ISSN 2788-5518

ІНФОКОМУНІКАЦІЙНІ ТА КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

№ 1 (07), 2024

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Видавничий дім
«Гельветика»
2024

ISSN 2788-5518

INFOCOMMUNICATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

№ 1 (07), 2024

SCIENTIFIC JOURNAL

Publishing House
“Helvetica”
2024

Засновник, видавець та виробник журналу: «Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна».

Свідоцтво про державну реєстрацію: Серія КВ № 24782-14722 Р від 06.04.2021 р.

Журнал включений до переліку наукових фахових видань ВАК України категорія «Б», додаток 4 до наказу МОН України № 735 від 29.06.2021 р. та додаток 2 до наказу МОН України № 320 від 07.04.2022 р.

Журнал відповідає вимогам наказу МОН України № 32 від 15.01.2018 р.

Має міжнародні коди: ISSN 2788-5518 та DOI 10.36994/2788-5518.

Журнал індексується у міжнародних базах та каталогах Google Scholar, Index Copernscus, Vernadsky National Library of Ukraine.

Мова видання: українська, англійська

Рекомендовано до друку вченою радою відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна» (протокол № 4 від 01.07.2024 р.)

URL-адреса видання: visn-icct.uu.edu.ua/

Тематика журналу:

- Теоретичні основи інфокомунікацій та комп’ютерних наук
- Інфокомунікаційні системи
- Безпроводові технології
- Технічна електродинаміка та антени
- Волоконно-оптичні системи
- Радіорелейні та супутникові системи
- Телевізійні системи
- Системи відеоконференцзв’язку та відеоспостереження
- Комп'ютерні системи та мережі
- Комп'ютерна і програмна інженерія
- Системи SCADA
- Захист інформації та кібербезпека
- Прикладна математика та моделювання
- Метрологія та інформаційно-вимірювальні системи
- Медична та екологічна електроніка
- Автоматизація управління технологічними процесами

В журналі публікуються статті для захисту дисертацій зі спеціальностей: 121 Інженерія програмного забезпечення. 122 Комп’ютерні науки. 123 Комп’ютерна інженерія. 125 Кібербезпека та захист інформації. 151 Автоматизація та комп’ютерні інтегровані технології. 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка. 172 Телекомунікації та радіотехніка

Founder, publisher and producer of the journal: "Open International University of Human Development" Ukraine".

Certificate of state registration: Series KV № 24782-14722 R from 06.04.2021.

The journal is included in the list of scientific professional publications of the Higher Attestation Commission of Ukraine – category "B", Annex 4 to the order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 735 from 29.06.2021 and Annex 2 to the order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 320 from 07.04.2022

The journal meets the requirements of the order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 32 from 15.01.2018.

It has international codes: ISSN 2788-5518 and DOI 10.36994 / 2788-5518.

The journal is indexed in international databases and directories of Google Scholar, Index Copernicus, Vernadsky National Library of Ukraine

Language of publication: Ukrainian, English

Recommended for publication by the Academic Council of the Open International University of Human Development "Ukraine" (Protocol № 4 dated 01.07.2024.)

Publication URL: visn-icct.uu.edu.ua/

Subject journal:

- Theoretical foundations of infocommunications and computer science
- Infocommunication systems
- Wireless technology
- Technical electrodynamics and antennas
- Fiber optic systems
- Radio relay and satellite systems
- Television systems
- Video conferencing and video surveillance systems
- Computer systems and networks
- Computer and software engineering
- SCADA systems
- Information security and cybersecurity
- Applied mathematics and modeling
- Metrology and information-measuring systems
- Medical and environmental electronics
- Automation of process control

The journal publishes articles for the defense of dissertations in the following specialties: 121 Software engineering. 122 Computer science. 123 Computer engineering. 125 Cybersecurity. 151 Automation and computer integrated technologies. 152 Metrology and information and measurement technology. 172 Telecommunications and radio engineering

ЗМІСТ

ІНФОКОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

CONTENTS

INFOCOMMUNICATION TECHNOLOGIES

COMPUTER TECHNOLOGIES

ІНФОКОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 629.735:004.93:004.94:621.396.96
DOI: https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-01

УРАХУВАННЯ ХАРАКТЕРНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ БУДОВИ ТА РУХУ БПЛА У ЗАДАЧАХ ЇХ КОМПЛЕКСНОГО ВИЯВЛЕННЯ І СУПРОВОДЖЕННЯ У ПОВІТРЯНОМУ ПРОСТОРІ

Соколов К. А., *аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. https://orcid.org/0009-0003-4238-097X, kyrilsokolov1997@gmail.com*

Жук С. Я., *д.т.н., проф., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. https://orcid.org/0000-0002-0046-8450, s.zhuk@kpi.ua*

Анотація. *Стаття висвітлює аспект зростання ролі БПЛА у різних сферах діяльності. Підкреслено, що дане явище зумовлено гнучкістю БПЛА як цільової платформи модульної структури. Зазначено, що така особливість і визначає мультизадачність даного класу апаратів для забезпечення безпеки, надання допомоги у різних галузях. Також зауважено про здатність систем із використанням БПЛА до масштабування. Автори звертають увагу на пов'язану із цим важливість та необхідність контролю повітряного простору. У рамках цього питання підкреслено завдання виявлення та супроводження повітряних об'єктів як первинне завдання контролю повітряного простору. Надано класифікацію БПЛА за будовою та іншими ознаками, що впливають на льотні характеристики. У спрощеному вигляді розглянуто типову структурну будову малогабаритного БПЛА. Зазначено основні типи руху та маневрів БПЛА. Підкреслено специфічні маневрові рухи, виокремлено основні типи маневрів. Наведено кількісну класифікацію повітряних об'єктів у контексті використання БПЛА. Оглядово описано особливості поведінки таких об'єктів, як рої, характер їхньої поведінки. Детально розглянуто типологію пропульсивних систем та їх значення у задачах детекції та супроводження БПЛА. Зазначено про важливість комплексування чи злиття даних для підвищення якості детекції та стійкості супроводження БПЛА в складних умовах. Наведено приклад роботи системи з внутрішньою взаємодією давачів різної фізичної природи: аудіо, відео, ІЧ-діапазонів. Запропоновано умовний поділ елементів руху БПЛА на три типи. Зазначено особливості детекції та супроводження в рамках відеодетекції повітряного об'єкта з огляду на його особливості руху. Наведено тестову модель руху малогабаритного БПЛА за наведеним поділом на елементи руху. Відзначено можливу сферу застосування моделі руху в рамках оцінки параметрів руху та фільтрації з використанням сенсорних мереж і згорткових нейронних мереж. Зазначено можливість використання особливостей руху БПЛА та сучасних методів обробки даних у задачах виявлення та супроводження рухомих повітряних об'єктів, зокрема БПЛА.*

Ключові слова: *БПЛА, малогабаритні безпілотні літальні апарати, відслідковування, виявлення, супроводження, квадрокоптер, повітряний об'єкт, літальний апарат, сенсорні мережі, нейронні мережі, злиття даних, маневр, фільтрація сигналів, параметри руху.*

USING FOR THE SPECIFIC FEATURES OF UAV STRUCTURE AND MOVEMENT IN TASKS OF THEIR COMPLEX DETECTION AND TRACKING IN AIRSPACE

Kyrylo Sokolov, *Ph.D student, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0009-0003-4238-097X, kyrilsokolov1997@gmail.com*

Serhii Zhuk*, Dc.S., Prof., National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0002-0046-8450, s.zhuk@kpi.ua*

Abstract. *The article discusses the increasing role of UAVs in various fields of activity. It emphasizes that this phenomenon is due to the flexibility of UAVs as a modular platform. It is noted that this feature determines the multitasking capabilities of this class of devices for ensuring safety and providing assistance in various sectors. The capability of systems using UAVs to scale is also mentioned. The author draws attention to the associated importance and necessity of airspace control. Within this issue,*

the task of detecting and tracking aerial objects is emphasized as the primary task of airspace control. A classification of UAVs by structure and other characteristics affecting flight performance is provided. The typical structural design of a small UAV is considered in a simplified form. The main types of UAV movement and maneuvers are noted. Specific maneuvering movements are emphasized, and the main types of maneuvers are identified. A quantitative classification of aerial objects in the context of UAV use is presented. The characteristics of the behavior of such objects as swarms and their behavior are described in an overview. The typology of propulsion systems and their role in detection and tracking is detailed. The importance of data fusion for improving detection quality and tracking stability is noted. An example of a system with internal interaction of sensors of different physical natures: audio, video, IR ranges is provided. A conditional division of UAV movement elements into three types is proposed. The features of detection and tracking within the framework of video detection of an aerial object considering its movement features are noted. A test model of small UAV movement according to the proposed division into movement elements is presented. The possible application of the movement model in assessing movement parameters and filtering using sensor networks and convolutional neural networks is highlighted. The possibility of using UAV movement features and modern data processing methods in tasks of detecting and tracking moving aerial objects, particularly UAVs, is indicated.

Key words: *UAV, small unmanned aerial vehicles, tracking, detection, tracking, quadcopter, aerial object, aircraft, sensor networks, neural networks, data fusion, maneuver, signal filtering, motion parameters.*

Вступ

У зв'язку з поширенням БПЛА різних типів у різноманітних сферах питання регулювання, контролю та спостереження за даними пристроями є вкрай актуальним та важливим. Функціональний потенціал таких пристроїв є надзвичайно високим. У зв'язку із цим використання БПЛА різними службами для виконання специфічних завдань невпинно зростає. Зумовлені попитом, зростають і темпи виробництва даних літальних апаратів [1–3]. Технологічний розвиток сприяє зменшенню ціни компонентної бази та зменшенню габаритів і вагових показників таких пристроїв. Доступність цих пристроїв зростає, а керування ними спрощуються та розширюється за рахунок багатоплатформеності та внутрішньої взаємодії різних систем керування. Так, керування можливе з різних наземних систем керування (НСК): портативних гаджетів, ПК та спеціалізованих АРМ оператора та ін. (рис. 1).

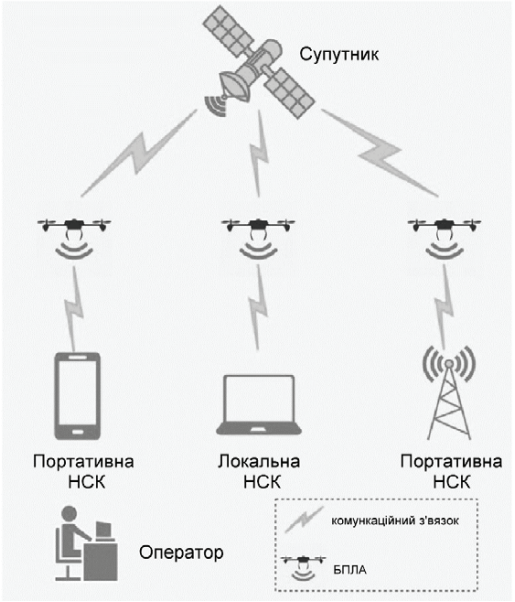


Рис. 1. Система керування БПЛА

За рахунок комплексного та модульного підходу малі БПЛА з простих пристроїв, призначених для розважальної сфери, кінематографу, спостереження, перетворилися на багатоцільові платформи та системи (рис. 2). Такі системи здатні поєднувати у собі кілька модулів для виконання специфічних та складних завдань. Також ці пристрої можуть використовуватися як розширення вже існуючих систем за їх покращення та модернізації. Таким чином, вони доповнюють існуючі підходи у вирішенні вузьких завдань кожної зі сфер, зокрема секторів безпеки [4], пошуково-рятувальних операцій [5], моніторингу об'єктів, аерофотозйомки, контролю транспортного руху. Задля забезпечення контролю, безпеки та управління існує гостра необхідність у створенні нових та модернізації вже існуючих систем спостереження за пові-

тряним простором. Окремим питанням у цьому завданні є оптимізація та покращення методів виявлення і слідкування за повітряними об'єктами з урахуванням особливостей їх будови і поведінки.

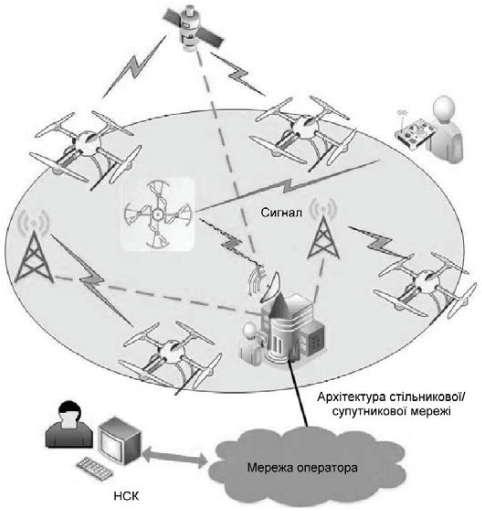


Рис. 2. Розгалужена система з використанням БПЛА

Виконання досліджень

Розглянемо основні типи безпілотних літальних апаратів. Кожен тип має свої особливості, що вирізняє їх з-поміж інших. Ці особливості зумовлені їх побудовою та специфікою використання у різних сферах для виконання різноманітних завдань. На рис. 3 зображено часткову класифікацію БПЛА [6–9], яка цікавить нас у рамках дослідження.

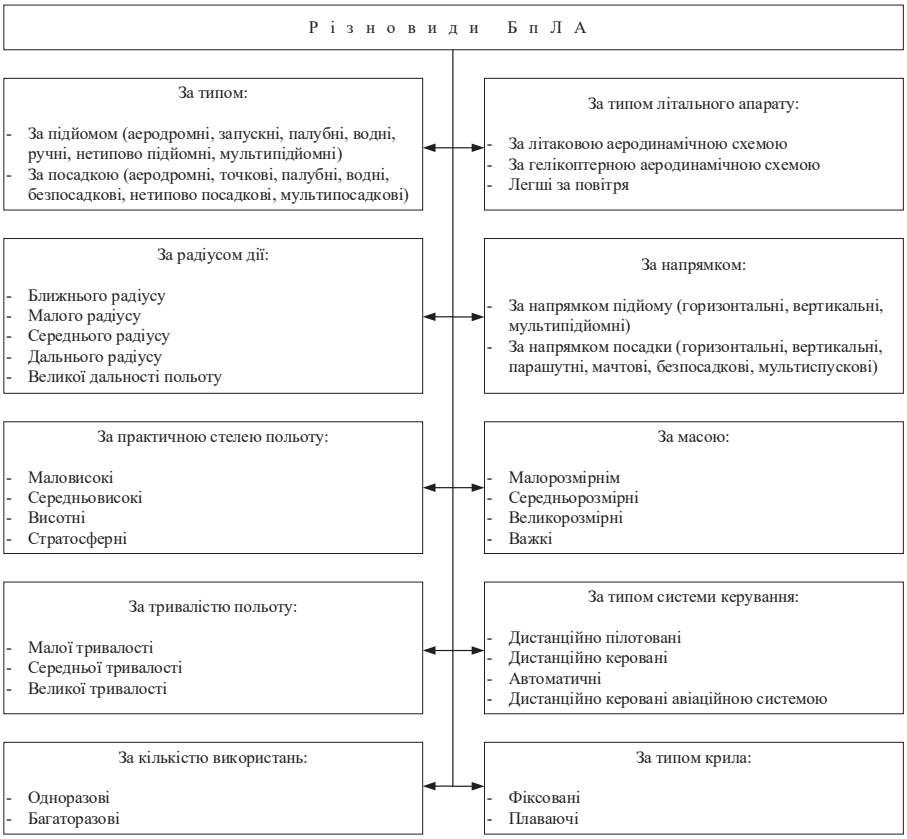


Рис. 3. Часткова класифікація БПЛА

Наведена класифікація орієнтується на врахування саме тих ознак, які впливають на динаміку руху БпЛА. Своєю чергою, перш за все, динаміка руху зумовлена внутрішньою будовою БпЛА: формою фюзеляжу (корпусу), двигуном, принципом дії підйомної сили, габаритами, корисним навантаженням тощо.

Внутрішня будова БПЛА варіюється залежно від його типу та призначення [10–12]. На рис. 4 зображено спрощену схему будови квадрокоптера.

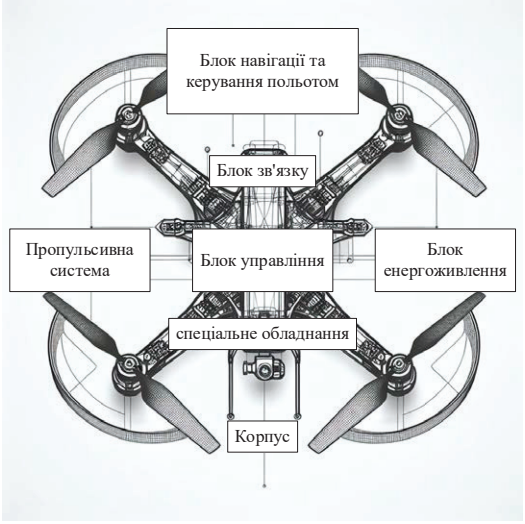


Рис. 4. Структурна схема будови квадрокоптера

Не останню роль відіграють і вимоги до виконання поставлених завдань: польоти на довгі відстані, вантажопідйомність, розміщення певного обладнання, вимоги до базування, керування тощо. Усе це зумовлює в кінцевому підсумку певні льотні характеристики, характер руху і загальну типову поведінку в конкретних сценаріях застосування. На малюнках представлено типові представники БПЛА. Умовно на рис. 5 представлено крупногабаритний БПЛА з фіксованим крилом [13], а на рис. 6 – малогабаритний БПЛА (МБПЛА) мультироторного типу [12] як найбільш розповсюджений та загальнодоступний вид.

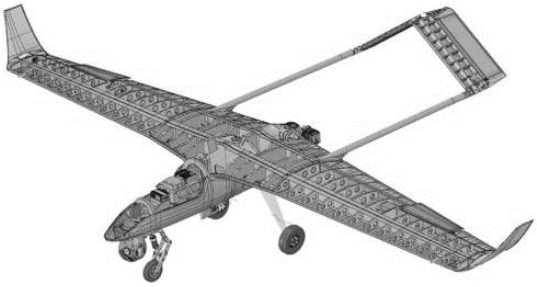


Рис. 5. БПЛА з фіксованим крилом HCUAV

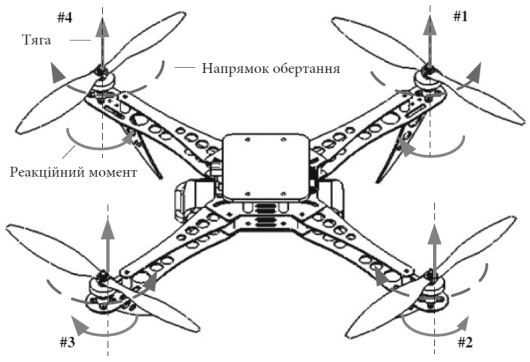


Рис. 6. Квадрокоптер у зависаючому польоті

Так, певні типи апаратів мають визначені їх геометрією певні особливості поведінки. БПЛА з фіксованим крилом здатні застосовуватися для перельотів на значні дистанції, маневреність їх порівняно з іншими типами БПЛА у цілому нижча, що зумовлено максимально допустимими навантаженнями за їх характерної геометрії та враховуючи матеріали виготовлення [13; 14]. Виходячи з аеродинаміки та особливостей побудови, можна зазначити, що HCUAV, зображений на рис. 5, призначений для тривалих польотів на значних висотах. Водночас квадрокоптер як окремий випадок мультикоптера має значно менші габарити, вантажопідйомність і, відповідно, більшу маневреність у зв'язку з конструкцією [15]. Більша маневреність дає змогу виконувати більш складні та специфічні маневрові рухи.

Розглянемо основні типи руху та маневрів БПЛА. Деякі з них здатні проводити вертикальний зліт та посадку (VTOL), особливо квадрокоптери можуть взлітати та сідати вертикально, що робить їх ідеальними для роботи в обмежених просторах або в густому лісі [16]. Більшість БПЛА можуть виконувати горизонтальний політ, що дає їм змогу подолати великі відстані та виконувати завдання, такі як відеозйомка, моніторинг або доставка вантажів. Сучасні БПЛА мають системи стабілізації, які дають їм змогу утримувати стабільне положення в повітрі, навіть за сильного вітру, що активно використовується у завданнях, які вимагають високої точності, таких як фотографування або відеозйомка. Певні типи БПЛА можуть виконувати автономні польоти, використовуючи передвстановлені точки шляху або системи штучного інтелекту для навігації [17]. БПЛА можуть виконувати різноманітні маневри, включаючи повороти, петлі, зміну висоти та швидкості. Серед основних маневрів БПЛА здатні виконувати повороти на різні кути, що дає їм змогу змінювати напрямок польоту. Можуть виконувати петлі, що дає їм змогу швидко змінити напрямок на 180 градусів. Здатні підніматися та опускатися, що дає змогу перебувати на різних висотах для виконання різноманітних завдань, а також можуть прискорюватися та уповільнюватися, що дає змогу адаптуватися до різних умов польоту [18]. Також можна виокремити спеціальні маневри, такі як обертання навколо своєї осі, зависання, що може бути корисним для певних завдань, таких як відеозйомка.

За кількісною ознакою повітряні об'єкти, що спостерігаються, можуть бути поодинокі або розподілені, як це показано на рис. 7.

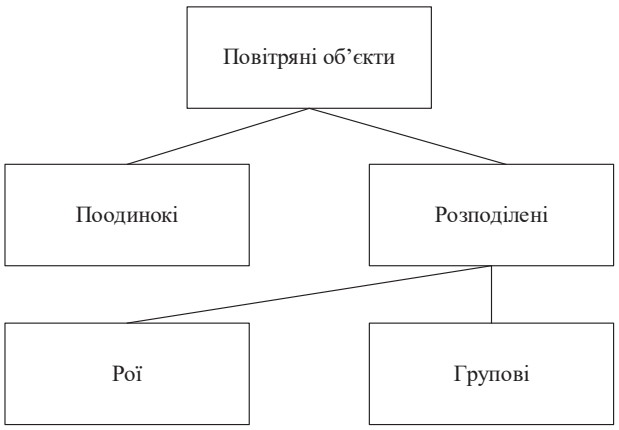


Рис. 7. Класифікація повітряних об'єктів

Поведінкові особливості руху поодиноких БПЛА були описані вище, розподілені ж об'єкти мають низку власних особливостей. Коли БПЛА діють у групах, їхні поведінкові особливості можуть ще більше ускладнюватися, тому визначну роль відіграють координація одиниць у групах, розподіл ролей відповідно до поставленого завдання. Типова конфігурація груп являє собою зв'язку «ведучий – відомий» у різних співвідношеннях залежно від кількості та структурної ієрархії. Схематично поодинокий та розподілені об'єкти (БПЛА) представлено на рис. 8.

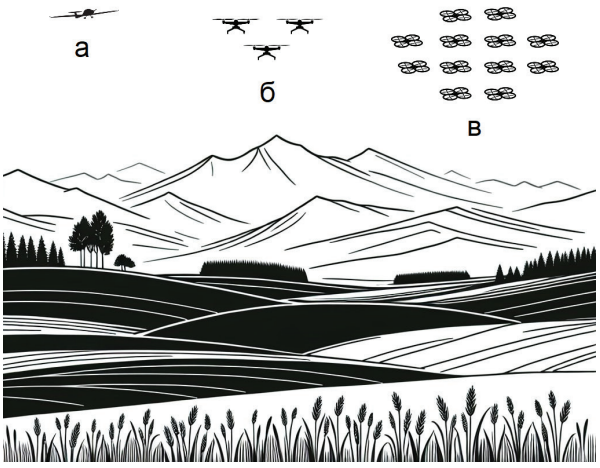


Рис. 8. Схематичне відображення повітряних об'єктів: а – поодинокий об'єкт, б – група, в – рій

Окремим підвидом розподілених об'єктів у випадку БПЛА є так звані рої. Це такі групи, де вони рухаються як єдиний організм, що ускладнює передбачення їхніх траєкторій. Такі рої можуть змінювати геометричну форму розміщення у просторі. У такому разі надважливими питаннями є синхронізація та координація окремих одиниць у складі всього рою. Умовна класифікація роїв наведена на рис. 9 [2]. Вона базується на особливостях управління та на масштабі застосування.

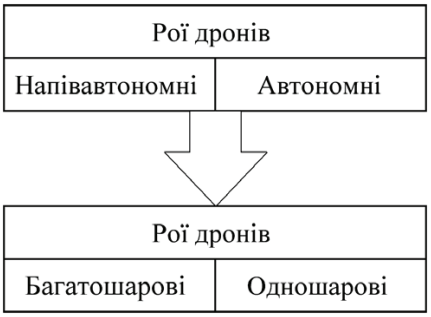


Рис. 9. Класифікація роїв

Тип двигуна впливає (рис. 10) на додаткові чинники виявлення БПЛА, оскільки залишає «сліди» різної фізичної природи [9; 19; 20]. Це можна врахувати під час створення комплексної системи їх виявлення та відслідковування. Сліди різної фізичної природу визначають додаткові канали спостереження, які будуть працювати відповідно до певного роду збурення – збудження зовнішнього середовища або випромінювання згенерованого внаслідок роботи БПЛА.

Так, реактивні двигуни створюють значний тепловий слід, що дає змогу чітко спостерігати його в ІЧ-спектрі. Пропелерний та вентиляторний двигуни створюють значну кількість характерного шуму – звукових коливань, які здатна зчитати чутлива та високоселективна аудіосистема. Електродвигуни та електроніка на борту генерують електромагнітне випромінювання, яке також може бути зафіксовано спектроаналізаторними системами. Дані методи відносяться до пасивних методів пошуку об'єктів. З активних методів можна використати класичну радіолокацію, оскільки корпус (фюзеляж) має певну ефективну площу розсіювання (ЕПР).

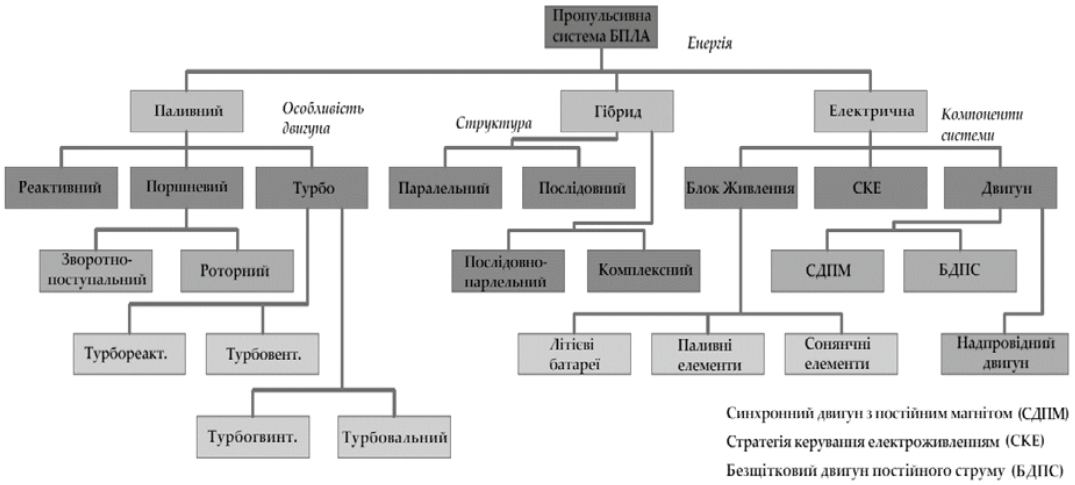


Рис. 10. Класифікація пропульсивних систем БПЛА

Фонова обстановка під час пошуку об'єкта може бути складною для певних типів каналів. У такому разі доцільним є отримання та використання даних із давачів різної фізичної природи для забезпечення безшовного та безперервного слідкування. Для покращення швидкодії системи та з метою зменшення її обчислювальних потужностей задіяння всіх датчиків різної фізичної природи можна використовувати на етапі детекції об'єктів. Слідкування ж проводити по найбільш чіткому «сліду», на другому місці, використовуючи дані, отримані з каналів, на які приходять сигнали меншої інтенсивності як резервного каналу інформації.

Комплексування каналів отримання даних дає змогу покращити точність вимірювання. Так, первинну детекцію можна зробити, наприклад, використовуючи радіолокатор, а для збільшення точності вимірювання кутових координат можна задіяти оптичну відеосистему, яка здатна покращити загальну точність, і додатково використати направлений мікрофон [21]. Додатковою перевагою є взаємодоповнення інформації з різних каналів. Тобто, наприклад, за зриву супроводження по відеоданих можна продовжувати слідкування на основі даних отриманих із радіолокатора, і навпаки. Ще одним сценарієм суміщення даних є використання дальноміра та відеосистеми, що потенційно здешевшує систему. У такому разі дані отримані з дальноміра доповнюють дані, отримані з камери, при цьому формується повна інформація щодо розташування об'єкта, що спостерігається, по координатах заданої системи координат [22]. У разі використання, наприклад, ІЧ-датчиків, які доречно застосовувати й у ночі, що на відміну від відеосистеми будуть коректно працювати за умов низької освітленості, також можна застосувати й аудіосистему отримання звукових даних. Такі і подібні до них комбінації можна застосовувати не лише з метою підвищення точності результатів, а й із метою підвищення стійкості та надійності роботи системи відслідковування [21].

