + \alpha_1\alpha_3(b_3 + b_4) + \\& + \alpha_1\alpha_4(b_2 + b_3) + \alpha_2\alpha_3(b_1 + b_4) + \\& + \alpha_2\alpha_4(b_1 + b_3) + \alpha_3\alpha_4(b_1 + b_2)]p - \\& - b_1\alpha_1\alpha_3\alpha_4 - b_3\alpha_1\alpha_2\alpha_3 - b_2\alpha_1\alpha_3\alpha_4 - b_4\alpha_1\alpha_2\alpha_3.\end{aligned}\quad (13)$$

By equating the coefficients at the same degrees of the complex variable, we obtain a system of nonlinear algebraic equations, the solution of which in this case the consideration leads to the following values of unknown coefficients

$$\alpha_1 = 0.7720389 \cdot 10^{29}, \quad b_1 = -6.286364 \cdot 10^{-10},$$

$$k'_1 = 3.066031 \cdot 10^{-11}$$

$$\alpha_2 = 0.741194 \cdot 10^{11}, \quad b_2 = 0.923272 \cdot 10^{44},$$

$$k'_2 = 1.0203 \cdot 10^6$$

$$\alpha_3 = 0.119998 \cdot 10^{65}, \quad b_3 = 1.726575 \cdot 10^{39},$$

$$k'_3 = 1.034001 \cdot 10^{-11}$$

$$\alpha_4 = 0.0, \quad b_{13} = 0.207001 \cdot 10^{75},$$

$$k'_4 = 0.2114031 \cdot 10^6.$$

Checking at the obtained values of the condition of recoverability through the standard matrix of recoverability.

$$Q = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ CA^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & -\alpha_4 \\ -\alpha_1^2 & -\alpha_2^2 & -\alpha_3^2 & -\alpha_4^2 \\ -\alpha_1^3 & -\alpha_2^3 & -\alpha_3^3 & -\alpha_4^3 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -0.77204 \cdot 10^{29} & -0.7412 \cdot 10^{11} & -0.11999 \cdot 10^{65} & 0 \\ -0.596046 \cdot 10^{58} & -0.549377 \cdot 10^{22} & -0.0143976 \cdot 10^{130} & 0 \\ -0.460171 \cdot 10^{87} & -0.407199 \cdot 10^{33} & -0.001627 \cdot 10^{195} & 0 \end{bmatrix}$$

The matrix is not singular due to the fact that $\det Q = -0.7629752 \cdot 10^{261} \neq 0$ and $\text{rang} Q = 4 = n$. Therefore, in this case the object is renewable.

To ensure maximum accuracy of management and minimization of energy costs, management in the analytical design of the evaluation and management system uses the functionality of the form

$$I = \int_0^\infty \left[q_1(y_1 - y_{10})^2 + q_2(y_2 - y_{20})^2 + q_3(U_1 - U_{10})^2 + q_4(U_2 - U_{20})^2 + q_5(U_3 - U_{30})^2 + q_6(U_4 - U_{40})^2 \right] dt. \quad (14)$$

If the numerical values of controls and controlled variables are brought to standard unified signals, it is permissible to equate them

$$q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q_5 = q_6 = 1.$$

Taking into account (7), the functional (14) will receive the following expression

$$\begin{aligned} I = \int_0^\infty & \left[\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_4^2 + 2(\varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_3\varepsilon_4) + \right. \\ & + \Delta U_1^2 + 2\Delta U_2(\varepsilon_1k_1 + \varepsilon_2k_1 + \varepsilon_3k_3 + \varepsilon_4k_3) + \\ & + \Delta U_2^2(k_1^2 + k_3 + 1) + \Delta U_3^2 + \\ & + 2\Delta U_4(\varepsilon_1k_2 + \varepsilon_2k_2 + \varepsilon_3k_4 + \varepsilon_4k_4) + \\ & + \Delta U_4^2(k_2^2 + k_4 + 1) + \\ & \left. + 2\Delta U_2\Delta U_4(k_1k_2 + k_3k_4) \right] dt \end{aligned} \quad (15)$$

Drawing up the functional equation of R. Bellman

$$\begin{aligned} & \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_4^2 + 2(\varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_3\varepsilon_4) + \Delta U_1^2 + \\ & + 2\Delta U_2(\varepsilon_1k_1 + \varepsilon_2k_1 + \varepsilon_3k_3 + \varepsilon_4k_3) + \\ & + \Delta U_2^2(k_1^2 + k_3 + 1) + \Delta U_3^2 + \\ & + 2\Delta U_4(\varepsilon_1k_2 + \varepsilon_2k_2 + \varepsilon_3k_4 + \varepsilon_4k_4) + \\ & + \Delta U_4^2(k_2^2 + k_4 + 1) + 2\Delta U_2\Delta U_4(k_1k_2 + k_3k_4) + \\ & + (-\alpha_1\varepsilon_1 + b_1\Delta U_1)\frac{dS}{d\varepsilon_1} + (-\alpha_2\varepsilon_2 + b_2\Delta U_3)\frac{dS}{d\varepsilon_2} + \\ & + (-\alpha_3\varepsilon_3 + b_3\Delta U_1)\frac{dS}{d\varepsilon_3} + (-\alpha_4\varepsilon_4 + b_4\Delta U_3)\frac{dS}{d\varepsilon_4} = 0 \\ & 2\Delta U_1 + b_1\frac{dS}{d\varepsilon_1} + b_3\frac{dS}{d\varepsilon_3} = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & k_1(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + k_3(\varepsilon_3 + \varepsilon_4) + \Delta U_2(k_1^2 + k_3 + 1) + \\ & + \Delta U_4(k_1k_2 + k_3k_4) = 0 \end{aligned}$$

$$2\Delta U_3 + b_2\frac{dS}{d\varepsilon_2} + b_4\frac{dS}{d\varepsilon_4} = 0$$

$$\begin{aligned} & k_2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + k_4(\varepsilon_3 + \varepsilon_4) + \\ & + \Delta U_4(k_2^2 + k_4 + 1) + \Delta U_2(k_1k_2 + k_3k_4) = 0 \end{aligned}$$

Denote accordingly

$$\alpha = (k_1k_2 + k_3k_4), \quad \beta = (k_1^2 + k_3 + 1), \quad \sigma = (k_2^2 + k_4 + 1).$$

From the second, third, fourth and fifth equations of the system (16) it turns out

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= -\frac{1}{2} \left(b_1 \frac{dS}{d\varepsilon_1} + b_3 \frac{dS}{d\varepsilon_3} \right) \\ \Delta U_2 &= \frac{[-k_1(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) - k_3(\varepsilon_3 + \varepsilon_4)](\alpha^2 - \beta^2)}{\beta(\alpha^2 - \beta^2)} - \\ & - \frac{\alpha[(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)(\beta k_2 - \alpha k_1) + (\varepsilon_3 + \varepsilon_4)(\beta k_4 - \alpha k_3)]}{\beta(\alpha^2 - \beta^2)} \\ \Delta U_3 &= -\frac{1}{2} \left(b_2 \frac{dS}{d\varepsilon_2} + b_4 \frac{dS}{d\varepsilon_4} \right) \\ \Delta U_4 &= \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)(\beta k_2 - \alpha k_1) + (\varepsilon_3 + \varepsilon_4)(\beta k_4 - \alpha k_3)}{\alpha^2 - \beta^2} \end{aligned} \quad (17)$$

Accordingly, from the first equation of the system (16) after substituting the expression (17) into it, it turns out

$$\begin{aligned} & \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_4^2 + 2(\varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_3\varepsilon_4) + \\ & + \frac{1}{4} \left(b_1 \frac{dS}{d\varepsilon_1} + b_3 \frac{dS}{d\varepsilon_3} \right)^2 + \\ & + 2(\varepsilon_1k_1 + \varepsilon_2k_1 + \varepsilon_3k_3 + \varepsilon_4k_3)G + \\ & + \frac{1}{4} \left(b_2 \frac{dS}{d\varepsilon_2} + b_4 \frac{dS}{d\varepsilon_4} \right)^2 + \beta G^2 + \\ & + 2(\varepsilon_1k_2 + \varepsilon_2k_2 + \varepsilon_3k_4 + \varepsilon_4k_4)K + \\ & + \sigma K^2 + 2\alpha GK - \alpha_1\varepsilon_1 \frac{dS}{d\varepsilon_1} - \\ & - \frac{b_1}{2} \left(b_1 \frac{dS}{d\varepsilon_1} + b_3 \frac{dS}{d\varepsilon_3} \right) \frac{dS}{d\varepsilon_1} - \alpha_2\varepsilon_2 \frac{dS}{d\varepsilon_2} - \\ & - \frac{b_2}{2} \left(b_2 \frac{dS}{d\varepsilon_2} + b_4 \frac{dS}{d\varepsilon_4} \right) \frac{dS}{d\varepsilon_2} - \alpha_3\varepsilon_3 \frac{dS}{d\varepsilon_3} - \\ & - \frac{b_3}{2} \left(b_1 \frac{dS}{d\varepsilon_1} + b_3 \frac{dS}{d\varepsilon_3} \right) \frac{dS}{d\varepsilon_3} - \alpha_4\varepsilon_4 \frac{dS}{d\varepsilon_4} - \\ & - \frac{b_4}{2} \left(b_2 \frac{dS}{d\varepsilon_2} + b_4 \frac{dS}{d\varepsilon_4} \right) \frac{dS}{d\varepsilon_4} = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

To find the laws of control (17), it is necessary to find a function S in the form of an expression (19)

$$S = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4] \times \begin{bmatrix} A_{11} & \frac{A_{12}}{2} & \frac{A_{13}}{2} & \frac{A_{14}}{2} \\ \frac{A_{12}}{2} & A_{22} & \frac{A_{23}}{2} & \frac{A_{24}}{2} \\ \frac{A_{13}}{2} & \frac{A_{23}}{2} & A_{33} & \frac{A_{34}}{2} \\ \frac{A_{14}}{2} & \frac{A_{24}}{2} & \frac{A_{34}}{2} & A_{44} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{bmatrix} \quad (19)$$

From the expression (19) it is determined

$$\frac{dS}{d\alpha_1} = 2A_{11}\alpha_1 + A_{12}\alpha_2 + A_{13}\alpha_3 + A_{14}\alpha_4;$$

$$\frac{dS}{d\alpha_2} = A_{12}\alpha_1 + A_{22}\alpha_2 + A_{23}\alpha_3 + A_{24}\alpha_4;$$

$$\frac{dS}{d\alpha_4} = A_{14}\alpha_1 + A_{24}\alpha_2 + A_{34}\alpha_3 + A_{44}\alpha_4;$$

$$\Delta U_2 = \frac{-[k_1(1-\gamma^2) + (\gamma k_2 - k_1)]\varepsilon_1 - [k_1(1-\gamma^2) + (\gamma k_2 - k_1)]\varepsilon_2 - [k_3(1-\gamma^2) + (\gamma k_4 - k_3)]\varepsilon_3 - [k_3(1-\gamma^2) + (\gamma k_4 - k_3)]\varepsilon_4}{\beta(\alpha^2 - \beta^2)}$$

$$\Delta U_3 = -\left(\frac{A_{12}b_2}{2} + \frac{A_{14}b_4}{2}\right)\varepsilon_1 - \left(\frac{A_{22}b_2}{2} + \frac{A_{24}b_4}{2}\right)\varepsilon_2 - \left(\frac{A_{23}b_2}{2} + \frac{A_{34}b_4}{2}\right)\varepsilon_3 - \left(\frac{A_{24}b_2}{2} + A_{44}b_4\right)\varepsilon_4$$

$$\Delta U_4 = \frac{(\gamma k_2 - k_1)\varepsilon_1 + (\gamma k_2 - k_1)\varepsilon_2 + (\gamma k_4 - k_3)\varepsilon_3 + (\gamma k_4 - k_3)\varepsilon_4}{\alpha(1-\gamma^2)}. \quad (21)$$

Substituting (20) in (18) and grouping the members with $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_1\varepsilon_2, \varepsilon_1\varepsilon_3, \varepsilon_1\varepsilon_4, \varepsilon_2\varepsilon_3, \varepsilon_2\varepsilon_4, \varepsilon_3\varepsilon_4$ and equating the coefficients with zero for them, we get a system of nonlinear equations of the form

$$V_i(A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{14}, A_{22}, A_{23}, A_{24}, A_{33}, A_{34}, A_{44}) = 0, \\ i = 1, 2, 3, \dots, 10. \quad (22)$$

Solving a system of equations (22), we find the desired coefficients A_{ij} , which in this case are equal accordingly

$$\begin{aligned} A_{11} &= 0.1533 \cdot 10^{-79} & A_{14} &= 0.1508 \cdot 10^{-79} \\ A_{24} &= 0.2510 & A_{44} &= 0.2511 \\ A_{12} &= 0.1533 \cdot 10^{-79} & A_{22} &= 0.1510 \cdot 10^{-79} \\ A_{33} &= 0.6091 \cdot 10^{11} \\ A_{13} &= 0.1533 \cdot 10^{-79} & A_{23} &= 0.1496 \cdot 10^{-79} \\ A_{34} &= 0.2510 \end{aligned} \quad (23)$$

Substituting their values into expressions (18) it can be obtained

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= -0.1323491 \cdot 10^{-40} \varepsilon_1 - 0.1291547 \cdot 10^{-40} \varepsilon_2 + \\ &+ 0.105171 \cdot 10^{51} \varepsilon_3 - 0.2166968 \cdot 10^{39} \varepsilon_4 \\ \Delta U_2 &= -0.5082528 \cdot 10^{-41} \varepsilon_1 - 0.5182528 \cdot 10^{-41} \varepsilon_2 + \\ &+ 0.2499975 \cdot 10^{-25} \varepsilon_3 - 0.2499975 \cdot 10^{-25} \varepsilon_4 \\ \Delta U_3 &= -0.1560788 \cdot 10^{-5} \varepsilon_1 - 0.2597863 \cdot 10^{74} \varepsilon_2 + \\ &+ 0.2597863 \cdot 10^{74} \varepsilon_3 - 0.5195725 \cdot 10^{74} \varepsilon_4 \\ \Delta U_4 &= -0.4998983 \cdot 10^{-22} \varepsilon_1 - 0.4998983 \cdot 10^{-22} \varepsilon_2 + \\ &+ 0.4999995 \cdot 10^{-5} \varepsilon_3 - 0.4999995 \cdot 10^{-5} \varepsilon_4 \end{aligned} \quad (24)$$

Replacing variables $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ with their values from (7) ΔU_i to $U_i - U_{i0}$ expressions of control actions have the form

$$\frac{dS}{d\alpha_3} = A_{13}\alpha_1 + A_{23}\alpha_2 + A_{33}\alpha_3 + A_{34}\alpha_4. \quad (20)$$

The last equation substituting in (17) is obtained

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= -\left(\frac{A_{11}b_1}{2} + \frac{A_{13}b_3}{2}\right)\varepsilon_1 - \left(\frac{A_{12}b_1}{2} + \frac{A_{23}b_3}{2}\right)\varepsilon_2 - \\ &- \left(\frac{A_{13}b_1}{2} + A_{33}b_3\right)\varepsilon_3 - \left(\frac{A_{14}b_1}{2} + \frac{A_{34}b_3}{2}\right)\varepsilon_4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_1 &= -0.1323491 \cdot 10^{-40} z_1 - 0.1291547 \cdot 10^{-40} z_2 + \\ &+ 0.105171 \cdot 10^{51} z_3 - 0.2166968 \cdot 10^{39} z_4 + \\ &+ 0.1513307 \cdot 10^{24} U_{10} - 0.160182 \cdot 10^{-7} U_{30} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_2 &= -0.5082528 \cdot 10^{-41} z_1 - 0.5182528 \cdot 10^{-41} z_2 - \\ &- 0.2499975 \cdot 10^{-25} z_3 - 0.2499975 \cdot 10^{-25} z_4 + \\ &+ 0.3597226 \cdot 10^{-52} U_{10} - 0.6331076 \cdot 10^{-8} U_{30} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} U_3 &= -0.1560788 \cdot 10^{-5} z_1 - 0.2597863 \cdot 10^{74} z_2 - \\ &- 0.2597863 \cdot 10^{74} z_3 - 0.5195725 \cdot 10^{74} z_4 + \\ &+ 0.37380701 \cdot 10^{49} U_{10} - 0.323604 \cdot 10^{107} U_{30} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_4 &= 0.4998983 \cdot 10^{-22} z_1 + 0.4998983 \cdot 10^{-22} z_2 + \\ &+ 0.4999995 \cdot 10^{-5} z_3 + 0.4999995 \cdot 10^{-5} z_4 + \\ &+ 0.7194502 \cdot 10^{-30} U_{10} + 0.6227008 \cdot 10^{11} U_{30} \end{aligned}$$

When using in the control circuit of the calculator and the expression of the law of control of the complex system in the state variables (25), it is advisable to restore the state vector of the drum mill with the help of a discrete observer. In this case, the structure of the control system will look like the one presented in Fig. 2, and the discrete description in the difference equations of state will get the following expression

$$z^+(i+1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} z^+(i) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 & 0 \\ m_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_4 & 0 \end{bmatrix} U^+(i). \quad (26)$$

With the corresponding replacement of $z(t)$ by $z(i)$, and accordingly $U(t)$ by $U(i)$ it turns out that the output variable $y(t)$, which is canted at

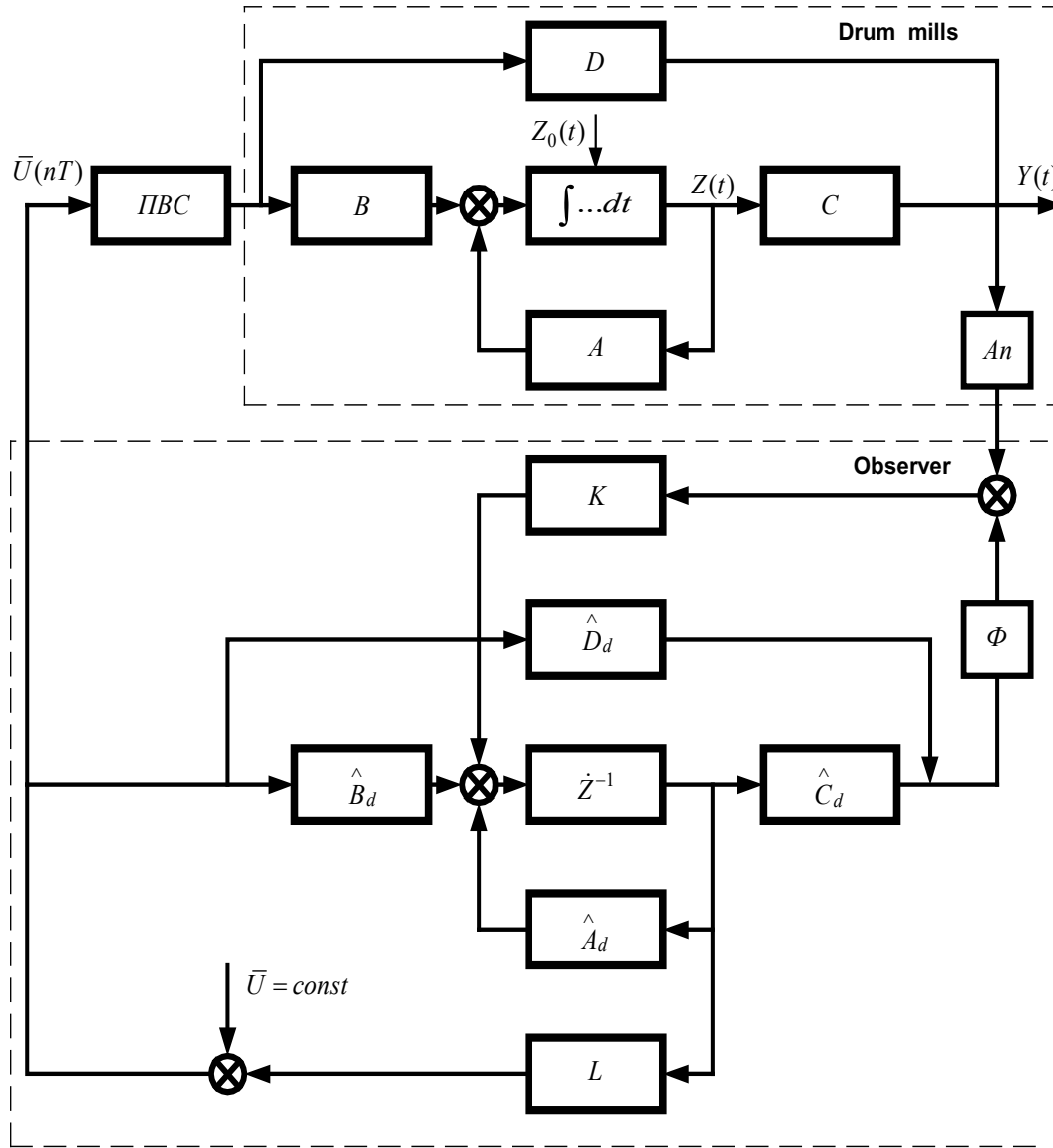


Fig. 2. Block diagram of a multidimensional optimal evaluation and control system with a discrete observer when operating a drum mill

moments of time t_i , where $i = 0.001, 0.002, 0.003, \dots$ will be determined as

$$y^+(i) = [1 \quad 1 \quad n_3 \quad 1] z^+(i) + [m_3 \quad l_1 + l_3 \quad m_2 + m_3 \quad l_2 + l_4] U^+(i) \quad (27)$$

where $z^*(i+1)$ is replaced by $y^*(i)$ for numerical values

$$\begin{aligned} n_3 &= 0.4314 \cdot 10^{70}, & m_3 &= 0.1490 \cdot 10^{59}, \\ l_1 &= k'_1, & l_3 &= k'_3, \\ m_2 &= -0.9233 \cdot 10^{-6}, & m_4 &= 0.207 \cdot 10^{25}, \\ l_2 &= k'_2, & l_4 &= k'_4. \end{aligned}$$

The given above proves that the formed evaluation and management system is fully renewable and we can find

$$A_\alpha - KC_\alpha = \begin{bmatrix} 1-k_1 & -k_1 & -k_1 & -k_1 \\ -k_2 & 1-k_2 & -k_2 & -k_2 \\ -k_3 & -k_3 & n_3(1-k_3) & -k_3 \\ -k_4 & -k_4 & -k_4 & 1-k_4 \end{bmatrix} \quad (28)$$

This matrix has the following characteristic polynomial

$$\begin{aligned} & -3n_3k_2k_3k_4]p - n_3k_3^2 + 2n_3k_1k_3^2 + \\ & + n_3k_1k_2k_3^2 - n_3k_1k_4k_3^2 + n_3k_4k_3^2 - n_3k_1 - \\ & - n_3k_2 - n_3k_3 - n_3k_4 + n_3k_1k_3 + 2n_3k_1k_4 \\ & + n_3k_2k_3 - n_3k_2k_4 + n_3k_1k_2k_3 - n_3k_1k_3k_4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -3n_3k_2k_3k_4]p - n_3k_3^2 + 2n_3k_1k_3^2 + \\
& + n_3k_1k_2k_3^2 - n_3k_1k_4k_3^2 + n_3k_4k_3^2 - n_3k_1 - \\
& - n_3k_2 - n_3k_3 - n_3k_4 + n_3k_1k_3 + 2n_3k_1k_4 + \\
& + n_3k_2k_3 - n_3k_2k_4 + n_3k_1k_2k_3 - n_3k_1k_3k_4 + \\
& + 3n_3k_2k_3k_4 - 2n_3k_1k_2k_3k_4 + n_3 = 0 \quad (29)
\end{aligned}$$

The corresponding discrete observer is found from a system of equations

$$\begin{aligned}
& k_1 + k_2 + n_3k_3 + k_4 - (n_3 + 3) = 0 \\
& n_3k_3^2 - (n_3 + 2)k_1 - 2k_2 - 4n_3k_3 - (n_3 + 2)k_4 + \\
& + 2k_1k_2 + (2n_3 - 1)k_1k_3 + 2k_1k_4 + \\
& + n_3k_2k_3 + 3(n_3 + 1) = 0 \\
& n_3(2k_1 - k_4)k_3^2 + (2n_3 + 1)k_1 + \\
& + (2n_3 + 1)k_2 + 3n_3k_3 + (2n_3 + 1)k_4 - \\
& - (5n_3 + 1)k_1k_3 - 2n_3k_2k_3 + n_3k_2k_4 - \\
& - (n_3 - 1)k_1k_2k_3 - k_1k_2k_4 - \\
& - n_3k_1k_3k_4 - 3n_3k_2k_3k_4 = 0 \quad (30) \\
& -n_3k_3^2 - 2n_3k_1k_3^2 + n_3k_1k_2k_3^2 + \\
& + n_3k_1k_4k_3^2 + n_3k_4k_3^2 - n_3k_1 - \\
& - n_3k_2 - n_3k_3 - n_3k_4 + n_3k_1k_3 +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2n_3k_1k_4 + n_3k_2k_3 - n_3k_2k_4 + \\
& + n_3k_1k_2k_3 - n_3k_1k_3k_4 + 3n_3k_2k_3k_4 - \\
& - 2n_3k_1k_2k_3k_4 + n_3 = 0
\end{aligned}$$

where $n_3 = 0.4314$

The solution of the system (27) determines the matrix of observer coefficients

$$K = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3.4314 \\ 12.6373 \\ 141.29 \\ -0.443307 \cdot 10^6 \end{bmatrix} \quad (31)$$

The resulting discrete observer reduces any initial recovery error to zero value in a maximum of four steps.

Conclusions. The presentation of technological units, namely powerful drum mills, in conjunction with optimal control systems as individual intelligent agents can be analytically justified in structure. Accordingly, modeling through the variables of the state of the complex internal operational state of the mill as an agent of a multi-agent system presents an opportunity to more effectively work out the formation of optimal decisions according to a given criterion for accuracy and energy consumption of the law of decisions made. The use of a discrete observer in this structure increases positive outcomes of evaluation and management.

REFERENCES:

1. Griffin D.R. Animal Minds. – Chicago: The University of Chicago Press, 2001. – 376 p.
2. Meshcheriakov L. Methods and models of authentication and management by the mountain technological complexes: Monograph. – the D.: National mountain university, 2009. – 263 p. [in Russian].
3. Meshcheriakov L. (2015). Identification of stabilizing modes for the parameters of drilling tools. / L. Meshcheriakov, L. Tokar, K. Ziborov // Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems, Taylor & Francis Group, London, 2015, – P. 135–142.
4. Meshcheriakov L. Forming of structure of subsystem of diagnostics of mountain electromechanics complexes / L. Meshcheriakov, S.I. Vipanaseenco, N.S.Dreshpac, A.I. Shirin // Collection of scientific labours NGOu. – Dnepr, 2018. – №53. – P. 213–223. [in Russian].
5. Meshcheriakov L. Recognition of technological states of drum mills on the basis of neuron networks of adaptive resonance / L. Meshcheriakov, O.M. Galoushco, O.I. Sirotcina, O.T.Demidov // Collection of scientific labours NGOu. – Dnepr, 2019. – №57. – P. 129–139. [in Russian].
6. Litvin V.V. Moultiagentni systems of support of acceptance of decisions, that are based on precedents and use adaptive ontology / V.V. Litvin // Artificial intelligence. – 2009. – № 2. – P. 24–33. [in Russian].
7. Doudlya M.A. Diagnostics and planning of boring machines and machineries / M.A Doudlya., L.I. Meshcheriakov // Aid train. – Dnepropetrovsk: National mountain university, 2004. – 267 p. [in Russian].
8. Didenko D.G. Multiagentnaya system of the discrete-event imitation design OpenGPSS : dis. ... kand. tehn. sciences: special. 05.13.06 / Didenko Dmitriy George; NTU Ukraine the "Kiev polytechnic institute". – To., 2010. – 155 p. [in Russian].
9. Parunak H.V.D. "Go to the ant": Engineering principles from natural multi-agent systems // Annals of Operation Research – 1997. – №75. – P. 69–101.
10. Karaboga D. An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization. – Technical report TR06. – Erciyes: Erciyes University Press, 2005. – 10 p.

УДК 004

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-7>

Борис МОРОЗ

доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Яворницького, 19, м. Дніпро, Дніпропетровська обл., Україна, 49005, moroz.boris.1948@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5625-0864

Scopus-Author ID: 57218242332

Леонід КАБАК

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Яворницького, 19, м. Дніпро, Дніпропетровська обл., Україна, 49005, kabak.leo@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6267-1772

Scopus-Author ID: 5720222205

Катерина РОДНА

асистент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Яворницького, 19, м. Дніпро, Дніпропетровська обл., Україна, 49005, kitti_ukr@ukr.net, Rodna.K.S@nmu.one

ORCID: 0000-0002-3610-7091

Scopus-Author ID: 57219006777

Євгеній РУКСОВ

студент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». просп. Яворницького, 19, м. Дніпро, Дніпропетровська обл., Україна, 49005, euruksov@gmail.com

Бібліографічний опис статті: Мороз, Б., Кабак, Л., Родна, К., Руксов, Є. (2022). Порівняння різних конфігурацій моделі GAN на базі сервісу хмарних обчислень AWS. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 61–78, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-7>

ПОРІВНЯННЯ РІЗНИХ КОНФІГУРАЦІЙ МОДЕЛІ GAN НА БАЗІ СЕРВІСУ ХМАРНИХ ОБЧИСЛЕНЬ AWS

У роботі було розглянуто модель машинного навчання, яка реалізує концепцію машинного мистецтва. За основу було взято такий алгоритм штучного інтелекту як Генеративна змагальна мережа (Generative adversarial network, GAN). Порівняно різні конфігурації цієї моделі. Для реалізації моделі було обрано мову програмування Julia. Також було проаналізовано продуктивність моделі на різних платформах, зокрема на базі сервісу хмарних обчислень AWS. В результаті дослідження було розроблено оптимальну конфігурацію моделі; запропоновано комбінацію підходів для навчання моделі; визначено найбільш продуктивну платформу для навчання моделі.

Метою роботи є розробка оптимальної конфігурації системи для ефективного навчання моделі машинного навчання, яка реалізує концепцію машинного мистецтва. Конфігурація системи передбачає такі аспекти як архітектура моделі, алгоритм навчання та платформа, на якій цей алгоритм буде виконуватись. Кожен з цих аспектів опрацьований та запропоновано рішення, яке покаже найкращі результати замірів продуктивності.

Методологія вирішення поставленого завдання полягає в проведенні порівняльного аналізу показників продуктивності різних конфігурацій системи, які запроваджені з урахуванням попередніх досліджень моделей машинного мистецтва, які реалізують концепцію машинного мистецтва.

Наукова новизна. В ході виконання роботи набув подальший розвиток напрямок застосування мови програмування Julia на базі сервісу хмарних обчислень AWS. Вперше запропоновано ефективний варіант програмної та апаратної конфігурації системи для навчання моделі машинного навчання, яка реалізує концепцію машинного мистецтва.

Висновки. Результати даної роботи можуть бути використані для реалізації ефективної системи для навчання моделі машинного навчання, яка реалізує концепцію машинного мистецтва, та в подальших дослідженнях перспектив використання мови програмування Julia в поєднанні з сервісом хмарних

обчислень AWS. Всі отримані результати замірів продуктивності та якості навчання різних конфігурації подано в таблицях та графіках.

Ключові слова: мова програмування Julia, машинне навчання, машинне мистецтво, Generative adversarial network (GAN), сервіс хмарних обчислень AWS.

Borys MOROZ

Doctor of Technical Sciences, Professor at Department of Software Engineering, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, moroz.boris.1948@gmail.com

Scopus-Author ID: 57202222055

ORCID: 0000-0002-5625-0864

Leonid KABAK

Candidate of Technical Sciences, Professor at Department of Software Engineering, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, kabak.leo@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6267-1772

Kateryna RODNA

Assistant at Department of Software Engineering, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, kitti_ukr@ukr.net, Rodna.K.S@nmu.one

ORCID: 0000-0002-3610-7091

Scopus-Author ID: 57219006777

Yevhenii RUKSOV

Student, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, euruksov@gmail.com

To cite this article: Moroz, B., Kabak, L., Rodna, K., Ruksov, Ye. (2022). Porivniannia riznykh konfiguracyi modeli GAN na bazi servisu khmarnykh obchyslen AWS [Comparison of different configurations of the GAN model based on the AWS cloud computing service]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 61–78, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-7>

COMPARISON OF DIFFERENT CONFIGURATIONS OF THE GAN MODEL BASED ON THE AWS CLOUD COMPUTING SERVICE

The aim. The aim of the work is to develop an optimal configuration of the system for effective learning of the machine learning model, which implements the concept of machine art. The configuration of the system includes such aspects as the architecture of the model, the learning algorithm and the platform on which this algorithm will run. Each of these aspects is developed and a solution is proposed that will show the best results of performance measurements. The methodology of the solution of the task set is a comparable analysis of productivity indices of different system configurations that were used taking into account previous studies of machine art models which realized the machine art concept.

Scientific novelty. In the course of the work the further development in the direction of application of the Julia programming language based on the AWS cloud computing service was made. An effective version of the software and hardware configuration of the system for learning of a machine learning model that implements the concept of machine art is proposed for the first time.

Conclusions.

The results of this work could be used for implementation of an effective system for learning of a machine learning model that use the concept of machine art, as well as in further studies of the prospects of using the Julia programming language in combination with the AWS cloud computing service. All the results of the measurements of productivity and quality of training of different configurations are presented in tables and graphs.

Key words: Julia programming language, machine learning, machine art, Generative adversarial network (GAN), AWS cloud computing service.

Актуальність проблеми. Відома теза «мозок людини – найскладніша обчислювальна система в світі» має багато підтверджень та проявів, особливо, у сучасному світі. Існує певний набір показників, значення яких свідчить про існування та рівень розвитку цивілізації. Мозок, як велика нейронна мережа, якість і швидкість навчання якої та складність оброблених та згенерованих нею структур надзвичайно високі, зміг дійти до такого рівня ефективності, що зі складних структур навколиш-

нього світу зміг створити ще складніші. Саме це і є головним показником, який характеризує цивілізацію.

Проте такий складний процес, як творчість та мистецтво, дуже складно оцінити або проаналізувати. Складною задачею є визначення механізму, який реалізує процес синтезу чогось нового. Над цією задачею працювало вчених, філософів та митців. Бажання пізнавати в людині не менше ніж бажання творити, тому спроби пізнати саму творчість з наукової точки зору робляться постійно. Певного успіху в цьому напрямку досягли саме математики та спеціалісти з інформаційних технологій. Вони пішли шляхом моделювання найбільш близького до людського мозку механізму синтезу складної систематизованої інформації. Ця робота присвячена саме синтезу графічної інформації.

Ця робота відноситься до тієї групи досліджень, які вивчають феномен графічного мистецтва. Це одна з багатьох робіт, які складають загальну картину представлення людини про механізм творчості. Результати цієї роботи дозволяють розширити та систематизувати вже накопичені знання в цій сфері. Також дослідження та порівняння різних конфігурацій моделі дозволяють робити правильний вибір для ефективної та швидкої роботи в подальших дослідженнях.

Крім наукових досліджень для побудови теоретичної системи опису феномену мистецтва, результати цієї роботи будуть корисними і для спеціалістів з аналізу даних, адже розглянута модель вміє не тільки генерувати зображення, а й розпізнавати справжні та фальшиві зображення. Це може знадобитися, наприклад, в аналізі великої бази картин, і знаходження справжніх, які належать пензлю того чи іншого митця. Також є потенціал застосування такої моделі, наприклад, при розробці ігор, для генерування унікальних ігрових об'єктів.

Отже, актуальність цієї роботи має широке значення, як практичне, так і теоретичне та фундаментальне.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Докладний опис та аналіз досліджень, які описують найбільш перспективні та ефективні методики та підходи до всіх аспектів системи подано в основній частині разом з описом технічних та математичних особливостей системи. Загалом такого порівняльного аналізу різних конфігурацій моделі на рівні дослідження ще не робилося. Головна відмінність від схожих досліджень полягає в тому, що тут застосовується молода мова програмування

Julia на базі сервісу хмарних обчислень AWS, а саме додатку AWS SageMaker, який призначений для побудови моделей машинного навчання у зручному інтерфейсі Jupyter Notebook. AWS дозволяє обирати машини різного типу та потужності, що дає змогу робити такий порівняльний аналіз, який представлено в цій роботі. Ще однією особливістю в порівнянні з іншими дослідженнями в цій сфері є те, що з'явилась необхідність розробляти ручний спосіб запуску ядра Julia на базі машини AWS SageMaker, бо зараз цей сервіс не підтримує автоматичні налаштування для Julia.

Мета статті. Необхідно знайти оптимальну конфігурацію системи для ефективного навчання моделі машинного навчання, яка реалізує концепцію машинного мистецтва. Конфігурація системи передбачає такі аспекти як архітектура моделі, алгоритм навчання та платформа, на якій цей алгоритм буде виконуватись. Кожен з цих аспектів опрацьований та запропоновано рішення, яке покаже найкращі результати замірів продуктивності та ефективності.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленої цілі роботи необхідно розглянути кожен аспект конфігурації системи окремо. Потім надається порівняльний аналіз.

Перший аспект – це архітектура розроблюваної моделі машинного навчання, яка реалізує концепцію машинного мистецтва. Розглянемо призначення машинного мистецтва як такого.

Комп'ютерна творчість (також відома як штучна творчість, машинна творчість, креативні обчислення або творчі обчислення, машинне мистецтво) – це багатопрофільна діяльність, яка знаходиться на перетині сфер штучного інтелекту, когнітивної психології, філософії та мистецтва.

Метою обчислювальної творчості є моделювання або імітація творчості за допомогою комп'ютера для досягнення однієї з кількох цілей:

- створити програму, яка здатна до творчості на рівні людини;

- щоб краще зрозуміти творчість людини та сформулювати алгоритмічний погляд на творчу поведінку людей;

- розробляти програми, які можуть підвищити творчість людини, не обов'язково бути креативними.

Сфера обчислювальної творчості стосується теоретичних і практичних питань у вивченні творчості. Теоретична робота щодо природи та правильного визначення креативності виконується паралельно з практичною роботою над впровадженням систем, що демонструють

креативність, при цьому один напрям роботи доповнює інший.

Проте ця робота направлена на інше, а саме аналіз конкретних методів та принципів, які дозволяють реалізувати практичну сторону машинної творчості. Тож, розглянемо одну з найбільш розповсюджених моделей штучного інтелекту, які використовуються в цій сфері застосування.

Генеративна змагальна мережа (GAN) – це клас моделей машинного навчання, розроблений Яном Гудфеллоу та його колегами в червні 2014 року. Дві нейронні мережі змагаються один з одним у так званий «гри з нульовою сумою» (гра, у якій гравці мають повністю протилежні цілі, а виграш одного буде означати програш іншого). Загалом це така архітектура моделі, яка дозволяє оцінити генеративні можливості системи через процес змагання, у якому ми одночасно навчаємо дві підмоделі: генеративну модель G, яка фіксує розподіл даних; і дискримінаційну модель D, яка оцінює ймовірність того, що примірник вхідних даних надійшов з навчального набору, а не відноситься до тих, які були згенеровані моделлю G. Процедура навчання для G полягає в тому, щоб максимізувати ймовірність помилки при розпізнанні фальшивки моделлю D. Ця структура відповідає гри «*minimax*» для двох гравців. У просторі довільних функцій G і D існує єдине рішення, у якому G відтворює розподіл навчальних даних, а D дорівнює всюди $1/2$. У випадку, коли G і D є багатшаровими перцептронами (повнозв'язна нейронна мережа), всю систему можна навчити за допомогою методу зворотного поширення помилки. Немає потреби в будь-яких ланцюгах Маркова або розгорнутих мережах наближених висновків під час навчання або генерації вибірок. Експерименти демонструють потенціал такої системи шляхом якісної та кількісної оцінки згенерованих зразків. (моделі GAN)

Ян Гудфеллоу з колегами розробили доволі дієву так ефективну модель для вирішення зазначених задач. Розглянемо детально кожен елемент моделі.

Першим розглянемо дискримінатор (в деяких варіаціях GAN, таких як WGAN, його ще називають критиком). Це багатшаровий перцептрон, якому на вхід подіється масив даних певної розмірності. Досліджена модель працює із зображеннями, тож далі будуть розглянуті різні методи нормалізації зображень для обробки. Вихід дискримінатора – це одне значення в діапазоні від 0 до 1, що відображає

вірогідність належності вхідного примірника до тренувальної вибірки (0 – відповідає згенерованим даним, 1 – даним із тренувального набору). У варіації моделі WGAN на виході критика подається числова оцінка від 0 до певного значення, яке може бути необмеженим.

Генератор – це також багатшаровий перцептрон, але має зворотню структуру – вхідних нейронів менше ніж вихідних. Вхідний вектор значень – це так званий шум, який складається із випадкового набору числових значень в діапазоні від -1 до 1 . На виході має розмірність таку ж, як на вході у дискримінатора. В залежності від форми вихідних даних є декілька способів збільшення розмірності через шари нейронної мережі. Вони будуть розглянуті далі разом із методами нормалізації зображень для обробки моделлю.