Окрім комплексування, існують більш просунуті методи злиття даних (fusion data). Такі методи дають змогу більш гнучко зіставляти отримані дані з давачів різної фізичної природи [23]. У разі відстеження МБПЛА є можливість співставляти не окремі дані, а траєкторії, отримані з різних каналів. Злиття даних можливо як на основі класичних методів, заснованих на теоремі Байєса, так і з використанням елементів нечіткої логіки та нелінійних методів злиття даних [24].

Побудова моделі руху є надзвичайно важливим етапом у багатьох дослідженнях та практичних завданнях, оскільки дає змогу прогнозувати, оцінювати та співставляти реальні отримані результати з розрахованими у моделі. Це дає змогу проводити більш точні симуляції та отримувати більш точні прогнози швидкості траєкторії руху МБПЛА.

Складні маневрові рухи можна представити у вигляді суми простих (із похибкою), таких як повороти, петлі, зміна висоти та швидкості, зависання. А їх, своєю чергою, можна апроксимувати трьома станами: зависання, майже рівномірний рух, рух із маневром (прискорення). Також можна зазначити, що певні типові рухи простіше буде прораховувати та обчислювати у різних системах координат та потім приводити до однієї узагальненої.

Урахування особливостей руху важливе в рамках детекції та відслідковування повітряних об'єктів, зокрема у разі реалізації візуального відслідковування. Так, відслідковування маневруючого БПЛА за різних умов та різних маневрів оптимально буде робити різними методами у зв'язку з їхніми особливостями. Так, під час зависання дрона методи відеодетекції, основані на різниці кадрів, неефективно справляються з таким завданням, у цьому разі більш доцільно використовувати методи пошуку за шаблоном із застосунком кореляційно-екстремальних функцій (КЕФ). А у разі рівномірного руху на відносно простому тлі можна застосовувати звичайні диференційні методи покадрового відслідковування або відслідковування за рухом під час використання методів обчислення оптичного потоку. Комбінування та переключення методів варто робити залежно від багатьох чинників, зокрема зовнішніх умов, складності тла та обстановки [25].

Модель руху малогабаритного БпЛА подано у вигляді стохастичної динамічної системи з випадковою структурою [26], а саме:

$$\boldsymbol{w}(k)=\boldsymbol{L}_n\boldsymbol{w}(k-1)+\boldsymbol{H}_n{}^{з}(k),n=\overline{1,S},$$

яка враховує три основних види руху $S=3$: зависання $n=1$, майже рівномірний рух $n=2$, рух з маневром $n=3.$ Вектор стану $\boldsymbol{w}^T(k)=\left(x(k),\dot{x}(k),\ddot{x}(k),y(k),\dot{y}(k),\ddot{y}(k),z(k),\dot{z}(k),\ddot{z}(k)\right)$ містить у собі координати положення, швидкості і прискорення по осях місцевої системи координат. $\gamma(k)$ – шум збудження з одиничною кореляційною матрицею.

Матриці, що входять у модель руху (5.34), мають вигляд:

$$\boldsymbol{L}_n(k,k-1)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{L}_n^b & 0 & 0\\ 0 & \boldsymbol{L}_n^b & 0\\ 0 & 0 & \boldsymbol{L}_n^b\end{bmatrix},\boldsymbol{H}_n(k)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{H}_n^b & 0 & 0\\ 0 & \boldsymbol{H}_n^b & 0\\ 0 & 0 & \boldsymbol{H}_n^b\end{bmatrix},$$

де $\boldsymbol{L}_j^b,\boldsymbol{H}_j^b,n=\overline{1,3}$, мають вигляд:

$$\boldsymbol{L}_1^b=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix},\boldsymbol{L}_2^b=\begin{bmatrix}1 & T & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix},\boldsymbol{L}_3^b=\begin{bmatrix}1 & T & \frac{T^2}{2}\\ 0 & 1 & T\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{H}_1^b = \begin{bmatrix} c_1 \cdot T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{H}_2^b = \begin{bmatrix} \frac{c_2 \cdot T^2}{2} \\ c_2 \cdot T \\ 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{H}_3^b = \begin{bmatrix} \frac{c_3 \cdot T^3}{6} \\ \frac{c_3 \cdot T^2}{2} \\ c_3 \cdot T \end{bmatrix}$$

c_1, c_2, c_3 – СКВ випадкових флуктуацій швидкості, прискорення і швидкості зміни прискорення малогабаритного БПЛА для кожного типу руху відповідно. T – час. За певного виду маневру застосовується змінна перемикання з класу ланцюгів Маркова $c_n(k), n = \overline{1,3}$, яка описує тип структури моделі руху малогабаритного БПЛА.

Отримана траєкторія змодельована виходячи з таких початкових умов та параметрів руху. Подальші величини наведено в одиницях виміру Сі. Початкове положення: $x(-1) = 300, y(-1) = 1000, z(-1) = 100$, стартова швидкість $\dot{x}(-1) = -20, \dot{y}(-1) = -20, \dot{z}(-1) = 0$ та початкове прискорення $\ddot{x}(-1) = 0, \ddot{y}(-1) = 0, \ddot{z}(-1) = 0$. Рух об'єкта на всьому часовому проміжку відбувається на фіксованій висоті 100 м.

Отримана траєкторія описує такий характер руху: рівномірний рух – маневр – рівномірний рух – маневр «скидання швидкості» зависання маневр – рівномірний рух (рис. 11–13).

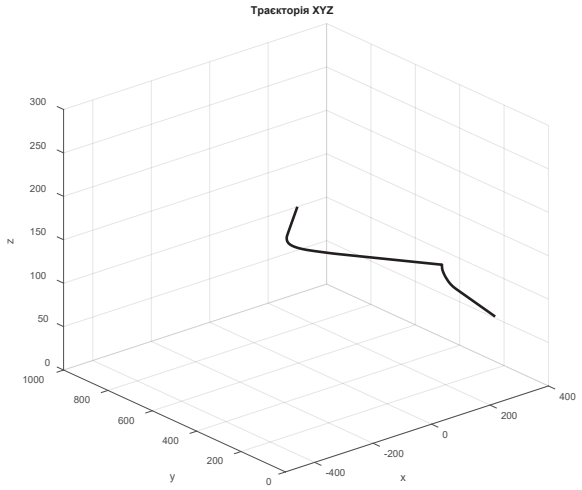


Рис. 11. Змодельована траєкторія руху малогабаритного БПЛА

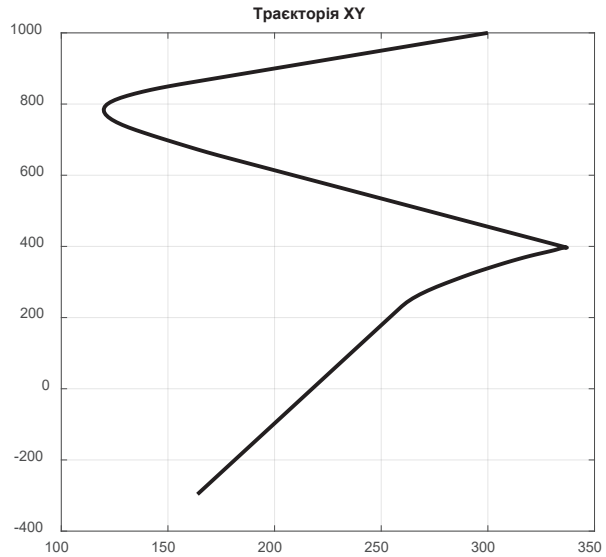


Рис. 12. Траєкторія руху малогабаритного БПЛА у площині фіксованого зрізу з вистою 100 м

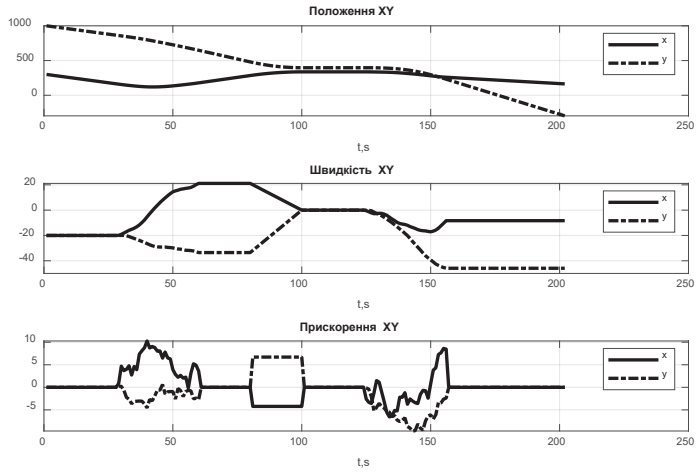


Рис. 13. Графіки положення, швидкості та прискорення в площині XY

Питання методів оцінки параметрів руху та фільтрації є невід'ємним складником завдання супроводження рухомого об'єкта в різних умовах [27–29]. Дані методи використовуються у різних сферах та у зв'язці з іншими системами, наприклад на базі сенсорних мереж, приклад подано на рис. 14 [26]. При цьому використовують фільтр Калмана, його модифіковані варіанти, метод найменших квадратів (МНК), а також сучасний підхід з обробкою даних нейронними мережами [30].

Сенсорні мережі також використовують для оцінки параметрів руху, відслідковування. У простому випадку такі системи мають пункт збору та обробки даних, а також розгалужену мережу давачів. Нерідко для обробки інформації використовують нейронні мережі, зокрема згорткові нейронні мережі (CNN) [21].

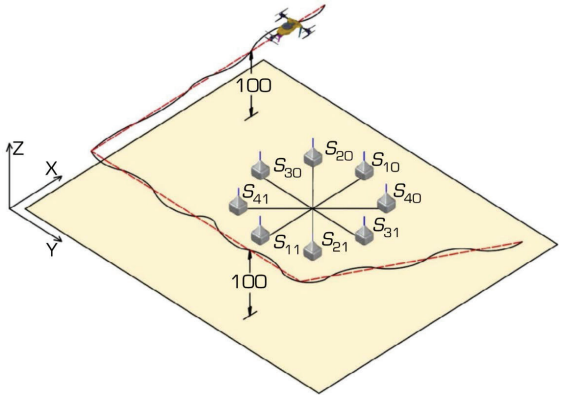


Рис. 14. Сенсорна мережа для оцінки параметрів руху МБПЛА

Висновки

Кожне сімейство та тип БПЛА мають свої унікальні характерні особливості просторового руху. Ці особливості руху зумовлені будовою БПЛА, його масою та габаритами, типом пропульсивної системи та іншими складниками. Будова БПЛА впливає не лише на його динаміку рух та маневреність, а й на те, наскільки він буде помітний для різних типів давачів (аудіо, відео, ІЧ).

Орієнтуючись на поведінкові особливості груп, поодиноких об'єктів, можна більш точно налаштовувати систему виявлення та відслідковування, ураховуючи маневреність БПЛА і навколишню обстановку. Особливості руху БПЛА накладають певні вимоги на системи детекції та відслідковування цих об'єктів. Це певні швидкості руху, відстані їх можливого виявлення, «сліди», котрі вони залишають, із яких і формуються технічні вимоги до комплексу виявлення та супроводження таких повітряних об'єктів. Такий комплекс являє собою поєднання апаратного та програмного забезпечення, на базі якого можливе застосування сучасних підходів, нейронних мереж, машинного навчання для забезпечення виконання поставлених завдань. При цьому залишається можливість доповнювати та модернізувати комплекс, додаючи алгоритми розпізнавання, групування та ідентифікації повітряних повітряних об'єктів.

Використання комбінованих методів виявлення та супроводження повітряних об'єктів дає змогу гнучко підлаштуватися під кожну ситуацію, що дає можливість більш ефективно знаходити та відстежувати різноманітні БПЛА та зменшити ймовірність зриву вікна супроводження за об'єктом. Покращити роботу алгоритмів можна, суміщаючи дані від давачів різної фізичної природи, наприклад відеодавача та радіолокаційної станції, що дасть змогу взаємно коригувати роботу комплексу та збільшити відмовостійкість системи. Складні рухи та маневри можна апроксимувати більш простими та узагальнити підхід для спрощення розрахунків. Змодельована траєкторія руху повітряного об'єкта може бути перерахована відносно інших додатково введених систем координат. А сам алгоритм побудови такої траєкторії може бути модифікованим та використаним для симуляції задля оцінки ефективності алгоритмів виявлення та відслідковування МБПЛА.

Література

1. Protect your sky: a survey of counter unmanned aerial vehicle systems / H. Kang et al. IEEE access. 2020. Vol. 8. P. 168671–168710. URL: https://doi.org/10.1109/access.2020.3023473 (дата звернення: 23.05.2024).
2. Towards the unmanned aerial vehicles (uavs): a comprehensive review / S. A. H. Mohsan et al. Drones. 2022. Vol. 6, no. 6. P. 147. URL: https://doi.org/10.3390/drones6060147 (дата звернення: 23.05.2024).
3. Unmanned aerial vehicles: a review / A. A. Laghari et al. Cognitive robotics. 2022. URL: https://doi.org/10.1016/j.cogr.2022.12.004 (дата звернення: 23.05.2024).
4. Song Y., Zhang X., Zhao X. Research on the application of UAVs in the security of major events. BCP Social Sciences & Humanities. 2022. Vol. 19. P. 247–253. URL: https://doi.org/10.54691/bcpssh.v19i.1611 (дата звернення: 23.05.2024).
5. Способи застосування бпла під час авіаційного пошуку і рятування / Г. Лещенко та ін. Science-based technologies. 2021. Т. 51, № 3. С. 271–280. URL: https://doi.org/10.18372/2310-5461.51.15998 (дата звернення: 23.05.2024).
6. Гуцул Т., Жежера І., Ткач В. Особливості класифікації та методів вибору БПЛА. *Технічні науки та технології.* 2023. № 4(30). С. 201–212. URL: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-201-212 (дата звернення: 23.05.2024).
7. Попіль Д., Бровко П., Книш Б. Класифікація відомих видів безпілотних літальних апаратів. *Modern engineering and innovative technologies.* 2017. Т. 1. № 02–01. С. 34–39. URL: https://doi.org/10.30890/2567-5273.2017-02-01-004.
8. Security analysis of drones systems: attacks, limitations, and recommendations / J.-P. Yaacoub et al. Internet of things. 2020. Vol. 11. P. 100218. URL: https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100218 (дата звернення: 23.05.2024).
9. Çoban S., Oktay T. Unmanned aerial vehicles (uavs) according to engine type. Journal of aviation. 2018. URL: https://doi.org/10.30518/jav.461116 (дата звернення: 23.05.2024).
10. Bresciani T. Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter : Master thesis. Lund, 2008. 170 p. URL: https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/8847641 (дата звернення: 23.05.2024).
11. Fethalla N. Modelling, Identification, and Control of a Quadrotor Helicopter. MONTREAL, 2019. 193 p. URL: https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2354 (дата звернення: 23.05.2024).
12. Quan Q. Introduction to multicopter design and control. Singapore : Springer Singapore, 2017. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-10-3382-7 (дата звернення: 23.05.2024).
13. Aerodynamic and structural design for the development of a MALE UAV / P. Panagiotou et al. Aircraft engineering and aerospace technology. 2018. Vol. 90, no. 7. P. 1077–1087. URL: https://doi.org/10.1108/aeat-01-2017-0031 (дата звернення: 23.05.2024).
14. Grodzki W., Łukaszewicz A. Design and manufacture of umanned aerial vehicles (UAV) wing structure using composite materials. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2015. Vol. 46, no. 3. P. 269–278. URL: https://doi.org/10.1002/mawe.201500351 (дата звернення: 23.05.2024).
15. Rodic A., Mester G. Modeling and simulation of quad-rotor dynamics and spatial navigation. 2011 IEEE 9th international symposium on intelligent systems and informatics (SISY 2011), Subotica, 8–10 September 2011. 2011. URL: https://doi.org/10.1109/sisy.2011.6034325 (дата звернення: 23.05.2024).
16. Technical Analysis of VTOL UAV / S. Yu et al. Journal of computer and communications. 2016. Vol. 04, no. 15. P. 92–97. URL: https://doi.org/10.4236/jcc.2016.415008 (дата звернення: 23.05.2024).
17. Frazzoli E. Maneuver-Based motion planning and coordination for single and multiple uavs. 1st UAV conference, Portsmouth, Virginia. Reston, Virigina, 2002. URL: https://doi.org/10.2514/6.2002-3472 (дата звернення: 23.05.2024).
18. Quadrotor helicopter flight dynamics and control: theory and experiment / G. Hoffmann et al. AIAA guidance, navigation and control conference and exhibit, Hilton Head, South Carolina. Reston, Virigina, 2007. URL: https://doi.org/10.2514/6.2007-6461 (дата звернення: 23.05.2024).
19. Overview of propulsion systems for unmanned aerial vehicles / B. Zhang et al. Energies. 2022. Vol. 15, no. 2. P. 455. URL: https://doi.org/10.3390/en15020455 (дата звернення: 23.05.2024).
20. Adamski M. Analysis of propulsion systems of unmanned aerial vehicles. Journal of marine engineering & technology. 2017. Vol. 16, no. 4. P. 291–297. URL: https://doi.org/10.1080/20464177.2017.1383337 (дата звернення: 23.05.2024).
21. CNN-Based UAV detection and classification using sensor fusion / H. Lee et al. IEEE access. 2023. P. 1. URL: https://doi.org/10.1109/access.2023.3293124 (дата звернення: 23.05.2024).
22. Жук С. Я., Соколов К. А. Адаптивне оцінювання параметрів руху малорозмірного БПЛА за даними відеокамери і FMCW-далекоміру. *Вісник НТУУ «КПІ». Радіотехніка, радіоапаратобудування.* 2023. № 91. С. 46–52. URL: https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.91.46-52.
23. Wei Y., Hong T., Fang C. Research on information fusion of computer vision and radar signals in UAV target identification. Discrete dynamics in nature and society. 2022. Vol. 2022. P. 1–13. URL: https://doi.org/10.1155/2022/3898277 (дата звернення: 23.05.2024).
24. Durrant-Whyte H., Henderson T. C. Multisensor data fusion. Springer handbook of robotics. Berlin, Heidelberg, 2008. P. 585–610. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_26 (дата звернення: 23.05.2024).

25. Соколов К. Візуальне виявлення та відстеження малогабаритних рухомих об'єктів на основі функціональних особливостей зорового апарату та особливостях сприйняття людини. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Технічні науки.* 2023. № 5. С. 75–82. URL: https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/13 (дата звернення: 23.05.2024).

26. Tovakch I. O., Zhuk S. Y. Adaptive filtration of parameters of the UAV movement on data from its location calculated on the basis the time difference of arrival method. 2017 IEEE first ukraine conference on electrical and computer engineering (UKRCON), Kyiv, Ukraine, 29 May – 2 June 2017. 2017. URL: https://doi.org/10.1109/ukrcon.2017.8100466 (дата звернення: 23.05.2024).

27. Adaptive filtering of UAV movement parameters based on aoa-measurements of the sensor network in the presence of abnormal measurements / S. Y. Zhuk et al. Journal of aerospace technology and management. 2021. Vol. 13. URL: https://doi.org/10.1590/jatm.v13.1242 (дата звернення: 23.05.2024).

28. Цуканов О. Ф., Якорнов Є. А. Методи оцінки параметрів руху маневруючих безпілотних літальних апаратів в інфокомунікаційних сенсорних мережах. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології.* 2023. Т. 2. № 04. С. 74–84. URL: https://doi.org/10.36994/2788-5518-2022-02-04-08 (дата звернення: 23.05.2024).

29. Song T. L., Ahn J. Y., Park C. Suboptimal filter design with pseudomeasurements for target tracking. *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*. 1988. Vol. 24, no. 1. P. 28–39. URL: https://doi.org/10.1109/7.1033 (дата звернення: 23.05.2024).

30. Wei Y., Hong T., Kadoch M. Improved Kalman Filter Variants for UAV Tracking with Radar Motion Models. Electronics. 2020. Vol. 9, no. 5. P. 768. URL: https://doi.org/10.3390/electronics9050768 (дата звернення: 23.05.2024).

References

1. Kang, H., Joung, J., Kim, J., Kang, J., & Cho, Y. S. (2020). Protect Your Sky: A Survey of Counter Unmanned Aerial Vehicle Systems. IEEE Access, 8, 168671–168710. https://doi.org/10.1109/access.2020.3023473

2. Mohsan, S. A. H., Khan, M. A., Noor, F., Ullah, I., & Alsharif, M. H. (2022). Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review. Drones, 6(6), 147. https://doi.org/10.3390/drones6060147

3. Iaghari, A. A., Jumani, A. K., Laghari, R. A., & Nawaz, H. (2022). Unmanned Aerial Vehicles: A Review. Cognitive Robotics. https://doi.org/10.1016/j.cogr.2022.12.004

4. Song, Y., Zhang, X., & Zhao, X. (2022). Research on the application of UAVs in the security of major events. BCP Social Sciences & Humanities, 19, 247–253. https://doi.org/10.54691/bcpssh.v19i.1611

5. Leshchenko, H., Mandryk, Ya., Stratonov, V., & Davydov, S. (2021). Sposoby zastosuvannia BPLA pid chas aviatsiinoho poshuku i riatuvannia [Methods of using uavs during aviation search and rescue]. Science-based technologies, 51(3), s. 271–280. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.18372/2310-5461.51.15998

6. Hutsul, T., Zhezhera, I., & Tkach, V. (2022). Osoblyvosti klasyfikatsii ta metodiv vyboru bpla [Features of uav classification and selection methods]. Technical Sciences and Technologies, 4(30), s. 201–212. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-201-212

7. Popyl, D., Brovko, P., & Knysh, B. (2017). Klasyfikatsiia vidomykh vydiv bezpilotnykh litalnykh aparativ [The classification of the certain types of the unmanned aerial vehicles]. Modern engineering and innovative technologies, 1(02-01), s. 34–39. [in Ukrainian] https://doi.org/10.30890/2567-5273.2017-02-01-004

8. Yaacoub, J.-P., Noura, H., Salman, O., & Chehab, A. (2020). Security analysis of drones systems: Attacks, limitations, and recommendations. Internet of Things, 11, 100218. https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100218

9. ÇOBAN, S., & OKTAY, T. (2018). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) According to Engine Type. Journal of Aviation. https://doi.org/10.30518/jav.461116

10. Bresciani, T. (2008). Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter (№ 8847641) [Master thesis, Lund University Department of Automatic Control]. https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication. https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/8847641

11. Fethalla, N. (2019). Modelling, Identification, and Control of a Quadrotor Helicopter. https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2354

12. Quan, Q. (2017). Introduction to Multicopter Design and Control. Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3382-7

13. Panagiotou, P., Giannakis, E., Savaidis, G., & Yakinthos, K. (2018). Aerodynamic and structural design for the development of a MALE UAV. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 90(7), 1077–1087. https://doi.org/10.1108/aeat-01-2017-0031

14. Grodzki, W., & Łukaszewicz, A. (2015). Design and manufacture of umanned aerial vehicles (UAV) wing structure using composite materials. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 46(3), 269–278. https://doi.org/10.1002/mawe.201500351

15. Rodic, A., & Mester, G. (2011). Modeling and simulation of quad-rotor dynamics and spatial navigation. У 2011 IEEE 9th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY 2011). IEEE. https://doi.org/10.1109/sisy.2011.6034325

16. Yu, S., Heo, J., Jeong, S., & Kwon, Y. (2016). Technical Analysis of VTOL UAV. Journal of Computer and Communications, 04(15), 92–97. https://doi.org/10.4236/jcc.2016.415008

17. Frazzoli, E. (2002). Maneuver-Based Motion Planning and Coordination for Single and Multiple UAVs. У 1st UAV Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics. https://doi.org/10.2514/6.2002-3472

18. Hoffmann, G., Huang, H., Waslander, S., & Tomlin, C. (2007). Quadrotor Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment. У AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. American Institute of Aeronautics and Astronautics. https://doi.org/10.2514/6.2007-6461

19. Zhang, B., Song, Z., Zhao, F., & Liu, C. (2022). Overview of Propulsion Systems for Unmanned Aerial Vehicles. Energies, 15(2), 455. https://doi.org/10.3390/en15020455

20. Adamski, M. (2017). Analysis of propulsion systems of unmanned aerial vehicles. Journal of Marine Engineering & Technology, 16(4), 291–297. https://doi.org/10.1080/20464177.2017.1383337

21. Lee, H., Han, S., Byeon, J.-I., Han, S., Myung, R., Joung, J., & Choi, J. (2023). CNN-Based UAV detection and classification using sensor fusion. IEEE Access, 1. https://doi.org/10.1109/access.2023.3293124

22. Zhuk, S. Ya., & Sokolov, K. A. (2023). Adaptyvne otsiniuvannia parametriv rukhu malorozmirnoho BPLA za danymy videokamery i FMCW-dalekomiru [Adaptive estimation of small-size UAV motion parameters based on video camera and FMCW

rangefinder data]. Visnyk NTUU KPI Seriia – Radiotekhnika Radioaparatobuduvannia, (91), s. 46–52. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.91.46-52

23. Wei, Y., Hong, T., & Fang, C. (2022). Research on information fusion of computer vision and radar signals in UAV target identification. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2022, 1–13. https://doi.org/10.1155/2022/3898277

24. Durrant-Whyte, H., & Henderson, T. C. (2008). Multisensor data fusion. У B. Siciliano & O. Khatib (Ред.), Springer handbook of robotics (с. 585--610). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_26

25. Sokolov, K. A. (2023). Vizualne vyiavlennia ta vidstezhennia malohabarytnykh rukhomykh obiektiv na osnovi funktsionalnykh osoblyvostei zorovoho aparatu ta osoblyvostiakh spryiniattia liudyny [Visual detection and tracking of small moving objects based on the functional features of the visual apparatus and the peculiarities of human perception]. Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences, (5), s. 75–82. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/13

26. Tovakch, I. O., & Zhuk, S. Y. (2017). Adaptive filtration of parameters of the UAV movement on data from its location calculated on the basis the time difference of arrival method. У 2017 IEEE first ukraine conference on electrical and computer engineering (UKRCON). IEEE. https://doi.org/10.1109/ukrcon.2017.8100466

27. Zhuk, S. Y., Tovkach, I. O., Neuimin, O., & Vasyliev, V. (2021). Adaptive filtering of UAV movement parameters based on aoa-measurements of the sensor network in the presence of abnormal measurements. Journal of Aerospace Technology and Management, 13. https://doi.org/10.1590/jatm.v13.1242

28. Tsukanov, O. F., & Yakornov, Ye. A. (2023). Metody otsinky parametriv rukhu manevruiuchykh bezpilotnykh litalnykh aparativ v infokomunikatsiinykh sensornykh merezhakh. Infokomunikatsiini ta kompiuterni tekhnolohii [Methods for evaluating the motion parameters of maneuvering unmanned aerial vehicles in info-communication sensor networks]. Infocommunication and computer technologies, 2(04), s. 74–84. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.36994/2788-5518-2022-02-04-08

29. Song, T. L., Ahn, J. Y., & Park, C. (1988). Suboptimal filter design with pseudomeasurements for target tracking. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 24(1), 28–39. https://doi.org/10.1109/7.1033

30. Wei, Y., Hong, T., & Kadoch, M. (2020). Improved kalman filter variants for UAV tracking with radar motion models. Electronics, 9(5), 768. https://doi.org/10.3390/electronics9050768

УДК 004.04:005.4
DOI: https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-02

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ УПРАВЛІННЯ ІТ-ПРОЄКТАМИ В УМОВАХ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ ВИГОРАННЯ

***Фонар Л. С.**, к.т.н., доц., Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна. https://orcid.org/0000-0002-7478-6742, fonar_l_s@ukr.net*

***Лотіс О. С.**, аспірант, Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна. https://orcid.org/0009-0008-1395-1039, alexey.lotis@gmail.com*

***Анотація.** У роботі розглянуто проблему вигорання учасників команд ІТ-проєктів та проведено аналіз методик управління проєктами, які є найбільш оптимальними. Приділяти увагу вигоранню важливо для забезпечення ефективної роботи команди, здоров'я її учасників, збереження морального духу та мотивації, а також для попередження втрати цінних кадрів та забезпечення стабільності в управлінні проєктами в галузі ІТ. Проблема вигорання в командах ІТ-проєктів є значним чинником, що впливає на їх ефективність та результативність, особливо в умовах високих очікувань та стресового середовища. Вигорання може суттєво погіршити психологічний стан та здоров'я учасників команди, що призводить до зниження професійної ефективності та негативного впливу на результати проєкту. Особливо актуальною стає ця проблема під час воєнних дій, коли загальний стрес і напруга населення зростають, а доступ до ресурсів може бути обмеженим. Недооцінка підтримки з боку роботодавців та співробітників може загострити цю проблему, ускладнюючи співпрацю у команді.*

Проаналізовано різноманітні методології управління проєктами. Порівняльний аналіз методологій управління проєктами в ІТ-сфері виявив, що хоча кожен підхід має свої переваги, такі як підтримка комунікації, контроль над навантаженням або ефективне управління ризиками, усі вони стикаються із власними обмеженнями, що можуть спричиняти стрес командам. На основі аналізу зроблено висновок про важливість використання комбінації методологій для забезпечення гнучкості, управління ризиками та підтримки морального духу учасників проєктів. Цей підхід сприяє успішному завершенню проєктів у сучасному ІТ-середовищі та забезпечує досягнення поставлених цілей з урахуванням вимог та потреб команди, дає можливість створити гнучке, ефективне середовище, яке не лише запобігає вигоранню, а й сприяє успішному завершенню проєктів у сфері інформаційних технологій та досягнення поставлених цілей з урахуванням вимог та потреб команди.