Як відомо із теорії штучних нейронних мереж, кожен нейрон на кожному шарі повинен застосовувати функцію активації над виваженою сумою вхідних значень з урахуванням також додаткових відхилень. Ян Гудфеллоу у своїй роботі використовував так званий випрямлений лінійний нейрон (функція активації має назву ReLU) у комбінації із стандартною сигмоїдою для генератора та функцією активації *maxout* (на виході нейрона береться максимальне значення серед розрахованих виважених входів) для дискримінатора (Функція активації *maxout*, яка була застосована в першій публікації про модель GAN). Проте у даній роботі буде використано функцію активації Leaky ReLU (від'ємні значення не відкидаються повністю, а пригнічуються із певним коефіцієнтом) як для генератора, так і для дискримінатора. Значення коефіцієнта для Leaky ReLU обрано 0.2 , виходячи із емпіричних даних, які отримали Алекс Редфорд та Люк Метс у своїй роботі, присвяченій більш складній та потужній моделі DCGAN (моделі DCGAN). Аргументація використання функції активації Leaky ReLU полягає в тому, що ця функція зменшує прояв проблеми зникання градієнту (Свідчення спеціалістів, які підтвердили ефективність застосування функції активації LeakyReLU в моделі GAN). На вихідному шарі генератора було використана функція активації гіперболічний тангенс (*tanh*), тому що значення кожного згенерованого пікселя повинно бути від -1 до 1 . На вихідному шарі дискримінатора використовується стандартна сигмоїда, проте для моделі WGAN вихідне значення може не нормуватись взагалі, тоді змінюється функція помилки для правильної роботи алгоритму навчання.

Розглядалось два основних методи нормалізації вхідної матриці даних:

1. Перетворення матриці у вектор та нормалізація значень яскравості пікселів у діапазон від -1 до 1 . Цей підхід придатний для невеликих зображень (наприклад із набору MNIST, де кожне зображення має розмір 28 на 28 пікселів). Але для великих матриць вхідних даних, а особливо коли є декілька каналів (наприклад кольорові зображення RGB), такий спосіб нормалізації вхідних даних неприйнятний, адже це буде потребувати надзвичайно великих обчислювальних потужностей.

2. Використання технології згорткової нейронної мережі (CNN), які є спеціалізованим типом нейронної мережі для обробки даних, яка має відому топологію сітки. Приклади включають дані часових рядів, які можна розглядати як одновимірну сітку, що бере вибірки через регулярні інтервали часу, і дані зображення, які можна розглядати як двовимірну сітку пікселів. Згорткові мережі були надзвичайно успішними у практичному застосуванні. Назва «згортка нейронна мережа» вказує на те, що мережа використовує математичну операцію під назвою згортка. Згортка – це спеціалізований вид лінійної операції, в теорії обробки зображень його ще називають локальним оператором або фільтром. Згорткові мережі – це просто нейронні мережі, які використовують згортку замість загального множення матриці принаймні в одному або декількох зі своїх шарів (Гудфелов). Отже, вхідна матриця даних в такій моделі залишається незмінною, може бути із декількох каналів. Проте для нашої моделі необхідно значення кожного пікселю нормалізувати у діапазон від -1 до 1 . Загалом у такої моделі є своя назва – Глибока згорткова генеративна змагальна мережа (DCGAN). Для генератора така модель передбачає шари оберненої згортки.

Тепер представимо код на Julia, який відображає два розглянутих типи моделі GAN:

1. Стандартна модель з першим типом нормалізації вхідних даних та функцією активації сигмоїда на виході дискримінатора:

```
discriminator = Chain(Dense(n_features ^ 2, 1024,
x-> leakyrelu(x, 0.2f0)),
x-> customDropout(x, 0.3f0, true),
Dense(1024, 512, x-> leakyrelu(x, 0.2f0)),
x-> customDropout(x, 0.3f0, true),
Dense(512, 256, x-> leakyrelu(x, 0.2f0)),
x-> customDropout(x, 0.3f0, true),
Dense(256, 1, sigmoid));
generator = Chain(Dense(latent_dim, 256),
BatchNorm(256, x-> leakyrelu(x, 0.2f0)),
```

```
Dense(256, 512),
BatchNorm(512, x-> leakyrelu(x, 0.2f0)),
Dense(512, 1024),
BatchNorm(1024, x-> leakyrelu(x, 0.2f0)),
Dense(1024, n_features ^ 2, tanh));
```

2. Моделі DCGAN із лінійною активацією на виході дискримінатора:

```
function create_discr(image_size::Integer)
discr_design = [LayerDesign(4, 2, 1), LayerDesign
(4, 2, 1)];
return Chain(Conv((discr_design[1].kernel, discr_
design[1].kernel), 1 => 64;
stride = discr_design[1].stride, pad = discr_design[1].
pad),
x->leakyrelu.(x, 0.2f0),
x-> customDropout(x, 0.3f0, true),
Conv((discr_design[2].kernel, discr_design[2].
kernel), 64 => 128;stride =
discr_design[2].stride, pad = discr_design[2].pad),
x->leakyrelu.(x, 0.2f0),
x-> customDropout(x, 0.3f0, true),
Flux.flatten,
Dense(culc_size(discr_design, image_size) ^ 2 * 128,
1))
end
function create_gen(image_size::Integer)
gen_design = [LayerDesign(4, 2, 1),
LayerDesign(4,2,1),LayerDesign(5,1,2)];
size = culc_size(gen_design, image_size);
return Chain(Dense(latent_dim, size ^ 2 * 256, relu),
BatchNorm(size ^ 2 * 256, relu),
x-> reshape(x, size, size, 256, :),
ConvTranspose((gen_design[3].kernel,gen_
design[3].kernel),256=>128;
stride = gen_design[3].stride, pad = gen_design[3].
pad),
BatchNorm(128, relu),
ConvTranspose((gen_design[2].kernel,gen_
design[2].kernel), 128 => 64;
stride = gen_design[2].stride, pad = gen_design[2].
pad),
BatchNorm(64, relu),
ConvTranspose((gen_design[1].kernel, gen_
design[1].kernel), 64 => 1,
tanh; stride = gen_design[1].stride, pad = gen_
design[1].pad))
end
```

В зазначеному коді є декілька додаткових елементів, які необхідні для покращення процесу навчання. Серед них BatchNorm та Dropout. Розглянемо їх більш детально.

Існує так звана «пакетну нормалізація» або «нормалізація по вибірці» (Batch Normalization), яку запропонували Сергій Іові та Крістіан Середі з компанії Google в 2015 році. Цей метод полягає в тому, що виконує нормалізацію частини

архітектури моделі та робить це для кожного навчального міні-набору. Такий підхід дозволяє ефективно боротися з феноменом «внутрішнього коваріантного зсуву». Пакетна нормалізація дозволяє використовувати набагато вищі темпи навчання і бути менш обережними в ініціалізації гіперпараметрів моделі. Він також діє як регулятор, у деяких випадках зменшуючи необхідність використання методу Dropout. Суть цього методу полягає в статистичному аналізі та відповідному корегуванні проміжних результатів активацій нейронів у відповідності з нормалізацією статистичного розподілу цих значень всередині вибірки вхідних примірників. Далі приведені аналітичне представлення цієї ідеї (ідеї про додатковий шар BatchNorm в нейронній мережі)

На вході: значення x в міні-наборі $B = \{x_{1...m}\}$;

На виході: $\{y_i = BN_{\gamma, \beta}(x_i)\}$

Математичне очікування в наборі розраховуємо так:

$$\mu_B \leftarrow \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i$$

Середньоквадратичне відхилення розраховуємо так:

$$\sigma_B^2 \leftarrow \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_i - \mu_B)^2$$

Нормалізоване значення активації нейрона розраховуємо так:

$$\hat{x}_i \leftarrow \frac{x_i - \mu_B}{\sqrt{\sigma_B^2 + \epsilon}}$$

Масштабування та зміщення нормалізованого значення розраховуємо так:

$$y_i \leftarrow \gamma \hat{x}_i + \beta \equiv BN_{\gamma, \beta}(x_i)$$

Цей підхід показав доволі високу ефективність в процесі навчання розглянутих типів нейронних мереж, тому саме його було обрано для розробки ефективної конфігурації системи.

Є ще один метод, який також показав певну ефективність для стабілізації процесу навчання мережі. Цей метод більш простий у реалізації, але має один недолік – необхідність генерації випадкового числа, що додає певної невизначеності внутрішньої роботи мережі. Метод називається «відкидання» (Dropout), винайдений Нітішем Срівастава та колегами із університету в Торонто у 2014 році. Цей підхід допомагає вирішити проблему «перенавчання мережі». Ключова ідея полягає в тому, щоб під час навчання випадковим чином відкидати нейрони (разом з їх вагами та зв'язками з іншими нейронами) із нейронної мережі. Це запобігає надмірній коадаптації нейронів. Під час навчання

вилучається вибірка з певною кількістю різних «потоншених» мереж. Під час тестування легко наблизити ефект усереднення прогнозів усіх цих розріджених мереж, просто використовуючи одну нерозріджену мережу, яка має менші ваги. Це значно зменшує ефект перенавчання та дає значні покращення порівняно з іншими методами регуляції. «Відкидання» покращує продуктивність нейронних мереж в завданнях «навчання з вчителем». (ідеї про додатковий шар Dropout в нейронній мережі) Для написання такого алгоритму, щоб його можна було запускати на базі графічного процесора, було необхідно створити власну реалізацію для Dropout, яка наведена нижче:

```
function customDropout(x, p::Float32, active::Bool)
    if (!active)
        return x
    end
    y = rand!(similar(x, size(x)))
    y = broadcast(el-> el>p ? 1/(1-p) : 0f0, y)
    return x .* y
end
```

Обидва методи працюють тільки в циклі навчання, але повинні бути вимкнені при тестуванні та експлуатації мережі. В результаті експериментів ефективною виявилась конфігурація коли BatchNorm застосовується для генератора, а Dropout – для дискримінатора. Це обумовлено тим, що дискримінатор не повинен навчатися занадто швидко, а генератор повинен бути більш стабільним в процесі навчання, щоб не випадати в крайнощі.

Другий аспект – алгоритм навчання моделі. Суть процесу навчання полягає у корегуванні вагових коефіцієнтів, коефіцієнтів зміщень нейронів, коефіцієнтів масштабування γ та зміщення β для шару BatchNorm та інших параметрів у відповідності із типом оцінки якості роботи моделі та в напрямку підвищення цієї якості. Як відомо із теорії нейронних мереж, існує три основних типи навчання нейронних мереж: з вчителем, без вчителя, з підкріпленням. Навчання з вчителем передбачає наявність чіткого розподілення тренувальної вибірки на класи, тобто розподіл даних відомий завчасно. Навчання без вчителя призначене для пошуку кластерів в множині даних, у яких не має чіткого розподілу по класам. Навчання з підкріпленням передбачає оцінку результату роботи нейронної мережі від середовища, яке здатне реагувати на діяльність моделі. У випадку з моделями GAN та DCGAN на загальному рівні застосовується підхід навчання з вчителем. Для такої моделі існує всього два класи: справжні та згенеровані дані. Проте якщо розглядати

окремо дискримінатор (критик) та генератор, то для першого це навчання з вчителем, а от для другого – навчання з підкріпленням. Генератор корегує свої налаштування у відповідності із реакцією та оцінкою середовища, яким для нього виступає дискримінатор (який в свою чергу теж навчається, але має при цьому чіткий розподіл тренувальних даних). Отже, модель GAN унікальна по своїй суті, адже вона поєднує два типи алгоритму навчання.

Однією із найважливіших частин алгоритму навчання є функція помилки. Їх існує багато та кожна з них ефективна у певній ситуації. Дійсно, від правильності оцінки роботи моделі залежить швидкість та ефективність процесу навчання. У моделі GAN там DCGAN прийнято застосовувати функцію помилки binary cross-entropy або logistic binary cross-entropy. Аналітична аргументація доцільності використання саме цього типу функцій помилки дуже добре виклав Ян Гудфеллоу у своїй роботі (моделі GAN). Тут буде лише зазначено коротке роз'яснення суті бінарної перехресної ентропії.

Для розуміння поняття «ентропія» в теорії інформації треба зазначити, що з точки зору теорії статистики «інформація» еквівалентна «невизначеності» випадкової величини. Тобто інформація відображає невизначеність результату якоїсь події. Це можна розуміти так, що чим більше інформації в системі, тим більш невизначеним є результат роботи цієї системи. Для визначення кількості цієї інформації, а отже рівня невизначеності системи, було введено поняття «ентропія». Як відомо, ентропія (в контексті теорії інформації) – це міра невизначеності системи, міра кількості інформації. Формула ентропії:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log p(x_i),$$

де $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – випадкова величина, яка може мати n можливих станів; p – вірогідність i -того стану випадкової величини.

Перехресна ентропія, в свою чергу, відображає відстань від розподілу p до розподілу q . В нашому випадку в якості розподілу p виступає розподіл очікуваних вихідних значення моделі, а розподіл q – це розподіл дійсних вихідних значень моделі. Ціль навчання моделі – мінімізація цієї відстані. Проте існує два поняття, які відображають відстань між розподілами: відносна ентропія (або ще називають відстань Кульбака-Лейблера) та перехресна ентропія. Різниця полягає в тому, що для відносної ентропії рівність розподілів визначається нульовим значенням цієї функції, а для перехресної

ентропії рівність розподілів – це ентропія розподілу p . Для навчання мережі використовується саме перехресна ентропія, бо для відносної ентропії розподіл p є фіксованим і потрібно підганяти саме розподіл q , а в перехресній ентропії немає такого обмеження. (Опис розрахунку функції помилки binary cross-entropy) Загальна формула перехресної ентропії з n можливих станів випадкової величини X зазначено далі:

$$H(p, q) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log q(x_i).$$

Бінарність цієї ентропії обумовлена тим, що в моделі GAN є всього два класи для розпізнання даних: справжні та згенеровані. Тому можливих станів випадкової величини всього два. Формула бінарної перехресної ентропії:

$$H(p, q) = -\left[y \log \hat{y} + (1 - y) \log (1 - \hat{y}) \right],$$

де $p = \{y, 1-y\}$ – очікувані вихідні значення; $q = \{\hat{y}, 1-\hat{y}\}$ – дійсні вихідні значення. Для правильного розрахунку функції помилки на наборі даних треба знайти середнє значення цих ентропій. Формула:

$$L(w) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N H(p_n, q_n) = -\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[y_n \log \hat{y}_n + (1 - y_n) \log (1 - \hat{y}_n) \right],$$

де $L(w)$ – функція помилки, аргументом якої є множина параметрів моделі; $n = \{1, 2, \dots, N\}$ – порядкові номери вхідних примірників.

Логарифмічна бінарна перехресна ентропія – це те ж саме, що бінарна перехресна ентропія, але для покращення якості роботи методу градієнтного спуску над вихідним значенням застосовується сигмоїда.

Ціль навчання моделі, як вже зазначалось раніше, є знаходження мінімуму цієї функції. Для цього зазвичай використовується метод градієнтного спуску та його модифікації (але є альтернативи, наприклад еволюційні алгоритми). Разом з тим, дискримінатор та генератор мають однаковий принцип по мінімізації функції помилки, проте розподіл очікуваних вихідних значень p для них різний. Для дискримінатора згенерованим примірникам відповідає значення 0 (примірникам із тренувального набору – 1), а для генератора – навпаки, згенерованим примірникам відповідає значення 1. При цьому важливо, щоб в процесі навчання корегування параметрів кожної мережі відбувалось у свій час.

Під час навчання нейронної мережі для корегування кожного параметру (це ваги, зсуви, масштабуючі та коригуючі коефіцієнти для специфічних шарів, таких як BatchNorm) необхідно знайти відповідне значення градієнту і відняти його виважене значення від попереднього значення параметра. Ваговий коефіцієнт градієнту – це, так звана, швидкість навчання, і це один із гіперпараметрів моделі (тобто таких, що підбираються вручну). У цьому полягає сутність принципу градієнтного спуску. Принцип оберненого розповсюдження помилки, в свою чергу, описує безпосередньо методику розрахунку градієнтів кожного параметру. Цей алгоритм був винайдений у 1986 році Девідом Румелхартом, Джефрі Хінтоном та Рональдом Вільямсом, а стаття була оприлюднена найбільш авторитетним науковим журналом Nature (Стаття автора алгоритму зворотного розповсюдження помилки та градієнтного спуску).

Проте цей підхід до корегування параметрів моделі в чистому вигляді доволі повільний і потребує багато обчислень. Також для складних сучасних моделей глибокого навчання цей метод без введення певних корективів виявився взагалі неефективним, а інколи навіть неспроможним досягти оптимального набору значень параметрів. Це було спричинено проблемою занадто швидкого або занадто повільного ковзання по функції помилки в пошуках глобального мінімуму. Також проблему складали локальні мінімуми, з яких цей алгоритм був неспроможний вивести. Основна причина цих проблем – це ручне підбирання гіперпараметру швидкості навчання для кожної конкретної архітектури моделі та кожного типу задачі. Саме тому було винайдено багато різних підходів для оптимізації процесу корегування параметрів, а саме динамічні швидкості навчання. Більше того, сучасні алгоритми оптимізації спроможні навіть розраховувати динамічні коефіцієнти швидкості для кожного конкретного параметру моделі індивідуально. Здебільшого, ці методи використовують статистику та різні поняття з теорії вірогідності.

В багатьох експериментах доволі добре себе показав алгоритм ADAM. Він базується на алгоритмі RMSprop та SGD з моментом. Для кращого розуміння необхідно спочатку визначити основну ідею RMSprop та SGD з моментом. Почнемо з другого, SGD з моментом (Stochastic Gradient Descent with momentum) – це звичайний алгоритм градієнтного спуску, але замість градієнта на один примірник вхідних даних розраховується момент першого порядку або ще називають рухомим середнім чи матема-

тичним очікуванням (застосовується емпірична формула для спрощення розрахунків) над значеннями градієнта для набору даних; при цьому коефіцієнт швидкості навчання залишається сталим.

Оптимізатор RMSprop (Root Mean Squared Propagation), в свою чергу, за основу бере градієнт, але коефіцієнт швидкості навчання адаптується на основі моменту другого порядку або ще називають нецентрованою дисперсією (теж застосовується емпірична формула для розрахунків) над градієнтами для набору примірників. Із назви цього методу зрозуміло, що береться квадратний корінь від моменту другого порядку (це є нецентрованим середньоквадратичним відхиленням), а коефіцієнт швидкості навчання ділиться на отримане значення.

Оптимізатор ADAM комбінує обидва підходи: замість градієнту застосовується момент першого порядку, а коефіцієнт швидкості навчання корегується за допомогою ділення на квадратний корінь від моменту другого порядку над градієнтом. Для кращого корегування швидкості навчання особливо на початку, щоб не дати алгоритму занадто швидко ковзати по функції помилки, значення моментів в оригінальній статті (стаття 2015 року за авторством Дієдеріка Кінгма та Джиммі Леї Ба) ще додатково корегуються за допомогою «корекції зміщення» (Стаття автора методу оптимізації алгоритму навчання ADAM).

Отже, комбінація всіх цих методик, доцільність яких була визначена в багатьох попередніх дослідженнях, дозволяють визначити два варіанти моделі, які будуть використовуватись при порівнянні: модель на базі згорткових шарів та модель з повною зв'язністю нейронів. Порівняння застосування тих чи інших додаткових архітектурних рішень та підходів до навчання не є доцільним в цій роботі, адже вони були вже проаналізовані іншими дослідниками. Проведений лише стислий мета-аналіз існуючих робіт.

На поточному етапі розвитку комп'ютерних технологій має місце тенденція до зростання попиту на хмарні сервіси. Це обумовлено тим, що об'єм та складність обчислень досягли такого рівня, що використання власних серверів та обчислювальних систем стало занадто дорого. Висока ціна обумовлена необхідністю постійного неперервного обслуговування великої обчислювальної мережі, тобто треба постійно мати великий штат системних адміністраторів, які будуть слідкувати та підтримувати мережу, і це на додачу до штату програмістів та DevOps. Багато ІТ-компаній, шукаючи альтернативи такому підходу, прийшли до хмарних сервісів.

Хмарні обчислення базуються на принципі доступності ресурсів комп'ютерної системи, особливо сховища даних (хмарного сховища) та обчислювальної потужності тільки тоді, коли це необхідно, та без прямого активного керування користувачем внутрішньою інфраструктурою. Великі хмари часто мають функції, розподілені в кількох місцях, кожне місце є центром обробки даних. Хмарні обчислення покладаються на спільне використання ресурсів для досягнення узгодженості та зазвичай використовують модель «оплати по мірі використання», яка може допомогти зменшити капітальні витрати, але також може призвести до неочікуваних операційних витрат для несвідомих пересічних користувачів. Проте загалом для побудови великої та складної обчислювальної системи хмари набагато дешевші та мають більш простий інтерфейс для налагодження та підтримки, що може звільнити ІТ-компанію від необхідності тримати великий штат системних адміністраторів.

Одним з найпопулярніших хмарних сервісів є AWS (Amazon Web Services). Для досягнення мети даної роботи буде використовуватись саме ця платформа. Причиною цьому є те, що серед особливостей хмарних сервісів є можливість запуску алгоритмів на базі машин різного типу та потужності – а отже можна порівняти ефективність різних конфігурацій системи для навчання описаної моделі.

Для роботи із моделями машинного навчання в AWS є сервіс SageMaker. SageMaker дозволяє розробникам працювати на кількох рівнях абстракції під час навчання та розгортання моделей машинного навчання. На найвищому рівні абстракції SageMaker надає попередньо навчені моделі машинного навчання, які можна розгорнути як є. Крім того, SageMaker надає ряд вбудованих алгоритмів ML, які розробники можуть навчати на власних даних. Крім того, SageMaker надає керовані екземпляри TensorFlow і Apache MXNet, де розробники можуть створювати власні алгоритми ML з нуля. Незалежно від того, який рівень абстракції використовується, розробник може підключити свої моделі ML з підтримкою SageMaker до інших служб AWS, таких як база даних Amazon DynamoDB для зберігання структурованих даних, AWS Batch для автономної пакетної обробки або Amazon Kinesis для обробки в реальному часі. Для взаємодії з SageMaker розробникам доступний ряд інтерфейсів. По-перше, є веб-API, який віддалено керує екземпляром сервера SageMaker. Хоча веб-API не залежить від мови програмування, яку використовує розробник, Amazon надає прив'язки API SageMaker для кількох

мов, включаючи Python, JavaScript, Ruby, Java та Go. Крім того, SageMaker надає керовані екземпляри Jupyter Notebook для інтерактивного програмування SageMaker та інших програм. Саме Jupyter Notebook разом з мовою програмування Julia буде використовуватись для побудови та навчання моделі. Проте для запуску серверу Julia на базі машини SageMaker необхідно описати скрипт, який буде завантажувати та запускати всі необхідні програми для роботи серверу Julia на базі Jupyter Notebook. Ось shell-скрипт, який завантажує Julia під час створення машини SageMaker:

```
#!/bin/bash
set -e
sudo -u ec2-user -i <<EOF
echo «. /home/ec2-user/anaconda3/etc/profile.d/
conda.sh» >> ~/.bashrc
conda create --yes --prefix ~/SageMaker/envs/julia
wget -q https://julialang-s3.julialang.org/bin/linux/
x64/1.7/julia-1.7.2-linux-x86
_64.tar.gz -O- | tar xzf-
cp -R julia-1.7.2/* ~/SageMaker/envs/julia/
mkdir -p ~/SageMaker/envs/julia/etc/conda/
activate.d
echo 'export JULIA_DEPOT_PATH=~/SageMaker/
envs/julia/depot' >> ~/Sage
Maker/envs/julia/etc/conda/activate.d/env.sh
echo -e 'empty!{(DEPOT_PATH)\npush!{(DEPOT_
PATH,raw»/home/ec2-user/
SageMaker/envs/julia/depot»)' >> ~/SageMaker/
envs/julia/etc/julia/
startup.jl
conda activate /home/ec2-user/SageMaker/envs/
julia
julia --eval 'using Pkg; Pkg.add(«Julia»); using IJulia'
EOF
```

Скрипт, який запускає сервер Julia під час ввімкнення машини SageMaker:

```
#!/bin/bash
set -e
sudo -u ec2-user -i <<EOF
echo «. /home/ec2-user/anaconda3/etc/profile.d/
conda.sh» >> ~/.bashrc
conda run --prefix ~/SageMaker/envs/julia/ julia
--eval 'using IJulia;
IJulia.installkernel(«Julia»)'
EOF
```

Для порівняння було обрано два типи машини: на базі CPU (ml.c5.2xlarge) та на базі GPU (ml.g4dn.xlarge). Обчислення на графічному процесорі потребують використання деяких бібліотек та відповідних функцій. Для автоматичного розподілу задач та даних на графічному процесорі Nvidia застосовується бібліотека CUDA. Детальніше про використанні машини SageMaker в таблиці 1.

Таблиця 1

Використані машини SageMaker

Тип машини	CPU (ядра)	GPU	ОЗП (Гб)	SSD (Гб)	Ціна за час (USD)
ml.c5.2xlarge	8	інтегрована	16	5	0,408
ml.g4dn.xlarge	4	NVIDIA T4	16	5	0,7364

Загалом маємо 4 конфігурації:

1. GAN на ml.c5.2xlarge;
2. CGAN на ml.c5.2xlarge;
3. GAN на ml.g4dn.xlarge;
4. CGAN на ml.g4dn.xlarge.

В обох типах моделей на вхід генератора подається випадковий шум на 100 значень в діапазоні від -1 до 1 . Навчання проходить на стандартному наборі чорно-білих зображень цифр MNIST (Modified National Institute of Standards and Technology database). Це базовий стандарт для навчання різних моделей машинного навчання і саме він використовується в більшості досліджень для оцінки якості роботи моделі. Загальний розмір навчальної вибірки для всіх конфігурацій становить 2000 зображень. Розмір підвибірки становить 128 зображень. Для кожної епохи навчальна вибірка перемішується, що запобігає ефекту перенавчання. Всі інші гіперпараметри (наприклад швидкість навчання для оптимізатора ADAM, що становить 0.0002 як для генератора, так і для дискримінатора) однакові для всіх чотирьох конфігурацій системи. Єдине, що відмінне між GAN та CGAN, – це загальна кількість параметрів, які потрібно корегувати для навчання моделі. Для GAN кількість параметрів дорівнює 2950161 (займає при серіалізації моделі близько 11.269 Мб на диску). А для CGAN – 2382466 (займає при серіалізації моделі близько 9.201 Мб на диску).

У результаті багатьох експериментів виявилось, що оптимальний баланс між генератором та дискримінатором досягається при середньому значення функції помилки на епоху у дискримінатора – близько 0.5–0.6, а у генератора – близько 1.0–1.1. Подальші ітерації навчання не дають значного покращення якості роботи моделі.

В результаті експериментів було зроблена оцінка таких показників, як:

1. Час обробки однієї епохи навчання;
2. Кількість епох, потрібних для досягнення оптимального балансу між генератором та дискримінатором;
3. Форма графіку зміни середнього значення функції помилки по епохам;
4. Якість згенерованих зображень (суб'єктивна оцінка).

Далі в таблиці 2 подано заміри часу обробки однієї епохи.

Таблиця 2

Заміри часу обробки однієї епохи

	GAN	CGAN
ml.c5.2xlarge	37	437
ml.g4dn.xlarge	0.1	0.45

Як бачимо, різниця в швидкості обробки між машиною на CPU та машиною на GPU значна. Машина ml.g4dn.xlarge в 370 рази швидша в роботі з GAN та 971 раз швидша в роботі з CGAN ніж машина ml.c5.2xlarge. Дивлячись з площини порівняння GAN та CGAN, то другий виявився складніший для обробки обома типами машин. Хоча CGAN має меншу кількість параметрів та займає менше місця в пам'яті, ця модель складніша з точки зору обчислення градієнтів для кожного параметра. Далі в таблиці 3 подано кількість епох до оптимуму.

Таблиця 3

Кількість таблиць до оптимуму

	GAN	CGAN
ml.c5.2xlarge	1200	300
ml.g4dn.xlarge	1200	300

Бачимо, що CGAN досягає оптимального стану в 4 рази швидше ніж GAN. Розраховуючи загальний час навчання кожної моделі, отримаємо такі середні значення (таблиця 4).

Таблиця 4

Загальний час навчання кожної моделі

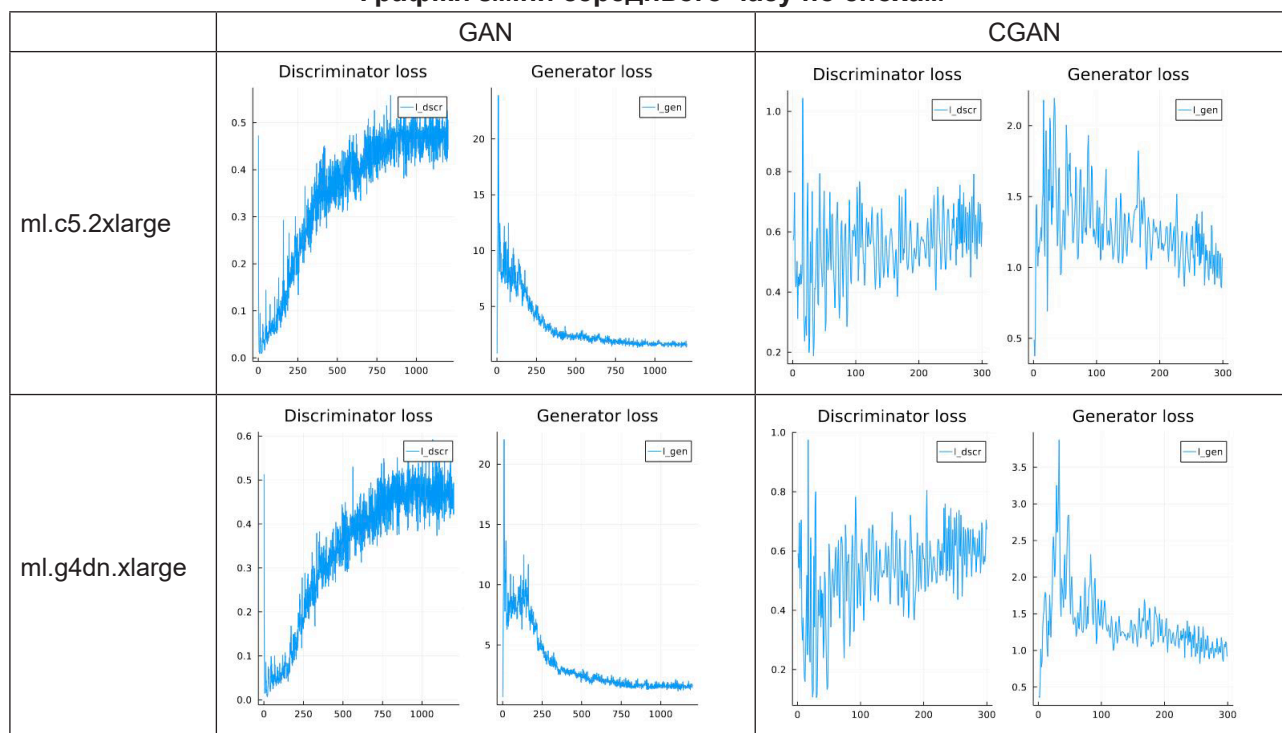
	GAN	CGAN
ml.c5.2xlarge	44400	131100
ml.g4dn.xlarge	120	135

Різниця між моделями для CPU-машини занадто велика, майже в 3 рази. Проте для GPU-машини ця різниця складає всього 15 секунд. І загалом, вже можна констатувати, що оптимальним вибором для навчання таких моделей є саме GPU-машина. Таку складну моделі як GAN ці машини можуть ефективно навчити на базі стандарту MNIST за 2–3 хвилини.

Представимо графіки зміни середнього значення функції помилки по епохам. Порівняння подано в таблиці 5.

Таблиця 5

Графіки зміни середнього часу по епохам



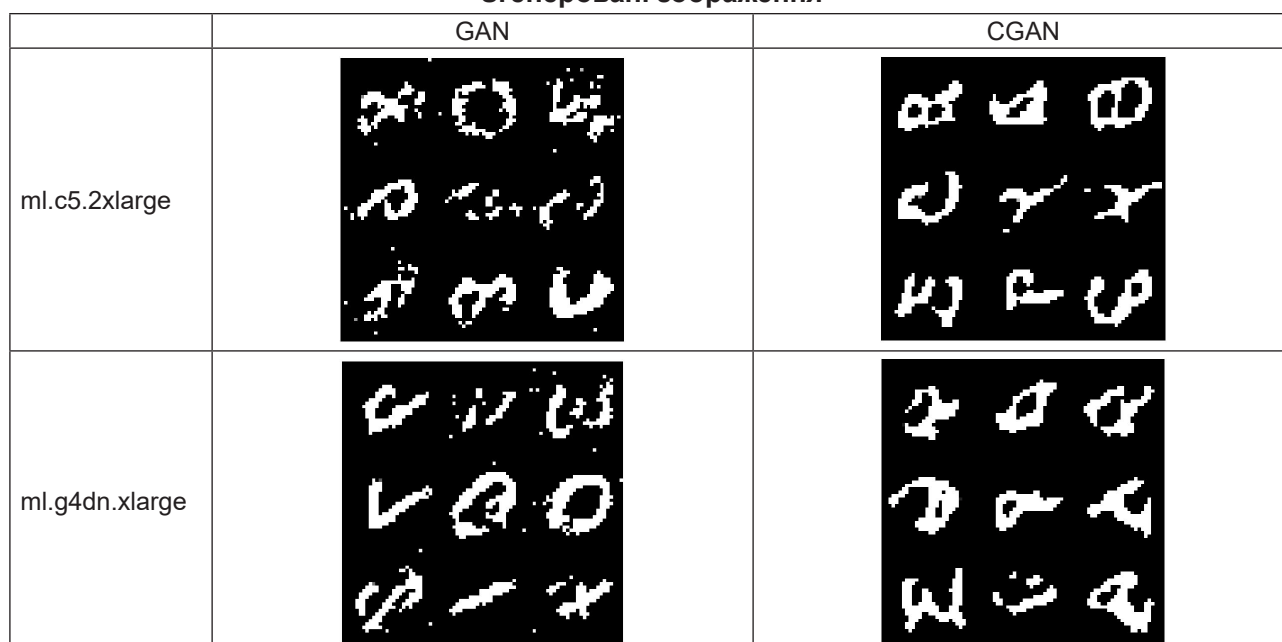
Як бачимо, графіки зміни середнього значення функції помилки для моделі GAN мають експоненціальну форму і змінюються повільніше. Графіки для CGAN, в свою чергу, виходять в оптимальну полосу вже через 100–200 епох, далі функція лише стабілізується ти вирівнюється – немає експоненціальної форми. З іншого боку, графік для

GAN більш стабільний та має менший діапазон відхилень. Тобто характер зміни функції і спосіб досягнення оптимуму різний. Для CGAN – це стабілізація «стрибаючої по великому діапазону» функції навколо оптимуму, а для GAN – експоненціальне наближення.

Далі представлено згенеровані зображення (по 9 на кожну конфігурацію). Порівняння подано в таблиці 6.

Таблиця 6

Згенеровані зображення



Знову будемо порівнювати GAN та CGAN між собою. За рахунок згорткових шарів CGAN має ефект згладжування зображення і видалення шумів. У GAN такого немає, тому в згенерованих зображеннях спостерігаються зайві артефакти та шуми, при цьому, навіть, збільшуючи кількість епох, цей шум не зменшується. З цього можна зробити висновок, що для роботи із зображеннями згорткові шари все ж дають більш «чистий» результат. Загалом, обидві моделі ефективно впоралися із завданням генерації зображенням і з суб'єктивної точки зору більшість згенерованих зображень цифр можна впізнати.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку. В ході виконання даного дослідження набув розвитку напрямок побудови, навчання та застосування моделі, яка реалізує концепцію машинного мистецтва, на базі сервісу хмарних обчислень AWS. Був проведений порівняльний аналіз попередніх робіт, в яких були винайдені найбільш ефективні на даний момент

методи та підходи для побудови такої моделі. Також був проведений порівняльний аналіз чотирьох конфігурацій системи, серед яких була визначена найбільш оптимальна, а саме CGAN на базі GPU-машини ml.g4dn.xlarge. Були виважені всі аспекти, які дозволили знайти такий варіант, який тримав баланс між швидкістю та якістю.

Подальші перспективи дослідження можна окреслити в таких категоріях:

1. Дослідження моделі WGAN в цьому ж контексті;
2. Дослідження рекурентних нейронних мереж для генерації, наприклад, музики в цьому ж контексті;
3. Дослідження генетичних алгоритмів для оптимізації процесу навчання також у контексті порівняння з іншими конфігураціями системи;

Також є практичне побажання – автоматизація конфігурації ядра мови програмування Julia на машинах AWS SageMaker, адже ця мова є однією з найбільш перспективних в сфері машинного навчання та науки про данні.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Стаття авторів моделі GAN. [Electronic resource] – Access mode: <https://arxiv.org/pdf/1406.2661.pdf>
2. Функція активації maxout, яка була застосована в першій публікації про модель GAN [Electronic resource] – Access mode: <https://arxiv.org/pdf/1302.4389v4.pdf>
3. Стаття авторів моделі DCGAN [Electronic resource] – Access mode: <https://arxiv.org/pdf/1511.06434.pdf>
4. Свідчення спеціалістів, які підтвердили ефективність застосування функції активації LeakyReLU в моделі GAN [Electronic resource] – Access mode: https://www.reddit.com/r/MLQuestions/comments/c96mci/why_do_gans_only_work_with_leaky_relu/
5. Розділ книги Яна Гудфелоу, присвячений згортковим нейронним мережам [Electronic resource] – Access mode: <https://www.deeplearningbook.org/contents/convnets.html>
6. Стаття автора ідеї про додатковий шар BatchNorm в нейронній мережі [Electronic resource] – Access mode: <https://arxiv.org/pdf/1502.03167.pdf>
7. Стаття автора ідеї про додатковий шар Dropout в нейронній мережі [Electronic resource] – Access mode: <https://www.cs.toronto.edu/~rsalakhu/papers/srivastava14a.pdf>
8. Опис розрахунку функції помилки binary cross-entropy [Electronic resource] – Access mode: <https://towardsdatascience.com/understanding-binary-cross-entropy-log-loss-a-visual-explanation-a3ac6025181a>
9. Стаття автора алгоритму зворотного розповсюдження помилки та градієнтного спуску [Electronic resource] – Access mode: <https://www.nature.com/articles/323533a0>
10. Стаття автора методу оптимізації алгоритму навчання ADAM [Electronic resource] – Access mode: <https://arxiv.org/pdf/1412.6980.pdf>

REFERENCES:

1. <https://arxiv.org/pdf/1406.2661.pdf>
2. <https://arxiv.org/pdf/1302.4389v4.pdf>
3. <https://arxiv.org/pdf/1511.06434.pdf>
4. https://www.reddit.com/r/MLQuestions/comments/c96mci/why_do_gans_only_work_with_leaky_relu/
5. <https://www.deeplearningbook.org/contents/convnets.html>
6. <https://arxiv.org/pdf/1502.03167.pdf>
7. <https://www.cs.toronto.edu/~rsalakhu/papers/srivastava14a.pdf>
8. <https://towardsdatascience.com/understanding-binary-cross-entropy-log-loss-a-visual-explanation-a3ac6025181a>
9. <https://www.nature.com/articles/323533a0>
10. <https://arxiv.org/pdf/1412.6980.pdf>

UDC 004.93

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-8>

Kostiantyn KHABARLAK

Postgraduate Student, Assistant Professor at the Department of System Analysis and Control, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005, habarlack@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4263-0871

Scopus-Author ID: 57219511187

To cite this article: Khabarlak, K. (2022). Adaptivna pislia navchannia merezha U-Net dlia zadachi sehmentatsii zobrazen [Post-Train adaptive U-Net for image segmentation]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 73–78, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-8>

POST-TRAIN ADAPTIVE U-NET FOR IMAGE SEGMENTATION

Many fields benefit from fast and accurate image segmentation. Convolutional neural networks show the best accuracy solving the task. Applications include medical or satellite imaging, autonomous driving, etc. Typical neural network architectures used for image segmentation are expected to be fully configured before the training procedure starts. To change the network architecture additional training steps are required. This is quite limiting as the network might not only be executed on a powerful server, but also on a mobile or edge device. Adaptive neural networks offer a solution to the problem by allowing certain adaptivity after the training process is complete.