***Ключові слова:** методологія, управління проєктами, ІТ-проєкти, команда, вигорання.*

ANALYSIS OF IT PROJECT MANAGEMENT TECHNOLOGIES UNDER THE NEGATIVE IMPACT OF BURNOUT

***Liudmyla Fonar,** PhD in Engineering, Ass. Prof., Odessa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine. https://orcid.org/0000-0002-7478-6742, fonar_l_s@ukr.net*

***Oleksii Lotis,** Postgraduate Student, Odessa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine. https://orcid.org/0009-0008-1395-1039, alexey.lotis@gmail.com*

***Abstract.** In the paper, the problem of burnout among IT project team members is examined, and an analysis of project management methodologies that are the most optimal is conducted. Solving the issue of burnout is crucial for ensuring team efficiency, the health of its members, maintaining morale and motivation, as well as preventing the loss of valuable personnel and ensuring stability in IT project management. The issue of burnout in IT project teams significantly affects their efficiency and effectiveness, especially in high-expectation and stressful environments. Burnout can severely deteriorate the psychological state and health of team members, leading to reduced professional effectiveness and negatively impacting project outcomes. This problem becomes particularly pertinent during wartime, when overall stress and tension increase, and access to resources may be limited. Underestimating support from employers and colleagues can exacerbate this problem, complicating team collaboration. Various project management methodologies have been analyzed. A comparative analysis of project management methodologies in the IT sector revealed that while each approach has its advantages, such as supporting communication, managing workload, or effective risk management, they all face their own limitations that can cause stress for teams. Based on the analysis, it is concluded that it is important to use a combination of methodologies to ensure flexibility, risk management, and the maintenance of team morale. This approach promotes the successful*

completion of projects in the modern IT environment and ensures the achievement of set goals while considering the requirements and needs of the team. It allows for the creation of a flexible, efficient environment that not only prevents burnout but also contributes to the successful completion of IT projects and the achievement of set goals while considering the requirements and needs of the team.

Key words: *methodology, project management, IT projects, team, burnout.*

Вступ

Однією зі значних проблем, які виникають у команд ІТ-проєктів та суттєво впливають на результат, є проблема «вигорання» учасників команди. Проблема вигорання може бути критичною для підприємств, які розробляють інноваційні продукти та послуги і прагнуть постійно розвиватися у сучасному світі передових технологій та конкурентного середовища. Команда ІТ-проєктів часто працює в умовах тісних термінів, кросфункціональних команд, високих очікувань до результатів.

Термін burnout (емоційне вигорання) увів ще в 1974 р. Герберт Фрейденберг [1] для характеристики психологічного стану деморалізації, розчарування та крайньої втоми. Крістіна Маслах [2] визначає вигорання як стан фізичного та психічного виснаження, що виник у відповідь на емоційну перенапругу, синдром, який включає у себе емоційне виснаження, деперсоналізацію та зниження особистих досягнень. Світова організація охорони здоров'я з 22 січня 2022 р. внесла «вигорання» в Міжнародний класифікатор хвороб [3] як «синдром, до якого, як уважається, призводить хронічний стрес на роботі, не стриманий вчасно» та виділила три ознаки «вигорання»: виснаження й занепад сил, падіння професійної ефективності і наростаюче відчуття негативу до роботи.

Під час військових дій проблема вигорання в українських ІТ-компаніях значно збільшилася, зростання загального стресу через небезпеку для життя, психічне виснаження через війну, загрозу окупації, особисті проблеми через зміну місця роботи або проживання значної частини українських робітників, і не тільки ІТ-сфери, проблеми з доступом до інформаційних технологій через відсутність світла, загальні хвилювання та напруга у родинах і суспільстві, постійний стрес та тривога за близьких та інші чинники. Нестача психологічної підтримки через дистанційну роботу частини команди також може стати значним чинником збільшення ризику вигорання. Необхідність працювати віддалено може призводити до ізоляції та відчуження від решти команди, негативно впливає на командний дух і співпрацю. Відсутність особистого спілкування ускладнює обмін ідеями, вирішення проблем та прийняття спільних рішень. Члени команди можуть відчувати себе менш залученими до загального процесу, що знижує мотивацію та ефективність роботи. Це особливо критично для ІТ-проєктів, де тісна співпраця та швидка реакція на зміни є ключовими чинниками успіху.

Виконання досліджень

Методології управління проєктами для ІТ-проєктів повинні враховувати необхідність приділяти увагу процесам вигорання, щоб забезпечити ефективність та конкурентоспроможність проєктів, а також мінімізувати ризики. Вигорання може серйозно вплинути на продуктивність та моральний дух команди, тому важливо використовувати та розробляти методології, які забезпечують підтримку та мотивацію учасників проєкту.

Управління проєктами може використовувати різні методології, такі як Agile, так і Waterfall, а також їх поєднання [4–6]. Кожна із цих методологій має свої переваги та особливості, що можуть бути корисними залежно від конкретних умов та потреб проєкту. Також для зменшення ризику вигорання членів команди потрібно приділяти увагу комунікаціям у команді та вирішенню конфліктних ситуацій [7; 8]. Огляд методологій управління ІТ-проєктами та порівняння їхніх особливостей за врахування вигорання членів команди проєкту може визначити такі переваги та недоліки (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняльна таблиця різновидів методологій управління проєктами

Методологія	Принцип застосування	Переваги	Недоліки
Agile	Гнучкий підхід до управління проєктами, де робота розбита на короткі цикли (ітерації).	Підтримує постійне спілкування та зворотний зв'язок, що допомагає швидко виявляти проблеми та підтримувати командний дух.	Часті зміни пріоритетів можуть створювати додатковий стрес для команди.
Scrum	Включає в себе спринти (короткі цикли розроблення), щоденні зустрічі (стендапи) та огляди спринтів.	Регулярні зустрічі сприяють комунікації та своєчасному виявленню проблем, запобігаючи вигоранню.	Інтенсивність роботи в спринтах може призводити до вигорання, якщо не враховувати навантаження.

Продовження таблиці 1

Lean	Орієнтований на усунення втрат, максимізацію цінності для клієнта та оптимізацію процесів.	Фокус на ефективність може зменшити стрес через оптимізацію процесів та усунення непотрібних завдань.	Може створювати додатковий тиск на команду для постійного підвищення продуктивності.
Waterfall	Послідовний підхід, де кожен етап проєкту виконується послідовно від початку до кінця.	Чітка структура та визначеність можуть зменшувати стрес, оскільки команда знає, що робити на кожному етапі.	Відсутність гнучкості може збільшити стрес у разі виникнення змін або проблем на пізніх етапах.
Сашимі	Підхід, де всі етапи розроблення виконуються паралельно з початку до кінця (подібно до sashimi).	Паралельні процеси можуть сприяти більшій гнучкості та швидшому виявленню проблем, що зменшує стрес.	Висока координація між етапами може створювати додатковий тиск на команду.
Waterfall з субпроєктів	Модифікація Waterfall, де великий проєкт розбивається на менші, керовані субпроєкти.	Дає змогу краще контролювати навантаження та зосереджуватися на менших, досяжних цілях, що зменшує ризик вигорання.	Усе ще має недоліки традиційного Waterfall за відсутності гнучкості та можливості швидко реагувати на зміни.
Spiral Model	Поєднує у собі ітеративний підхід із систематичним, послідовним підходом до управління ризиками.	Регулярні цикли дають змогу команді отримувати зворотний зв'язок і вчасно вносити зміни, що може знизити стрес і уникнути перевантаження.	Складність управління і високі вимоги до планування можуть, навпаки, стати джерелом додаткового стресу, якщо не забезпечити достатню підтримку і ресурси.
Kanban	Фокусується на візуалізації роботи, обмеженні незавершених завдань і максимізації ефективності.	Візуалізація сприяє кращій комунікації та співпраці.	Може ускладнити впровадження для команд, які звикли до більш формальних методів.

Agile-підхід забезпечує постійне спілкування та зворотний зв'язок, це сприяє швидкому виявленню та вирішенню проблем, допомагає знизити стрес, адаптувати робочі процеси до змін, підтримувати мотивацію та залученість команди. Scrum забезпечує чітку структуру роботи в коротких ітераціях, що дає змогу команді зосереджуватися на досяжних цілях і отримувати регулярний зворотний зв'язок, сприяє відкритому обговоренню проблем і потреб команди, що допомагає запобігати накопиченню стресу, підтримує командний дух. Lean методологія може знизити стрес команди завдяки ефективному використанню ресурсів, допомагає підтримувати здоровий баланс між роботою та особистим життям членів команди, знижуючи ризик вигорання. Підхід Waterfall із субпроєктів розбиває великий проєкт на менші, керовані субпроєкти, що дає змогу краще контролювати навантаження, команда може бачити прогрес і досягати проміжних результатів, це підтримує мотивацію та задоволеність роботою.

Своєю чергою, традиційний Waterfall через відсутність гнучкості може збільшити стрес у разі виникнення змін або проблем на різних етапах проєкту. Чітка послідовність етапів і відсутність можливості швидко адаптуватися до нових вимог може призвести до надмірного навантаження на команду, що підвищує ризик вигорання. При цьому непередбачувані зміни у законодавстві, економіці та бізнес-середовищі ускладнюють довгострокове планування проєктів. Паралельні процеси розроблення Сашимі можуть створювати високий рівень координаційного навантаження на команду. Це може призвести до підвищеного стресу через необхідність одночасно керувати кількома аспектами проєкту. Якщо не забезпечити належного рівня підтримки та координації, команда може швидко втомлюватися та вигорати.

Модель Spiral може бути корисною, але водночас може стати причиною стресу та вигорання команди через складність та велику кількість етапів у кожному «оберті» спіралі. Використання моделі Spiral для управління вигоранням команди може вимагати дбайливого планування, ефективного управління ризиками та підтримки команди під час усього процесу.

Kanban може бути ефективним інструментом для управління вигоранням команди IT-проєкту завдяки обмеженню незавершених завдань та прозорості процесу роботи. Проте відсутність жорстких дедлайнів може призвести до недостатнього тиску та відповідальності, що може вплинути на ефективність та мотивацію команди. Для успішного використання Kanban для управління вигоранням команди важливо створити баланс між гнучкістю та структурою та активно впроваджувати стратегії підтримки мотивації й ефективності.

Висновки

Вибираючи найкращу методологію для управління проєктами, яка буде враховувати ризики вигорання членів команди в IT-проєктах, важливо враховувати потреби команди, специфіку проєкту та

умови роботи. З огляду на ці чинники, методологія, яка комбінує гнучкий підхід та ефективне управління ризиками, може бути найбільш удалим вибором. Поєднання методології Agile і Kanban може бути ефективним рішенням для управління проєктами в умовах вигорання команди в IT-проєктах в Україні. Вони забезпечують гнучкий підхід до розроблення, ураховуючи потреби команди та здатність швидко адаптуватися до змін, а також ефективне управління потоком робіт, що сприяє уникненню стресу та перевантаження, що може викликати вигорання. Такий підхід допомагає забезпечити успішне виконання проєкту та підтримує продуктивність та мотивацію команди.

Література

1. Freudenberger H. Staff burn – out. Journal of Social Issues. 1974. Vol. 30. P. 159–165.
2. Burnout J. Christina Maslach, Wilmar B. Schaufeli, Michael P. Leiter Annual Review of Psychology 2001 52:1. P. 397–422.
3. International Classification of Diseases *ICD-11*. URL: https://icd.who.int/en (date of access: 23.05.2024).
4. Новохацька Д.В. Особливості та проблеми реалізації IT-проєктів в Україні. *Вісник ЧДТУ*. 2016. № 2. С. 72–77.
5. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). Seventh Edition : Project Management Institute, 2021. 250 p.
6. Schwaber K. and J. Sutherland The Scrum Guide. The definitive Guide to Scrum: The Rules of the Game. 2017.
7. Schwaber, Ken; Beedle, Mike (2001). Agile software development with Scrum // Prentice HallPTR Upper Saddle River, NJ, USA, 2001. P. 158.
8. Zanora V., Momot S., Bedrii D., Fonar L. Conflict management in enterprise development project teams. *Academic Review*. 2023. Т. 1. № 58. С. 187–204. URL: https://doi.org/10.32342/2074-5354-2023-1-58-14 (date of access: 23.05.2024).

References

1. Freudenberger H. (1974). Staff burn – out. Journal of Social Issues. 1974. Vol. 30. P. 159–165. [in English].
2. Burnout J. Christina Maslach, Wilmar B. Schaufeli, Michael P. Leiter (2001) Annual Review of Psychology 52:1. P. 397–422. [in English].
3. International Classification of Diseases *ICD-11*. URL: https://icd.who.int/en (date of access: 23.05.2024). [in English].
4. Novokhatska, D.V. (2016). Features and problems of implementation of IT-projects in Ukraine. Bulletin of ChSTU, 2. P. 72–77. [in Ukrainian].
5. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) (2021). Seventh Edition : Project Management Institute, 250 p. [in English].
6. Schwaber K. and J. Sutherland (2017) The Scrum Guide. The definitive Guide to Scrum: The Rules of the Game.
7. Schwaber, Ken, Beedle, Mike (2001). Agile software development with Scrum. *Upper Saddle River*. P. 158 [in English].
8. Zanora V., Momot S., Bedrii D., Fonar L. (2023) Conflict management in enterprise development project teams. *Academic Review*. 58(1), 187–204. [in English].

КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.3.037.37
DOI: https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-03

ПЕРЕТВОРЕННЯ ДВІЙКОВИХ ЧИСЕЛ В БІНОМІАЛЬНІ

Борисенко О. А., *д.т.н., проф., Сумський державний університет, Суми, Україна.*
Хацько А. О., *аспірант, Сумський державний університет, Суми, Україна. andrey5135vk@gmail.com*

Анотація. *У статті пропонується метод перетворення двійкових чисел у нерівномірні та рівномірні біноміальні числа за допомогою одночасного перебору: двійкові числа перебираються в бік зменшення, а біноміальні – у бік збільшення. Процес перебору триває доти, доки двійкове число не зменшиться до нуля. На цьому перебір завершується, і результатом є значення відповідного біноміального числа. Це перетворення є найпростішим з усіх відомих методів перетворення двійкових чисел у біноміальні. Воно також характеризується високою завадостійкістю та надійністю.*

Для реалізації методу перебору використовуються відомі властивості біноміальних чисел, що забезпечують завадостійкість процесу. Завдяки цим властивостям перебірні алгоритми, представлені у статті, є найбільш простими та надійними. Недоліком методу є невисока швидкодія, однак вона компенсується тим, що для багатьох практичних застосувань ця швидкодія є достатньою, що робить алгоритми ефективними у таких випадках.

Ефективність методу зростає завдяки врахуванню завадостійкості процедур отримання рівномірних біноміальних чисел, які природно є завадостійкими. Біноміальні числа володіють властивістю самокорекції, що робить їх стійкими до різних видів шумів і помилок під час перетворення. Тому запропонований у статті метод може бути використаний у випадках, коли висока точність та надійність мають пріоритет перед швидкодією.

Зазначимо, що метод одночасного перебору дає змогу забезпечити стабільну роботу навіть в умовах підвищеного рівня завад, що важливо для багатьох технічних і наукових застосувань. Завдяки своїй простоті та завадостійкості алгоритмів вони можуть бути легко введені в різноманітні системи обробки даних, де потрібне перетворення двійкових чисел у біноміальні числа. Таким чином, наданий метод становить важливий інструмент у галузі цифрової обробки інформації, де простота й завадостійкість є критично важливими параметрами.

Важливо також відзначити, що на додаток до завадостійкості наданий метод перетворення має ще одну вагому перевагу – технологічність. Тому його реалізація з використання відповідних алгоритмів є важливим фактором для підвищення надійності цифрових систем під час їх розробки. Тому цей метод перетворення конкурентоспроможний порівняно з іншими методами перетворення двійкових чисел в біноміальні.

Ключові слова: *двійкові числа, біноміальні числа, перебір, завадостійкість, біноміальні коефіцієнти.*

CONVERSION OF BINARY NUMBERS INTO BINOMIAL NUMBERS

Oleksii Borysenko, *D.Sc. (Tech.), Professor, Sumy State University, Sumy, Ukraine.*
Andrii Khatsko, *Ph.D Student, Sumy State University, Sumy, Ukraine. andrey5135vk@gmail.com*

Abstract. *The article proposes a method for converting binary numbers into non-uniform and uniform binomial numbers using simultaneous enumeration: binary numbers are enumerated in the decreasing direction, while binomial numbers are enumerated in the increasing direction. The enumeration process continues until the binary number is reduced to zero. At this point, the enumeration ends, and the result is the value of the corresponding binomial number. This conversion is the simplest of all known methods for converting binary numbers into binomial numbers. It is also characterized by high noise immunity and reliability.*

The implementation of the enumeration method uses the well-known properties of binomial numbers, which ensure the noise immunity of the process. Thanks to these properties, the enumeration algorithms presented in the article are the simplest and most reliable. The drawback of the method is its low speed;

however, this is compensated by the fact that for many practical applications, this speed is sufficient, making the algorithms effective in such cases.

The efficiency of the method increases due to the consideration of the noise immunity of the procedures for obtaining uniform binomial numbers, which are naturally noise-immune. Binomial numbers have a self-correction property, making them resistant to various types of noise and errors during conversion. Therefore, the method proposed in the article can be used in cases where high accuracy and reliability take precedence over speed.

It should be noted that the simultaneous enumeration method ensures stable operation even under increased noise conditions, which is important for many technical and scientific applications. Due to the simplicity and noise immunity of the algorithms, they can be easily integrated into various data processing systems where the conversion of binary numbers into binomial numbers is required. Thus, the provided method constitutes an important tool in the field of digital information processing, where simplicity and noise immunity are critically important parameters.

It is also important to note that in addition to noise immunity, the given conversion method has another significant advantage its technological feasibility. Therefore, its implementation using the appropriate algorithms is an important factor in improving the reliability of digital systems during their development. Hence, this conversion method is competitive compared to other methods of converting binary numbers into binomial numbers.

Key words: *binary numbers, binomial numbers, enumeration, noise immunity, binomial coefficients.*

Вступ

Більшість сучасних цифрових систем обробки й передачі інформації будуються на основі двійкових чисел, які належать до природної двійкової системи числення. Вона найбільш проста, тому що має просту структуру з нульовою складністю. Однак двійкові числа самі по собі, без додаткового завадостійкого кодування, не дають змоги знаходити помилки в своїй роботі. Тому з'явилися більш складні позиційні системи числення – структурні системи зі складністю більшою за нуль, які вирішують задачу підняття завадостійкості цифрових систем. На сьогодні найбільш відомими структурними системами числення є факторіальні, біноміальні, фібоначієві, які генерують відповідно факторіальні, біноміальні і фібоначієві числа [1]. Останні найбільш відомі й до того ж і найбільш прості серед структурних чисел, що дає змогу ефективно виконувати над ними арифметичні операції. Факторіальна й біноміальна системи числення складніші, і тому їх числа мають більш високий рівень завадостійкості. Тож вони досить ефективно можуть використовуватися в спеціалізованих цифрових пристроях із метою підняття їх завадостійкості. Наприклад, за їх допомогою можна будувати завадостійкі кодуючі й декодуючі пристрої систем передачі інформації.

Особливо важливе значення для побудови спеціалізованих пристроїв мають біноміальні системи числення, тому що вони можуть виконувати задачі на побудову складних комбінаторних об'єктів, що використовують сполуки, наприклад у вигляді рівноважних кодів, композицій тощо [1–4]. Однак у разі їх використання потрібні перетворювачі кодів із двійкових чисел у біноміальні і зворотно. Таке перетворення було запропоновано в роботах [1, 2]. Але воно досить складне для програмної і особливо апаратної реалізації, що знижує завадостійкість перетворення. Тому на практиці використовують хоча і менш швидкодіючі перетворювачі кодів, але більш прості, які базуються на переборі комбінацій [1, 2].

Постановка задачі

Є дві задачі перетворення, пов'язані з біноміальними числами, які можуть ефективно використовувати для свого рішення переборні алгоритми, досягаючи при цьому більшої простоти й надійності. З одного боку, це задача перетворення двійкових чисел у біноміальні, а з іншого – біноміальних чисел у двійкові. У цій роботі розглядається перша задача, тому що вона більш складна, чим зворотна, і в ній є більша практична потреба. Тим паче, що не завжди після перетворення двійкових чисел у біноміальні, особливо в системах автоматики, виникає зворотна задача перетворення біноміальних чисел у двійкові.

Отже, завданням цієї роботи є розробка переборного алгоритму перетворення біноміальних чисел у двійкові.

Поняття біноміальних чисел. Існує багато різновидів біноміальних чисел [1]. У цій роботі розглядаються найбільш прості двійкові біноміальні числа

Двійковими біноміальними числами називаються послідовності розрядів цифр 0 і 1, з вагами у вигляді біноміальних коефіцієнтів, які дають змогу перетворювати їх в номери природних чисел і зворотно.

Нерівномірні біноміальні числа. Існують нерівномірні й отримані на їх основі рівномірні біноміальні числа [1]. Нерівномірним біноміальним числом називається число з двійковим алфавітом довжини n, у якому кількість одиниць не перевищує значення k, а кількість нулів n – k [1]. Вони мають різну довжину і тому можуть ефективно використовуватися для зберігання й передачі інформації. У цьому випадку біноміальні числа меншої довжини кодують більш імовірні повідомлення, а довші –

менш ймовірні. Іншою їх задачею є те, що вони створюють рівномірні біноміальні числа, які можуть використовуватися для побудови завадостійких цифрових пристроїв [1].

Діапазон нерівномірних і відповідно рівномірних біноміальних чисел визначається біноміальним коефіцієнтом

$$P = C_{n+1}^{k} = C_{n+1}^{n-k} = \frac{(n+1)!}{k!(n-k+1)!} \quad . \tag{1}$$

У табл. 1 наведені величини діапазонів P нерівномірних біноміальних чисел для n = 1, 2, …, 20 і k = 2.

Таблиця 1

Діапазони біноміальних чисел P

n	***P***	***n***	***P***	***n***	***P***	***n***	***P***
1	1	6	21	11	66	16	136
2	3	7	28	12	78	17	153
3	6	8	36	13	91	18	171
4	10	9	45	14	105	19	190
5	15	10	55	15	120	20	210

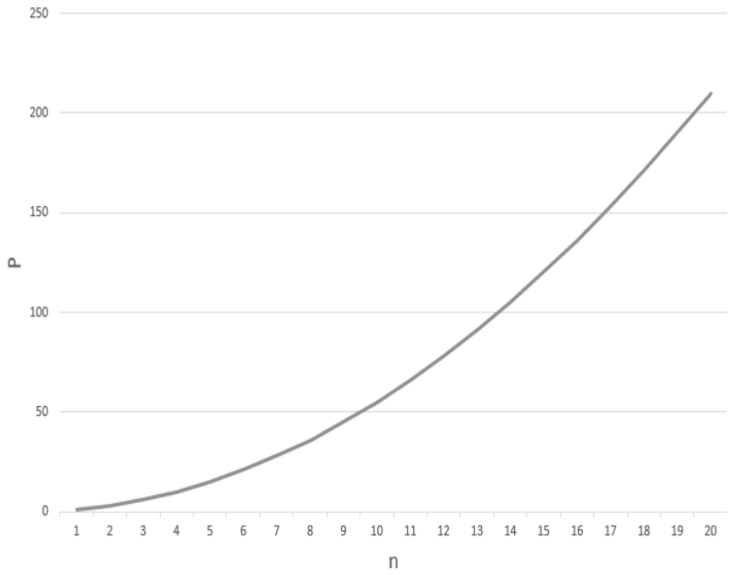


Рис. 1. Графік величин діапазонів біноміальних чисел P

Алгоритм побудови нерівномірних біноміальних чисел у зростаючому порядку з будь-якого біноміального числа має такі кроки:

1. В останній розряд справа нерівномірного біноміального числа, у якому стоїть 0, записується 1 і підраховується кількість одиниць у ньому.

2. Якщо кількість одиниць у біноміальному числі менша за k, то справа від отриманої одиниці записується нуль і далі відбувається повернення до кроку 1.

3. Якщо кількість одиниць у біноміальному числі дорівнює k, а нулів перед ними немає, то кінець.

4. Якщо кількість одиниць у біноміальному числі дорівнюватиме k і перед останніми з них буде стояти хоча б один нуль, то цей 0 повинен бути замінений на 1, а у молодші відносно нього справа розряди записуються нулі доти, доки їх кількість у числі не стане дорівнювати $n - k$.

5. Повернення до кроку 1.

У табл. 2 для n = 4 наведені 10 можливих нерівномірних біноміальних чисел зліва з кількістю одиниць k = 3, а справа з k = 2.

Рівномірні біноміальні числа. Крім нерівномірних біноміальних чисел, для побудови біноміальних цифрових пристроїв використовуються рівномірні біноміальні числа. Вони, на відміну від нерівномірних чисел, мають постійну довжину (див. табл. 3), яка містить n розрядів. Їх особливістю є те, що кількість нулів в них перед останньою одиницею справа не може бути більшою за $n - k$, що при-

зводить до їх завадостійкості [1]. Тобто побудовані на основі рівномірних біноміальних чисел цифрові пристрої чи програми будуть завадостійкі.

Таблиця 2

Нерівномірні біноміальні числа з n = 4 і k = 3,2

№	Бін. числа	№	Бін. числа	№	Бін. числа	№	Бін. числа
0	00	5	1010	0	000	5	011
1	010	6	1011	1	0010	6	1000
2	0110	7	1100	2	0011	7	1001
3	0111	8	1101	3	0100	8	101
4	100	9	111	4	0101	9	11

Для побудови рівномірних біноміальних чисел нерівномірні біноміальні числа доповнюються справа нулями до довжини n відповідно до наступного алгоритму:

Формується нерівномірне біноміальне число

1. Знаходиться кількість розрядів у числі. Якщо воно дорівнює

n – 1, то рівномірне біноміальне число отримане.

2. Якщо кількість розрядів у нерівномірному біноміальному числі менше за n – 1, то в молодші розряди, які доповнюють біноміальне число до n – 1 розрядів, дописуються нулі.

У табл. 3 надані рівномірні біноміальні числа з n = 4 і k = 3, 2, які отримані відповідно до наданого вище алгоритму.

Таблиця 3

Рівномірні біноміальні числа з n = 4 і k = 3, 2

№	Бін. числа, k = 3	№	Бін. числа, k = 3	№	Бін. числа, k = 2	№	Бін. числа, k = 2
0	0000	5	1010	0	0000	5	0110
1	0100	6	1011	1	0010	6	1000
2	0110	7	1100	2	0011	7	1001
3	0111	8	1101	3	0100	8	1010
4	1000	9	1110	4	0101	9	1100

Завадостійкість рівномірних біноміальних чисел створює їх надлишковість, яка може бути абсолютною і відносною. Остання характеризує долю (імовірність) знаходження помилок у числах. Абсолютна надлишковість рівномірних біноміальних чисел:

$$N = 2^n - P = 2^n - C_{n+1}^k, \tag{2}$$

а відносна, яка характеризує долю (імовірність) знаходження в них помилок,

$$D = \frac{N}{2^n} = \frac{2^n - C_{n+1}^k}{2^n} = 1 - \frac{C_{n+1}^k}{2^n}. \tag{3}$$

У табл. 4 і 5 наведені абсолютна N і відносна D надлишковість рівномірних біноміальних чисел в бітах з n = 1, 2, …, 20 і k = 2. Відповідно на рисунках 2 і 3 наведені розподіли значень N та D залежно від значення n.