In this work for the first time, we apply Post-Train Adaptive (PTA) approach to the task of image segmentation. We introduce U-Net+PTA neural network, which can be trained once, and then adapted to different device performance categories. The two key components of the approach are PTA blocks and PTA-sampling training strategy. The PTA blocks were added into the U-Net neural network with MobileNetV2 backbone. The post-train configuration can be done at runtime on any inference device including, but not limited to mobile devices. In addition to post-train neural network configuration, the PTA approach has allowed to improve image segmentation quality (Dice score) on the CamVid dataset. The final trained model can be switched at runtime between 6 PTA configurations. These configurations differ by inference time and quality. Importantly, all of the configurations have better quality than the original U-Net (No PTA) model. The possible future research direction is to expand the inference time difference between heavy and light PTA configurations to allow a single trained PTA-based network to target even more device performance categories.

Key words: Adaptive convolutional neural networks, image segmentation, inference speed, mobile computing, edge computing, computer vision.

Костянтин ХАБАРЛАК

аспірант, асистент кафедри системного аналізу та управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького 19, Дніпро, Україна, 49005, habarlack@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4263-0871

Scopus-Author ID: 57219511187

Бібліографічний опис статті: Хабарлак, К. (2022) Адаптивна після навчання мережа U-Net для задачі сегментації зображень. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 73–78, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-8>

АДАПТИВНА ПІСЛЯ НАВЧАННЯ МЕРЕЖА U-NET ДЛЯ ЗАДАЧІ СЕГМЕНТАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

Багато застосунків потребують швидку та точну сегментації зображень, де згорткові нейронні мережі показують найкращу точність вирішення задачі. Застосування включають медичні або супутникові зображення, автономне водіння тощо. Зазвичай необхідно, щоб архітектури нейронних мереж, які використовуються для сегментації зображень, були повністю налаштовані до початку процедури навчання. Для зміни архітектури мережі необхідні додаткові ітерації навчання. Це є обмеженням, оскільки мережа може працювати не лише на потужному сервері, а й на мобільному чи крайовому пристрої. Адаптивні нейронні мережі пропонують вирішення проблеми, дозволяючи певну адаптацію після завершення процесу навчання.

У цій роботі вперше застосовано підхід Post-Train Adaptive (PTA) до задачі сегментації зображень. Представлено нейромережу U-Net+PTA, яку можна один раз навчити, а потім адаптувати до пристроїв

із різною обчислювальною швидкістю. Двома ключовими компонентами підходу є блоки РТА та стратегія навчання із випадковою вибіркою РТА конфігурацій. Блоки РТА було додано в нейромережу U-Net з мережею кодувальником MobileNetV2. Отриману мережу можна конфігурувати після навчання на будь-якому пристрої, включаючи мобільні. Також підхід РТА дозволить покращити якість сегментації зображення в наборі даних CamVid відповідно до метрики Dice. Навчену модель можна перемикаати між 6 конфігураціями РТА навіть під час виконання. Ці конфігурації відрізняються часом роботи та якістю. Важливо, що всі конфігурації мають кращу якість, ніж оригінальна модель U-Net (без РТА). Можливим напрямком подальших досліджень є збільшення різниці в часі виконання між важкою та легкою конфігураціями РТА блоків, щоб дозволити одній навченій мережі на основі РТА націлюватися на ще більшу кількість пристроїв із різною обчислювальною потужністю.

Ключові слова: адаптивні згорткові нейронні мережі, сегментація зображень, час виконання, мобільні обчислення, крайові обчислення, комп'ютерний зір.

Introduction. Many fields benefit from fast and accurate image segmentation. Convolutional neural networks show the best accuracy solving the task. Applications include medical imaging (Ronneberger et al., 2015), autonomous driving (Brostow et al., 2009), satellite imaging (Hnatushenko et al., 2021), etc. Typical neural network architectures used for image segmentation are expected to be fully configured before the training procedure starts. To change the network architecture additional training steps are required. This is quite limiting as the network might not only be executed on a powerful server, but also on a mobile or edge device (Khabaralak, 2022a; Khabaralak & Koriashkina, 2022). Training separate networks for each device category is quite inefficient. Ideally, the network configuration change should be performed dynamically at runtime.

Adaptive neural networks offer a solution to the problem by allowing certain adaptivity after the training process is complete. Successful approaches to building adaptive neural networks have been proposed for Recurrent Neural Networks in (Graves, 2016), Convolutional Neural Networks in (Figurnov et al., 2017; Khabaralak, 2022b, 2022c). In particular, we see the Post-Train Adaptive approach proposed in (Khabaralak, 2022b) as an easy and effective way for the neural network adaptivity. Still the approach was only applied to the image classification task.

In this work we present U-Net+PTA network for the image segmentation task. We base upon U-Net (Ronneberger et al., 2015) architecture with MobileNetV2 (Sandler et al., 2018) backbone. To enable post-train adaptivity of the network, we apply the Post-Train Adaptive approach from (Khabaralak, 2022b).

To summarize, our main contributions are as follows:

1. We introduce U-Net+PTA neural network, which can be trained once, and then adapted to devices of different performance categories.
2. We demonstrate that U-Net+PTA not only improves inference speed over the U-Net, but

also shows better Dice_{score} on the CamVid (Brostow et al., 2009) dataset.

Literature Overview. Many fields benefit from fast and accurate image segmentation. To solve the segmentation task with high quality, the input image should be considered at multiple scales. This can be done through feature pyramid network (Lin et al., 2017), U-Net-like architecture (Ronneberger et al., 2015) or feature exchange between multiple scales (Sun et al., 2019). Such architectures are computationally intensive. In the meantime, segmentation algorithms are often required to run on desktop as well as mobile devices, while current architectures are mostly suited for desktop applications only.

Typically, neural network architectures made to solve the segmentation task are configured before the training process starts. Different backbones can be used in the segmentation models to change their quality and inference speed, like ResNet (He et al., 2016), MobileNetV2 (Sandler et al., 2018), MobileNetV3 (Howard et al., 2019), SeNet (Hu et al., 2018) or others. Still, these backbones cannot be additionally configured after the training process is complete, which limits their applicability to devices with different computational resources.

Dynamic neural networks is a promising research direction (Figurnov et al., 2017; Graves, 2016; Khabaralak, 2022b, 2022c). The goal is to allow the neural network to change its architecture depending on expected inference time or input data complexity. However, in many cases additional adaptivity comes at increased computational cost. Thus, inference time might not be smaller on average than that of a conventional static neural network. In contrast, in (Khabaralak, 2022b) Post-Train Adaptive approach was presented, which via a simple MobileNetV2 modification has allowed to reduce actual inference time. Importantly, the approach allows to reconfigure the neural network after the training process is complete. But, to the best of our knowledge, the approach has only been

applied to the image classification task, namely face anti-spoofing. In this work we adapt the Post-Train Adaptive approach to the task of image segmentation.

Materials and Methods. We base on the U-Net architecture with MobileNetV2 backbone. To make the constructed neural network dynamic, we use the approach proposed in (Khabarлак, 2022b), and add 3 Post-Train Adaptive (PTA) blocks to the network (as is shown in Fig. 1). In this work we include PTA blocks only in the U-Net

encoder (backbone), leaving the decoder part intact.

A single PTA block has 2 branches:

- Light branch. Contains a single Inverted Residual block;
- Heavy branch. Contains two Inverted Residual blocks connected sequentially.

Each block can be dynamically configured to infer either branch exclusively, or both branches at the same time averaging the resulting feature maps.

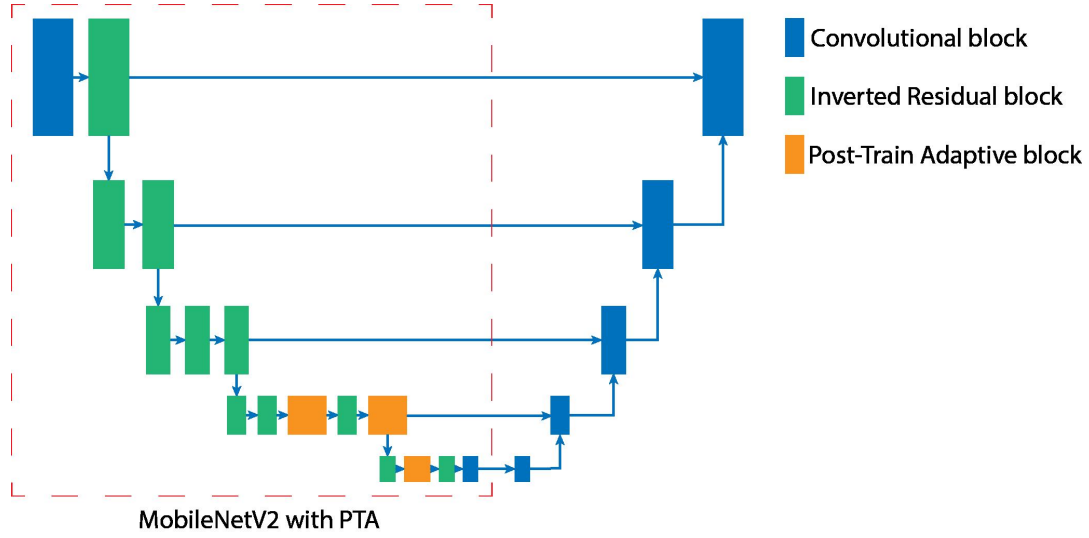


Figure 1. The proposed U-Net+PTA architecture for the image segmentation task.
MobileNetV2 architecture with added PTA blocks is used as an encoder.
Convolutional blocks are shown in blue, Inverted Residual in green,
Post-Train Adaptive (PTA) in orange

To enable dynamic branch selection in the PTA block without retraining, a special PTA-sampling strategy is applied at training time. Specifically, several possible block configurations are selected randomly during the training procedure following the distribution shown in Table 1. All PTA block configurations that are possible, but not presented in the table are expected to be never sampled. Note, that configuration where both blocks are enabled at the same time is also never sampled.

Table 1.

U-Net+PTA train-time configuration sampling.
Sampling strategy follows the original strategy from (Khabarлак, 2022b).

PTA Configuration	Sampling Probability
[Heavy, Heavy, Heavy]	0.45
[Light, Heavy, Heavy]	0.15
[Heavy, Light, Heavy]	0.15
[Heavy, Heavy, Light]	0.15
[Light, Light, Light]	0.10

To train the neural network, we use the $Dice_{loss}$ that has shown good segmentation training results, and to measure the resulting model quality, we use $Dice_{score}$ (Milletari et al., 2016):

$$Dice_{loss} = 1 - \frac{2 \sum_i^N p_i g_i + \epsilon}{\sum_i^N p_i^2 + \sum_i^N g_i^2 + \epsilon}, \quad (1)$$

$$Dice_{score} = \frac{2 \sum_i^N p_i g_i + \epsilon}{\sum_i^N p_i^2 + \sum_i^N g_i^2 + \epsilon}, \quad (2)$$

where p_i is the predicted probability distribution, g_i is the ground true one-hot vector, N is the number of classes to distinguish between, ϵ is a small constant.

Experiments. To train and evaluate the model we use the widely known CamVid (Brostow et al., 2009) dataset. It contains images of size 480×360 pixels. The dataset is split into train (367 images), validation (101 images) and

test (233 images) subsets. All of the subsets have segmentation masks available of the same 480×360 size. The task is to learn the network to segment the images into one of the following classes: sky, building, pole, road, pavement, tree, sign symbol, fence, car, pedestrian, bicyclist, unlabeled.

For training and testing we resize the images into 256×256 size. To retain the original width to height ratio, the images are letterboxed. During training random crop and color jitter augmentations are used. Both U-Net and U-Net+PTA networks are trained for 600 epochs from scratch. No neural network pre-training is performed. Batch size is set to 8. Adam (Kingma & Ba, 2015) with the learning rate of $\alpha = 10^{-3}$ is used as an optimizer. The results are reported on the test set. NVIDIA GTX 1050Ti is used to train and test the model. In addition, we report inference time for a batch of 8 items. To ensure accurate time measurements, timings are averaged over 1000 batches. 95 % confidence interval is given for each measurement.

Results. In Table 2 we show model performance on the test set for the original U-Net model (denoted as No PTA) and the new U-Net+PTA model (denoted as PTA-*), where * is the PTA block configuration for inference. The best result is shown in red; the second best is in blue. As is clearly seen, all PTA-based configurations show better performance than the original U-Net. The best results are obtained by PTA-HLH, followed by PTA-BBB. Note, all PTA configurations have been obtained from a single model, trained only once. Thanks to the adaptive architecture, the exact configuration can be selected after the training is complete. Interestingly, PTA-HHH, which is equivalent in architecture to the

No PTA model, but has been trained with PTA-sampling strategy is also better than No PTA configuration.

Table 2.

Dice_{score} comparison for the U-Net+PTA model in the segmentation task on the CamVid dataset. Higher Dice_{score} is better. The best configuration is highlighted in red; the second best is in blue. All Post-Train Adaptive (PTA) configurations show better quality than the original U-Net with MobileNetV2 backbone.

Configuration	Dice _{score} (↑)
No PTA	0.8583
PTA-HHH	0.8666
PTA-LHH	0.8659
PTA-HLH	0.8670
PTA-HHL	0.8660
PTA-LLL	0.8647
PTA-BBB	0.8667

Table 3 shows model complexity and inference time comparison of the U-Net and the newly proposed U-Net+PTA models. The best result is shown in red; the second best is in blue. We show post-train model configuration, the number of model parameters, the number of multiplication and addition operations for inference, absolute and relative inference time. Relative time is computed with respect to the No PTA baseline. Inference time on actual device has some fluctuation due to GPU frequency change or sporadic system activity. To ensure accurate and consistent measurements, the inference time results are averaged across 1,000 measurements. Additionally, 95 % confidence interval is given. As can be seen, PTA-based models that have one or more Light branches enabled have faster than No PTA baseline inference.

Table 3.

Model complexity and inference time comparison of U-Net vs U-Net+PTA models. The following information is shown: post-train model configuration, the number of model parameters, the number of multiplication and addition operations for the inference, absolute and relative inference. Relative time is computed with respect to the No PTA model. The best result is shown in red; the second best is in blue. PTA-based models with Light branch show faster inference time.

Config	# Params (↓, M)	Multiply-Adds (↓, Mops.)	Inference Time (↓, ms)	Relative Impr. (% , ↓)
No PTA	6.63	871.80	$81.37 \pm .14$	100.00
PTA-HHH	6.63	871.80	81.16 ± 0.13	99.75
PTA-LHH	6.58	868.58	80.21 ± 0.08	98.58
PTA-HLH	6.51	864.16	79.78 ± 0.08	98.05
PTA-HHL	6.31	866.65	79.89 ± 0.08	98.19
PTA-LLL	6.14	855.49	78.82 ± 0.09	96.86
PTA-BBB	7.12	888.12	83.79 ± 0.09	102.98

In Table 4 we show total training time and the best Dice_{score} for the No PTA and U-Net+PTA models. The best Dice_{score} is selected from all possible PTA configurations from a single training pass. Both models were trained 600 epochs. As can be seen, higher Dice_{score} for the PTA-based model is achieved with slightly faster model training.

Table 4.

Training time and the best final score comparison for the U-Net and U-Net+PTA models. Higher Dice_{score} for the PTA-based model is achieved with slightly faster model training.

Config	Total Training Time (↓, Min)	Best Dice _{score} (↑)
U-Net	161.6	0.8583
U-Net+PTA	158.6	0.8670

Discussion. The Post-Train Adaptive method has been originally introduced for the task of face anti-spoofing in (Khabarлак, 2022b). In this work we have applied it to a different computer vision task, namely image segmentation. We based our approach on the U-Net neural network with the MobileNetV2 backbone. By adding PTA blocks to the U-Net architecture and following the PTA sampling training strategy, we have been able to successfully train the

neural network. The resulting network can be trained once and reconfigured later. As can be seen from the Table 2, all of the PTA configurations show superior quality when compared to the U-Net with MobileNetV2 (No PTA). The best improvement is achieved by PTA-HLH (Dice_{score} improvement of 0.0087), followed by PTA-BBB (+ 0.0084). The PTA-HHH configuration that is equivalent in architecture to the original No PTA model is also better than the No PTA configuration, which shows the benefit of the PTA-sampling training strategy. We also note that even the lightest PTA-LLL configuration is better than No PTA baseline (+ 0.0064).

The PTA-LLL configuration is the fastest configuration as is shown in Table 3. PTA-LLL model shows better Dice_{score} and is 3.14 % faster. Also, the heaviest PTA-BBB model is only 2.98 % slower, while offering 0.0084 higher Dice_{score}. PTA-HLH has good speed and the best quality making it the best configuration in terms of speed to quality ratio.

We also note that the benefit of using 3 PTA blocks in the U-Net with MobileNetV2 backbone is smaller, than it was in the original PTA work. This can be explained by the fact that overall U-Net with MobileNetV2 backbone is a much larger model than the plain MobileNetV2 for classification as can be seen from Table 5.

Table 5.

Comparison of the number of model parameters and multiply-additions to perform classification (Class.) and segmentation (Segm.) tasks. Note, that for segmentation the baseline No PTA model is significantly larger.

Model	Task	# Params (M)	Multiply-Adds (Mops.)
MobileNetV2 No PTA	Class.	2.23	104.15
MobileNetV2 PTA-LLL	Class.	1.73	87.84
U-Net No PTA	Segm.	6.63	871.80
U-Net PTA-LLL	Segm.	6.14	855.49

The PTA training procedure is easy to integrate into existing pipelines. It offers the benefits of extra model configuration after the training is complete, higher model quality, and lower inference time. In addition to that, overall U-Net+PTA training time is no larger than that of a simple U-Net model as can be seen from Table 4.

Conclusions. In this work Post-Train Adaptive approach has been first applied to the task of image segmentation. The PTA approach has made it possible to reconfigure the architecture of the designed neural network after the training process has been complete. The two key components of the approach are PTA blocks and PTA-sampling training

strategy. The PTA blocks were added into the U-Net neural network with MobileNetV2 backbone. The post-train configuration can be done at runtime on any inference device including, but not limited to mobile devices.

In addition to post-train neural network configuration, the PTA approach has allowed to improve image segmentation quality (Dice_{score}) on the CamVid dataset.

The final trained model can be switched at runtime between 6 PTA configurations. These configurations differ by inference time and quality. The best speed is offered by PTA-LLL configuration, that is faster and has higher quality than No PTA baseline. The best quality is achieved by PTA-HLH configuration with

better than No PTA inference speed making the best configuration in term of speed to quality ratio. Importantly, all of the configurations have better quality than the original U-Net (No PTA) model.

The possible future research direction is to expand the inference time difference between heavy and light configurations to allow a single trained PTA-based network to target even more device performance categories.