Таблиця 4

Абсолютна N надлишковість рівномірних біноміальних чисел з n = 1, 2, …, 20 і k = 2

n	***N***	***n***	***N***	***n***	***N***	***n***	***N***
1	-	6	43	11	1982	16	65400
2	-	7	100	12	4018	17	130919
3	2	8	220	13	8101	18	261973
4	6	9	467	14	16279	19	524098
5	17	10	969	15	32648	20	1048366

Методи перетворення двійкових чисел у біноміальні. На практиці для використання біноміальних чисел потрібні перетворювачі двійкових чисел у біноміальні, тому що цифрові системи працюють здебільшого з двійковими числами. Загальний вигляд процесу перетворення двійкового числа в біноміальне число показано на рис. 4.

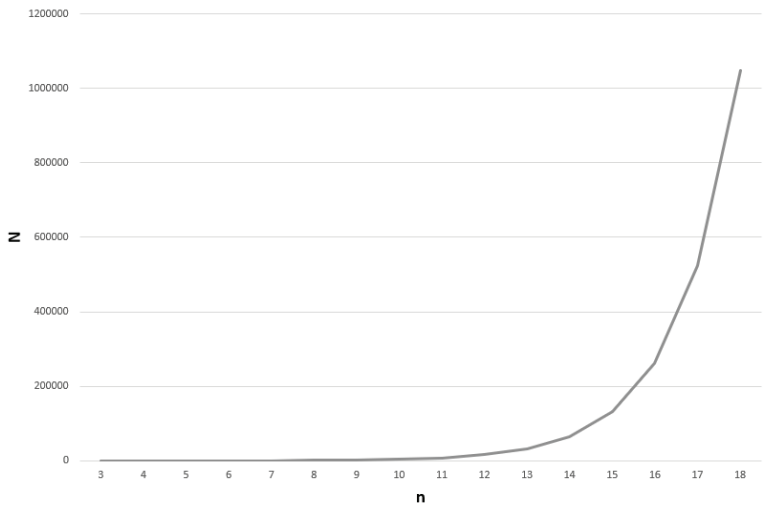


Рис. 2. Графік абсолютної *N* надлишковості рівномірних біноміальних чисел з *n* = 1, 2, …, 20 і *k* = 2

Таблиця 5

Відносна *D* надлишковість рівномірних біноміальних чисел з *n* = 1, 2, …, 20 і *k* = 2

n	***D***	***n***	***D***	***n***	***D***	***n***	***D***
1	–	6	0,671875	11	0,967773438	16	0,997924805
2	–	7	0,78125	12	0,980957031	17	0,998832703
3	0,25	8	0,859375	13	0,988891602	18	0,999347687
4	0,375	9	0,912109375	14	0,993591309	19	0,999637604
5	0,53125	10	0,946289063	15	0,996337891	20	0,999799728

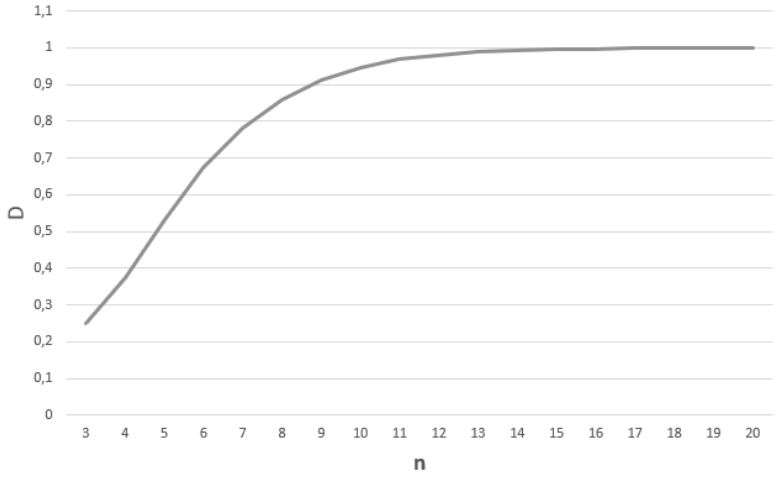


Рис. 3. Графік відносної *D* надлишковості рівномірних біноміальних чисел з *n* = 1, 2, …, 20 і *k* = 2

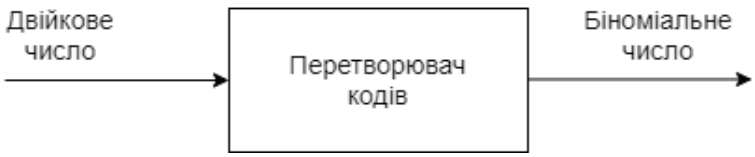


Рис. 4. Перетворення двійкових чисел у біноміальні

У ньому двійкове число подається на перетворювач кодів, який залежно від вибраного алгоритму з тою чи іншою швидкодією перетворює його в біноміальне число [2]. Найбільш швидкодіючий буде табличний метод перетворення, за якого в пам'яті перетворювача знаходиться готовий результат, а вхідне двійкове число виступає як його адреса, отже, за цією адресою знаходиться біноміальне число. [2]. Недолік цього алгоритму – це необхідність великої ємності пам'яті й обмеженість кількості біноміальних чисел, які можуть в ній зберігатися.

Менш швидкодіючим алгоритмом, який у багатьох випадках має достатню швидкодію і не потребує великої ємності пам'яті, буде алгоритм наданий в [2]. Його особливість – це використання числової функції для біноміальних чисел [2]. Однак він досить складний для практичної реалізації, особливо в схемному вигляді.

Найменш швидкодіючим, але найбільш простим і надійним буде переборний алгоритм, який використовує програмно чи апаратно реалізований двійковий лічильник, що віднімає одиниці, відповідний йому біноміальний лічильник, який підсумовує одиниці, і схему порівняння числа, яке знаходиться в двійковому лічильнику, з нулем.

Вона працює таким чином. Програмно чи апаратно реалізований двійковий лічильник послідовно зменшує двійкові числа, і синхронно з ним, починаючи з 0, збільшує біноміальні числа підсумовуючий біноміальний лічильник. Він зупиняється тоді, коли двійковий лічильник переходить у нульовий стан і схема порівняння видає відповідний сигнал. У цей момент часу стан біноміального лічильника покаже результат перетворення двійкового числа.

Швидкість перетворення двійкового числа в біноміальне число залежить від кількості тактів 1, 2, … C_{n+1}^{k}, що призводить до потрібного результату. Середнє значення цієї кількості тактів знаходиться за формулою:

$$S = \frac{C_{n+1}^{k} + 1}{2}. \qquad (4)$$

Виходить, що сума ряду, яка складається з C_{n+1}^{k} цілих чисел 1, 2, …, C_{n+1}^{k}, знаходиться з виразу C_{n+1}^{k} (C_{n+1}^{k} + 1) / 2. Якщо поділити цей вираз на C_{n+1}^{k}, отримаємо (4). Наприклад, для *n* = 4 і *k* = 2 $S = \frac{10+1}{2} = 5{,}5$.

У табл. 6 наведені значення *S* для *n* = 1, 2, …, 20 і *k* = 2.

Таблиця 6

Середнє значення *S* для n = 1, 2, …, 20 і *k* = 2

n	***S***	***n***	***S***	***n***	***S***	***n***	***S***
1	1	6	11	11	33,5	16	68,5
2	2	7	14,5	12	39,5	17	77
3	3,5	8	18,5	13	46	18	86
4	5,5	9	23	14	53	19	95,5
5	8	10	28	15	60,5	20	105,5

Висновки

Таким чином, надані в цій статті переборні алгоритми побудови нерівномірних і рівномірних біноміальних чисел, які перетворюють двійкові числа в біноміальні, є найбільш простими й надійними. Їх недолік, мала швидкодія, компенсується тим, що для багатьох практичних випадків ця швидкодія достатня, і тоді вони будуть для них найбільш ефективними. Ефективність перетворення зростає з урахуванням завадостійкості процедур отримання рівномірних біноміальних чисел, які є завадостійкими за своєю природою.

Література

1. Борисенко О. А. Дискретна математика : підручник. Суми, 2019. 255 с.
2. Бардачов Ю., Соколова Н., Ходаков В. Дискретна математика. Київ : Вища шк., 2002. 287 с.
3. Бондаренко М., Білоус Н., Руткас А. Комп'ютерна дискретна математика. Компанія СМІТ, 2004. 480 с.
4. Капітонова Ю., Кривий С., Летичевський О. Основи дискретної математики. Наук. думка, 2002. 580 с.

References

1. Borysenko, O.A. (2019). Diskretnaya matematika [Discrete Mathematics]. Sumy [in Ukrainian].
2. Bardachov, Yu., Sokolova, N., Khodakov, V. (2002). Diskretnaya matematika [Discrete Mathematics]. Kyiv: Vyshcha Shkola [in Ukrainian].
3. Bondarenko, M., Bilous, N., Rutkas, A. (2004). Kompyuternaya obrabotka matematiki [Computer Discrete Mathematics] [in Ukrainian].
4. Kapitonova, Yu., Kryvyi, S., Letychevskyi, O. (2002). Osnovy detalnoy matematiki [Fundamentals of Discrete Mathematics] [in Ukrainian].

УДК 004.056.5
DOI: https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-04

ОГЛЯД МЕТОДІВ ЗАХИСТУ ПЕРСОНАЛЬНИХ ДАНИХ У ХМАРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

***Борисенко О. С.**, Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Київ, Україна. https://orcid.org/0009-0001-3738-5878, alekborysenko@gmail.com*

***Тимошенко А. Г.**, к.т.н., доц., Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Київ, Україна. https://orcid.org/0000-0003-0954-3186, timoshag@i.ua*

***Анотація.** З розвитком інформаційних технологій і популяризацією хмарних сервісів усе більше компаній та індивідуальних користувачів зберігають і обробляють дані у хмарі. Ця тенденція забезпечує доступність даних, гнучкість у масштабуванні ресурсів і зниження витрат на IT-інфраструктуру. Проте виникають виклики щодо захисту персональних даних у хмарному середовищі.*

У статті розглядаються сучасні ризики зберігання й обробки персональних даних у хмарі та рекомендації для їх мінімізації. Основні загрози стосуються витоку даних, що може призвести до несанкціонованого доступу та розкриття конфіденційної інформації, а також проблем із дотриманням регуляторних вимог.

Рекомендації передбачають використання надійних методів контролю доступу, шифрування даних, регулярну оцінку вразливостей і тестування на проникнення. Відмічається важливість забезпечення відповідності вимогам таких нормативних актів, як GDPR, HIPAA та CCPA, через регулярні аудити та чіткі політики управління даними.

Особлива увага приділяється безпеці API, які можуть бути вразливими до атак. Для захисту API рекомендується безпечне кодування, регулярний моніторинг і автентифікація.

Упровадження надійного контролю доступу, включно з принципом мінімальних привілеїв, мультифакторною автентифікацією, рольовою моделлю доступу та безперервним моніторингом, є ключовим елементом стратегії захисту. Шифрування даних під час передачі та зберігання, використання TLS/SSL-протоколів і серверного шифрування від хмарних провайдерів допомагає забезпечити конфіденційність і цілісність даних.

Стаття підкреслює важливість практик безпечної розробки, регулярних аудитів і моніторингу, а також відповідності регуляціям щодо захисту даних. Упровадження цих заходів дає змогу організаціям ефективно захищати персональні дані у хмарному середовищі, мінімізувати ризики й відповідати законодавчим вимогам.

***Ключові слова:** захист персональних даних, контроль доступу, шифрування, аудит безпеки.*

OVERVIEW OF PERSONAL DATA PROTECTION METHODS IN THE CLOUD ENVIRONMENT

***Oleksandr Borysenko,** Open International University of Human Development "Ukraine", Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0009-0001-3738-5878, alekborysenko@gmail.com*

***Anatolii Tymoshenko,** Ph.D., Ass. Prof., Open International University of Human Development "Ukraine", Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0003-0954-3186, timoshag@i.ua*

***Abstract.** With the advancement of information technology and the popularization of cloud services, more and more companies and individual users are storing and processing data in the cloud. This trend ensures data accessibility, flexibility in resource scaling, and reduced IT infrastructure costs. However, challenges arise regarding the protection of personal data in the cloud environment.*

This article examines the modern risks of storing and processing personal data in the cloud and provides recommendations for minimizing these risks. Major threats include data breaches, which can lead to unauthorized access and disclosure of confidential information, as well as compliance issues with regulatory requirements.

The recommendations include using reliable access control methods, data encryption, regular vulnerability assessments, and penetration testing. It is crucial to ensure compliance with regulations such as GDPR, HIPAA, and CCPA through regular audits and clear data management policies.

Special attention is given to the security of APIs, which can be vulnerable to attacks. To protect APIs, secure coding, regular monitoring, and authentication are recommended.

Implementing robust access control, including the principle of least privilege, multi-factor authentication, role-based access control, and continuous monitoring, is a key element of the protection strategy. Data

encryption during transmission and storage, using TLS/SSL protocols, and server-side encryption from cloud providers help ensure data confidentiality and integrity.

The article emphasizes the importance of secure development practices, regular audits and monitoring, and regulatory compliance for data protection. Implementing these measures allows organizations to effectively protect personal data in the cloud environment, minimize risks, and meet legislative requirements.

Key words: *personal data protection, access control, encryption, security audit.*

Вступ

Останнім часом дуже зросла популярність хмарних сервісів для зберігання й обробки даних у хмарному середовищі. Хмари використовуються як індивідуальними користувачами, так і великими компаніями. Цей підхід несе багато переваг: зниження витрат на IT-інфраструктуру, гнучкість у масштабуванні ресурсів, зручність використання, доступ до даних з будь-якої точки світу. Однак разом із цими перевагами постають серйозні питання щодо захисту персональних даних у хмарному середовищі. У цій статті розглядаються основні ризики й методи захисту персональних даних у хмарі.

Метою дослідження є огляд і класифікація сучасних ризиків зберігання й обробки персональних даних у хмарному середовищі, а також вироблення рекомендацій для уникнення або зменшення цих ризиків.

Виконання досліджень

Насамперед розглянемо загальні проблеми, пов'язані зі зберіганням даних у хмарному середовищі, і можливі загрози. Однією з основних загроз є виток даних. Вони можуть призвести до несанкціонованого доступу та розкриття конфіденційної інформації, від особистих даних до фінансових записів. Вплив є не тільки фінансовим, але й поширюється на репутаційні втрати, втрату довіри клієнтів і можливі юридичні наслідки.

Найкращою стратегією запобігання буде:

а) використання надійних методів контролю доступу, щоб обмежити кількість осіб з доступом до конфіденційних даних;

б) упровадження шифрування для захисту даних як під час зберігання, так і під час передачі;

в) регулярне проведення оцінки вразливостей і тестування на проникнення для виявлення й усунення потенційних слабких місць.

Іншою потенційною проблемою може бути проблема з регуляторними органами. Різні регіони та галузі мають різні вимоги щодо захисту даних, такі як GDPR у Європі, HIPAA в охороні здоров'я та CCPA у Каліфорнії. Недотримання цих вимог може призвести до суворих штрафів та юридичних дій.

Найкращою стратегією запобігання буде:

а) слідкувати за оновленням відповідних нормативних документів, забезпечувати, щоб заходи безпеки відповідали їх вимогам;

б) проводити регулярні аудити відповідності для виявлення та вирішення потенційних проблем;

в) встановити чіткі політики управління даними для забезпечення належного оброблення персональних даних.

Ще однією важливою проблемою є безпека API. Багато додатків використовують API для з'єднання з хмарними сервісами. Незахищені API можуть бути використані зловмисниками, що призводить до несанкціонованого доступу, маніпуляції даними та навіть порушення роботи сервісу.

Найкращою стратегією запобігання буде:

а) використання безпечних практик кодування під час розробки API;

б) регулярна перевірка та моніторинг використання API для виявлення підозрілої активності;

в) використання механізмів автентифікації, такі як ключі API або OAuth, для контролю доступу до API.

Розглянемо більш детально впровадження надійного контролю доступу. Його можна розділити на такі складові:

а) принцип мінімальних привілеїв, який надає такий рівень доступу користувачам і додаткам, який є мінімально необхідним для виконання їхніх завдань. Для його впровадження слід призначати ролі та дозволи на основі посадових обов'язків і регулярно переглядати й оновлювати надані дозволи, щоб вони відповідали зміні ролей і обов'язків;

б) мультифакторна автентифікація (MFA), яка надає такий рівень автентифікації, що виходить за межі імені користувача та пароля, вимагаючи додаткові форми перевірки. MFA потрібно впроваджувати для всіх користувачів, які мають доступ до конфіденційних даних або критичних систем;

в) рольова модель доступу (RBAC), яка надає дозволи на основі робочих ролей користувачів, забезпечуючи доступ лише до ресурсів, які стосуються їхніх обов'язків. Для її впровадження потрібно визначити ролі з конкретними дозволами на основі тих функцій, які вони виконують, та регулярно переглядати й оновлювати політики RBAC, щоб вони відображали організаційні зміни;

г) безперервний моніторинг, який забезпечує видимість дій користувачів у реальному часі, що дає змогу швидко виявляти несанкціонований доступ або підозрілу поведінку. Для його впровадження

потрібно використовувати інструменти управління інформаційною безпекою та подіями (SIEM) для моніторингу дій користувача на основі логів і подій та налаштовувати сповіщення для незвичайної або потенційно шкідливої активності.

Ще одним важливим аспектом захисту даних є їх шифрування. Воно може відбуватися під час передачі або зберігання даних.

Для шифрування під час передачі даних використовуються протоколи TLS та SSL. Протокол Transport Layer Security (TLS) є стандартним протоколом для забезпечення безпеки комунікацій у комп'ютерній мережі. Він забезпечує конфіденційність і цілісність даних, що передаються між системами. Сертифікати Secure Sockets Layer (SSL) є криптографічними ключами, які ініціюють рукостискання TLS, встановлюючи безпечне з'єднання. Вони є важливими для шифрування даних під час передачі.

Шифрування під час зберігання може бути надане хмарним провайдером. Більшість із них пропонують серверне шифрування (server side encryption – SSE), де вони автоматично шифрують дані перед зберіганням їх у своїй інфраструктурі. Хмарні провайдери керують ключами шифрування, що забезпечує зручне рішення для багатьох користувачів.

Шифрування також може відбуватися на стороні клієнта. Організації можуть вибрати управління своїми ключами шифрування, додаючи додатковий рівень контролю. У разі шифрування на стороні клієнта дані шифруються на стороні клієнта до того, як вони потрапляють у хмару, забезпечуючи захист від кінця до кінця.

Шифрування даних забезпечує конфіденційність, а отже, тільки авторизовані сторони можуть отримувати доступ і розуміти дані. Шифрування запобігає несанкціонованій зміні даних, зберігаючи їх точність і цілісність. Багато нормативних документів щодо захисту даних вимагають або рекомендують шифрування як захід для захисту особистої та конфіденційної інформації.

Одним із важливих аспектів є дотримання практик безпечної розробки. До них належить валідація вхідних даних. Їх перевірка й очищення, щоб запобігти поширеним вразливостям, таким як SQL-ін'єкції та міжсайтові скрипти (XSS). Упровадження надійних механізмів аутентифікації та авторизації, а також розробка надійних механізмів обробки помилок, щоб запобігти розкриттю конфіденційної інформації у повідомленнях про помилки. Критичним є постійне навчання з безпеки для команд розробників, щоб вони були в курсі новітніх загроз і найкращих практик. Навчальні програми повинні бути адаптовані відповідно до ролей розробників, зосереджені на специфічних проблемах безпеки, з якими вони можуть зіткнутися. Потрібні регулярні процеси перевірки коду. Ручні перевірки коду слід доповнювати автоматизованими інструментами, які можуть виявляти поширені проблеми безпеки, такі як інструменти статичного аналізу. Інтеграція планування реагування на інциденти в життєвий цикл розробки забезпечує швидке реагування на будь-які інциденти безпеки.

Одну з ключових ролей у захисті інформації відіграє регулярний аудит та моніторинг. У ньому можна виділити такі напрями:

а) безперервний моніторинг, який передбачає спостереження за активністю в хмарному середовищі в режимі реального часу. Автоматизовані інструменти можуть аналізувати моделі поведінки й піднімати тривогу в разі виявлення відхилень від норми. Інтеграція із системами управління інформаційною безпекою та подіями (SIEM) централізує дані логів для аналізу, кореляції та звітності;

б) аудити та оцінки. Регулярно заплановані аудити, як внутрішні, так і зовнішні, забезпечують систематичний огляд заходів безпеки та конфігурацій. Періодичні оцінки виявляють і усувають потенційні вразливості в хмарній інфраструктурі. Імітація кібератак допомагає оцінити ефективність заходів безпеки та виявити області для покращення;

в) відповідність нормативним документам. Організації, що підлягають певним регуляціям, повинні проводити аудити для підтвердження дотримання нормативних вимог, вести записи про практики безпеки та зберігати результати аудитів;

г) використання систем виявлення вторгнень (IDS). Ці інструменти постійно здійснюють моніторинг мережевої або системної активності на наявність шкідливої діяльності або порушень політики безпеки. Автоматизовані інструменти можуть оптимізувати рутинні завдання з безпеки, даючи змогу командам безпеки зосередитися на більш складних загрозах; автоматизовані системи оповіщення забезпечують швидке інформування про інциденти безпеки відповідного персоналу для розслідування й реагування;

ґ) регулярний моніторинг. Раннє виявлення інцидентів безпеки дає змогу швидко реагувати, мінімізуючи потенційні збитки. Безперервний моніторинг допомагає організаціям залишатися гнучкими перед новими загрозами кібербезпеки. Детальні логи з безперервного моніторингу дають змогу проводити ретельний форензичний аналіз після інциденту безпеки, допомагаючи зрозуміти природу й обсяг атаки.

Дані в разі зберігання й обробки повинні відповідати вимогам щодо захисту даних. До цих вимог належать:

а) нормативні документи GDPR, HIPAA, CCPA. Загальний регламент захисту даних (GDPR) зосереджується на конфіденційності та захисті персональних даних громадян Європейського Союзу.

Закон про переносимість і відповідальність медичного страхування (HIPAA) стосується безпеки та конфіденційності медичної інформації в галузі охорони здоров'я. Каліфорнійський закон про конфіденційність споживачів (CCPA) надає права на конфіденційність мешканцям Каліфорнії, вимагаючи від бізнесу розкривати практики щодо даних;

б) чіткі правила, що визначають місцезнаходження персональних даних в організації, спосіб їх обробки, процеси отримання й управління згодою користувачів на обробку даних, а також механізми реалізації прав осіб, таких як право на доступ та право бути забутим;

в) оцінка ризиків впливу на захист даних за процедурою DPIA;

г) шифрування даних для захисту конфіденційності персональних даних як під час передачі, так і під час зберігання, та псевдонімізація, тобто заміщення ідентифікуючої інформації псевдонімами для зменшення ризику, пов'язаного з обробкою персональних даних;

ґ) виявлення та своєчасне повідомлення про витоки даних із дотриманням регуляторних вимог щодо повідомлення; встановлення протоколів комунікації для інформування постраждалих осіб та відповідних органів про витоки даних;

д) призначення відповідальних за захист даних (DPO) для надання експертних порад із питань захисту даних і забезпечення узгодження з відповідними нормами; також DPO слугує контактною особою для регуляторних органів та суб'єктів даних із питань захисту даних;

е) проведення регулярних внутрішніх аудитів для оцінки та забезпечення постійної відповідності вимогам щодо захисту даних; залучення зовнішніх аудиторів для надання незалежної оцінки зусиль з відповідності.

є) дотримання принципів конфіденційності за дизайном, у процесі розробки, які забезпечують наявність функцій конфіденційності за замовчуванням. Також потрібно збирати й обробляти тільки ті дані, які необхідні для виконання поставленого завдання, дотримуючись принципу мінімізації даних.

Завдяки впровадженню захищених практик розробки та дотриманню суворих вимог щодо захисту даних організації можуть створювати додатки, які не тільки відповідають законодавчим вимогам, але й пріоритетно ставляться до конфіденційності та безпеки персональних даних, з якими вони працюють. Ці практики сприяють формуванню культури безпеки й демонструють зобов'язання щодо захисту конфіденційної інформації протягом усього життєвого циклу додатка.

Висновки

Упровадження хмарних технологій приносить значні переваги, такі як доступність, гнучкість і зниження витрат, але водночас створює серйозні виклики у сфері безпеки даних. У цій статті було розглянуто основні ризики, пов'язані зі зберіганням і обробкою персональних даних у хмарному середовищі, а також запропоновано рекомендації для їх мінімізації.

Однією з ключових загроз є витік даних, що може призвести до значних фінансових втрат, пошкодження репутації та юридичних наслідків. Для запобігання витокам даних рекомендується впровадження надійних методів контролю доступу, шифрування даних і регулярного тестування на проникнення. Важливим є також дотримання регуляторних вимог, таких як GDPR, HIPAA та CCPA, через проведення регулярних аудитів і забезпечення відповідності заходів безпеки.

Література

1. Zissis, D., & Lekkas, D. (2012). Addressing cloud computing security issues. *Future Generation Computer Systems*, 28 (3), 583–592.
2. Rittinghouse, J.W., & Ransome, J.F. (2016). *Cloud Computing: Implementation, Management, and Security*. CRC Press.
3. Hwang, K., & Li, D. (2010). Trusted cloud computing with secure resources and data coloring. *IEEE Internet Computing*, 14 (5), 14–22.
4. Pearson, S. (2013). Privacy, Security and Trust in Cloud Computing. In *Privacy and Security for Cloud Computing* (pp. 3–42). Springer, London.
5. Cloud Security Alliance (CSA). (2021). Security Guidance for Critical Areas of Focus in Cloud Computing v4.0.
6. Fernandes, D.A.B., Soares, L.F.B., Gomes, J.V., Freire, M.M., & Inácio, P.R.M. (2014). Security issues in cloud environments: a survey. *International Journal of Information Security*, 13 (2), 113–170.

References

1. Zissis, D., & Lekkas, D. (2012). Addressing cloud computing security issues. *Future Generation Computer Systems*, 28 (3), 583–592.
2. Rittinghouse, J.W., & Ransome, J.F. (2016). *Cloud Computing: Implementation, Management, and Security*. CRC Press.
3. Hwang, K., & Li, D. (2010). Trusted cloud computing with secure resources and data coloring. *IEEE Internet Computing*, 14 (5), 14–22.
4. Pearson, S. (2013). Privacy, Security and Trust in Cloud Computing. In *Privacy and Security for Cloud Computing* (pp. 3–42). Springer, London.
5. Cloud Security Alliance (CSA). (2021). Security Guidance for Critical Areas of Focus in Cloud Computing v4.0.
6. Fernandes, D.A.B., Soares, L.F.B., Gomes, J.V., Freire, M.M., & Inácio, P.R.M. (2014). Security issues in cloud environments: a survey. *International Journal of Information Security*, 13 (2), 113–170.

УДК 004.8, 004.94, 621.31
DOI: https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-05

ВИКОРИСТАННЯ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ТА МЕРЕЖЕВИХ НАБОРІВ ДАНИХ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМ

***Войтех Д. В.**, Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Київ, Україна. https://orcid.org/0009-0003-8997-5495, d.voitekh@gmail.com*

***Тимошенко А. Г.**, к.т.н., доц., Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Київ, Україна. https://orcid.org/0000-0003-0954-3186, timoshag@i.ua*

***Анотація.** Світова енергетика останнім часом зазнає суттєвих змін, у тому числі завдяки тенденціям переходу на відновлювані джерела електроенергії, потребам у більш розподіленій генерації та підвищенні надійності електромереж. Ця стаття презентує дослідження основних завдань у галузі моделювання енергомереж, для вирішення яких доцільне використання методів машинного навчання. У ній розглядається, як машинне навчання може сприяти оптимізації функціонування мереж і відігравати ключову роль у модернізації енергетики та забезпеченні більш стабільного процесу переходу до децентралізованої архітектури енергосистеми.*

Стаття охоплює широкий спектр питань, пов'язаних із застосуванням машинного навчання в енергосистемах, включно з аналізом задач оптимального розподілу потужності, оцінкою стану системи, прогнозуванням попиту та генерації тощо. Також досліджуються різні типи даних, що використовуються для навчання моделей, і сформовано практичні поради щодо їх обробки. Наведено сценарії застосування й категоризацію різних методів машинного навчання, такі як навчання з учителем, без учителя та навчання з підкріплення. Крім того, розглядаються гібридні підходи, які поєднують машинне навчання з класичними фізичними моделями, забезпечуючи при цьому більшу ефективність і стабільність.

Наостанок у статті наводиться аналіз одного з найбільших мережевих наборів даних від GridKit, у рамках якого проведено моделювання загальноєвропейської високовольтної мережі щодо особливостей її структури та зв'язків. На основі результатів також виділено перспективні напрями майбутніх досліджень із використанням методів машинного навчання, таких як великі мовні моделі та графові нейронні мережі. Загалом ця стаття є багатостороннім аналізом важливих задач моделювання енергетичної галузі, актуальних наборів даних і моделей машинного навчання та може використовуватися для подальшого вдосконалення інтелектуальних енергетичних систем.

***Ключові слова:** машинне навчання, аналіз мережевих даних, електричні мережі, інтелектуальні енергосистеми, моделювання енергетичних процесів, прогнозування попиту та пропозиції, оптимізація мереж.*

APPLICATIONS OF MACHINE LEARNING AND NETWORK DATASETS FOR POWER SYSTEMS MODELING

***Dmytro Voitekh,** Open International University of Human Development "Ukraine", Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0009-0003-8997-5495, d.voitekh@gmail.com*

***Anatolii Tymoshenko,** Ph.D., Ass. Prof., Open International University of Human Development "Ukraine", Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0003-0954-3186, timoshag@i.ua*

***Abstract.** Global energy has undergone significant changes in recent decades, including trends toward the transition to renewable energy sources, the need for more distributed generation, and the enhancement of grid reliability. This article presents a study of the main tasks in the field of energy network modeling, for which the use of machine learning methods is advisable. It examines how machine learning can contribute to optimizing network operations and play a key role in the modernization of energy systems, ensuring a more stable transition process to a decentralized energy system architecture.*

The article covers a wide range of issues related to the application of machine learning in energy systems, including the analysis of optimal power distribution tasks, system state estimation, demand and generation forecasting, among others. It also explores the various types of data used for training models and provides practical advice on their processing. Scenarios for the application and categorization of different machine learning methods, such as supervised learning, unsupervised learning, and reinforcement learning, are presented. Additionally, hybrid approaches that combine machine learning with classical physical models, thereby ensuring greater efficiency and stability, are discussed.

Finally, the article provides an analysis of one of the largest network datasets from GridKit, within the framework of which the modeling of the European high-voltage network regarding its structural features and connections is carried out. Based on the results, promising directions for future research using machine learning methods, such as large language models and graph neural networks, are highlighted. Overall, this article is a comprehensive analysis of important tasks in energy modeling, relevant datasets, and machine learning models and can be used to further enhance intelligent energy systems.

Key words: *machine learning, power grid data analysis, power grids, smart power systems, energy process modeling, demand and supply forecasting, network optimization.*

Вступ

Перед людством постає ряд складних викликів, серед яких зменшення впливу на екологію та прискорення процесу децентралізації енергетики [1]. Окремо варто виділити проблему інтеграції численних невеликих генераторів на основі відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі й вітряки, та нових класів споживачів, таких як електромобілі, що вносять додаткову невизначеність в енергобаланс і обумовлюють потребу в нових підходах до управління енергосистемою [1, 2].

Класичні методи аналізу й моделювання енергосистем вже сьогодні на практиці виявляються недостатньо ефективними, оскільки відповідні моделі зазвичай не враховують значну кількість сучасних динамічних факторів [6]. Наприклад, уже зараз відновлювані джерела електроенергії становлять суттєву частку генерації електроенергії, їх генерація є мінливою і залежить, зокрема, від погодних умов [1, 6]. Водночас можливості щодо контролю та моніторингу самої мережі є досить обмеженими, тому постає потреба в більш комплексних інструментах моделювання, які дадуть змогу врахувати вищезгадані особливості й забезпечити стабільність параметрів електромережі [1, 2]. Також є очевидним, що в перспективі з подальшим розширенням мережі та розвитком відновлюваної генерації ця потреба буде лише посилюватися [1, 2].

Технології у сфері штучного інтелекту і, зокрема, машинного навчання швидко розвиваються завдяки регулярній появі у різних галузях нових, великих наборів даних, а також періодичному вдосконаленню спеціалізованих обчислювальних систем [2]. Останні досягнення машинного навчання великою мірою обумовлені появою і успішним впровадженням нових архітектур моделей глибинного навчання (deep learning), серед них трансформерні нейромережі (transformer neural networks) та графові нейромережі (graph neural networks, GNN) [2]. Уже зараз стрімкий розвиток цієї сфери суттєво впливає і на вищезгадані виклики, пов'язані з енергетикою, а моделі на базі машинного навчання можуть доповнити або навіть замінити традиційні методи [2].

Проте, незважаючи на всі перспективи застосування машинного навчання в моделюванні енергосистем, часто таким дослідженням не вистачає аналізу доцільності його використання для конкретної задачі [2, 6]. Наприклад, складні архітектури глибоких нейромереж, що потребують для навчання великої кількості даних, не можуть бути ефективно адаптовані до завдань енергетики, де таких вибірок може не бути в загальному доступі [2]. З іншого боку, впровадження подібних моделей для симуляції і прогнозування показників енергосистеми на великому об'ємі даних матиме багато перешкод, а також ресурсних і часових обмежень [2].

Виконання досліджень

Модель енергосистеми. Енергосистема є складною багаторівневою структурою, що об'єднує передавальну мережу, завданням якої є передача електроенергії на великі відстані за допомогою високовольтних ліній, і мережу розподілу, яка доставляє електроенергію до кінцевих споживачів [1]. У класичних енергосистемах 20-го століття електроенергія передавалася в одному напрямку, від великих централізованих генераторів електроенергії до споживачів [1]. Проте з ростом кількості приватних електростанцій, у тому числі на основі відновлюваних джерел живлення, усе більшу частку становлять двоспрямовані потоки електроенергії [1]. Це спричиняє ряд проблем і викликів, що негативно впливають на ефективність роботи електромереж [1, 2].

Ключовою вимогою безпечного функціонування енергосистеми є чітке дотримання балансу виробництва та споживання електроенергії, що, зокрема, забезпечується сталою частотою (50 або 60 Гц залежно від країни, в Україні стандартною мережевою частотою є 50 Гц). Будь-який дисбаланс призводить до зміни частоти: вона падає за нестачі генерації і зростає в разі надлишку [1]. Підтримання енергобалансу досягається за допомогою планування й маневрування потужністю контрольованих генераторів, таких як теплові (вугільні та газові) електростанції [1, 2].

Топологія енергосистеми описує фізичне розташування та з'єднання всіх її компонентів і зазвичай надається у вигляді орієнтованого або неорієнтованого графа. Цей граф складається з вузлів (генератори, навантаження, підстанції) і ребер (лінії електропередачі), що їх з'єднують. У загальному випадку модель енергосистеми можна описати у вигляді системи рівнянь, якими встановлюються взаємозв'язки між компонентами та їх вплив [3]. Також варто зазначити, що модель мережі розподілу суттєво відрізняється від передавальної мережі тим, що має меншу зв'язність, більшу мінливість, великі значення відношення опору до реактивного опору (відношення R/X) та дисбаланс фаз через

асиметричність навантаження. Відмінності між мережами обумовлюють необхідність у різних підходах до їх аналізу. Наприклад, через велике значення R/X опір ліній у мережах розподілу не можна ігнорувати, на відміну від систем передачі [3].

Традиційні підходи засновані на складних фізичних моделях і великій кількості факторів [1, 2]. Проте через масштаб сучасних енергосистем часто для прискорення моделювання можуть застосовуватися деякі апроксимації. Такі спрощені моделі можуть давати задовільні результати для значної частини задач, але іноді призводять до погіршення якості [2]. Тож методи машинного навчання можуть використовуватися як потужні апроксиматори, що мають більш прогнозований час відгуку та кращі можливості адаптації до змін у поведінці системи, ніж класичні методи [2]. Далі наведено огляд основних задач аналізу енергосистем і можливостей використання для їх вирішення підходів машинного навчання:

Задача потоків потужності (power flow problem). Ця задача є однією з найважливіших для аналізу усталеного режиму роботи енергосистем. Спочатку визначається стан системи в нормальних умовах роботи, зокрема величини напруги й фазового кута в усіх вузлах системи. На основі цих даних можуть бути аналітично розраховані інші величини, такі як активна та реактивна потужність, втрати на кожній лінії тощо. Ця інформація є надзвичайно важливою для операторів енергосистем, оскільки вона дає їм змогу розуміти поведінку системи за різних умов експлуатації, виявляти потенційні проблеми та вживати заходів для підтримання стабільності. Задача аналізу розподілу потужності зазвичай описується у вигляді системи нелінійних рівнянь [4]:

$$P_i = V_i \sum_{j \in \mathrm{N}} V_j (G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)), i \in \mathrm{N},$$
$$Q_i = V_i \sum_{j \in \mathrm{N}} V_j (G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)), i \in \mathrm{N}, \quad (1)$$

де N – множина усіх вузлів системи. $P_i = P_i^G - P_i^L$ та $Q_i = Q_i^G - Q_i^L$ є активними та реактивними потужностями вузла *i* відповідно. Верхні індекси *G* і *L* використовуються для позначення потужності генерації (generation) та навантаження (load) відповідно. V_i та θ_i є величиною напруги та фазовим кутом вузла *i*. G_{ij} та B_{ij} є провідністю та сприйнятливістю лінії між вузлами *i* та *j* – дійсна та уявна частина комплексної провідності лінії Y_{ij} відповідно.

У більш загальному випадку рівняння розподілу потоків потужності можна виразити таким нелінійним рівнянням [4]:

$$f(x, p, A) = 0, \quad (2)$$

де *x* – вектор невідомих системи, *p* – вектор параметрів ліній (опори і реактивні опори), *A* є матрицею зв'язків, яка описує топологію мережі. Оскільки аналітичного рішення для даної задачі не існує, зазвичай вона вирішується за допомогою ітераційних методів, наприклад методом Ньютона. У термінах машинного навчання, якщо враховувати, що ця модель описує усталені процеси, вона може бути виражена так [4]:

$$y = F(x) + \varepsilon, \quad (3)$$

де *x* та *y* є вхідним на вихідним вектором відповідно, ε – помилка (або шум), F – модель, задана у вигляді функції.

Задача оптимального розподілу потужності (optimal power flow). Ця задача заснована на деяких умовах попередньої та є поширеною серед операторів енергосистеми. Формулюється як задача оптимізації з обмеженнями [5]:

$$min_{x,u}\, c(x,u),$$
$$\text{за умови що}: g_i(x,u) = 0 (1 \le i \le n),$$
$$h_j(x,u) \le 0 (1 \le j \le m), \quad (4)$$

де $c(\cdot)$ – цільова функція, яка визначається для конкретної задачі (наприклад, максимізація стабільності мережі, мінімізація операційних витрат тощо), x – вектор змінних, що описує стан системи (генерацію та споживання вузлів), *u* – вектор змінних керування, таких як цільові значення параметрів генераторів, а $g(\cdot)$ та $h(\cdot)$ – лінійні або нелінійні рівняннями та нерівності, які задають обмеження енергосистеми. Якщо застосувати цей тип задачі до вищезгаданої проблеми потоків потужності, то система нерівностей передбачатиме потрапляння значення напруги та фазового кута у визначені робочі діапазони й умову, що комплексна потужність кожної лінії передачі не перевищує її максимальні значення.

Задача оптимального розподілу потужності є NP-повною [5]. Тому зазвичай використовуються спрощені підходи для її розв'язку, наприклад лінійна апроксимація або ж метод «чорної скрині», що може використовувати моделі машинного навчання [2, 5]. На відміну від підходу «чорної скрині»,

у деяких останніх дослідженнях машинне навчання комбінується з фізичними моделями, правилами і класичними інструментами для аналізу електромереж, разом утворюючи так звану фізично обґрунтовану модель машинного навчання або гібридну модель [6]. Перевага цієї концепції полягає у тому, що для навчання такої моделі зазвичай потрібно значно менше даних, оскільки модель від самого початку має потужний сигнал у вигляді формалізованих обмежень і правил мережі. Таким чином досягається оптимальне співвідношення використання наявних знань про систему та її властивості, а також автоматичне вивчення її закономірностей на основі даних [6]. Принцип роботи даних методів узагальнено у вигляді схеми на рис. 1.

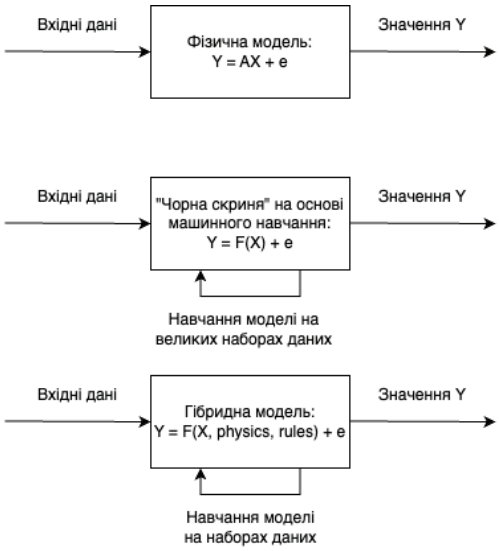


Рис. 1. Фізична модель на основі системи рівнянь і правил та альтернативи з використанням машинного навчання: «чорна скриня» та гібридна модель

Задача оцінки стану (state estimation). Є надзвичайно важливою для забезпечення ситуаційної обізнаності в енергосистемі та має на меті передбачення її найбільш імовірного стану, що зазвичай представлений величинами напруг і фазових кутів вузлів. Для вирішення цієї задачі потрібні історичні дані відповідних вимірювань та актуальна топологічна модель, включно з параметрами компонентів. Основною метою задачі є надання точного оцінювання стану системи в реальному часі (позначається як *x*) який згоджується з доступними метриками, насамперед величинами струму й напруги. Класична задача формулюється так [7]:

$$\tilde{x}(z) = \underset{x}{\operatorname{argmin}} \left(z - h(x)\right)^2, \tag{5}$$

де *z* – вектор вимірювань, $h(\cdot)$ – нелінійна функція, що описує зв'язок між вектором стану системи *x* та вимірюваннями *z*. Оптимальна оцінка стану $\tilde{x}(z)$ обчислюється на основі мінімізації відхилення *z* від $h(x)$.

Для класичних способів розв'язання цієї задачі, наприклад для методу зважених найменших квадратів, потрібна значна кількість даних щодо вимірювань і точна структура моделі мережі, що часто є неможливим. І навіть за цих умов під час застосування таких методів можна стикнутися з проблемами щодо збіжності й надмірною чутливістю до викидів у даних [2, 7]. Зі свого боку, підходи машинного навчання показують перспективні результати в різних аспектах вирішення задачі оцінки стану енергосистеми, таких як виявлення помилкових даних, автоматизована ідентифікація топології, генерація синтетичних даних, рекомендація схожих за поведінкою і параметрами компонентів системи [2].

Джерела даних. Для забезпечення різних функцій в енергосистемі використовується широкий спектр джерел даних, таких як системи диспетчерського управління та збору даних (supervisory control and data acquisition, SCADA), метеорологічні дані, а також мережеві вимірювальні пристрої, наприклад пристрої вимірювання комплексної амплітуди (phasor management unit, PMU) та розумні лічильники [2]. Крім того, існують численні джерела даних, які надаються операторами енергосистем та їх об'єднаннями, такими як ENTSO-E [8]. Ці дані містять історичні часові ряди (попит і пропозиція, динамічні ціни на електроенергію, генерація відновлюваних джерел живлення), а також параметри генераторів, мережевих ліній та основних споживачів. Основні типи джерел даних узагальнено на рис. 2.

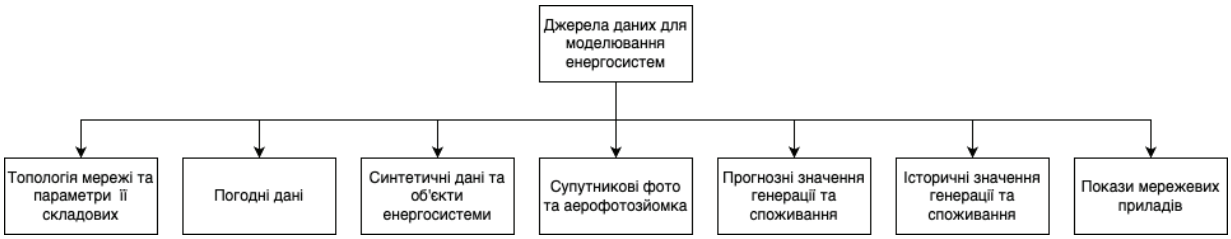


Рис. 2. Джерела даних, що використовуються для керування й моделювання енергосистем

Ці дані можуть бути використані для побудови моделей машинного навчання для різних задач [2, 8]. Проте потрібно враховувати, що в кожного джерела даних є свої особливості й обмеження (наприклад, різна частота та моменти вимірювань). Зокрема, покази з PMU, підключеного до мережі, можуть приходити з інтервалом, який вимірюється приблизно в мілісекундах, дані SCADA – у секундах, дані з розумних лічильників абонентів – у хвилинах, дані про погоду – у годинах тощо [8]. Тому для ефективного використання цих даних під час моделювання потрібно виконувати стандартизацію даних, що може передбачати зниження частоти вибірки даних із високою частотою вимірювань до частоти вибірки з нижчою частотою або навпаки [2, 8]. Цю операцію можна виконувати як за допомогою простої лінійної інтерполяції, так і використовуючи більш складні методи, у тому числі на основі машинного навчання, наприклад, застосовуючи для синтезу даних генеративні змагальні мережі (generative adversarial networks, GANs) [9].

Основні приклади використання машинного навчання. Машинне навчання застосовується для широкого спектра прикладних задач, пов'язаних із різними аспектами моделювання енергосистеми [2]. Основні сімейства методів машинного навчання, прикладів їх використання та релевантних алгоритмів зведено у схему, яку зображено на рис. 3.

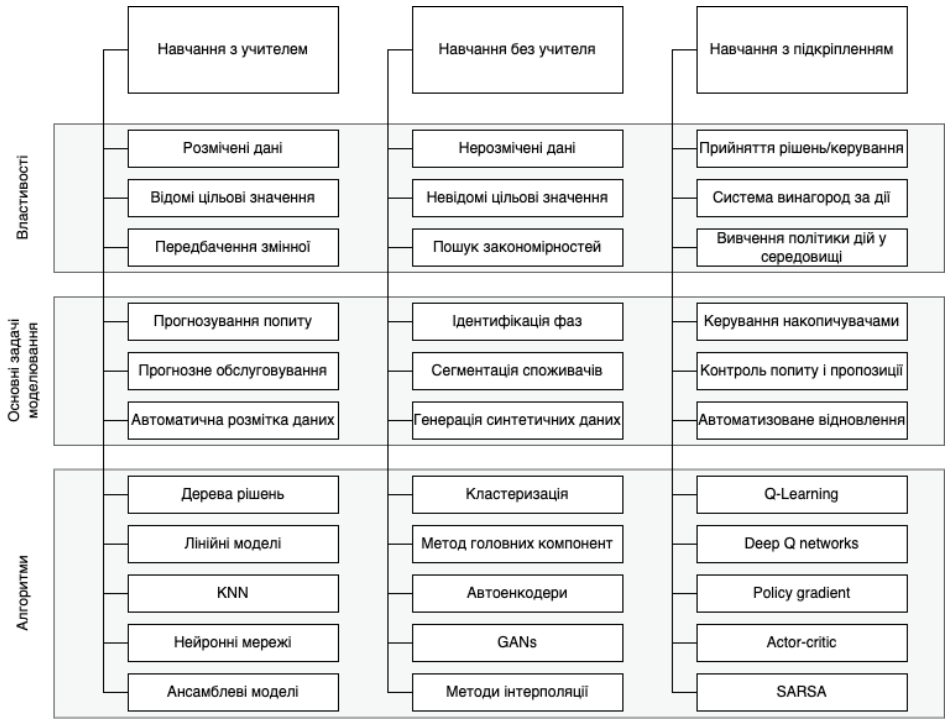


Рис. 3. Категоризація методів машинного навчання відповідно до різних задач моделювання енергосистеми

Далі наведено опис найбільш популярних сценаріїв, для яких або вже використовують, або можуть у перспективі почати застосовувати методи машинного навчання.

Для **навчання з учителем (supervised learning)** двома основними типами моделей є класифікація і регресія. У контексті електромереж такі моделі є найбільш дослідженими та широко розповсюдженими і, наприклад, використовуються для прогнозування (forecasting) локальних ринкових цін на електроенергію або стану вузлів системи на основі часових рядів [2]. Ці прогнози надають

важливу інформацію і використовуються для прийняття рішень операторами енергосистем та власниками енергетичних об'єктів. Наприклад, точне прогнозування генерації відновлюваної енергії допомагає операторам більш ефективно керувати сегментами мережі з великою часткою розподіленої генерації, зменшуючи експлуатаційні витрати й ризики виникнення дисбалансу [2]. Регресійні моделі відрізняються горизонтом планування, що може становити як секунди або хвилини (для моделювання у режимі наближеному до реального часу), так і місяці або роки (для стратегічного планування й аналізу ризиків) [10]. Іншим прикладом є прогнозне обслуговування (predictive maintenance) [2]. Використовуючи історичні дані показів стану мережевого обладнання, такі як деградація ізоляції у трансформаторах та історія виявлених несправностей, можна навчити модель для передбачення виходу обладнання з ладу, що дає змогу операторам вчасно вживати превентивні заходи й уникати аварійних ситуацій [2].

Навчання без учителя (unsupervised learning) є дуже перспективним сімейством методів для застосування в енергосистемах, оскільки не потребує дороговартісних і зазвичай наявних лише в невеликій кількості розмічених даних та охоплює широкий спектр популярних задач, таких як кластеризація (clustering), зменшення розмірності (dimensionality reduction), виявлення аномалій (anomaly detection), генерація синтетичних даних (synthetic data generation) [2]. У рамках енергосистем прикладом їх застосування є ідентифікація фазових підключень – для ефективного розміщення нових розподілених потужностей у мережі розподілу (наприклад, побутові та комерційні сонячні електростанції) важливо правильно ідентифікувати фазове підключення кожного споживача [11]. Для вирішення цієї задачі можна застосувати метод кластеризації, щоб згрупувати вузли системи щодо використання тих чи інших комбінацій фаз на основі показів з їх розумних лічильників або інших мережевих приладів [2, 11]. Іншим прикладом є сегментація споживачів електроенергії – автоматизоване визначення профілів мережевого навантаження (наприклад, комутовані або регульовані прилади), а також їх закономірностей споживання [11]. Розв'язання цієї задачі дає змогу енергетичним компаніям розробляти ефективніші стратегії залучення нових і заохочення наявних споживачів, враховуючи їх енергетичні потреби. Також таким чином оператори можуть більш ефективно реагувати на зміну попиту за різних умов, включно з погодою, соціальними подіями та святами [11].

Методи **навчання з підкріпленням (reinforcement learning)** є перспективними для задач прийняття рішень і керування енергетичними системами, оскільки дають змогу вивчити оптимальну політику і спланувати потрібну послідовність дій у заданому середовищі з метою досягнення бажаного результату [2]. Прикладом застосування може бути автоматизована система керування мережевими накопичувачами електроенергії в умовах динамічного ціноутворення електроенергії, як-от Tesla Autobidder [12]. Метою такої системи є максимізація доходів унаслідок оптимальних дій щодо збереження та продажу оператору енергосистемі електроенергії залежно від поточного балансу попиту та пропозиції. Водночас ці агенти мають враховувати ряд обмежень щодо експлуатації накопичувача, наприклад потребу уникнення глибоких розрядів [12]. Іншим цікавим прикладом є автоматизація оператора енергосистеми за допомогою моделі на основі навчання з підкріпленням [2, 12]. Метою агента на основі подібної моделі є підтримка стабільної напруги в мережі й уникнення аварійних відключень. Для цього він може виконувати дії щодо регулювання та комутації компонентів системи [13].

Аналіз загальноєвропейського мережевого набору даних від GridKit. У загальному доступі існує велика кількість наборів даних, що описують топологію електромереж різних країн і регіонів, параметри мережевих об'єктів та історію їх зміни [3]. Такі набори зазвичай створюються на основі даних, що надаються національними операторами та міжнародними енергетичними агентствами й організаціями. Для доповнення цих даних також часто використовуються відкриті картографічні ресурси, такі як OpenStreetMap, що містять географічні координати й інші додаткові атрибути енергетичних об'єктів [8].

GridKit є одним із популярних інструментів, що використовує вищезгаданий підхід, і на його основі регулярно створюються великі мережеві вибірки [14]. Прикладом є набір даних європейської та північноамериканської високовольтних мереж станом на 2016 р., який базується, зокрема, на інформації, що регулярно публікується асоціацією ENTSO-E (Європейською мережею операторів систем передачі електроенергії) [8]. Саме європейська складова цієї вибірки використовувалася в рамках цього дослідження для аналізу й моделювання.

Вибірка відкрита для завантаження через ресурс Zenodo та надається у вигляді архіву з двома CSV файлами – вузлами й ребрами мережі відповідно [14]. Файли містять значну кількість метаданих, таких як тип вузла, оператор, номінальні показники кожного компонента (частота, напруга, потужність), їх географічне розташування тощо.

У рамках аналізу основним завданням було дослідити структуру, особливості даних, а також їх потенціал для моделювання, зокрема, використовуючи машинне навчання. Обробка даних проводилася за допомогою мови програмування Python, бібліотеки для роботи з табличними даними Pandas і бібліотеки для побудови й аналізу графів Networkx. Попередньо дані було очищено (видалено дублі-

кати, нормалізовано типи вузлів і залишено лише найбільший компонент зв'язності) та перетворено їх на networkx-граф. Усього граф складається з 13 871 вузла та 18 804 ребер. Як зображено на рис. 4, у вибірці виокремлено 3 основні типи вузлів: 1) вузлова точка – усього 6330 елементів, це умовна назва для місць з'єднання кількох ліній електропередачі (без трансформаторного обладнання); 2) підстанція – усього 6395 елементів, вузли, де відбувається трансформація та розподіл електроенергії; 3) генератор – усього 1146 елементів, у цих вузлах відбувається генерація електричної енергії різних джерел (теплових, атомних, відновлюваних тощо).

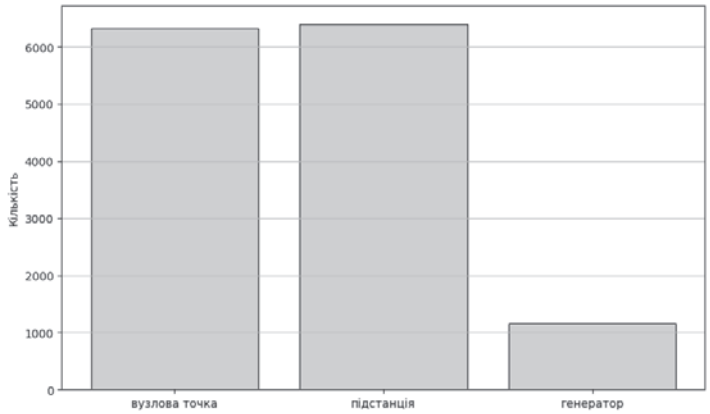


Рис. 4. Гістограма кількості вузлів різних типів у вибірці GridKit

Для аналізу структури та властивостей мережевої моделі, відповідно до даних, за допомогою функції curve_fit бібліотеки scikit-learn було виконано автоматизований підбір параметрів степеневого розподілу (power law). Також було розраховано степені вузлів (кількість зв'язків), що продемонструвало їх підпорядкування раніше отриманому степеневому закону. Це можна побачити на рис. 5. Причина цієї закономірності полягає в тому, що мережі (і не тільки енергетичні) зазвичай розширюються за принципом приєднання нових вузлів до вже наявних вузлів із високим ступенем. Тож завдяки цій властивості вузли в мережах поділяються на незначну кількість елементів зі значними степенями і велику кількість вузлів із малими степенями.

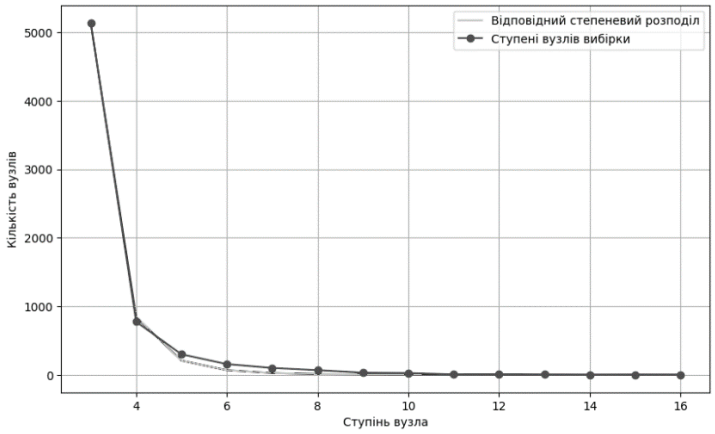


Рис. 5. Розподіл степенів вузлів графа та його зв'язок зі ступеневим законом

Крім того, за допомогою засобів Networkx було розраховано одну з найважливіших метрик оцінки впливу кожного з вузлів на мережу – центральність за посередництвом (betweenness centrality). Чисельно ця метрика виражає відношення кількості найкоротших шляхів, які проходять через цей вузол, до загальної кількості найкоротших шляхів у мережі. Значення перебуває у межах від 0 до 1, де 0 означає, що вершина не має впливу на будь-які інші, а 1 означає, що вершина задіяна в найкоротших шляхах між усіма вершинами. Для наочності на рис. 6 наведено український сегмент мережі з основними вузлами, їх типами, а також величинами центральності. Чим більший вузол на рисунку, тим більше його значення центральності.