REFERENCES:

1. Brostow, G. J., Fauqueur, J., & Cipolla, R. (2009). Semantic object classes in video: A high-definition ground truth database. *Pattern Recognition Letters*, 30(2), 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2008.04.005>
2. Figurnov, M., Collins, M. D., Zhu, Y., Zhang, L., Huang, J., Vetrov, D. P., & Salakhutdinov, R. (2017). Spatially adaptive computation time for residual networks. *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017, Honolulu, HI, USA, July 21–26, 2017*, 1790–1799. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.194>
3. Graves, A. (2016). Adaptive computation time for recurrent neural networks. *CoRR*, abs/1603.08983. <http://arxiv.org/abs/1603.08983>
4. He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2016, Las Vegas, NV, USA, June 27–30, 2016*, 770–778. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>
5. Hnatushenko, V. V., Zhernovyi, V., Udoviyk, I., & Shevtsova, O. (2021). Intelligent system for building separation on a semantically segmented map. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security with CEUR-WS, Khmelnytskyi, Ukraine, March 24–26, 2021*, 2853, 1–11. <http://ceur-ws.org/Vol-2853/keynote1.pdf>
6. Howard, A., Pang, R., Adam, H., Le, Q. V., Sandler, M., Chen, B., Wang, W., Chen, L.-C., Tan, M., Chu, G., Vasudevan, V., & Zhu, Y. (2019). Searching for MobileNetV3. *2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, ICCV 2019, Seoul, Korea (South), October 27 - November 2, 2019*, 1314–1324. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2019.00140>
7. Hu, J., Shen, L., & Sun, G. (2018). Squeeze-and-excitation networks. *2018 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2018, Salt Lake City, UT, USA, June 18–22, 2018*, 7132–7141. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00745>
8. Khabaralak, K. (2022a). Face detection on mobile: Five implementations and analysis. *CoRR*, abs/2205.05572. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.05572>
9. Khabaralak, K. (2022b). Post-train adaptive MobileNet for fast anti-spoofing. *CEUR Workshop Proceedings*, 3156, 44–53. <http://ceur-ws.org/Vol-3156/keynote5.pdf>
10. Khabaralak, K. (2022c). Faster optimization-based meta-learning adaptation phase. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 1, 82–92. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-1-10>
11. Khabaralak, K., & Koriashkina, L. (2022). Fast facial landmark detection and applications: A survey. *Journal of Computer Science and Technology*, 22(1), 12–41. <https://doi.org/10.24215/16666038.22.e02>
12. Kingma, D. P., & Ba, J. (2015). Adam: A method for stochastic optimization. In Y. Bengio & Y. LeCun (Eds.), *3rd international conference on learning representations, ICLR 2015, san diego, CA, USA, may 7–9, 2015, conference track proceedings*. <http://arxiv.org/abs/1412.6980>
13. Lin, T.-Y., Dollár, P., Girshick, R. B., He, K., Hariharan, B., & Belongie, S. J. (2017). Feature pyramid networks for object detection. *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017, Honolulu, HI, USA, July 21–26, 2017*, 936–944. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.106>
14. Milletari, F., Navab, N., & Ahmadi, S.-A. (2016). V-Net: Fully convolutional neural networks for volumetric medical image segmentation. *Fourth International Conference on 3D Vision, 3DV 2016, Stanford, CA, USA, October 25–28, 2016*, 565–571. <https://doi.org/10.1109/3DV.2016.79>
15. Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015 – 18th International Conference Munich, Germany, October 5–9, 2015, Proceedings, Part III*, 9351, 234–241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28
16. Sandler, M., Howard, A. G., Zhu, M., Zhmoginov, A., & Chen, L.-C. (2018). MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks. *2018 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2018, Salt Lake City, UT, USA, June 18–22, 2018*, 4510–4520. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00474>
17. Sun, K., Xiao, B., Liu, D., & Wang, J. (2019). Deep high-resolution representation learning for human pose estimation. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2019, Long Beach, CA, USA, June 16–20, 2019*, 5693–5703. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00584>

УДК 519.8

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-9>

Оксана ЧЕРНЕНКО

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Полтавський університет економіки і торгівлі, вул. Ковалю, 3, Полтава, Україна, 36000, oksanachernenko7@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9084-0999

Scopus Author ID: 36862730800

Олена ОЛЬХОВСЬКА

кандидат фізико-математичних наук, завідувач кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Полтавський університет економіки і торгівлі, вул. Ковалю, 3, Полтава, Україна, 36000, lana@olhovsky.name

ORCID: 0000-0001-5366-5995

Scopus Author ID: 42262220700

Дмитро ОЛЬХОВСЬКИЙ

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Полтавський університет економіки і торгівлі, вул. Ковалю, 3, Полтава, Україна, 36000, dmitriy@olhovsky.name

ORCID: 0000-0003-0313-6977

Scopus Author ID: 55328301800

Юрій ОЛЕКСІЙЧУК

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Полтавський університет економіки і торгівлі, вул. Ковалю, 3, Полтава, Україна, 36014, olexijchuk@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0585-3307

Scopus Author ID: 54904496400

Тетяна ПАРФЬОНОВА

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Полтавський університет економіки і торгівлі, вул. Ковалю, 3, Полтава, Україна, 36000, tara.poltava@gmail.com

ORCID: 0000-0001-9343-2061

Scopus Author ID: 36089160700

Оксана ОРІХІВСЬКА

старший викладач кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Полтавський університет економіки і торгівлі, вул. Ковалю, 3, м. Полтава, Україна, 36014, aka.jeita@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2775-0832

Бібліографічний опис статті: Черненко, О., Ольховська, О., Ольховський, Д., Олексійчук, Ю., Парфьонова, Т., Оріхівська, О. (2022). Алгоритм методу гілок та меж для розв'язування оптимізаційних задач з дробово-лінійною цільовою функцією та додатковими комбінаторними обмеженнями. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 79–84, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-9>

АЛГОРИТМ МЕТОДУ ГІЛОК ТА МЕЖ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ЗАДАЧ З ДРОБОВО-ЛІНІЙНОЮ ЦІЛЬОВОЮ ФУНКЦІЄЮ ТА ДОДАТКОВИМИ КОМБІНАТОРНИМИ ОБМЕЖЕННЯМИ

У роботі розглядається математична модель задачі комбінаторної оптимізації з дробово-лінійною цільовою функцією на множині розміщень. Враховуючи, що задача дробово-лінійного програмування відрізняється від задачі лінійного програмування лише виглядом цільової функції, це дає можливість використувувати для її розв'язування відомі методи лінійного програмування за певної їх модифікації. Серед комбінаторних методів важливе значення як в практичному, так і теоретичному плані має метод гілок та меж.

У роботі поширено метод гілок та меж для розв'язування задач оптимізації на розміщеннях з дробово-лінійною цільовою функцією та додатковими лінійними обмеженнями. Основними критеріями, що визначають ефективність методу при розв'язуванні конкретної задачі були спосіб обчислення оцінок та галуження. Алгоритм складається з двох етапів: спочатку перехід до релаксованої задачі (застосовуючи відповідне відображення переходимо від дробово-лінійної задачі оптимізації до лінійної), далі – модифікований метод гілок та меж, що ґрунтується на ідеях Ленда та Дойґа. Комбінаторна умова, а саме, бути елементом множини розміщень, замінена системою обмежень, що описує загальний многогранник розміщень.

В роботі, на основі властивостей застосованого до задачі з дробово-лінійною цільовою функцією відображення, доведено ряд тверджень, що лягли в основу методу розв'язування задачі. Зокрема, теорема про еквівалентність множин допустимих значень вихідної та релаксованої задач та теорема про оцінку допустимих областей задач, які є проміжними в процесі розв'язування.

Запропонований алгоритм методу гілок та меж для розв'язування задач оптимізації на комбінаторній множині розміщень у випадку дробово-лінійної цільової функції видається доцільним надалі застосовувати для розв'язування задач оптимізації з дробово-лінійною функцією цілі на інших множинах.

Ключові слова: метод гілок та меж, розміщення, дробово-лінійна цільова функція, комбінаторна оптимізація.

Oksana CHERNENKO

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Computer Science and Information Technology, Poltava University of Economics and Trade, Koval str., 3, Poltava, Ukraine, 36000, oksanachernenko7@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9084-0999

Scopus Author ID: 36862730800

Olena OLKHOVSKA

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Computer Science and Information Technology, Poltava University of Economics and Trade, Koval str., 3, Poltava, Ukraine, 36000, lena@olhovsky.name

ORCID: 0000-0001-5366-5995

Scopus Author ID: 42262220700

Dmytro OLKHOVSKY

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Computer Science and Information Technology, Poltava University of Economics and Trade, Koval str., 3, Poltava, Ukraine, 36000, dmitriy@olhovsky.name

ORCID: 0000-0003-0313-6977

Scopus Author ID: 55328301800

Yuriy OLEKSIYCHUK

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at Department of Computer Science and Information Technology, Poltava University of Economics and Trade, Koval str., 3, Poltava, Ukraine, 36000, olexijchuk@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0585-3307

Scopus Author ID: 54904496400

Tatyana PARFONOVA

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Computer Science and Information Technology, Poltava University of Economics and Trade, Koval str., 3, Poltava, Ukraine, 36000, tapa.poltava@gmail.com

ORCID: 0000-0001-9343-2061

Scopus Author ID: 36089160700

Oksana ORIKHIVSKA

Senior Lecturer at Department of Computer Science and Information Technology, Poltava University of Economics and Trade, Koval str., 3, Poltava, Ukraine, 36000, aka.jeita@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2775-0832

To cite this article: Chernenko, O., Olkhovska, O., Olkhovsky, D., Oleksiichuk, Yu., Parfyonova, T., Orikhovska, O. (2022). Alhorytm metodu hilok ta mezh dla rozv'iazuvannia optyimizatsiinykh zadach z drobovo-liniinoiu tsilovoio funktsiieiu ta dodatkovymy kombinatornymy обмеженнями [Branch-and-bound algorithm for solving optimization problems with a fractionallinear objective function and additional combinatorial constraints]. *Information Technology Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 79–84, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-9>

ALGORITHM OF THE BRANCH AND BOUND METHOD FOR SOLVING OPTIMIZATION PROBLEMS WITH A FRACTION-LINEAR OBJECTIVE FUNCTION AND ADDITIONAL COMBINATORY CONSTRAINTS

The paper considers a mathematical model of the problem of combinatorial optimization with a fractional-linear objective function on a set of placements. Given that the problem of fractional-linear programming differs from the problem of linear programming only in the form of the objective function, this makes it possible to use known methods of linear programming with a certain modification to solve it. Among the combinatorial methods, the method of branches and limits is important both in practical and theoretical terms.

In the work the method of branches and bounds is extended for solving optimization problems on placements with a fractional-linear objective function and additional linear constraints. The main criteria that determined the effectiveness of the method in solving a specific problem were the method of calculating estimates and branching. The algorithm consists of two stages: first, the transition to a relaxed problem (using the appropriate mapping, we move from a fractional-linear optimization problem to a linear one), then a modified method of branches and bounds, based on the ideas of Land and Doig. The combinatorial condition, namely, to be an element of the set of placements, is replaced by a system of constraints describing the general polyhedron of placements.

In the work based on the properties of the mapping applied to the problem with a fractional-linear objective function, a number of statements that formed the basis of the method of solving the problem were proved. In particular, the theorem on the equivalence of sets of admissible values of the original and relaxed problems and the theorem on the estimation of admissible areas of problems that are intermediate in the process of solving.

The proposed algorithm of the branch-and-bound method for solving optimization problems on a combinatorial set of placements in the case of a fractional-linear objective function seems appropriate to be applied in the future for solving optimization problems with a fractional-linear objective function on other sets.

Key words: method of branches and bounds, placement, fractional-linear objective function, combinatorial optimization.

Актуальність проблеми. Оптимізаційні задачі на комбінаторних множинах все частіше зустрічаються на практиці та потребують дослідження і розв'язання. Постає необхідність розробки нових та модифікації вже існуючих методів для їх розв'язування. У зв'язку з цим питання евклідової комбінаторної оптимізації все частіше стають метою досліджень вітчизняних та зарубіжних науковців.

Окремим класом можна виділити задачі оптимізації дробово-лінійної цільової функції, які адекватно моделюють ситуації, що мають місце на виробництві, сільському господарстві тощо (Ємець О.О., 2021, с. 63; Ємець О.О., 2022, с. 14). Актуальними залишаються розробка методів та алгоритмів розв'язування таких задач та проблема пошуку більш ефективних алгоритмів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботах (Стоян Ю. Г., 1993; Донець Г. П., 2011) описані методи та алгоритми розв'язування

лінійних умовних задач на комбінаторних множинах. Розроблено методи розв'язування дробово-лінійних умовних задач на множинах переставлень (Ємець О. О., 2005; Донець Г. П., 2011), розміщень (Ємець О. А., 2011).

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Запропонований в роботі (Ємець О. А., 2011) метод розв'язування умовних задач з дробово-лінійною цільовою функцією на розміщеннях ґрунтується на розбитті простору на класи еквівалентності та наступному напрямленому переборі цих класів. Доцільним є також застосування методів дискретної оптимізації (Корбут А. А., 1977) для даного класу задач, враховуючи схожість окремих властивостей допустимих множин дискретної та евклідової комбінаторної оптимізації.

Мета дослідження – модифікуємо метод гілок та меж для розв'язування умовних задач оптимізації на розміщеннях з дробово-лінійною

цільовою функцією та обґрунтуємо алгоритм цього методу.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Множину k перших натуральних чисел позначимо J_k , тобто $J_k = \{1, 2, \dots, k\}$, а $J_k^0 = J_k \cup \{0\}$.

Нехай задано мультимножину $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ з основою $S(G) = (e_1, e_2, \dots, e_n)$, де $e_i \in R^1 \quad \forall i \in J_n$, та кратностями елементів $k_G(e_i) = \eta_i$, $i \in J_n$. Очевидно, що $\sum_{i=1}^n \eta_i = \eta$ (Стоян Ю. Г., 1993).

Візьмемо довільне $k \in J_n$. Множина усіх упорядкованих k -вибірок з мультимножини G вигляду $(g_{i_1}, g_{i_2}, \dots, g_{i_k})$, де $g_{i_j} \in G$, $i_j \neq i_t \quad \forall i_j, i_t \in J_n$, $\forall j, t \in J_k$, утворює загальну множину розміщень $E_{\eta}^k(G)$. Нехай елементи мультимножини G упорядковані за неспаданням, а елементи $(e_1, e_2, \dots, e_n)$ її основи – за зростанням.

Опуклою оболонкою множини $E_{\eta}^k(G)$ є загальний многогранник розміщень $\Pi_{\eta}^k(G)$, що описується системою нерівностей

$$\sum_{j=1}^{|\omega|} g_j \leq \sum_{i \in \omega} x_i \leq \sum_{j=1}^{|\omega|} g_{\eta-j+1} \quad \forall \omega \subset J_k, \quad (1)$$

де $g_j \in G$, $|\omega|$ – кількість елементів у множині ω (Стоян Ю. Г., 1993).

Нехай k, n, η, m, p – натуральні константи, $c_j, d_j \in R \quad \forall j \in J_m^0$, $a_{ij}, b_i \in R \quad \forall j \in J_m, \forall i \in J_p$, та кож $t = (t_1, t_2, \dots, t_k, t_{k+1}, \dots, t_m) \in R^m$, де $x_j = t_j \quad \forall j \in J_k$, тобто змінні $t_{k+1}, \dots, t_m$ є неперервними, а $x_1, \dots, x_k$ – комбінаторними.

Розглянемо задачу вигляду: знайти впорядковану пару $\langle F(t^*), t^* \rangle$, таку що

$$F(t^*) = \max_{t \in R^m} \frac{\sum_{j=1}^m c_j t_j + c_0}{\sum_{j=1}^m d_j t_j + d_0},$$

$$t^* = \arg \max_{t \in R^m} \frac{\sum_{j=1}^m c_j t_j + c_0}{\sum_{j=1}^m d_j t_j + d_0}, \quad (2)$$

за комбінаторної умови

$$x = (x_1, \dots, x_k) \in E_{\eta}^k(G) \subset R^m, \quad k \leq m, \quad (3)$$

та додаткових лінійних обмежень

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} t_j \leq b_i, \quad i \in J_p. \quad (4)$$

Задача (2)–(4) може бути розв'язана шляхом переходу до релаксованої задачі: умову (3) „послабимо”, замінивши її (1). Застосовуючи до задачі (1), (2), (4) відображення ψ , яке задамо співвідношеннями

$$y_0 = \frac{1}{\sum_{j=1}^m d_j t_j + d_0}, \quad z_j = t_j y_0 \quad \forall j \in J_m, \quad t \in R^m, \quad (5)$$

перейдемо до задачі з лінійною функцією цілі та додатковими лінійними обмеженнями:

$$F(z) = \max_{z \in R^{m+1}} \sum_{j=1}^m c_j z_j + c_0 y_0,$$

$$z = \arg \max_{z \in R^{m+1}} \sum_{j=1}^m c_j z_j + c_0 y_0 \quad (6)$$

за умов

$$\sum_{j=1}^m a_{ij} z_j - b_i y_0 \leq 0, \quad i \in J_p, \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{|\omega|} g_j y_0 \leq \sum_{i \in \omega} y_i \leq \sum_{j=1}^{|\omega|} g_{\eta-j+1} y_0 \quad \forall \omega \subset J_k, \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^m d_j z_j + d_0 y_0 = 1, \quad y_0 > 0, \quad z_j \geq 0 \quad \forall j \in J_m, \quad (9)$$

де $z = (y_0, z_1, \dots, z_k, z_{k+1}, \dots, z_m) \in R^{m+1}$, $y_j = z_j \quad \forall j \in J_k$.

Комбінаторна умова (3) після застосування відображення (5) запишеться у вигляді:

$$y = (y_0, y_1, \dots, y_k) \in E \subset R^{m+1}. \quad (10)$$

Множину, задану системою (8), позначимо $Q_{\eta}^k(G)$. Задачі (1), (2), (4) та (6)–(9) еквівалентні, тобто, якщо $z^* = (y_0^*, z_1^*, \dots, z_m^*)$, де $y_j = z_j \quad \forall j \in J_k$, – оптимальний розв'язок задачі (6)–(9), то $t^* = (t_1^*, t_2^*, \dots, t_m^*)$, де $t_j^* = z_j^* (y_0^*)^{-1}$, $t_j = x_j \quad \forall j \in J_k$, – оптимальний розв'язок (1), (2), (4). Аналогічне твердження має місце і для задач (2)–(4) та (6), (7), (9), (10).

Опишемо алгоритм методу гілок та меж для розв'язування задачі (2)–(4):

1. Перейти до релаксованої задачі: умову (3) «послабити», замінивши її (1) та застосувати перетворення (5) до задачі (1), (3), (4).

2. Розв'язати лінійну задачу (6)–(9).

3. Якщо (6)–(9) не має розв'язку, то не має розв'язку (2)–(4), інакше нехай $\bar{t} = \bar{z} (y_0^*)^{-1}$ – екстремаль (1), (2), (4).

4. Якщо $\bar{x} \in E_{\eta}^k(G)$, де $\bar{x}_j = \bar{t}_j \quad \forall j \in J_k$, то $\langle F(x), x \rangle$ – розв'язок задачі (2)–(4), інакше перейти на корок 5.

5. Визначити індекс ρ компоненти t_{ρ} точки $\bar{t}$, т. що $t_{\rho} \notin G$, або $k_{\bar{t}}(t_{\rho}) > k_G(t_{\rho})$.

6. Записати два обмеження, що відтинають $\bar{t}$:

$$t_p \leq e_i^1, \quad (11)$$

$$t_p \geq e_i^2, \quad (12)$$

де

$$e_i^1 = \max \left\{ e_i \mid e_i \in S(G), e_i < t_p, (t_1, t_2, \dots, t_{p-1}, e_i) \in E_{\pi}^p(G) \right\},$$

$$e_i^2 = \min \left\{ e_i \mid e_i \in S(G), e_i > t_p, (t_1, t_2, \dots, t_{p-1}, e_i) \in E_{\pi}^p(G) \right\}.$$

7. Застосувати до (11), (12) перетворення (5):

$$z_p \geq e_i^1 y_0, \quad (13)$$

$$z_p \geq e_i^2 y_0, \quad (14)$$

8. Приєднати до останньої задачі вигляду (6)–(9) обмеження (13) та застосувати кроки 2–4 до розв'язування (6)–(9), (13). Якщо задача (6)–(9), (13) не має розв'язку, перейти на крок 9, інакше $\langle F(\bar{z}_1), \bar{z}_1 \rangle$ – розв'язок задачі (6)–(9), (13).

9. Приєднати до останньої задачі вигляду (6)–(9) обмеження (14) та застосувати кроки 2–4 до розв'язування (6)–(9), (14). Якщо задача (6)–(9), (14) не має розв'язку, перейти на крок 10, інакше $\langle F(\bar{z}_2), \bar{z}_2 \rangle$ – розв'язок задачі (6)–(9), (14).

10. Якщо жодна із задач вигляду (6)–(9), (13) та (6)–(9), (14) розв'язку не має, то задача (2)–(4) теж розв'язку не має.

11. Якщо одна із задач вигляду (6)–(9), (13) чи (6)–(9), (14) розв'язку не має, то перейти на крок 4.

12. Якщо обидві задачі вигляду (6)–(9), (13) та (6)–(9), (14) мають розв'язок, то для подальшого галуження вибрати ту, яка надає цільовій функції більшого значення, і перейти на крок 4.

Вищеописаний алгоритм ґрунтується на таких ідеях. Позначимо D – допустиму область вихідної задачі, тобто множину точок, що задовольняють умовам (2)–(4). Згідно з методом гілок та меж множину D розіб'ємо на частини, що не мають спільних точок, тобто $D = D_1 \cup D^* \cup D_2$, $D_1 \cap D^* \cap D_2 = \emptyset$, де D_1 –

множина допустимих розв'язків задачі (2)–(4) при додаванні обмеження (11); D^* – множина допустимих розв'язків задачі (2)–(4) при додаванні обмеження $e_i^2 \leq t_p \leq e_i^1$; D_2 – множина допустимих розв'язків задачі (2)–(4) при додаванні обмеження (12). Очевидно, що множина розв'язків D^* є порожньою для задачі (2)–(4) і з подальшого галуження може бути виключена.

Застосуємо до системи нерівностей, що описують множини D_1 , D^* , D_2 , перетворення (5), отримаємо Q_1 , Q^* , Q_2 .

Теорема 1. Обмеження (13), (14) не відсікають жодної точки $z = (y_0, z_1, \dots, z_m)$, т. що $y \in E$, де $y_j = z_j \quad \forall j \in J_k$.

Доведення. Нехай існує $z \in Q^*$, т. що z – розв'язок задачі (6), (7), (9), (10). Застосовуючи до z перетворення, обернене до (5), отримаємо точку t , $t = z(y_0)^{-1}$. Враховуючи, що задачі (6), (7), (9), (10) та (2)–(4) еквівалентні, t – розв'язок задачі (2)–(4). З (Емец О. А., 2011) очевидно, що відображення ψ задає взаємно-однозначну відповідність між D – множиною точок, що задовольняють (2)–(4) та Q – множиною точок, що задовольняють (6), (7), (9), (10), а отже, $t \in D^*$. Однак за побудовою множина D^* є порожньою для задачі (2)–(4). Суперечність. Таким чином, множина Q^* не містить розв'язків задачі (6), (7), (9), (10). Теорему доведено.

Враховуючи той факт, що задачі (1), (2), (4) та (6)–(9) еквівалентні, має місце наступна теорема.

Теорема 2. Оцінками допустимих областей D_i задач (2)–(4), (11) чи (2)–(4), (12) є значення цільових функцій відповідних задач (1), (2), (4), (11) чи (1), (2), (4), (12).

Висновки та перспективи подальших досліджень. Таким чином, у роботі запропоновано алгоритм методу гілок та меж для розв'язування задач оптимізації на комбінаторній множині розміщень у випадку дробово-лінійної цільової функції. В перспективі планується створити програмне забезпечення, що реалізує даний алгоритм, та дати йому теоретичну оцінку.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Сергиенко И. В., Каспицкая М.Ф. Модели и методы решения на ЭВМ комбинаторных задач оптимизации. К.: Наукова думка, 1981. 288 с.
2. Стоян Ю. Г., Ємец О.О. Теорія і методи евклідової комбінаторної оптимізації. К.: ІСДО, 1993. 188 с.
3. Ємец О. О., Колечкіна Л. М. Задачі комбінаторної оптимізації з дробово-лінійними цільовими функціями. К.: Наукова думка, 2005. 117 с.
4. Емец О. А., Черненко О. А. Оптимизация дробно-линейных функций на размещениях: монография. Київ: Наукова думка, 2011. 154 с.
5. Донець Г. П., Колечкіна Л. М. Екстремальні задачі на комбінаторних конфігураціях: монографія. Полтава: РВВ ПУЕТ, 2011. 309 с.

6. Ємець О.О., Черненко О.О., Чілікіна Т. В., Ольховська О. В. Огляд задач комбінаторної оптимізації визначення рентабельності сільськогосподарського виробництва та методи їх розв'язування. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: фізико-математичні науки*. Випуск 22. 2021. С. 63–74.
7. Ольховський Д., Ольховська О., Черненко О., Парфьонова Т., Чілікіна Т. Програмний комплекс для розв'язування евклідових комбінаторних оптимізаційних задач точними та наближеними методами. *Інформаційні технології та суспільство*, 2 (4). 2022. С. 78–87.
8. Юрій Олексійчук, Дмитро Ольховський, Олена Ольховська, Тетяна Чілікіна, Оксана Черненко, Оксана Оріхівська. Комбінаторна задача про побудову мостів та методи її розв'язання. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КРНУ, 2022. Випуск 1(132). С.115–122.
9. Ємець, О., Черненко, О., Парфьонова, Т., Ольховська, О. Математична модель задачі оптимального розміщення продуктивних сил з врахуванням мінімальної шкоди навколишньому середовищу. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security, випуск 1*, 2022, С. 14–19.
10. Корбут А. А., Сигал И.Х., Финкельштейн Ю. Ю. Метод ветвей и границ: обзор теории, алгоритмов, программ и приложений. *Math. Operationsch und Statist., Ser. Optimiz.* 1977. № 2. Р. 253–280.

REFERENCES:

1. Sergienko I.V., Kaspshitskaya M.F. (1981). Modely y metody resheniya na ЭVM kombynatornykh zadach optymyzatsyy [Models and methods for solving combinatorial optimization problems on a computer]. K.: Naukova Dumka. 288 p. [in Russian].
2. Stoyan Yu. G., Yemets O.O. (1993). Teoriya i metody evklidovoyi kombinatornoyi optyimizatsiyi [Theory and methods of Euclidean combinatorial optimization]. K.: Institute for Systems Research in Education. 188 p. [in Ukrainian].
3. Yemets O. O., Kolechkina L. M. (2005). Zadachi kombinatornoi optyimizatsii z drobovo-liniinymy tsilovymy funktsiiamy [Problems of combinatorial optimization with shot-linear objective functions]. K.: Naukova Dumka. 117 p. [in Ukrainian].
4. Yemets O. A., Chernenko O. A. (2011). Optymyzatsiya drobo-lyneinykh funktsyi na razmeshcheniyakh: monohrafiya [Optimization of fractional-linear functions on placements: monograph]. Kiev: Naukova Dumka. 154 p. [in Russian].
5. Donets G. P., Kolechkina L. M. (2011). Ekstremalni zadachi na kombinatornykh konfigurationsiakh: monohrafiia [Extremal problems on combinatorial configurations: monograph]. Poltava: RVV PUET. 309 p. [in Ukrainian].
6. Yemets, O.O., Chernenko, O.O., Chilikina, T.V., Olkhovska, O.V. (2021). Ohliad zadach kombinatornoi optyimizatsii vyznachennia rentabelnosti silskohospodarskoho vyrobnytstva ta metody yikh rozv'iazuvannia [Review of combinatorial optimization problems for determining the profitability of agricultural production and methods for solving them]. *Matematychna ta kompiuterna modeliuvannia. Seria: Fyzyko-matematychni nauky. – Mathematical and computer modeling. Series: Physical and Mathematical Sciences*. 22, 63–74 [in Ukrainian].
7. Olkhovskyi D., Olkhovska O., Chernenko O., Parfyonova T., Chilikina T. (2022). Prohramnyi kompleks dlia rozv'iazuvannia evklidovykh kombinatornykh optyimizatsiinykh zadach tochnymy ta nablyzhenymy metodamy [Software complex for solving Euclidean combinatorial optimization problems by exact and approximate methods]. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo. – Information technologies and society*, 2 (4), P. 78–87 [in Ukrainian].
8. Yurii Oleksiichuk, Dmytro Olkhovskyi, Olena Olkhovska, Tetiana Chilikina, Oksana Chernenko, Oksana Orihivska (2022). Kombinatorna zadacha pro pobudovu mostiv ta metody yii rozv'iazannia [The combinatorial problem of building bridges and methods of its solution]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho. – Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky National University of Kremenchug. – Kremenchuk: KRNU. Issue 1(132). P. 115–122* [in Ukrainian].
9. Yemets, O., Chernenko, O., Parfyonova, T., Olkhovska, O. (2022). Matematychna model zadachi optyimalnogo rozmishchennia produktyvnykh syl z vrakhuvanniam minimalnoi shkody navkolyshnomu seredovyshchu [Mathematical model of the problem of the optimal distribution of productive forces with the improvement of the minimum amount of stress in the middle]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security, issue 1*, P. 14–19 [in Ukrainian].
10. A. A. Korbut, I. Kh. Syhal, Y. Kh., Fynkelshtein Yu. Yu. (1977). Metod vetvei y hranyts: obzor teoryi, alhorytmov, prohramm y prylozhenyi [Branch and Bound Method: A Review of Theory, Algorithms, Programs, and Applications]. *Math. Operationsch und Statist., Ser. Optimization*. No. 2. P. 253–280 [in Russian].

УДК 004.75

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-10>

Gennadii SHVACHYCH

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at Department of Software Engineering, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005, ssg1@ukr.net

ORCID: 0000-0002-9439-5511

Scopus Author ID: 56509642500

Pavlo SHCHERBYNA

Assistant of Technical Sciences, Professor, Professor at Department of Software Engineering, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005, oo7@ukr.net

ORCID: 0000-0002-6740-286X

Dmytro MOROZ

Assistant at Department of Software Engineering, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005, ssg1@ukr.net

ORCID: 0000-0003-2577-3352

Scopus Author ID: 57369936300

To cite this article: Shvachych, G., Shcherbyna, P., Moroz, D. (2022). Alhorytm metodu hilok ta mezh dlia rozv'iazuvannia optymizatsiynykh zadach z drobovo-liniinoiu tsilovoiu funktsiieiu ta dodatkovymy kombinatornymy obmezhenniamy [Aggregation of computing channels based on the NVIDIA CUDA platform for control modes of components of technological systems]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 85–92, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-10>

AGGREGATION OF COMPUTING CHANNELS BASED ON THE NVIDIA CUDA PLATFORM FOR CONTROL MODES OF COMPONENTS OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS

Today, practice poses problems, the solution of which by well-known standard approaches quite often represents a significant problem, which can be solved only by using multiprocessor computer technologies. In turn, one of the fundamental features of the application of these technologies is reduced to increasing the productivity and speed of calculations. At the same time, the significant performance of calculations allows the solution of multidimensional problems, as well as problems that require a significant amount of processor time. Speed operation allows you to effectively manage not only technological processes, but also provides for the creation of prerequisites for the development of promising and innovative technological processes. Therefore, the application of high-performance computing is an urgent and priority problem today.

The goal of the work is to improve the structure and increase the performance of a multiprocessor computer system by aggregating computing channels based on the NVIDIA CUDA platform for control modes of technological process components. The proposed approach made it possible not only to increase the efficiency of parallelization, but also to significantly reduce the calculation time. In the given development of a multiprocessor system, two NVIDIA GeForce GTX 1080 video cards were "connected". This approach is aimed not only at a significant increase in computing performance, but also at a significant decrease in latency and significant unloading of the system bus.

Compared to the known approach, due to the application of the software-hardware architecture of parallel computing from the NVIDIA corporation based on the CUDA platform, it was possible to increase the volume of video memory by 16 GB on each computing node of the multiprocessor system, as well as to increase the overall performance of the system node by 350 GFL.

The practical value of the conducted research is aimed at solving the problem of intensification of spheroidizing annealing of a long steel product. The direct technological process of heat treatment of metal acquires such advantages as high productivity, a significant reduction in energy consumption, and allows control of technological parameters by the length and cross-sectional area of the metal.

Key words: multiprocessor systems, aggregation, speed, memory, computing nodes, technological process, processors, graphic objects, non-graphic computing, annealing, spheroidization.

Геннадій ШВАЧИЧ

доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, ssg1@ukr.net

ORCID: 0000-0002-9439-5511

Scopus Author ID: 56509642500

Павло ЩЕРБИНА

асистент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, sgg1@ukr.net

ORCID: 0000-0002-6740-286X

Дмитро МОРОЗ

асистент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, sgg1@ukr.net

ORCID: 0000-0003-2577-3352

Scopus Author ID: 57369936300

Бібліографічний опис статті: Швачич, Г., Щербина, П., Мороз, Д. (2022). Агрегація обчислювальних каналів на основі платформи *NVIDIA CUDA* для режимів управління компонентами технологічних систем. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 85–92, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-10>

АГРЕГАЦІЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ НА ОСНОВІ ПЛАТФОРМИ *NVIDIA CUDA* ДЛЯ РЕЖИМІВ УПРАВЛІННЯ КОМПОНЕНТАМИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

Сьогодні практика висуває задачі, розв'язування яких відомими стандартними підходами досить часто являє собою значну проблему, вирішити яку можна тільки шляхом застосування багатопроцесорних комп'ютерних технологій. В свою чергу одна з принципів особливостей застосування вказаних технологій зводиться до збільшення продуктивності й швидкодії обчислень. При цьому значна продуктивність обчислень допускає розв'язання багатовимірних задач, а також задач, які потребують значного обсягу процесорного часу. Швидкодія дозволяє ефективно керувати не тільки технологічними процесами, а передбачає і створення передумов для розробки перспективних та новітніх технологічних процесів. Отже, застосування високопродуктивних обчислень на сьогодні є проблемою актуальною та першочерговою.

У роботі поставлена мета удосконалення структури і підвищення продуктивності багатопроцесорної обчислювальної системи шляхом агрегації обчислювальних каналів на основі платформи *NVIDIA CUDA* для режимів управління компонентами технологічних процесів. Запропонований підхід дозволив не лише підвищити ефективність розпаралелювання, але і істотно зменшити час обчислень. У приведеній розробці багатопроцесорної системи «з'єзувалися» дві відеокарти *NVIDIA GeForce GTX 1080*. Такий підхід спрямовано не лише на істотне збільшення продуктивності обчислень, але і на значне зменшення латентності й істотного розвантаження системної шини.

В порівнянні з відомим підходом за рахунок застосування програмно-апаратної архітектури паралельних обчислень корпорації *NVIDIA* на основі платформи *CUDA* вдалося на кожному обчислювальному вузлі багатопроцесорної системи збільшити об'єм відеопам'яті на 16 Гб, а також підвищити загальну продуктивність вузла системи на 350 Гфл.

Практична цінність проведених досліджень спрямована на розв'язування задачі інтенсифікації сфероїдизуючого відпалу довгомірного сталевого виробу. Безпосередньо технологічний процес термічної обробки металу набуває такі переваги, як висока продуктивність, істотне зниження енергоспоживання та дозволяє здійснювати контроль технологічних параметрів за довжиною та площею перетину металу.

Ключові слова: багатопроцесорні системи, агрегація, швидкодія, пам'ять, обчислювальні вузли, технологічний процес, процесори, графічні об'єкти, неграфічні обчислення, відпал, сфероїдизація.

Relevance of the research problem

Today, practice raises such problems, the solution of which is more often than not possible only through the use of multiprocessor computing complexes. For example, in the field of metallurgical production, there are many diverse and interconnected processes [1–5]. This can be the process of smelting and pouring iron-carbon alloys, as well as rolling, heating and

heat treatment of various metal products, as well as the operation of auxiliary equipment, which includes filling machines, ladles, bowls, etc. At the same time, solving these problems using known standard approaches quite often represents a significant problem that can be solved only by using multiprocessor computer technologies. In turn, one of the fundamental features of the application of these technologies is reduced to increasing the

productivity and speed of calculations. At the same time, the significant performance of calculations allows the solution of multidimensional problems, as well as problems that require a significant amount of processor time. Speed operation allows you to effectively manage not only technological processes, but also provides for the creation of prerequisites for the development of promising and innovative technological processes. Therefore, the application of high-performance computing is an urgent and priority problem today.

NVIDIA hardware is used in the design of high-performance computing. In this regard, it becomes possible to use the hardware and software architecture of parallel computing based on the *CUDA* platform (*Compute Unified Device Architecture*). Such a platform allows you to use the resources of video cards for non-graphical calculations. And today this technology is becoming more and more relevant.

Nowadays, modern graphic processors are used not only for processing graphic objects. So, thanks to the programmable unified shader architecture, which allows video chips to work with a large number of data streams, they can also be used to process non-graphical calculations. Such capabilities of video cards appeared after the release of G80 chips from *NVIDIA*, which had a unified shader architecture. Note that the performance of modern graphics processors significantly exceeds the performance of central microprocessors (tens and hundreds of times) thanks to the shader architecture, which allows for a large number of parallel data streams (up to several thousand). At the same time, central processors are focused on executing a single stream of commands.

The technology of non-graphic computing on graphics chips was named *GPGPU* (*General-purpose computing on graphics processing units*). A fundamental feature of this technology is the fact that with appropriate calculations there is practically no load on the processor, and the user can use it for other purposes.

To use video card resources, software developers had to turn to *API* graphics libraries (*Application Programming Interface*): *OpenGL* or *Direct3D*, which significantly complicated the process of creating applications, as it required knowledge of the principles of processing 3D objects, for example, textures, shaders, and so on. With the introduction of the *BrookGPU* compiler, which allowed programmers not to learn the principle of working with 3d models, there was an opportunity to access the computing power of video cards.

Due to the growing interest in non-graphic computing on *GPUs*, video card manufacturers have introduced new developments in the field of *GPGPU* technology. Yes, the *NVIDIA* company offered *CUDA* technology for these purposes. This stage in the development of *CUDA* technology made it possible to use graphic processors in various fields of science, for example, astrophysics, computational biology and chemistry, modeling of fluid dynamics, electromagnetic interactions, computer tomography, seismic analysis, etc. In this work, this technology is used for automated control of the parameters of the technological process of metal processing.

Note that this type of calculation requires that the video card supports the shader architecture. In addition, in these studies, in order to achieve maximum performance, several video cards are used that implement the mode of aggregation of computing channels based on the *NVIDIA SLI* (*Scalable Link Interface*) technology.

Let's note that today a large number of software products have been created that are focused on the use of *GPGPU* technology. Many of these programs are focused on solving applied problems, video conversion, *HD* video broadcasts, data encryption, etc.

Despite the fact that this technology was developed very recently, it already has practical applications in scientific research. This is explained by the fact that the efficiency of *GPGPU* technology exceeds the efficiency of central processors by many times. So far, only the narrow focus of calculations remains a problem. However, we hope that this barrier will be overcome soon. Thus, today such technology is attracting increasing interest and is becoming more and more relevant.

Analysis of recent research and publications

This research is aimed at the development of new modes of control of the components of technological systems through the use of multiprocessor complexes and is illustrated on the basis of heat treatment (HT) of the workpiece. It is known that billet maintenance is the most promising way of fundamentally improving the consumer qualities of metal products. At the same time, the workpiece for cold landing should have in its initial state the structure of granular pearlite of a certain grade, i.e., one that has a globular form of the carbide phase of a certain size. To obtain the specified structural state, the workpiece is subjected to spheroidizing annealing.

Known technological processes for preparing rolled products for further deformation, which require certain optimization in order to improve them, as well as the construction of new

technological lines for metal maintenance require significant costs for conducting numerous full-scale experiments using laboratory and research and industrial equipment, or conducting research in real production conditions. Thus, the development and use of multiprocessor complexes using their mathematical and software is a primary problem. Solving such a problem allows to significantly reduce the number of experimental studies, and also, what is important, the time required for their conduct. This approach makes it possible to obtain the necessary information regarding the development and implementation of various technological innovations.

Many grades of steels – structural, tool, and others for cold tapping – must have a granular pearlite structure in the initial state, that is, pearlite with a globular morphology of the carbide phase of a certain size. Therefore, as is known [6], a special heat treatment is used to prepare a heterophase alloy for cold deformation – spheroidizing annealing. As a result of such an operation, the metal receives a structure with a partially or completely spheroidized carbide phase, which provides the best indicators of manufacturability and economy during its subsequent processing (cold tapping, stamping, clear cutting or cutting).

Today, there are two classical schemes of spheroidizing annealing: annealing at subcritical temperatures and annealing with incomplete phase recrystallization. The disadvantage of heat treatment (HT) according to the first scheme is its long duration. Annealing of metal according to the second scheme allows you to slightly shorten its time intervals. At the same time, as a result of rapid heating and incomplete austenization of steel, partial dissolution of cementite plates occurs. At the same time, during subsequent cooling, the austenite formed disintegrates by an abnormal mechanism into ferrite and cementite, and this, in turn, during further exposure ensures spheroidization of cementite. Under such conditions, the noted scheme differs in lower time costs. However, these schemes are characterized by significant disadvantages of metal heating by external media [6, 7].

During the last several decades, more and more attention is paid to the processes of spheroidization of the carbide phase with the structure of granular pearlite, which are considered as alternatives to the long traditional processes of spheroidizing annealing of steel billets. These include the methods and technologies of combination spheroidizing processing of various types of metal products [8].

A promising direction of intensification of the annealing process of steel products is the use of electric contact or induction heating of the metal being processed [9, 10]. The indisputable advantages of electrothermal treatment are as follows: giving steel products a high complex of properties, which is caused by the specific effect of high intensity of heating on the mechanism and kinetics of structural changes in steel, limited scale formation and decarburization, avoidance of environmental pollution, reduction of the duration of heat treatment by ten times. In addition, and most importantly, the indicated methods of electrothermal treatment of steel allow maintenance in automated flow lines [6]. When implementing the mode of spheroidal annealing of steel in the flow line, a significant contribution to the reduction of the total duration of annealing is provided by both the increase in the heating rate and the increase in the cooling rate at the corresponding stages of the maintenance mode. Therefore, the practical implementation of spherical annealing in flow lines requires, first of all, the solution of new technical problems. However, high-speed maintenance processes will continue to require research, first of all, to control the main technological parameters in order to optimize them.

Therefore, new technological processes of billet maintenance (heating and cooling of metal at the required speed in specific temperature and time conditions), resource-saving technologies for preparing the billet for further processing are the most important prospective directions of the development of the mining and metallurgical complex and mechanical engineering. Control of certain technological parameters and management of the maintenance process can be ensured through the use of multiprocessor complexes.

The purpose of research. The aim of the work is to improve the structure and increase the performance of a multiprocessor computing system by aggregating computing channels based on the *NVIDIA CUDA* platform for control modes of technological system components.