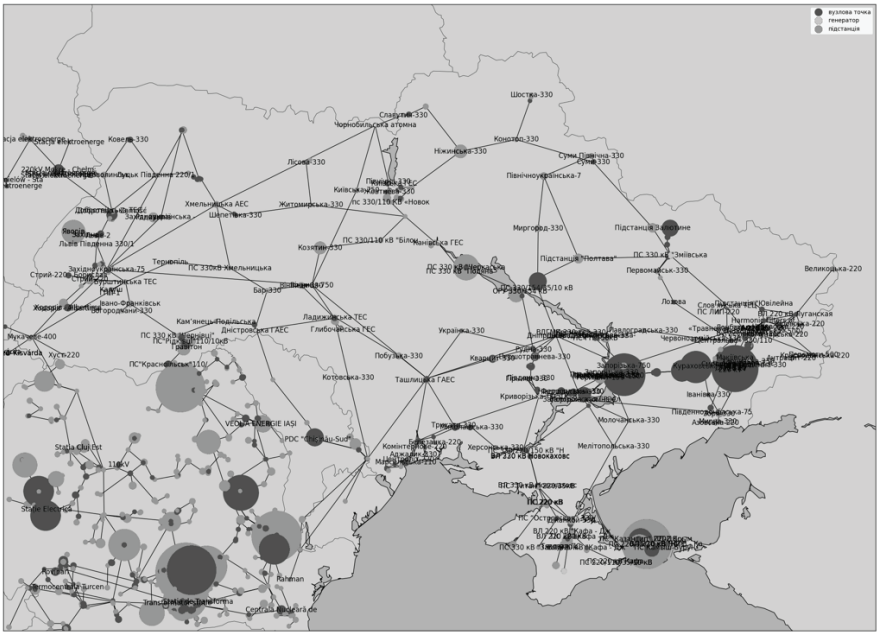


Рис. 6. Український сегмент мережі вибірки GridKit з розрахованими коефіцієнтами центральності

Із цього зображення можна переконатися, що найбільш важливими є вузли, які забезпечують транскордонну передачу електроенергії, а також розташовані в щільних сегментах мережі. На рис. 7 наведено частотний розподіл коефіцієнтів центральності за посередництвом по всій європейській вибірці в логарифмічному масштабі. Він також свідчить про те, що вплив вузлів у мережі підпорядковується ступеневому закону.

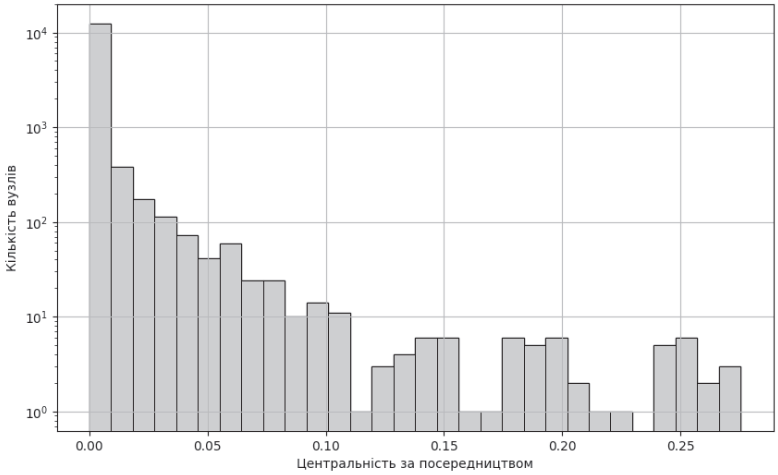


Рис. 7. Розподіл значень коефіцієнтів центральності за посередництвом

Вузли європейської мережі з найбільшими значеннями коефіцієнтів центральності за посередництвом наведено в табл. 1. Серед них є елементи всіх типів, проте переважно це вузлові точки.

Таблиця 1

Вузли європейської високовольтної мережі з найбільшою центральністю

Мережевий вузол	Тип	Коефіцієнт
Redipuglia (Італія)	вузлова точка	0.275585
Dugale (Італія)	підстанція	0.270770
RTP Divača (Словенія)	підстанція	0.266539
Ostiglia;Centrale termoelettrica di Ostiglia (Італія)	генератор	0.259387

Продовження таблиці 1

Udine Ovest – Cordignano (Італія)	вузлова точка	0.252068
Sandrigo (Італія)	підстанція	0.250508
Udine Ovest (Італія)	вузлова точка	0.248413
Poste électrique de Albertville (Франція)	вузлова точка	0.243978
Superphénix – Rondissone-Albertville (Франція)	вузлова точка	0.242329
TS Melina (Хорватія)	вузлова точка	0.240040

Крім центральності за посередництвом, також аналізувалися інші розповсюджені метрики важливості вузлів, такі як степенева центральність (degree centrality) та алгоритм PageRank. Було проведено кореляційний аналіз розподілів коефіцієнтів вузлів, отриманих за допомогою різних методів, а результати наведено в табл. 2. Ці значення демонструють, що степенева центральність і PageRank дають схожі результати, оскільки однаково ґрунтуються на кількості зв'язків вузлів. Водночас центральність за посередництвом має суттєво інший розподіл через те, що використовує складнішу оцінку, засновану на прохідності вузлів.

Таблиця 2

Кореляція різних метрик центральності

	Центральність за посередництвом	**Центральність за степенем**	**PageRank**
Центральність за посередництвом	–	0.2957	0.2665
Центральність за степенем	–	–	0.9540
PageRank	–	–	–

Цей аналіз мережевої вибірки даних також адресує задачу симуляції відмов вузлів, використовуючи різні підходи (відключення випадкового вузла або найбільш важливих вузлів за раніше згаданими критеріями центральності), у тому числі, як швидко мережа розпадається на енергетичні острови зі збільшенням кількості відключень відповідно до цих методів порівняно з випадковими відмовами. Тобто ця мережева модель даних може використовуватися для широкого спектра як класичних задач, так і таких, де доцільне використання машинного навчання.

Перспективні напрями досліджень. Крім згаданих раніше методів машинного навчання, які вже стали популярними й отримали реальні приклади застосування в енергетичній сфері, останнім часом стрімкого розвитку зазнав напрям, пов'язаний із моделюванням природної мови (natural language processing). Насамперед це обумовлено появою великих мовних моделей (large language models, LLMs), як загальних, так і адаптованих до конкретної предметної сфери, що дали змогу адресувати складні виклики, які не вдавалося ефективно вирішити раніше [15]. Водночас, на відміну від таких галузей, як охорона здоров'я, юриспруденція або екологія, в енергетиці подібні моделі досі не є розповсюдженими [15]. Останні дослідження виділяють декілька основних сценаріїв застосування мовних моделей для аналізу енергосистеми. Ключовий із них – це побудова, оновлення й пошук за графом знань електромережі. Ідея полягає у генерації графової структури на основі правил, закономірностей, а також типових відхилень, що притаманні енергомережам, і асоціація з елементами цього графа реальних вузлів і частин енергосистеми з урахуванням їх історичної поведінки [15]. Цей механізм зв'язку вузлів з елементами графа знань зазвичай реалізується за допомогою отримання ембедінгів (embeddings) – семантичних векторних репрезентацій, що генеруються нейромережами (у тому числі мовними моделями), для яких можна розраховувати певну обрану метрику схожості й відповідно до отриманого значення визначати приналежність об'єктів до певних категорій та один до одного, аналізувати зв'язки між ними [15]. Крім того, важливою функцією використання мовних моделей є можливість їх впровадження як асистента, основним завданням є оркестрація пошуку за вищезгаданим графом і надання текстових пояснень за результатами аналізу. Це може спростити роботу, зробити результати моделювання більш зрозумілими і зменшити кількість складних дій у різних інструментах, які потрібно виконувати оператору енергосистеми, замінивши більшість із них на взаємодію з асистентом за допомогою природної мови. Основним викликом у реалізації такого підходу є адаптація загальних мовних моделей до енергетичного домену, оскільки загальні моделі самі по собі не мають достатнього контексту, щоб якісно виконувати енергетичні завдання, і через складнощі отримання великої кількості спеціалізованих даних, які можна було б використати для донавчання моделей [2, 15].

Як зазначалося раніше, оскільки електромережі зазвичай наводяться у вигляді графової структури, ще одним важливим напрямом є моделювання за допомогою графових нейронних мереж. Завдяки своїм можливостям щодо якісного вивчення властивостей, закономірностей і зв'язків вузлів у графах, цей тип моделей усе частіше стає об'єктом досліджень, пов'язаних з енергосистемами [2, 16]. Напри-

клад, в одному з останніх досліджень пропонується баєсівська модель машинного навчання, компонентом якої є графова нейромережа для прогнозування потоків потужності трансформаторів, що з'єднують звичайні й високовольтні лінії електропередачі [16]. Завдяки ймовірнісній складовій цієї моделі вона ефективніше розподіляє увагу щодо впливу різних вузлів мережі та враховує широкий спектр сигналів, як-от погодні умови, баланс енергосистеми, взаємодія із суміжними вузлами. Крім того, векторні представлення вузлів, отримані з графових нейромереж, мають семантичні властивості, на основі яких можна проводити різноманітні типи аналізу (кластеризація, оцінка схожості тощо) [16].

Висновки

Застосування різноманітних методів машинного надає потенціал для більш ефективного моделювання й управління енергосистемами, а також ефективного вирішення ключових задач цієї предметної сфери. До того ж використання машинного навчання часто забезпечує кращу, ніж у класичних методах, пропускну здатність і якість результатів, завдяки властивостям моделей навчатися на великих обсягах даних, регулярно оновлюватися і враховувати більшу кількість різних факторів.

Попри поточні успіхи у впровадженні машинного навчання, існує ряд серйозних викликів, зокрема потреба у великих масивах даних для навчання та застосування складних моделей до специфічних завдань енергетики. Також важливим напрямом є поєднання цих методів з наявними фізичними моделями для досягнення більшої точності результатів та потенційного зменшення обсягу даних, потрібних для навчання.

Проведений аналіз одного з найбільших мережевих наборів даних від GridKit у поєднанні з сформованими на основі цього напрямами подальших досліджень може бути використаний для подальшого вдосконалення методів машинного навчання в контексті їх адаптації до енергетичної сфери, ефективнішого застосування апріорних знань про досліджувану задачу, а також упровадження новітніх підходів, які добре зарекомендували себе для схожих проблем в інших галузях. Усе це разом має на меті допомогти забезпечити стабільну роботу енергосистеми та швидше реагування на зміни в мережі.

Література

1. Sinsel, S.R., Riemke, R.L., & Hoffmann, V.H. (2020). Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources – a review. Renewable Energy, 145, 2271–2285. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.147.
2. Lee, S., Seon, J., Hwang, B., Kim, S., Sun, Y., & Kim, J. (2024). Recent Trends and Issues of Energy Management Systems Using Machine Learning. Energies, 17, 624. DOI: https://doi.org/10.3390/en17030624.
3. Shen, T., Li, Y., & Xiang, J. (2018). A Graph-Based Power Flow Method for Balanced Distribution Systems. Energies, 11, 511. DOI: https://doi.org/10.3390/en11030511.
4. Huang, W.-T., & Yang, W.-C. (2011). Power flow analysis of a grid-connected high-voltage microgrid with various distributed resources. In Proceedings of the 2011 International Conference on Materials and Applications for Communications and Electronics (MACE). DOI: https://doi.org/10.1109/MACE.2011.5987225.
5. ScienceDirect. Optimal power flow. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/optimal-power-flow.
6. Stiasny, J., & Chatzivasileiadis, S. (2023). Physics-informed neural networks for time-domain simulations: Accuracy, computational cost, and flexibility. Electric Power Systems Research, 224, Article 109748. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109748.
7. Vijaychandra, J., Prasad, B. R. V., Darapureddi, V. K., Rao, B. V., & Knypiński, Ł. (2023). A review of distribution system state estimation methods and their applications in power systems. Electronics, 12 (3), 603. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics12030603.
8. Ledesma, P., Arredondo, F., & Moreno, M. Á. (2023). Adapting ENTSO-E network data for power system simulation. In 2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe) (pp. 1–5). DOI: https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194624.
9. Li, J., Chen, Z., Cheng, L., & Liu, X. (2022). Energy data generation with Wasserstein deep convolutional generative adversarial networks. Energy, 257, 124694. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124694.
10. Benti, N.E., Chaka, M.D., & Semie, A.G. (2023). Forecasting renewable energy generation with machine learning and deep learning: Current advances and future prospects. Sustainability, 15 (7), 7087. DOI: https://doi.org/10.3390/su15097087.
11. Zhou, L., Zhang, Y., Liu, S., Li, K., Li, C., Yi, Y., & Tang, J. (2020). Consumer phase identification in low-voltage distribution network considering vacant users. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 121, 106079. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106079.
12. Tesla. Autobidder. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.tesla.com/support/energy/tesla-software/autobidder.
13. Cao, D., et al. (2020). Reinforcement learning and its applications in modern power and energy systems: A review. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 8 (6), 1029–1042. DOI: https://doi.org/10.35833/MPCE.2020.000552.
14. GridKit: European and North-American extracts. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://zenodo.org/records/47317.
15. Lin, C., et al. (2023). Knowledge graph completion for power grid main equipment using pretrained language models. In D. S. Huang, P. Premaratne, B. Jin, B. Qu, K. H. Jo, & A. Hussain (Eds.), Advanced Intelligent Computing Technology and Applications. ICIC 2023. Lecture Notes in Computer Science (Vol. 14089). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-4752-2_68.
16. Beinert, D., Holzhüter, C., Thomas, J.M., & Vogt, S. (2023). Power flow forecasts at transmission grid nodes using graph neural networks. Energy and AI, 14, 100262. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyai.2023.100262.

References

1. Sinsel, S.R., Riemke, R.L., & Hoffmann, V.H. (2020). Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources – a review. Renewable Energy, 145, 2271–2285. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.147.

2. Lee, S., Seon, J., Hwang, B., Kim, S., Sun, Y., & Kim, J. (2024). Recent Trends and Issues of Energy Management Systems Using Machine Learning. Energies, 17, 624. DOI: https://doi.org/10.3390/en17030624.

3. Shen, T., Li, Y., & Xiang, J. (2018). A Graph-Based Power Flow Method for Balanced Distribution Systems. Energies, 11, 511. DOI: https://doi.org/10.3390/en11030511.

4. Huang, W.-T., & Yang, W.-C. (2011). Power flow analysis of a grid-connected high-voltage microgrid with various distributed resources. In Proceedings of the 2011 International Conference on Materials and Applications for Communications and Electronics (MACE). DOI: https://doi.org/10.1109/MACE.2011.5987225.

5. ScienceDirect. Optimal power flow. Retrieved from https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/optimal-power-flow.

6. Stiasny, J., & Chatzivasileiadis, S. (2023). Physics-informed neural networks for time-domain simulations: Accuracy, computational cost, and flexibility. Electric Power Systems Research, 224, Article 109748. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109748.

7. Vijaychandra, J., Prasad, B.R.V., Darapureddi, V.K., Rao, B.V., & Knypiński, Ł. (2023). A review of distribution system state estimation methods and their applications in power systems. Electronics, 12 (3), 603. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics12030603.

8. Ledesma, P., Arredondo, F., & Moreno, M.Á. (2023). Adapting ENTSO-E network data for power system simulation. In 2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe) (pp. 1–5). DOI: https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194624.

9. Li, J., Chen, Z., Cheng, L., & Liu, X. (2022). Energy data generation with Wasserstein deep convolutional generative adversarial networks. Energy, 257, 124694. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124694.

10. Benti, N.E., Chaka, M.D., & Semie, A.G. (2023). Forecasting renewable energy generation with machine learning and deep learning: Current advances and future prospects. Sustainability, 15 (7), 7087. DOI: https://doi.org/10.3390/su15097087.

11. Zhou, L., Zhang, Y., Liu, S., Li, K., Li, C., Yi, Y., & Tang, J. (2020). Consumer phase identification in low-voltage distribution network considering vacant users. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 121, 106079. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106079.

12. Tesla. Autobidder. Retrieved from https://www.tesla.com/support/energy/tesla-software/autobidder.

13. Cao, D., et al. (2020). Reinforcement learning and its applications in modern power and energy systems: A review. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 8 (6), 1029–1042. DOI: https://doi.org/10.35833/MPCE.2020.000552.

14. GridKit: European and North-American extracts. Retrieved from https://zenodo.org/records/47317.

15. Lin, C., et al. (2023). Knowledge graph completion for power grid main equipment using pretrained language models. In D. S. Huang, P. Premaratne, B. Jin, B. Qu, K. H. Jo, & A. Hussain (Eds.), Advanced Intelligent Computing Technology and Applications. ICIC 2023. Lecture Notes in Computer Science (Vol. 14089). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-4752-2_68.

16. Beinert, D., Holzhüter, C., Thomas, J. M., & Vogt, S. (2023). Power flow forecasts at transmission grid nodes using graph neural networks. Energy and AI, 14, 100262. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyai.2023.100262.

УДК 004.42:004.8
DOI: https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-06

ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ФЕЙКОВИХ НОВИН

Джоші А., *Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Інститут комп'ютерних технологій, Київ, Україна. https://orcid.org/0009-0003-7487-2354, arturjoshi.mailbox@gmail.com*

Павленко В. І.*, к.ф.-м.н., доц., Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Інститут комп'ютерних технологій, Київ, Україна. https://orcid.org/0000-0002-3958-0415, pavlenko.v@i.ua*

Анотація. *У статті досліджено ефективність різних моделей машинного навчання для класифікації фейкових текстових новин. Розглянуто такі моделі: наївний Баєс, модель k-найближчих сусідів (kNN), модель опорних векторів (SVM) та модель випадкового лісу. Особливу увагу приділено впливу попередньої обробки даних, зокрема оверсемплінгу та використанню різних векторизаторів, на продуктивність моделей. У контексті наївного Баєса досліджується ефект згладжування на результати класифікації, визначаючи оптимальні параметри для поліпшення точності моделі. Для моделі kNN аналізується вплив кількості сусідів (k) на точність моделі, що дає змогу визначити найбільш відповідний параметр для даного завдання. Для моделі опорних векторів (SVM) випробувано різні перетворення, такі як лінійне, радіально-базисне функціональне (РБФ) та сигмоїдальне, із метою оцінки їхнього впливу на класифікацію текстових новин. Для випадкового лісу проведено аналіз того, як кількість дерев впливає на загальну ефективність моделі, що дає змогу знайти баланс між точністю та швидкістю навчання. Також розглянуто вплив різних методів векторизації тексту, таких як TF-IDF та CountVectorizer, на продуктивність моделей. Зокрема, проведено аналіз, як оверсемплінг впливає на точність моделей, даючи змогу краще справлятися з дисбалансом класів у даних. Результати дослідження надають важливу інформацію про оптимальні налаштування та підходи до попередньої обробки даних для поліпшення точності класифікації новин на достовірність. Отримані висновки можуть бути корисними для дослідників та практиків у галузі обробки природної мови та машинного навчання, які займаються розробленням систем для виявлення фейкових новин. Робота також підкреслює важливість ретельного вибору моделей та їхніх параметрів залежно від специфіки даних та поставлених завдань.*

Ключові слова: *класифікація текстових новин, моделі машинного навчання, попередня обробка даних, ефективність моделей машинного навчання.*

COMPARISON OF MACHINE LEARNING METHODS FOR FAKE NEWS DETECTION

Artur Joshi, *Open International University of Human Development «Ukraine» Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0009-0003-7487-2354, arturjoshi.mailbox@gmail.com*

Volodymyr Pavlenko*, Ph.D., Ass. Prof., Open University of Human Development «Ukraine», Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0002-3958-0415, pavlenko.v@i.ua*

Abstract. *The paper examines the effectiveness of various machine learning models for the classification of fake text news. The following models are reviewed: Naive Bayes, k-nearest neighbors (kNN), support vector model (SVM), and random forest model. Special attention is paid to the impact of data preprocessing on the performance of models, in particular oversampling and the usage of various vectorizers. In the context of naive Bayes, the effect of smoothing on the classification effectiveness is investigated, determining the optimal parameters to improve the accuracy of the model. For kNN, the influence of the number of neighbors (k) on the accuracy of the model is analyzed, which allows determining the most appropriate parameter for this task. For the support vector model (SVM), various kernel functions such as linear, radial basis functional (RBF) and sigmoidal have been tested in order to evaluate their impact on text news classification. For a random forest, an analysis of how the number of trees affects the overall performance of the model is executed, which allows finding a balance between accuracy and learning speed. The impact of different text vectorization methods, such as TF-IDF and CountVectorizer, on the performance of the models is also evaluated. In particular, an analysis was made to investigate how oversampling affects the accuracy of the models, allowing to better cope with the imbalance of*

classes in the data. The research results provide valueable information about optimal settings and data preprocessing approaches to improve the accuracy of news classification for authenticity. The obtained conclusions can be useful for researchers and practitioners in the field of natural language processing and machine learning, who are engaged in the development of systems to detect fake news. The work also emphasizes the importance of careful selection of models and their parameters depending on the specifics of the data and tasks.

Key words: *text news classification, machine learning models, data preprocessing, machine learning models efficiency.*

Вступ

У сучасному інформаційному просторі фейкові новини стали серйозною проблемою, особливо в Україні, де дезінформація може мати далекосяжні наслідки як для суспільства, так і для держави. Вплив фейкових новин на громадську думку та політичні процеси потребує ефективних інструментів для їх виявлення та класифікації. У цьому контексті машинне навчання виступає потужним засобом для автоматизованого аналізу та розпізнавання неправдивої інформації.

Для поліпшення ефективності автоматизованого аналізу та розпізнавання фейкових новин важливо порівняти різні методи машинного навчання для класифікації, зокрема наївного Баєсового класифікатора, алгоритму k-найближчих сусідів (KNN), методу опорних векторів (SVM) та випадкового лісу (Random Forest). Варто проаналізувати ефективність кожного фз цих методів на основі низки критеріїв, таких як точність, F-міра, чутливість.

На ефективність вищезгаданих алгоритмів можуть впливати різні чинники, такі як формат та попередня обробка вхідних даних, а також власні параметри алгоритмів. Варто зазначити, що однакова зміна до попередньої обробки вхідних даних може позитивно впливати на одні алгоритми і негативно – на інші, тому важливо проаналізувати цей вплив, а також дати йому кількісну оцінку. Також кожен з алгоритмів має власні параметри, підбір яких впливає на ефективність виконання конкретно взятого завдання.

Виконання досліджень

Машинне навчання – це галузь штучного інтелекту, яка займається розробленням алгоритмів і моделей, що дають змогу комп'ютерам навчатися з даних і робити прогнози або приймати рішення без явного програмування для виконання конкретних завдань. Основна ідея машинного навчання полягає у тому, що система може автоматично покращувати свою продуктивність шляхом аналізу великої кількості даних, знаходження закономірностей та використання цих закономірностей для майбутніх прогнозів або класифікацій. Основними видами машинного навчання є кероване та некероване навчання. За умови наявності якісного набору даних кероване навчання є потужним інструментом для аналізу як тексту в цілому, так і для класифікації тексту за певними критеріями.

До керованих методів машинного навчання відносять наївний Баєсовий класифікатор (Naive Bayes), алгоритм k-найближчих сусідів (kNN), метод опорних векторів (SVM) та випадковий ліс (Random Forest). Ці алгоритми відіграють ключову роль у задачах класифікації та прогнозування. Наївний Баєс базується на теоремі Байєса і передбачає незалежність ознак, що робить його швидким та ефективним для великих наборів даних, проте він може бути менш точним у випадках складних залежностей між ознаками. Алгоритм k-найближчих сусідів здійснює класифікацію, порівнюючи тестовий зразок із k найближчими зразками з навчального набору, що робить його простим у реалізації, по суті, він не вимагає навчання як такого, проте є ресурсоємним для великих даних. Метод опорних векторів (SVM) використовує гіперплощини для розділення класів у багатовимірному просторі, що дає йому змогу ефективно працювати з багатомірними даними та складними межами класифікації. Випадковий ліс, який складається з множини дерев рішень, є потужним методом завдяки своїй здатності знижувати вплив перенавчання, однак він може вимагати значних обчислювальних ресурсів.

Під час розгляду алгоритмів класифікації текстових даних у моделях машинного навчання важливо враховувати те, як репрезентується текст у вектори, що дають змогу алгоритмам обробляти ці дані. Текстові дані у найпростішому вигляді уявляються у вигляді n-вимірного вектору X, де n – довжина словника, Xi – кількість появ і-го слова у даному тексті. Словник формується під час тренування моделі і складається з усіх слів, що зустрічалися в тренувальному наборі даних. Очевидно, що набір даних потребує попередньої обробки перед тренуванням, оскільки необхідно виключити вплив лінгвістичних особливостей певної природньої мови на результати класифікації. Зазвичай для цих цілей увесь текст зводиться до нижнього регістру, прибираються знаки пунктуації та проводиться стемінг – процес скорочення слова до основи шляхом відкидання допоміжних частин, таких як закінчення чи суфікс. Таким чином, вектор X складається з n цілочисельних елементів xi, які є кількістю разів, з якою і-е слово зустрічається в тексті. У разі керованих методів машинного навчання кожен елемент набору даних містить у собі клас Yk, до якого належить даний елемент.

Баєсів класифікатор базується на теоремі Баєса, що визначає ймовірність певної події за умови істинності іншої взаємопов'язаної події.

$$P(A|B)=\frac{P(B|A)*P(A)}{P(B)}\ , \tag{1}$$

де $P(B|A)$ – імовірність події *B* за умови істинності події *A, P(A), P(B)* – імовірності настання подій *A* та *B* відповідно.

Нехай Y_k – подія, що визначає приналежність елементу набору даних до класу *k*. Застосувавши теорему Баєса для побудови класифікатора, отримуємо:

$$P(Y_k|x_1,x_2,\ldots,x_n)=\frac{P(x_1,x_2,...,x_n|Y_k)*P(Y_k)}{P(x_1,x_2,...,x_n)} \tag{2},$$

$$P(Y_k|x_1,x_2,\ldots,x_n)\propto P(x_1,x_2,...,x_n|Y_k)*P(Y_k) \tag{3},$$

$$P(Y_k|x_1,x_2,\ldots,x_n)\propto P(x_1|Y_k)*P(x_2|Y_k)*\ldots P(x_n\,|\,Y_k)*P(Y_k) \tag{4}$$

Отже, імовірність того, що даний вектор належить класу Y_k, пропорційна ймовірності появи цього класу в цілому і помножена на умовну ймовірність приналежності кожного елементу вектору до цього класу. Із цього одразу випливає особливість Баєсового класифікатора, яка полягає у тому, що нерівномірний розподіл класів у тренувальному наборі даних може впливати на результат класифікації, оскільки чим частіше зустрічається певний клас у тренувальному наборі даних, тим частіше класифікатор буде тяжіти до цього класу в тестовому наборі [2]. Це особливо важливо для класифікації текстових фейкових новин, оскільки для коректної класифікації фейкових новин необхідно, щоб кількість фейкових новин була приблизно рівною кількості правдивих новин. Якщо набір даних не є однорідним, існують техніки, за допомогою яких можна зменшити вплив цього ефекту, котрі будуть описані далі.

Метод *k* найближчих сусідів ґрунтується на ідеї, що приналежність даного елемента набору даних до певного класу визначається дистанцією цього елемента до елементів із тренувального набору. Як дистанція зазвичай береться евклідова відстань.

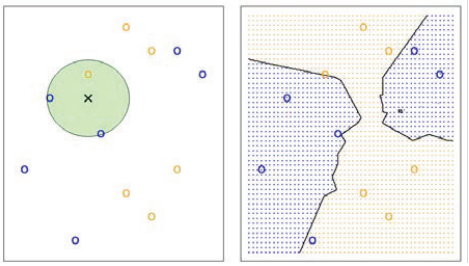


Рис. 1. Двовимірна модель *k* найближчих сусідів

На рис. 1 зображено приклад роботи класифікатора для 2-вимірного випадку. Аналогічно можна побудувати n-вимірний класифікатор тексту, де n – довжина словника. Очевидно, що дана модель на відміну від Баєсового класифікатора не має залежності ефективності класифікації від розподілу класів у тренувальному наборі даних [3].

Метод опорних векторів (SVM) полягає у пошуку рівняння гіперплощини, що максимізує евклідову відстань до елементів різних класів. На рис. 2 зображено приклад класифікатора для 2-вимірного простору.