Presentation of the main research material. The system of control modes of technological process components. To highlight the processes that take place in the control system of the components of technological processes, consider the block diagram of its main contours, which is presented in fig. 1.

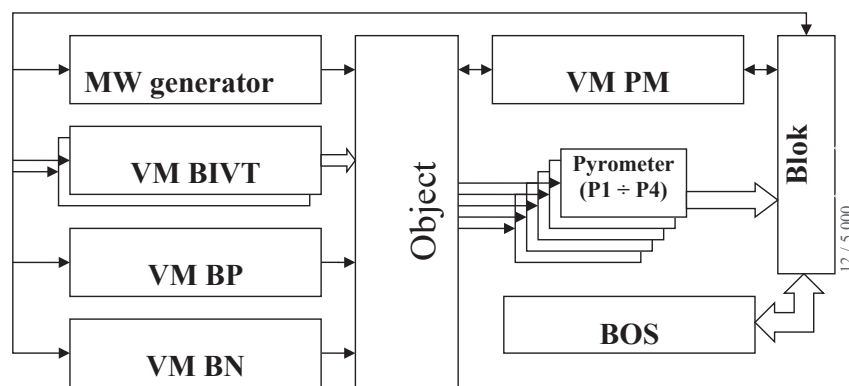


Fig. 1. Block diagram of the contours of the system for controlling the parameters of technological systems.

In fig. 1, the following designations are adopted: *BOS* – multiprocessor system; *VM PM* – executive mechanism of the extension mechanism; *VM BIVT* – executive mechanisms of certain blocks of isothermal exposure to metal temperature; *VM BNVT* – executive mechanisms of the non-isothermal metal temperature holding unit; *VM BP* – executive mechanism of the metal cooling unit; *VM BN* is the executive mechanism of the wire heating unit.

The given control system contains blocks that can receive information about the necessary current parameters of the controlled processes themselves. The peculiarity of such a system boils down to the fact that for each of the four processes of technological processing of metal, a two-dimensional problem of thermal conductivity is solved. Under such conditions, *BOS* software is able to control such temperature regimes that occur both over the entire cross-sectional area of the metal and along its length. Control of the specified temperature regimes is performed in the center of the plane of the corresponding cross-section of the wire.

Features of the aggregation of computing channels based on the use of the NVIDIA CUDA platform. NVIDIA hardware is used in the design of high-performance computing. In this connection, it becomes possible to use the hardware and software architecture of parallel computing based on the *CUDA* platform. Such a platform allows you to use the resources of video cards for non-graphical calculations. And today this technology is becoming more and more relevant.

Nowadays, modern graphic processors are used not only for processing graphic objects. So, thanks to the programmable unified shader architecture, which allows video chips to work with a large number of data streams, they can also be used to process non-graphical calculations. Such capabilities of video cards appeared after the

release of NVIDIA's G80 chips, which had a unified shader architecture. Note that the performance of modern graphics processors significantly exceeds the performance of central microprocessors (tens and hundreds of times) thanks to the shader architecture, which allows for a large number of parallel data streams (up to several thousand). At the same time, central processors are focused on executing a single stream of commands.

The programming procedure used in *CUDA* technology differs from traditional ones in that it completely hides the graphics pipeline from the programmer, allowing him to prepare programs in more familiar "terms". In addition, *CUDA* technology provides the programmer with a more convenient model of working with memory. There is no need to store data in 128-bit textures, since *CUDA* allows you to read data directly from the memory of the video card.

On the other hand, it should be noted that the *NVIDIA GeForce GTX 1080* video card for this multiprocessor system was selected taking into account the compatibility of the *Scalable Link Interface (SLI)*. When creating the latest technological processes [3, 4, 7, 10], this approach is extremely relevant. The company's *SLI* technology allows you to distribute the calculation between two video cards. At the same time, *Quad SLI* devices expand this technology – they allow two dual-processor video cards to use four graphics processors at the same time. In the given development of a multiprocessor system, two *NVIDIA GeForce GTX 1080* video cards were "connected". This approach is aimed not only at a significant increase in computing performance, but also at a significant decrease in latency and significant unloading of the system bus.

Note that an *SLI* bridge is used to "link" two video cards. At the same time, the *NVIDIA* corporation uses a physical connector to connect video cards together, which allows them to interact with

each other without using bandwidth in the slots. Therefore, you will need one of two SLI bridges: either a standard bridge (for less powerful cards) or a high-bandwidth bridge (for more powerful cards). For this development, a more powerful card (*NVIDIA GeForce GTX 1080*) was used, which allows the use of a standard bridge, but this will not allow to ensure the full performance of video cards.

When installing an *SLI* system, additional cooling of the multiprocessor system module housing is provided. Such a system uses a case with a 120 mm fan located opposite the video card connectors. Placing a 120 mm fan opposite these two graphics cards allows you to significantly reduce the temperature of the *GPU* graphics cards. Video cards are mounted in such a way that they blow hot air through holes on the back panel of the system case. In this regard, there is no need to apply additional special cooling. In this case, it is only necessary to ensure normal air exchange.

As for power consumption, high-quality power supplies must be used in such systems. A *Corsair HX 1200 W* power supply was used in the design of the multiprocessor system, which provides power for the *Quad SLI* system without any problems. The proposed multiprocessor system did not force the power supply unit to work at full capacity. The video cards used in this system also work quite quietly, and even in the *Quad SLI* configuration they have no problems with noise.

In addition, it must be emphasized that the graphics processor, having powerful computing capabilities, still could not completely replace the activity of the central processor, the absolute advantage of which is versatility, but it can significantly relieve the CPU by taking on the loads that are the most time-consuming and complex tasks.

Experimental studies. The developed multiprocessor system with the aggregation of computing channels is used to intensify the spheroidizing annealing of steel products [11, 12]. The installation for intensification of spheroidizing annealing of a long steel product is equipped with a multiprocessor computer system with specially oriented software installed on it. At the same time, the multiprocessor computer system is connected through the information bidirectional communication interface with the technological process control unit. The multiprocessor computer system is made in the form of a separate module and allows, with the help of special software, to set and control the necessary temperature regimes on the entire cross-sectional

plane of the sample during heating and holding of the metal, as well as control the mode of non-isothermal annealing of steel, while the multiprocessor computer system aims to control the thermal processing mode is constant in the range of annealing temperatures.

Algorithms for calculating the heat transfer process were implemented using *CUDA* technology. Analysis of the execution time of parallel algorithms showed that the use of *CUDA* technology significantly reduces the time of processing experimental data. Practical testing has shown that the effectiveness of such calculations exceeds by an order of magnitude the statistics of similar calculations on the central processor, even with the use of *OpenMP* technology. Directly, the features of mathematical modeling of metal maintenance processes are fully covered in works [13–15].

Spheroidization of the carbide phase of the metal in the conditions of the appropriate conditions of heat treatment of the workpieces provides the material with a granular pearlite structure. Moreover, rapid spheroidization leads to a more uniform distribution of cementite globules in the ferrite matrix. Steel samples of almost the same hardness after heat treatment acquired a finely dispersed structure that ensures a high level of plasticity of the metal. As a result of rapid heating of the sample and incomplete austenitization of the steel, there are certain changes in the morphology of the carbide phase from lamellar to finely dispersed globular.

Conclusions and prospects for further research.

This work shows ways to increase the efficiency of a multiprocessor cluster system due to the aggregation of computing channels based on the use of the *NVIDIA CUDA* platform. The proposed approach made it possible not only to increase the efficiency of parallelization, but also to significantly reduce the calculation time.

Compared to the known approach, due to the application of the software-hardware architecture of parallel computing from the *NVIDIA* corporation based on the *CUDA* platform, it was possible to increase the volume of video memory by 16 GB on each computing node of the multiprocessor system, as well as to increase the overall performance of the system node by 350 GFL.

Let's note that today a large number of software products have been created that are focused on the use of *GPGPU* technology. Many of these programs are focused on solving applied problems, video conversion, *HD* video broadcasts, data encryption, etc.

Despite the fact that this technology was developed relatively recently, it already has practical application in scientific research. This is explained by the fact that the efficiency of *GPGPU* technology exceeds the efficiency of central processors by many times. So far, only the narrow focus of calculations remains a problem. However, we hope that this barrier will be overcome soon. Thus, today such technology is attracting increasing interest and is becoming more and more relevant.

The authors see the prospects of further research in this scientific direction in the coverage of issues related to the study of estimations of

acceleration of calculations of a multiprocessor system. After all, in order to solve a certain class of applied problems, there is a need to expand the computing power of the system. The established principle of modularity allows you to increase the performance of the computer system by adding new slave nodes. In addition, it would be expedient to derive appropriate analytical ratios for calculating the efficiency of the claimed computing system. This would allow researchers to choose the most efficient configuration of a multiprocessor system and its operating modes. The authors intend to cover this type of research in upcoming publications.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Швачич Г.Г., Колomoец Н.А., Соболенко А.В. Исследование и разработка теплового режима отжига бунтов в шахтной печи. *Теплотехника и энергетика в металлургии*. Дніпро. 2002. С. 14–18.
2. Швачич Г.Г., Соболенко А.В., Соболенко М.А. Исследование температурного режима работы печей отжига шахтного типа бунтов проволоки. *Теория и практика металлургии*. 2003. № 1. С. 59–62.
3. Shvachych G., Pobochij I., Sazonova M., Bilyi O., Moroz D. Intelligent decision support system. *International Academy Journal Web of Scholar*. 2021. № 2 (52). P. 1–9. 4.
4. Швачич Г.Г., Соболенко А.В., Протопопов Д.В., Чувев А.В. Информационная система сопровождения трубопрокатного агрегата 140 со станами типа тандем. *Теория и практика металлургии*. 2003. № 5–6. С. 76–82.
5. Швачич Г.Г., Шмукин А.А. Особенности конструирования параллельных вычислительных алгоритмов для ПЭВМ в задачах тепло- и массообмена. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2004. № 3. С. 42–47.
6. Долженков И.Е. Термическая и деформационно – термическая обработка металлопроката. *Теория и практика металлургии*. 2002. № 3. – С.30–36.
7. Іващенко В.П., Швачич Г.Г., Соболенко М.О. Новітні металургійні технології на основі використання високопродуктивних багатопроцесорних обчислювальних комплексів. *Теория и практика металлургии*. 2013. № 3–4. С.78–87.
8. Долженков И.Е. Влияние пластической деформации и других предобработок на сфероидизацию карбидов в сталях. *Теория и практика металлургии*. 2007. № 1. С. 66–68.
9. Соболенко М.А. О проблеме математического моделирования параметров скоростной сфероидизирующей обработки углеродистых и низколегированных сталей. *Сучасні проблеми металургії*. 2007. № 10. С. 123–137.
10. Гуль Ю.П., Соболенко М.А. Интенсификация процесса сфероидизирующего отжига стали в поточных линиях. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2011. № 58. С. 197–202.
11. Патент №143971 Україна МПК C21D 1/26 (2006.01) Установка для інтенсифікації сфероїдизуючого відпалювання сталі / Іващенко В. П., Швачич Г. Г., Соболенко М.О., Гуль Ю.П., Соболенко О.В., Кокашинська Г.В., Мороз Д. М. №u202000940; заявл. 14.02.2020; опубл. 25.08.2020, Бюл. № 16.
12. Shvachych G., Moroz B., Martynenko A., Hulina I., Busygin V., Moroz D. Model of Speed Spheroidization of Metals and Alloys Based on Multiprocessor Computing Complexes. *Machine Learning for Predictive Analysis. Networks and Systems*. Springer. 2020. P. 33–41.
13. Shvachych G., Pobochii I., Khokhlova T., Kholod A., Moroz D. Multiprocessor Computing based Parallel Structures of Mathematical Models of Tridiagonal Systems. *5th International Conference on Inventive Computation Technologies*. 2020. P. 1031–1035.
14. Moroz D. Numerical-analytical method for distributed modelling of applied tasks. *Science and education : Proceedings of VII International Scientific and Practical Conference*. Kyoto, Japan. 2021. P. 128–136.
15. Мороз Д. М. Моделирование максимально параллельных структур алгоритмов решения тепловых задач. *Сучасні проблеми металургії*. Дніпро. 2021. № 24. С. 98–109.

REFERENCES:

1. Shvachych G.G., Kolomoets N.A., Sobolenko A.V. Issledovanie i razrabotka teplovogo rezhima otzhiga buntov v shahtnoy pechi [Research and development of thermal conditions for annealing coils in a shaft furnace]. *Teplotekhnika i energetika v metallurgii. Dnipro*. 2002. S. 14–18.
2. Shvachych G.G., Sobolenko A.V., Sobolenko M.A. Issledovanie temperaturnogo rezhima raboty pechey otzhiga shahtnogo tipa buntov provoloki [Investigation of the temperature regime of operation of furnaces for annealing shaft-type wire coils]. *Teoriya i praktika metallurgii*. 2003. № 1. S. 59–62.
3. Shvachych G., Pobochij I., Sazonova M., Bilyi O., Moroz D. Intelligent decision support system [Intelligent decision support system]. *International Academy Journal Web of Scholar*. 2021. № 2 (52). P. 1–9.
4. Shvachich G.G., Sobolenko A.V., Protopopov D.V., Chuev A.V. Informatsionnaya sistema soprovozhdeniya truboprokatnogo agregata 140 so stanami tipa tandem [Information system for tracking tube rolling unit 140 with tandem mills]. *Teoriya i praktika metallurgii*. 2003. № 5–6. S. 76–82.
5. Shvachych G.G., Shmukin A.A. Osobennosti konstruirovaniya parallelnykh vychislitelnykh algoritmov dlya PEVM v zadachah teplo- i massoobmena [Features of designing parallel computational algorithms for PC in problems of heat and mass transfer]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*. 2004. № 3. S. 42–47.
6. Dolzhenkov I.E. Termicheskaya i deformatsionno – termicheskaya obrabotka metalloprokata [Thermal and deformation-heat treatment of rolled metal products]. *Teoriya i praktika metallurgii*. 2002. № 3. – S. 30–36.
7. Ivaschenko V.P., Shvachych G.G., Sobolenko M.O. Novitni metalurgichni tehnologii na osnovi vikoristannya visokoproduktivnih bagatoprotsesnornih obchislyvalnih kompleksiv [New metallurgical technologies on the basis of high-performance high-performance processing complexes]. *Teoriya i praktika metallurgii*. 2013. № 3–4. S. 78–87.
8. Dolzhenkov I.E. Vliyanie plasticheskoy deformatsii i drugih predobrabotok na sferoidizatsiyu karbidov v stalyah [Influence of plastic deformation and other pretreatments on spheroidization of carbides in steels]. *Teoriya i praktika metallurgii*. 2007. № 1. S. 66–68.
9. Sobolenko M.A. O probleme matematicheskogo modelirovaniya parametrov skorostnoy sferoidiziruyushey obrabotki uglerodistykh i nizkolegirovannykh staley. [On the problem of mathematical modeling of the parameters of high-speed spheroidizing treatment of carbon and low-alloy steels]. *Suchasni problemi metalurgii*. 2007. № 10. S. 123–137.
10. Gul Yu.P., Sobolenko M.A. Intensifikatsiya protsessa sferoidiziruyushego otzhiga stali v potochnikh linyakh [Intensification of the process of spheroidizing annealing of steel in production lines]. [Intensification of the process of spheroidizing annealing of steel in production lines]. *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie*. 2011. № 58. S. 197–202.
11. Patent №143971 Ukrainy MPK C21D 1/26 (2006.01) Ustanovka dlya intensifikatsiyi sferoyidizuyushchego vidpalyuvannya stali. [Installation for intensification of spherical deposition steel]. / Ivaschenko V. P., Shvachych G. G., Sobolenko M.O., Gul Yu.P., Sobolenko O.V., Kokashinska G.V., Moroz D. M. №u202000940; zayavl. 14.02.2020; opubl. 25.08.2020, Byul. № 16.
12. Shvachych G., Moroz B., Martynenko A., Hulina I., Busygin V., Moroz D. Model of Speed Spheroidization of Metals and Alloys Based on Multiprocessor Computing Complexes [Model of Speed Spheroidization of Metals and Alloys Based on Multiprocessor Computing Complexes]. *Machine Learning for Predictive Analysis. Networks and Systems*. Springer. 2020. P. 33–41.
13. Shvachych G., Pobochii I., Khokhlova T., Kholod A., Moroz D. Multiprocessor Computing based Parallel Structures of Mathematical Models of Tridiagonal Systems [Multiprocessor Computing based Parallel Structures of Mathematical Models of Tridiagonal Systems]. *5th International Conference on Inventive Computation Technologies*. 2020. P. 1031–1035.
14. Moroz D. Numerical-analytical method for distributed modelling of applied tasks [Numerical-analytical method for distributed modeling of applied tasks]. *Science and education : Proceedings of VII International Scientific and Practical Conference*. Kyoto, Japan. 2021. P. 128–136.
15. Moroz D. M. Modelirovanie maksimalno parallelnykh struktur algoritmov resheniya teplovykh zadach [Modeling maximally parallel structures of algorithms for solving thermal problems]. *Suchasni problemi metalurgii. Dnipro*. 2021. № 24. S. 98–109.

ЗМІСТ

Віталій БРИДІНСЬКИЙ

ПОБУДОВА СИСТЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОВЦІВ НА ОСНОВІ БІБЛІОТЕКИ
АУДІООБРОБКИ PYANNOTE.....3

Юрій БУЦЕНКО, Володимир ЛАБЖИНСЬКИЙ

МАШИННИЙ АНАЛІЗ НЕКОНТРОЛЬОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОМИСЛОВИХ СИСТЕМ В
РЕЖИМИ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ.....12

Олександр ГУСЄВ, Владислав Сіданченко

ФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ РЕАЛЬНИХ ДАНИХ ПРО ХІМІЧНИЙ СКЛАД ЧАВУНУ
НА ВИПУСКУ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ.....24

Тімур ЖЕЛДАК, Ілля ЗІБОРОВ

САМОНАВЧАННЯ ПІДСИСТЕМИ ОПЕРАТОРА КОНВЕРТЕРА В ПРОЦЕСІ РАФІНАЦІЇ
СТАЛІ В СКЛАДІ СППР КЕРУВАННЯ МЕТАЛУРГІЙНИМ ВИРОБНИЦТВОМ.....32

Іван ЛАКТИОНОВ, Олександр ЖАБКО

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИМОГ ДО СТРУКТУРНО-АЛГОРИТМІЧНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ
ІОТ-ТЕХНОЛОГІЇ МОНИТОРИНГУ КОНЦЕНТРАЦІЙ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ.....41

Leonid MESHCHERIAKOV, Anton KOZHEVNYKOV, Svitlana KOSTRYTSKA, Anna STESHENKO

ANALYTICAL MODELING EVALUATION AND MANAGEMENT OF OPERATIONAL STATE
OF POWERFUL DRUM MILLS AS INTELLIGENT AGENTS.....52

Борис МОРОЗ, Леонід КАБАК, Катерина РОДНА, Євгеній РУКСОВ

ПОРІВНЯННЯ РІЗНИХ КОНФІГУРАЦІЙ МОДЕЛІ GAN НА БАЗІ СЕРВІСУ ХМАРНИХ
ОБЧИСЛЕНЬ AWS.....61

Kostiantyn KHABARLAK

POST-TRAIN ADAPTIVE U-NET FOR IMAGE SEGMENTATION.....73

**Оксана ЧЕРНЕНКО, Олена ОЛЬХОВСЬКА, Дмитро ОЛЬХОВСЬКИЙ, Юрій ОЛЕКСІЙЧУК,
Тетяна ПАРФЬОНОВА, Оксана ОРІХІВСЬКА**

АЛГОРИТМ МЕТОДУ ГІЛОК ТА МЕЖ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ
ЗАДАЧ З ДРОБОВО-ЛІНІЙНОЮ ЦІЛЬОВОЮ ФУНКЦІЄЮ ТА ДОДАТКОВИМИ
КОМБІНАТОРНИМИ ОБМЕЖЕННЯМИ.....79

Gennadii SHVACHYCH, Pavlo SHCHERBYNA, Dmytro MOROZ

AGGREGATION OF COMPUTING CHANNELS BASED ON THE NVIDIA CUDA
PLATFORM FOR CONTROL MODES OF COMPONENTS OF TECHNOLOGICAL
SYSTEMS.....85

INFORMATION TECHNOLOGY: COMPUTER SCIENCE, SOFTWARE ENGINEERING AND CYBER SECURITY

Випуск 2

Коректура • Ірина Миколаївна Чудеснова

Комп'ютерна верстка • Вікторія Вікторівна Москаленко

Формат 60x84/8. Гарнітура Arial.

Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 10,92. Замов. № 1222/532. Наклад 300 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1

Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.