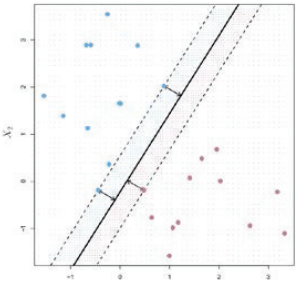


Рис. 2. Двовимірна модель опорних векторів

Варто зауважити, що метод опорних векторів потребує додаткової попередньої обробки даних, якщо межі класів не є лінійними [4].

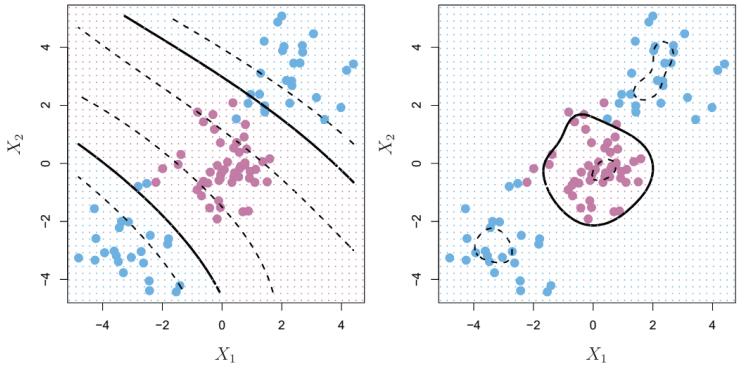


Рис. 3. Попередня обробка набору даних для моделі опорних векторів

У такому разі необхідно здійснити перехід із n-мірного простору до *n+1* мірного простору за допомогою певного відображення $K(x_i, x_i')$.

Метод випадкового лісу – це ансамблевий алгоритм машинного навчання, який використовується для задач класифікації та регресії. Він складається з множини дерев рішень і базується на принципі побудови кількох дерев рішень та об'єднання їх результатів. Для кожного вузла дерева вибирається випадкова підмножина ознак замість використання всіх ознак. Це додатково знижує кореляцію між деревами і допомагає уникнути перенавчання. Для задачі класифікації новий зразок проходить через кожне дерево, і кожне дерево дає свій прогноз класу. Кінцевий прогноз визначається голосуванням більшості.

Рис. 4. Метод випадкового лісу

Для порівняння ефективності різних моделей машинного навчання використовуються різноманітні метрики. Перш ніж розглянути їх, необхідно ввести поняття матриці помилок.

Таблиця 1

Можливі результати бінарної класифікації

	y = 1	y = 0
$y_0 = 1$	Істинно позитивні (True Positive, TP)	Хибно позитивні (False Positive, FP)
$y_0 = 0$	Хибно негативні (False Negative, FN)	Істинно негативні (True Negative, TN)

Найпростішою метрикою є точність – частка правильних відповідей алгоритму в цілому. Потрібно зазначити, що дана метрика не є репрезентативною у разі тренувальних наборів даних із нерівними класами.

$$accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \tag{5}$$

Більш репрезентативними метриками є прецизійність (precision) по кожному класу окремо та повнота.

$$precision = \frac{TP}{TP + FP} \tag{6},$$

$$recall = \frac{TP}{TP + FN} \tag{7}$$

Прецизійність є часткою елементів, що були класифіковані до певного класу і при цьому дійсно є елементами цього класу. Повнота показує, яку частку елементів класу знайшла модель.

Для об'єднання обох метрик в одну агреговану метрику використовується f-міра.

$$F_\beta = \left(1+\beta^2\right) * \frac{precision * recall}{\left(\beta^2 * precision\right) + recall} \quad (8)$$

Для поліпшення ефективності класифікаційних моделей варто дослідити вплив як попередньої обробки вхідних даних, так і власних параметрів моделей. У своїй роботі Ahmed H. Aliwy та Esraa H. Abdul Ameer запропонували низку поліпшень для збільшення точності моделей, таких як використання різних перетворень для моделі SVM, використання різних мір дистанції для моделі KNN, а також видалення дублікатів слів для наївного Баєсового класифікатора [1]. Для більш репрезентативної оцінки впливу вищезазначених чинників необхідно також дослідити кількісні характеристики й інших метрик, таких як прицизійнсть, повнота та f-міра.

Завданням даного дослідження є проведення експерименту задля оцінки впливу попередньої обробки вхідних даних і власних параметрів на ефективність моделей класифікації текстових новин українською мовою. Як вхідні дані взято 10 735 текстових новин з інформаційних телеграм-каналів, які розміщені на вебресурсі Kaggle [5]. Даний набір даних містить 8 237 достовірних і 2 498 фейкових новин.

Вхідний набір даних містить у собі необроблені дані в оригінальному вигляді. Задля поліпшення ефективності класифікаційних моделей необхідно виконати попередню обробку вхідних даних. До основних технік обробки вхідних даних відносять фільтрацію стоп-слів, лематизацію та стемінг. Фільтрація стоп-слів є процесом, який видаляє з вхідного набору даних певні слова, що містяться у заданому словнику. Лематизація – це комплексний підхід, що базується на визначенні основи слова. Першим кроком цього алгоритму є визначення частин мови у реченні. На другому кроці до слова застосовуються певні правила відповідно до частини мови. У результаті лематизації вхідне слово зводиться до слова у його базовій формі, наприклад інфінітив для дієслова або називний відмінок для іменника. Стемінг є процесом відкидання суфіксів та префіксів, завдяки чому є швидшим за лематизацію. Як попередню обробку вхідних даних було вибрано фільтрацію стоп-слів [6] та стемінг. На рисунках зображено частотні розподіли слів до та після попередньої обробки. Попередня обробка дала змогу вирівняти розподіл частот різних слів, а також прибрати несуттєві частини мови, що могли значно спотворити результати класифікації.

Рис. 5. Діаграма частотності слів до фільтрації

Рис. 6. Діаграма частотності слів після фільтрації

Важливою технікою попередньої обробки даних є оверсемплінг. Оверсемплінг – це метод боротьби з дисбалансом класів у наборах даних для машинного навчання. Коли одна з категорій

або класів у тренувальному наборі даних значно переважає інші, це може призвести до того, що модель навчиться ігнорувати менш представлені класи. Така модель буде добре працювати на переважаючому класі, але погано на рідкісних класах. Оверсемплінг передбачає збільшення кількості елементів менш представлених класів, щоб збалансувати кількість елементів для кожного класу. Це може бути досягнуто шляхом дублювання наявних елементів або створення нових синтетичних елементів.

Наступним кроком попередньої обробки вхідних текстових даних є векторизація. Векторизація є ключовим процесом у машинному навчанні та обробці природної мови, який перетворює текстові дані на числові вектори, що можуть бути оброблені алгоритмами машинного навчання. Оскільки алгоритми машинного навчання працюють із числовими даними, векторизація дає змогу представити текст у вигляді числових значень, зберігаючи інформацію про структуру та зміст тексту. Основна мета векторизації полягає у тому, щоб створити числові вектори, які відображають зміст та контекст тексту. Це досягається шляхом кодування кожного слова або фрази у вигляді вектора фіксованої довжини. Ці вектори можуть бути дуже простими, наприклад такими, що відображають наявність або відсутність слова у документі, або складнішими, такими як контекстуальні вектори, що враховують взаємозв'язки між словами у тексті. Векторизація тексту вирішує кілька важливих завдань. По-перше, вона дає змогу обробляти текстові дані на основі їхніх частотних характеристик, таких як частота появи слів у документі або зворотна частота документа, що знижує вплив загальних слів і підвищує значущість специфічних термінів. По-друге, вона дає змогу алгоритмам машинного навчання виявляти семантичні та синтаксичні патерни у тексті, що важливо для задач, пов'язаних із розумінням природної мови, таких як класифікація текстів, аналіз настроїв та пошук інформації.

Існує багато методів векторизації тексту, основним із яких є CountVectorizer, який перетворює колекцію текстових документів на матрицю термін-документ. У цій матриці кожен рядок відповідає одному документу, а кожен стовпець відповідає одному слову зі словника, створеного на основі всіх документів. Значення в матриці вказують кількість разів, коли слово з'являється у відповідному документі. Term Frequency-Inverse Document Frequency Vectorizer – це вдосконалений метод векторизації тексту, який ураховує не лише кількість появ слова у документі, а і його частотність у наборі даних у цілому. Це досягається шляхом обчислення TF-IDF значень для кожного слова. TF вимірює частоту появи слова в документі. Вона розраховується для кожного слова у кожному документі окремо. Особливістю TFIDF векторизації є зменшення ваги слів, що часто зустрічаються у тексті, та зменшення впливу шуму.

$$TF(t,d) = \frac{Кількість\ появ\ слова\ t\ в\ елементі\ d}{Загальна\ кількість\ слів\ в\ елементі\ d} \tag{9}$$

IDF оцінює рідкість слова в корпусі документів. Слова, які часто зустрічаються у багатьох документах, отримують меншу вагу.

$$IDF(t,d) = \log\left(\frac{N}{|d \in D : t \in d|}\right) \tag{10}$$

N – загальна кількість документів у наборі даних.

Розглянемо вплив оверсемплінгу та вибору векторизатора на ефективність вищезгаданих моделей.

Таблиця 2

Вплив попередньої обробки даних на ефективність моделей

		З оверсемпінгом	**Без оверсемплінгу**	**CountVectorizer**	**TFIDF Vectorizer**
Наївний Баєс	Точність	78,80%	72,60%	77,80%	77,80%
	Прецизійність (фейкові)	53,80%	44,20%	52,20%	52,20%
	Повнота (фейкові)	54,60%	71,80%	49,80%	50,80%
	F-міра (фейкові)	54,20%	54,80%	51,00%	51,40%
	Прецизійність (достовірні)	86,40%	89,60%	85,00%	85,00%
	Повнота (достовірні)	85,60%	72,60%	86,40%	85,80%
	F-міра (достовірні)	86,20%	80,20%	86,00%	85,60%

Продовження таблиці 2

Метод k найближчих сусідів	Точність	74,00%	77,20%	58,60%	74,60%
	Прецизійність (фейкові)	35,40%	58,40%	32,80%	35,80%
	Повнота (фейкові)	14,60%	0,80%	44,60%	14,40%
	F-міра (фейкові)	21,00%	1,60%	29,20%	20,60%
	Прецизійність (достовірні)	78,00%	77,20%	80,20%	79,00%
	Повнота (достовірні)	91,80%	100,00%	63,60%	92,00%
	F-міра (достовірні)	84,40%	87,00%	64,40%	85,00%
Метод опорних векторів	Точність	83,20%	80,00%	84,40%	83,80%
	Прецизійність (фейкові)	88,60%	98,60%	92,20%	89,00%
	Повнота (фейкові)	33,80%	15,40%	37,60%	35,80%
	F-міра (фейкові)	49,20%	26,80%	53,20%	50,60%
	Прецизійність (достовірні)	82,80%	79,20%	83,60%	83,20%
	Повнота (достовірні)	98,60%	100,00%	99,00%	98,60%
	F-міра (достовірні)	89,80%	88,20%	90,60%	90,40%
Випадковий ліс	Точність	91,20%	90,80%	90,80%	91,20%
	Прецизійність (фейкові)	90,20%	95,00%	91,40%	89,20%
	Повнота (фейкові)	70,20%	63,00%	68,60%	68,80%
	F-міра (фейкові)	79,00%	75,80%	78,40%	77,80%
	Прецизійність (достовірні)	91,40%	89,80%	91,00%	91,40%
	Повнота (достовірні)	97,80%	99,00%	98,00%	97,60%
	F-міра (достовірні)	94,40%	93,80%	94,60%	94,40%

Із результатів, поданих у таблиці, можна зробити такі висновки:

1. Для всіх моделей, окрім методу k найближчих сусідів, оверсемплінг підвищує загальну точність на 0,4–6,2%. Значний вплив оверсемплінгу на модель наївного Баєса пояснюється, передусім, більш рівномірним розподілом елементів обох класів у тренувальному наборі та, як наслідок –збільшенням апріорної ймовірності меншого класу.

2. Оверсемплінг має позитивний вплив на прецизійність та повноту моделі наївного Баєса.

3. Модель k найближчих сусідів практично не здатна знаходити фейкові новини за умови відсутності оверсемплінгу. Це може пояснюватися тим, що оверсемплінг, дублюючи точки, що репрезентують елементи з класу фейкових новин, збільшує вагу цієї точки під час класифікації.

4. Оверсемплінг позитивно впливає на пошук фейкових новин, використовуючи модель опорних векторів. Збалансування кількості зразків кожного класу допомагає моделі знайти більш точну гіперплощину, збільшує кількість підтримуючих векторів і знижує ризик перенавчання.

5. Прецизійність та повнота моделі випадкового лісу практично не зазнають впливу оверсемплінгу. Це може пояснюватися тим, що під час побудови кожного дерева випадковий ліс випадково вибирає підмножину ознак для розділення вузлів. Також рішення випадкового лісу базується на голосуванні багатьох дерев. Навіть якщо окремі дерева можуть бути схильні до домінування одного класу, загальний результат голосування буде менш упередженим завдяки різноманітності дерев.

6. Обидва векторизатори мають приблизно однакові результати для моделі наївного Баєса, опорних векторів та випадкового лісу. Це може буде зумовлено тим, що ці моделі відносно стабільні до різних методів векторизації, оскільки їхні алгоритми базуються на відносних частотах або вагових пропорціях слів у документах. TF-IDF фактично масштабує частоти слів, але це не змінює відносні пропорції настільки, щоб суттєво вплинути на кінцеві результати моделі.

7. Використання TFIDF-векторизатору для методу k найближчих сусідів значно підвищує точність та повноту пошуку саму достовірних новин. Це може бути зумовлено тим, що TFIDF-векторизатор ураховує не лише частоту слів, але й їх важливість, зменшуючи вагу часто вживаних слів і підвищуючи вагу рідкісних. Це змінює відстані між текстовими векторами і може суттєво вплинути на результати моделі kNN, покращуючи її здатність до класифікації.

Також варто проаналізувати вплив власних параметрів моделей на їх ефективність. Наприклад, параметр α в наївному Баєсі використовується для додаткової регуляризації (зглажування). Його основна мета – уникнути проблеми нульової ймовірності для слів, які не зустрічаються в тренувальних даних для певного класу. Без регуляризації, якщо слово ніколи не з'являється в тренувальних даних для певного класу, його ймовірність буде оцінюватися як нуль, що призведе до того, що обчислювана ймовірність належності нового елементу до цього класу також буде нульовою, навіть якщо всі інші ознаки сильно вказують на цей клас.

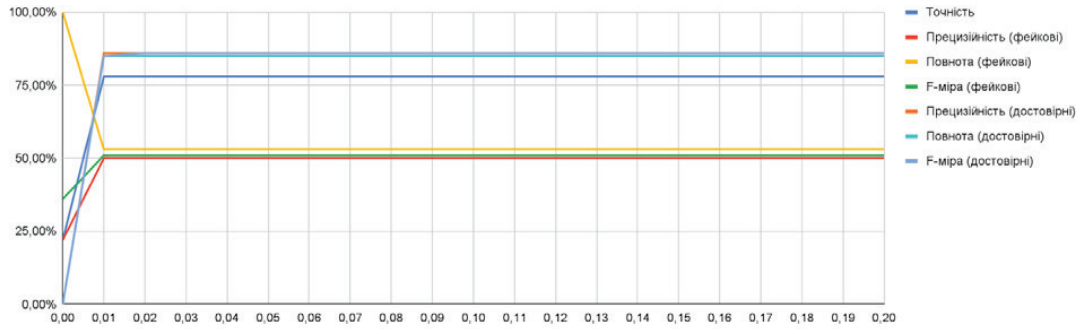


Рис. 7. Вплив регуляризації на ефективність моделі наївного Баєса

На діаграмі показана залежність метрик ефективності моделі наївного Баєса від параметру альфа. Із графіку випливає, що за значення альфа, що дорівнює 0, модель класифікує всі елементи набору даних як фейкові. Використавши навіть невелике ненульове значення alpha, можна привести модель до робочого стану. Незважаючи на те що за дуже великих значень альфа-метрики трохи покращуються, не рекомендується використовувати великі значення, оскільки це може зробити модель надто загальною, оскільки ймовірності будуть надто згладжені, і різниця між частотами слів для різних класів буде зменшена. У результаті модель може втратити здатність ефективно розрізняти класи на основі важливих слів.

Модель k найближчих сусідів має низку параметрів, що здатні впливати на ефективність моделі: k – кількість найближчих точок, до яких рахується відстань; однакові вагові коефіцієнти, або пропорційні відстані; використання манхетенської абревклідової відстані.

Із графіку можна помітити, що після k = 5 відзначається різке зменшення якості класифікації фейкових новин. Також експерименти не показали, що використання манхетенської відстані замість евклідової або пропорційні вагові коефіцієнти суттєво позитивно впливають на якість класифікації.

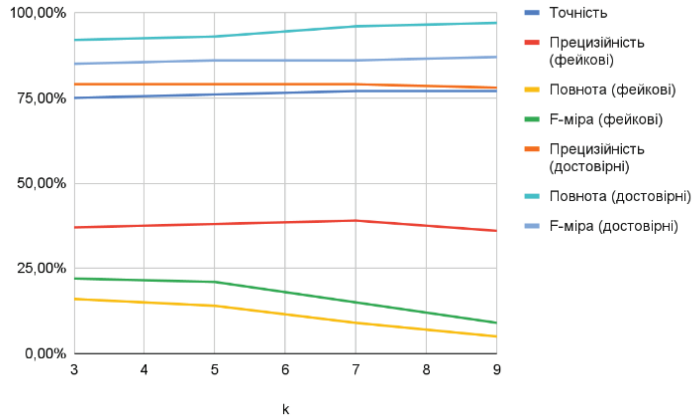


Рис. 8. Вплив параметра k на ефективність моделі k найближчих сусідів

Ефективність моделі опорних векторів має високу залежність від відображення, що використовується за переходу між векторними просторами. Із наступного графіку можна помітити, що для задач класифікації текстових новин найкраще підходить сигмоїдна функція. Зменшення прецизійності класифікації фейкових новин компенсується повнотою, що відображено в агрегованій метриці F-міра.

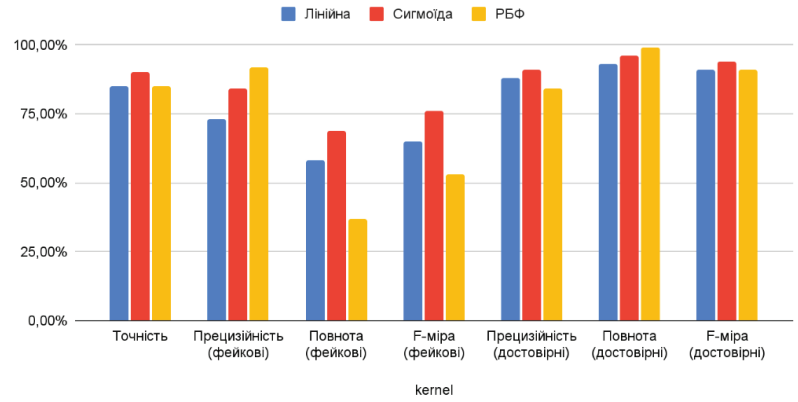


Рис. 9. Залежність ефективності моделі опорних векторів від вибраного перетворення

Ефективність моделі випадкового лісу значною мірою залежить від кількості дерев, що входять до його складу. Слід зауважити, що зі збільшенням кількості дерев збільшується час тренування та класифікації. Із графіку нижче можна зробити висновок, що 50 дерев є оптимальною кількістю для даної задачі. Ураховуючи, що час тренування моделі лінійно зростає зі збільшенням кількості дерев, можна зробити висновок про недоцільність подальшого збільшення кількості дерев у випадковому лісі.

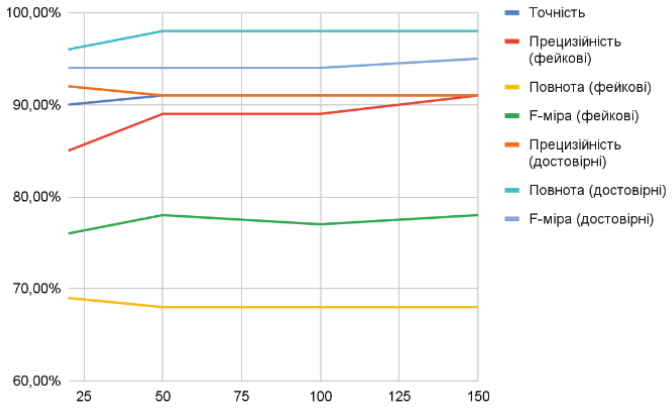


Рис. 10. Залежність ефективності моделей від кількості дерев у моделі випадкового лісу

Отже, додавання нових дерев зменшує варіативність результатів за рахунок агрегації, але після досягнення певної кількості дерев цей ефект стає незначним, оскільки більша частина варіативності вже знижена. Кожне додаткове дерево приносить дедалі менше нової інформації, оскільки більшість важливих патернів вже було враховано попередніми деревами. Після досягнення певного порогу додавання нових дерев майже не впливає на точність, оскільки нові дерева вносять мінімум нової інформації. Зі збільшенням кількості дерев зростають обчислювальні витрати для тренування та прогнозування. Із певного моменту додавання нових дерев не виправдовується через незначне поліпшення точності та збільшення часу обробки.

Висновки

У рамках дослідження було проведено огляд моделей машинного навчання для класифікації текстових новин на предмет достовірності. Розглянуто наївний Баєсів класифікатор, модель k найближчих сусідів, модель опорних векторів і модель випадкового лісу. Розглянуто методи попередньої обробки даних, а саме: фільтрацію, стемінг, оверсемплінг та векторизацію. Проведено аналіз впливу оверсемплінгу та векторизації на якість класифікації, а також вплив власних параметрів моделей на їх ефективність. Було визначено таке:

1. Найефективнішою моделлю для визначення фейкових новин є модель випадкового лісу. Дана модель показала ефективність визначення фейкових новин рівну 79% за метрикою F-міра та 94,4% для достовірних новин. Дещо меншу ефективність, на 15% за метрикою F-міра для достовірних та фейкових новин, показала модель наївного Баєса. Модель k найближчих сусідів має достатньо низьку ефективність класифікації фейкових новин – 21% за метрикою F-міра.

2. Найбільш значний вплив оверсемплінгу прослідковується для моделі наївного Баєса за рахунок його високої залежності від апріорної ймовірності класів та моделі опорних векторів за рахунок пошуку більш точної гіперплощини. Вплив оверсемплінгу на модель випадкового лісу менше 1% за метрикою F-міра для достовірних та фейкових новин.

3. Вплив використання TFIDF-векторизатора порівняно з простим CountVectorizer є не більше 2% за метрикою F-міра для достовірних та фейкових новин. Використання TFIDF-векторизатора покращує визначення достовірних новин на 20% за метрикою F-міра для моделі k найближчих сусідів за рахунок зменшення ваги часто вживаних слів, проте погіршує визначення фейкових новин на 8%.

4. Додаткова регуляризація є обов'язковою для моделі наївного Баєса, хоча і не вимагаються високі значення цього параметра: використання значень більших за 0,01 не призводять до підвищення ефективності класифікації.

5. Модель k найближчих сусідів не демонструє росту ефективності за збільшення кількості точок, що беруть участь у класифікації. Найвищу ефективність дана модель показує за значень k від 3 до 5.

6. Сигмоїда показала найкращі показники ефективності як відображення для моделі опорних векторів.

7. Модель випадкового лісу демонструє оптимальні показники ефективності за досить невисоких значень кількості дерев. Так, за класифікації набору даних обсягом близько 10 000 новин випадковий ліс із 50 дерев показує ефективність 80% за метрикою F-міра для визначення фейкових новин та 94% – для визначення достовірних новин.

Література

1. Ahmed H. Aliwy, Esraa H. Abdul Ameer. Comparative Study of Five Text Classification Algorithms with their Improvements. *International Journal of Applied Engineering Research* Vol. 12, 2017, Number 14, ISSN 0973-4562. pp. 4309-4319

2. Jason D.M. Rennie. Improving Multi-class Text Classification with Naive Bayes. *Massachusetts institute of technology – artificial intelligence laboratory.* 2001.

3. Songbo Tan. An effective refinement strategy for KNN text classifier. *Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences.* 2006.

4. Simon Tong, Daphne Koller. Support Vector Machine Active Learning with Applications to Text Classification. *Computer Science Department Stanford University.* 2001.

5. Набір даних фейкових та достовірних українських новин. URL: https://www.kaggle.com/datasets/zepopo/ukrainian-fake-and-true-news

6. Набір стоп-слів української мови. URL: https://github.com/skupriienko/Ukrainian-Stopwords/blob/master/stopwords_ua.txt

References

1. Ahmed H. Aliwy, Esraa H. Abdul Ameer. Comparative Study of Five Text Classification Algorithms with their Improvements. *International Journal of Applied Engineering Research* Vol. 12, 2017, Number 14, ISSN 0973-4562. pp. 4309-4319

2. Jason D.M. Rennie. Improving Multi-class Text Classification with Naive Bayes. *Massachusetts institute of technology – artificial intelligence laboratory.* 2001.

3. Songbo Tan. An effective refinement strategy for KNN text classifier. *Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences.* 2006.

4. Simon Tong, Daphne Koller. Support Vector Machine Active Learning with Applications to Text Classification. *Computer Science Department Stanford University.* 2001.

5. Ukrainian fake and true news dataset. URL: https://www.kaggle.com/datasets/zepopo/ukrainian-fake-and-true-news

6. Ukrainian stopwords dataset. URL: https://github.com/skupriienko/Ukrainian-Stopwords/blob/master/stopwords_ua.txt

УДК 04.416.6
DOI: https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-07

АРХІТЕКТУРА ЕФЕКТИВНОЇ CI/CD-СИСТЕМИ ДЛЯ ПРОГРАМНИХ РІШЕНЬ, ЗАСНОВАНИХ НА MSA

Загорулько А. В., *Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Київ, Україна. https://orcid.org/0009-0004-9478-5642, azago85@gmail.com*

Павленко В. І., *к. ф.-м. наук, Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Київ, Україна. https://orcid.org/0000-0002-3958-0415, pavlenko.v@i.ua*

Анотація. *Мікросервісна архітектура (MSA) здобула популярність завдяки своїй гнучкості, масштабованості та ефективності, але перехід на неї є складним та ресурсоємним процесом. Основні виклики включають зростання кількості сервісів та репозиторіїв коду, інфраструктурні витрати, підтримку конфігурацій для різних середовищ, керування залежностями між сервісами та використання різних платформ.*

У дослідженні пропонується архітектура ефективної системи неперервної збірки та розгортання (CI/CD), що вирішує зазначені проблеми і покращує весь цикл розроблення програмного забезпечення (SDLC). Основні принципи запропонованої архітектури включають модульність, використання відкритого набору специфікацій (API) та формування потоку подій. Модульність дає змогу виділити компоненти відповідно до задач SDLC, відкритий API забезпечує гнучкість інтеграції та оновлення, а потік подій забезпечує інформацію для аналізу повного SDLC продукту, створення метрик, системи реагування на надзвичайні ситуації та прозорого моніторингу. Саме потік подій є ключовою особливістю, що виокремлює запропоновану архітектуру ефективної CI/CD-системи серед наявних рішень управління програмними рішеннями, заснованими на MSA.

Кожен модуль CI/CD системи генерує події, які акумулюються для статистичного аналізу та побудови кореляційних моделей із використанням методів машинного навчання. Це дає змогу отримувати точні відповіді на системні питання, такі як вплив якості вимог на строки поставки продукту, відповідність архітектури системи вимогам, пошук причин помилок та вплив додаткових ресурсів на продуктивність системи.

Запропонована архітектура CI/CD-системи підвищує швидкість і якість розроблення, спрощуючи процеси оновлення та міграції на нову інфраструктуру, дає можливість аналізувати вплив змін на будь-якому етапі SDLC-продукту на його продуктивність, забезпечуючи конкурентні переваги на ринку розроблення програмного забезпечення.

Ключові слова: *мікросервіс, CI, CD, розгортання, машинне навчання, ML, SDLC.*

ARCHITECTURE OF AN EFFICIENT CI/CD SYSTEM FOR SOFTWARE SOLUTIONS BASED ON MSA

Anton Zahorulko, *Open International University of Human Development* «Ukraine», Kyiv, Ukraine. *https://orcid.org/0009-0004-9478-5642, azago85@gmail.com*

Volodymyr Pavlenko, *Ph.D., Open International University of Human Development «Ukraine», Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0002-3958-0415, pavlenko.v@i.ua*

Abstract. *Microservices architecture (MSA) has gained popularity due to its flexibility, scalability, and efficiency, but the migration to it is a complex and resource-intensive process. The main challenges include the increase in the number of services and code repositories, infrastructure costs, maintenance of configurations for different environments, management of dependencies between services, and the use of various platforms.*

This study proposes an architecture for an efficient continuous integration and deployment (CI/CD) system that addresses these issues and enhances the entire software development lifecycle (SDLC). The core principles of the proposed architecture include modularity, the use of an open set of specifications (API), and the formation of an event stream. Modularity allows the separation of components according to SDLC tasks, an open API ensures flexible integration and updates, and the event stream provides information for the analysis of the complete SDLC of a product, creation of metrics, emergency response systems, and transparent monitoring. The event stream is the key feature that distinguishes the proposed architecture of an efficient CI/CD system among existing solutions for managing MSA based software.

Each module of the CI/CD system generates events that are accumulated for statistical analysis and as the source to build correlation models using machine learning methods (ML). Such an approach allows one to obtain an accurate answer to the complex questions, such as the impact of requirements quality on product delivery timelines, the compliance of system architecture with requirements, identification of error causes, the impact of additional resources on system performance, etc.

The proposed CI/CD system architecture increases development speed and quality, simplifies the software product update and migration to new infrastructure stack, and enables the analysis of the impact of changes at any stage of the product's SDLC on its performance, providing competitive advantages in the software development market.

Key words: *microservice, CI, CD, deployment, machine learning, ML, SDLC.*

Вступ

Застосування мікросервісної архітектурі (MSA) є досить поширеною практикою для побудови програмних рішень в останні десятиліття. Такий успіх пов'язаний із тими перевагами, що надає використання MSA [1; 11; 12], основними з них є:

− розширені можливості масштабування;
− вищий рівень ізоляції помилок;
− підвищення ефективності розроблення продукту;
− підвищення гнучкості та швидкості розгортання продукту;
− збільшення економічної ефективності у цілому.

Упровадження MSA складається з двох складників:

− зміни архітектури продукту відповідно до принципів та практик MSA;
− перебудови циклу розроблення програмного забезпечення (SDLC) та CI/CD відповідно до архітектурних змін продукту.

Досить часто рівень складності другого складника є недооціненим або взагалі втрачається з поля зору під час проєктування та оцінки ресурсів за переходу на MSA.

Для оцінки кількісних і якісних змін, необхідних для адаптації наявних SDLC та CI/CD, варто врахувати такі чинники:

− збільшення кількості незалежних компонентів (сервісів) продукту, відповідно, і репозиторіїв вихідного коду;
− ускладнення процесу інтеграції та розгортання продукту;
− необхідність підтримувати конфігурацію кожного сервісу на кожному оточенні розгортання окремо;
− підвищення витрат на управління спільними бібліотеками вихідного коду та спільною інфраструктурою розгортання;
− необхідність поєднання в одному продукті компонентів різних інфраструктурних стеків (AWS-лямбд, Kubernetes-сервісів) [2].

Переважна більшість наявних CI/CD-систем має на меті автоматизувати рутинні операції для підвищення надійності та швидкості впровадження продукту у виробництво [7; 8], але вони лишають поза увагою інші частини SDLC, такі як розроблення вимог, проєктування, планування та моніторинг системи у виробництві. Для прикладу, буває досить важко локалізувати причину некоректної роботи системи, оскільки треба проаналізувати всю послідовність викликів сервісів, беручи до уваги, що помилка в одному сервісі може спричинити цілий каскад помилок у клієнтських сервісах [9]. Із погляду вимог проєктування та планування корисно мати змогу точної оцінки обсягів роботи та необхідних ресурсів, спираючись на вже розроблені сервіси та кількість ресурсів, витрачених на їх підтримку у виробництві.

Виконання досліджень

Розроблення архітектури ефективної CI/CD-системи

Мета цього дослідження – розробити ефективну CI/CD-систему, що дає змогу подолати проблеми, породжені особливостями MSA [3], та надати нові можливості, що якісно вплинуть на весь цикл SDLC.

Серед **функціональних вимог** до ефективної CI/CD системи можна виділити такі:

− інтеграція та розгортання продукту не залежить або має логарифмічну залежність відповідно до кількості його окремих складників;
− повністю автоматизована інтеграція та розгортання продукту на всіх оточеннях;
− моніторинг усіх фаз SDLC-продукту;
− прогнозований календар оновлень продукту;
− незалежність архітектури та технологічного стеку кожного окремого компонента від інших.

Поточне дослідження пропонує взяти за основу **архітектури** ефективної CI/CD-системи три основні складники: модульність, базування на відкритому набору специфікацій (API), формування потоку подій [3].

Модульність має на меті виділити компоненти CI/CD системи відповідно до фази SDLC та конкретної функціональності, що забезпечується модулем.

Рис. 1. Модульна структура ефективної CI/CD-системи

Підтримка відкритого **API** для кожного модуля дає можливість:

− розробляти модулі системи різними виробниками;

− полегшувати впровадження системи за рахунок можливості комбінування реалізації модулів під вимоги конкретної системи;

− незалежно оновлювати окремі компоненти системи.

Потік подій є ключовою особливістю архітектури ефективної CI/CD-системи. Його основне завдання – агрегувати в одному місці всі події, що відбуваються в системі та охоплюють увесь SDLC продукту – від створення вимог до функціонування системи у виробництві [3–6].

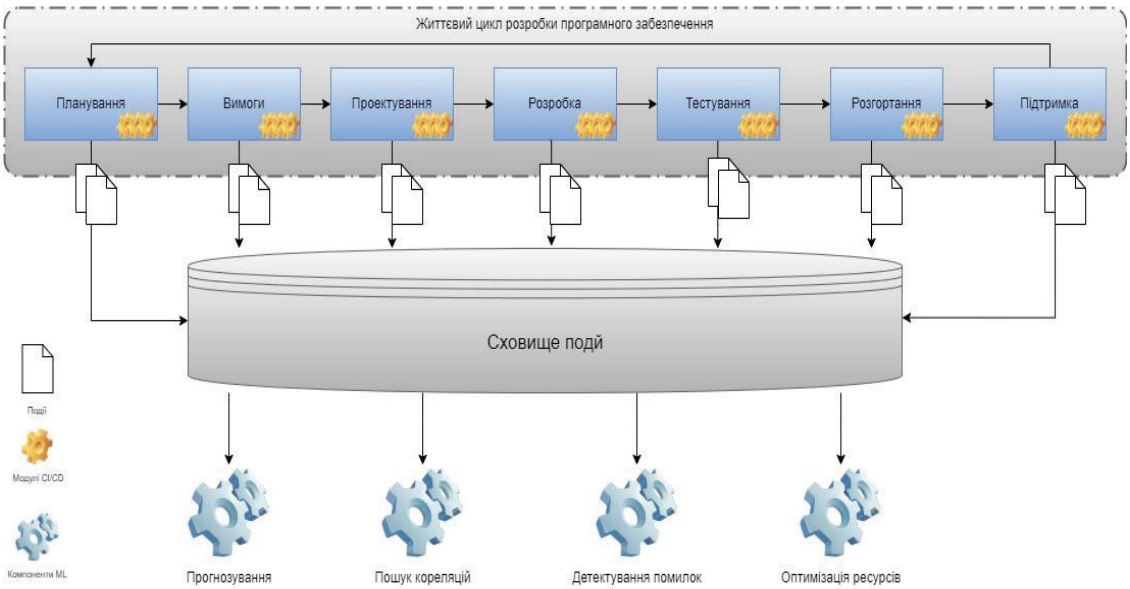


Рис. 2. Архітектура ефективної системи CI/CD

Кожен модуль системи продукує свій набір подій відповідно до API-модуля. Акумулюючи події від усіх модулів CI/CD-системи, пропонується формувати джерело достовірної інформації для статистичного аналізу даних, побудови кореляційних моделей із залученням методів машинного навчання [3].

Модель даних подій кожного компонента системи є фундаментом для подальшого аналізу стану системи та має відповідати таким вимогам:

− містити необхідну і достатню інформацію для аналізу роботи компонента;
− містити посилання на попередні події, що безпосередньо призвели до поточної події, таким чином зв'язуючи події між собою;
− містити унікальний ідентифікатор події;
− містити інформацію для забезпечення дедуплікації подій.

Запропонована архітектура дає змогу отримувати досить точні відповіді на питання, у яких можна поєднувати фази SDLC, команди розробки, ресурси оточення та роботу множини сервісів продукту у виробництві. Такий аналіз є недосяжним для поточних архітектур систем CI/CD. Можна навести приклади завдань, що вирішуються запропонованою архітектурою:

− вплив якості вимог на строки поставки системи у виробництво, якість роботи системи у виробництві та обсяг додаткових зусиль у фазі підтримки;
− відповідність архітектури системи поставленим вимогам, як то виявлення взаємозалежних сервісів, сервісів із великою кількістю помилок, вузьких місць системи, що впливають на її продуктивність;
− вплив термінів поставки системи у виробництво на якість її роботи;
− пошук функціоналу, що викликає більшість помилок у виробництві, та причини їх виникнення, ураховуючи всі фази SDLC та задіяні ресурси;
− аналіз впливу додаткового виділення обчислювальних ресурсів на продуктивність системи.

Подальший розвиток наведеної у даному дослідженні архітектури вбачається в додаванні зворотного зв'язку між модулями машинного навчання та системою, таким чином можна автоматично вирішувати знайдені проблеми без залучення оператора, наприклад:

− розгортати або відкочувати нову версію конкретного сервісу;
− оновлювати версії бібліотек та платформ, що використовуються у продукті;
− керувати строками поставки у виробництво, ураховуючи залежності між сервісами, командами розробки, змінами вимог тощо;
− керувати розгортанням або згортанням апаратних ресурсів виробництва відповідно до навантаження та вимог до продуктивності системи.

Висновки

Запропонована архітектура ефективної системи CI/CD для програмних продуктів, заснованих на архітектурі MSA, спрямована на вирішення не лише поточних проблем упровадження та функціонування MSA-систем, а й на суттєве розширення можливостей контролю та прогнозування процесів розроблення та підтримки таких систем у виробництві.

Створення масиву даних за допомогою потоку подій забезпечує основу для аналізу минулих, поточних та майбутніх станів продукту, використовуючи методи статистичного аналізу, прогнозування та машинного навчання.

Ці вдосконалення мають значно розширити та переосмислити завдання систем CI/CD, інтегруючи технології машинного навчання, а в майбутньому й інші технології штучного інтелекту для підвищення ефективності SDLC та загальної якості програмних рішень.

Література

1. Newman S., Building Microservices, 2nd Edition / Sam Newman. – O'Reilly Media, Inc., 2021. 617 p.
2. Davis A., Bootstrapping Microservices with Docker, Kubernetes, and Terraform / Ashley Davis. New York, USA: Manning Publications, 2021. 440 p.
3. Eramo R., Muttilo V., Berarrdinelli L., Bruneliere H., AIDOaRt: AI-augmented Automation for DevOps, a Model-based Framework for Continuous Development in Cyber-Physical Systems. [Electronic resource] / Conference: 24th Euromicro Conference on Digital System Design (DSD 2021), Palermo, Itally – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/353268043_AIDOaRt_AI-augmented_Automation_for_DevOps_a_Model-based_Framework_for_Continuous_Development_in_Cyber-Physical_Systems
4. Sabharwal N., Bhardwaj G., Hands-on AIOps Best Practices Guide to Implementing AIOps / Navin Sabharwal, Gaurav Bhardwaj. New York, USA: Apress, 2022. 259 p.
5. Josu Diaz de Arcaya, Ana-Isabel Torre-Bastida, Gorka Zarate, Raúl Miñón, Aitor Almeida, A Joint Study of the Challenges, Opportunities, and Roadmap of MLOps and AIOps: A Systematic Survey [Electronic resource] / October 2023ACM Computing Surveys 56(4):1–30 Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/374911984_A_Joint_Study_of_the_Challenges_Opportunities_and_Roadmap_of_MLOps_and_AIOps_A_Systematic_Survey
6. Pranjal Gupta, Harshit Kumar, Debanjana Kar, Karan Bhukar, Pooja Aggarwal, Prateeti Mohapatra, Learning Representations on Logs for AIOps [Electronic resource] / August 2023. Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/373298002_Learning_Representations_on_Logs_for_AIOps
7. Roozbeh Aghili, Heng Li, Foutse Khomh, Studying the characteristics of AIOps projects on GitHub [Electronic resource] / October 2023Empirical Software Engineering 28(6). Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/374810736_Studying_the_characteristics_of_AIOps_projects_on_GitHub
8. Saima Rafi, Muhammad Azeem Akbar, Sajjad Mahmood, Ahmed Alsanad, Abdulrahman Alothaim, Selection of DevOps best test practices: A hybrid approach using ISM and fuzzy TOPSIS analysis [Electronic resource] / March 2022 Journal of Software: Evolution and Process. Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/359164520_Selection_of_DevOps_best_test_practices_A_hybrid_approach_using_ISM_and_fuzzy_TOPSIS_analysis

9. Mingxu Jin, Aoran Lv, Yuanpeng Zhu, Zijiang Wen, Yubin Zhong, Zexin Zhao, Jiang Wu, Hejie Li, Hanheng He, Fengyi Chen, An Anomaly Detection Algorithm for Microservice Architecture Based on Robust Principal Component Analysis [Electronic resource] / December 2020IEEE Access PP(99):1–1. Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/347630664_An_Anomaly_Detection_Algorithm_for_Microservice_Architecture_Based_on_Robust_Principal_Component_Analysis

10. Jonas Sorgalla, Philip Wizenty, Florian Rademacher, Sabine Sachweh, Albert Zündorf, Applying Model-Driven Engineering to Stimulate the Adoption of DevOps Processes in Small and Medium-Sized Development Organizations [Electronic resource] / July 2021. Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/353510651_Applying_Model-Driven_Engineering_to_Stimulate_the_Adoption_of_DevOps_Processes_in_Small_and_Medium-Sized_Development_Organizations

11. Ahmad Alnafessah, Alim Ul Gias, Runan Wang, Lulai Zhu, Giuliano Casale, Antonio Filieri, Quality-Aware DevOps Research: Where Do We Stand? [Electronic resource] / March 2021 IEEE Access 9:44476–44489. Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/349934738_Quality-Aware_DevOps_Research_Where_Do_We_Stand

12. Tom Černý, Michael J. Donahoo, Michal Trnka, Contextual understanding of microservice architecture: current and future directions [Electronic resource] / January 2018 ACM SIGAPP Applied Computing Review 17(4):29–45. Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/322842819_Contextual_understanding_of_microservice_architecture_current_and_future_directions

References

1. Newman S., Building Microservices, 2nd Edition / Sam Newman. – O'Reilly Media, Inc., 2021. 617 p.

2. Davis A., Bootstrapping Microservices with Docker, Kubernetes, and Terraform / Ashley Davis. New York, USA: Manning Publications, 2021. 440 p.

3. Eramo R., Muttilo V., Berarrdinelli L., Bruneliere H., AIDOaRt: AI-augmented Automation for DevOps, a Model-based Framework for Continuous Development in Cyber-Physical Systems. [Electronic resource] / Conference: 24th Euromicro Conference on Digital System Design (DSD 2021), Palermo, Itally – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/353268043_AIDOaRt_AI-augmented_Automation_for_DevOps_a_Model-based_Framework_for_Continuous_Development_in_Cyber-Physical_Systems

4. Sabharwal N., Bhardwaj G., Hands-on AIOps Best Practices Guide to Implementing AIOps / Navin Sabharwal, Gaurav Bhardwaj. New York, USA: Apress, 2022. 259 p.

5. Josu Diaz de Arcaya, Ana-Isabel Torre-Bastida, Gorka Zarate, Raúl Miñón, Aitor Almeida, A Joint Study of the Challenges, Opportunities, and Roadmap of MLOps and AIOps: A Systematic Survey [Electronic resource] / October 2023ACM Computing Surveys 56(4):1–30 Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/374911984_A_Joint_Study_of_the_Challenges_Opportunities_and_Roadmap_of_MLOps_and_AIOps_A_Systematic_Survey

6. Pranjal Gupta, Harshit Kumar, Debanjana Kar, Karan Bhukar, Pooja Aggarwal, Prateeti Mohapatra, Learning Representations on Logs for AIOps [Electronic resource] / August 2023. Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/373298002_Learning_Representations_on_Logs_for_AIOps

7. Roozbeh Aghili, Heng Li, Foutse Khomh, Studying the characteristics of AIOps projects on GitHub [Electronic resource] / October 2023Empirical Software Engineering 28(6). Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/374810736_Studying_the_characteristics_of_AIOps_projects_on_GitHub

8. Saima Rafi, Muhammad Azeem Akbar, Sajjad Mahmood, Ahmed Alsanad, Abdulrahman Alothaim, Selection of DevOps best test practices: A hybrid approach using ISM and fuzzy TOPSIS analysis [Electronic resource] / March 2022 Journal of Software: Evolution and Process. Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/359164520_Selection_of_DevOps_best_test_practices_A_hybrid_approach_using_ISM_and_fuzzy_TOPSIS_analysis

9. Mingxu Jin, Aoran Lv, Yuanpeng Zhu, Zijiang Wen, Yubin Zhong, Zexin Zhao, Jiang Wu, Hejie Li, Hanheng He, Fengyi Chen, An Anomaly Detection Algorithm for Microservice Architecture Based on Robust Principal Component Analysis [Electronic resource] / December 2020IEEE Access PP(99):1–1. Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/347630664_An_Anomaly_Detection_Algorithm_for_Microservice_Architecture_Based_on_Robust_Principal_Component_Analysis

10. Jonas Sorgalla, Philip Wizenty, Florian Rademacher, Sabine Sachweh, Albert Zündorf, Applying Model-Driven Engineering to Stimulate the Adoption of DevOps Processes in Small and Medium-Sized Development Organizations [Electronic resource] / July 2021. Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/353510651_Applying_Model-Driven_Engineering_to_Stimulate_the_Adoption_of_DevOps_Processes_in_Small_and_Medium-Sized_Development_Organizations

11. Ahmad Alnafessah, Alim Ul Gias, Runan Wang, Lulai Zhu, Giuliano Casale, Antonio Filieri, Quality-Aware DevOps Research: Where Do We Stand? [Electronic resource] / March 2021 IEEE Access 9:44476–44489. Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/349934738_Quality-Aware_DevOps_Research_Where_Do_We_Stand

12. Tom Černý, Michael J. Donahoo, Michal Trnka, Contextual understanding of microservice architecture: current and future directions [Electronic resource] / January 2018 ACM SIGAPP Applied Computing Review 17(4):29–45. Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/322842819_Contextual_understanding_of_microservice_architecture_current_and_future_directions

УДК 681.51.01
DOI: https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-08

АВТОМАТИЗАЦІЯ ЗАХИСТУ ВОДОГОНУ ВІД ПРОМЕРЗАННЯ З РЕГУЛЮВАННЯМ ЗА ЗБУРЕННЯМ

***Іносов С. В.**, к.т.н., доц., Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна. https://orcid.org/0000-0001-8305-5514, Inosov.sv@knuba.edu.ua*

***Ілларіонов В. М.**, к.т.н., доц., Київський електромеханічний фаховий коледж, Київ, Україна. https://orcid.org/0000-0002-6952-9290, infcentr@i.ua*

***Сабалаєва Н. О.**, к.т.н., доц., Київський електромеханічний фаховий коледж, Київ, Україна. http://orcid.org/0000-0002-7015-1811, natsab152@gmail.com*

***Анотація.** Сучасна технологія дає змогу боротися із замерзанням водогонів у помірних і північних широтах за допомогою електричного гріючого кабелю, прокладеного на поверхні труби. Зазвичай використовується принцип регулювання за відхиленням, із контуром негативного зворотного зв'язку, із використанням датчиків температури, установлених у глибині ґрунту. Це вимагає додаткових витрат і зменшує надійність системи, виникає проблема точності вимірювання за існування локальних неоднорідностей температурного поля в ґрунті. У роботі пропонується для автоматизації захисту водогону від промерзання використовувати регулювання за збуренням, із вимірюванням температури повітря і розрахунком температури на глибині, із використанням динамічної моделі розповсюдження теплової хвилі в глибину ґрунту. Запропонована схема дає такі переваги: не треба встановлювати спеціальні датчики температури в глибині, що зменшує витрати і збільшує надійність системи, можна обійтися плинними даними Гідрометцентру; впливи можливих локальних неоднорідностей теплового поля ґрунту виключаються; можлива централізована реалізація системи, локальним підсистемам залишаться тільки функції включення (виключення) нагріву окремих водогонів по командах з єдиного центру. На жаль, точна теоретична модель розповсюдження теплової хвилі вглиб ґрунту непридатна для безпосередньої реалізації на мікроконтролері програмно в реальному часі, бо вона є ірраціональною передаточною функцією. У роботі поставлено і вирішено оптимізаційне завдання раціоналізації передаточної функції теплової інерційності ґрунту у вигляді наближеної дробово-раціональної передаточної функції третього порядку із запізненням. У результаті отримано універсальну практичну модель динаміки розповсюдження теплової хвилі вглиб ґрунту, придатну для будь-яких ґрунтів і будь-яких глибин, яка зручно реалізується програмно в реальному часі кроковими методами і забезпечує достатню для практики точність.*

***Ключові слова:** водогін, захист, промерзання, регулювання, збурення, динамічна модель, теплова хвиля.*

AUTOMATION OF WATER PIPES PROTECTION FROM FREEZING WITH REGULATION BY DISTURBANCE

***Serhiy Inosov**, Ph.D., Ass. Prof., Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0001-8305-5514, Inosov.sv@knuba.edu.ua*

***Valerii Illarionov**, Ph.D., Ass. Prof., Kyiv Electromechanical Vocational College, Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0002-6952-9290, infcentr@i.ua*

***Nataliya Sabalaeva**, Ph.D., Ass. Prof., Kyiv Electromechanical Vocational College, Kyiv, Ukraine. http://orcid.org/0000-0002-7015-1811, natsab152@gmail.com*

***Abstract.** Modern technology allows you to fight the freezing of water pipes in temperate and northern latitudes with the help of an electric heating cable laid on the surface of the pipe. Usually, the principle of deviation control is used, with a negative feedback loop, using temperature sensors installed in the depth of the soil. This requires additional costs and reduces the reliability of the system, there is a problem of measurement accuracy in the presence of local inhomogeneities of the temperature field in the soil. In the work, it is proposed to use disturbance control, with air temperature measurement and depth temperature calculation, using a dynamic model of heat wave propagation in the depth of the soil, to automate the protection of the water line against freezing. The proposed scheme provides the following advantages. There is no need to install special temperature sensors in the depth, which reduces costs and increases the reliability of the system, you can get by with the*

current data of the hydrometeorological center. The effects of possible local inhomogeneities of the thermal field of the soil are excluded. Centralized implementation of the system is possible, local subsystems will only have the function of turning on (off) the heating of individual water pipes by commands from a single center. Unfortunately, the exact theoretical model of heat wave propagation deep into the soil is not suitable for direct implementation on a microcontroller in real-time software, because it is an irrational transfer function. In the work, the optimization problem of rationalization of the transfer function of thermal inertia of the soil in the form of an approximate fractional-rational transfer function of the third order with a delay is set and solved. As the result, a universal practical model of the dynamics of heat wave propagation deep into the soil was obtained, suitable for any soil and any depth, which can be conveniently implemented by software in real time by step methods and provides sufficient accuracy for practice.

Key words: *water pipe, protection, freezing, regulation, disturbance, dynamic model, heat wave.*

Вступ

Водогони в помірних і північних широтах можуть виходити з ладу в результаті промерзання. Сучасна технологія дає змогу боротися із замерзанням водогонів за допомогою випуску води або електричного гріючого кабелю, прокладеного на поверхні труби [6]. Нагрівання або випуск води регулюється спеціальною автоматикою. Автоматика дає змогу мінімізувати витрати електроенергії за рахунок оптимального регулювання теплового режиму. Такі автоматичні системи збільшують капітальні та експлуатаційні витрати, але їх застосування виправдується, тому що у разі замерзання трубу необхідно відкопувати й заміняти, із чим пов'язані великі витрати і перерви у водопостачанні. Зазвичай використовується принцип регулювання за відхиленням, із контуром негативного зворотного зв'язку, із використанням датчиків температури, установлених у глибині ґрунту. Це вимагає додаткових витрат і зменшує надійність системи, виникає проблема точності вимірювання за існування локальних неоднорідностей температурного поля в ґрунті.

Для автоматизації захисту водогону від промерзання пропонується використовувати регулювання за збуренням, із вимірюванням температури повітря і розрахунком температури на глибині, із використанням динамічної моделі розповсюдження теплової хвилі в глибину ґрунту. Це дає такі переваги: не треба встановлювати спеціальні датчики температури в глибині, що зменшує витрати і збільшує надійність системи, можна обійтися плинними даними Гідрометцентру; впливи можливих локальних неоднорідностей теплового поля ґрунту виключаються; можлива централізована реалізація системи, локальним підсистемам залишаться тільки функції включення (виключення) нагріву окремих водогонів по командах з єдиного центру. На жаль, відома теоретична модель розповсюдження теплової хвилі вглиб ґрунту [7] непридатна для безпосередньої реалізації на мікроконтролері програмно в реальному часі, бо вона є ірраціональною передаточною функцією.

Мета роботи – отримати універсальну практичну модель динаміки розповсюдження теплової хвилі вглиб ґрунту, придатну для будь-яких ґрунтів і будь-яких глибин, яка зручно реалізується програмно в реальному часі кроковими методами і забезпечує достатню для практики точність для автоматизації захисту водогонів від промерзання з регулюванням за збуренням.

Виконання досліджень

Як приклад об'єкта регулювання розглянемо водогін із гріючим кабелем, хоча для системи з випуском води можна застосувати аналогічну схему. Функціональну схему регулювання за збуренням, що пропонується, наведено на рис. 1. Основним збуренням, що вимірюється, є зміна температури повітря (похолодання). Регулюється потужність нагріву залежно від розрахункової температури на глибині закладення трубопроводу за розімкнутою схемою (без зворотного зв'язку).

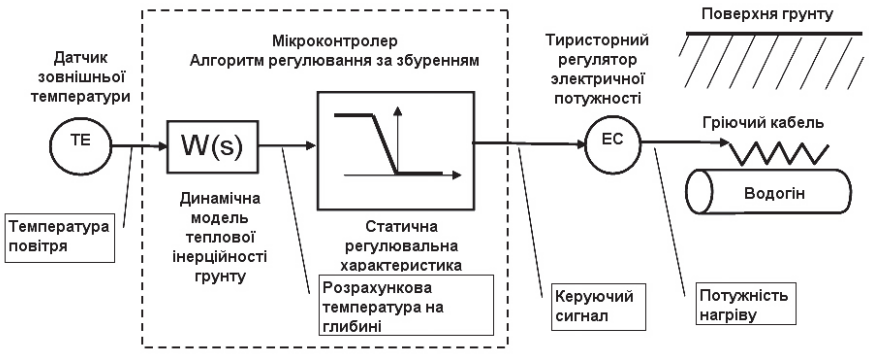


Рис. 1. Функціональна схема регулювання за збуренням

Між зовнішньою температурою та температурою в глибині є значні розбіжності через теплову інерційність ґрунту (рис. 2).

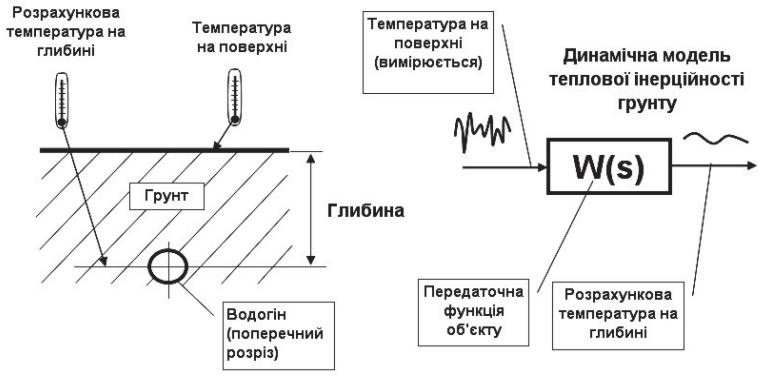


Рис. 2. Динамічна модель теплової інерційності ґрунту

Саме тому регулювання потужності нагрівання потрібно здійснювати за розрахунковою глибинною температурою, а не за температурою на поверхні. Потужність нагрівання рекомендується регулювати пропорційно (можливий варіант – релейне двопозиційне регулювання в режимі «включено/виключено») розрахунковій негативній температурі на глибині в межах від нуля до номінальної потужності. Така схема дає декілька переваг:

1. Не треба встановлювати спеціальні датчики температури в глибині, що зменшує витрати і збільшує надійність системи, можна обійтися плинними даними Гідрометцентру.

2. Теплова інерційність ґрунту враховується інтегрально, а не локально, тому впливи можливих локальних неоднорідностей теплового поля на датчики виключаються.

3. Можлива централізована реалізація системи для обслуговування всіх водогонів у певному регіоні. Локальним підсистемам залишається тільки функції включення (виключення) нагріву по командах з єдиного центру.

Під час програмної реалізації запропонованої схеми (рис. 1, 2) у реальному часі виникає така проблема. Лінійні стаціонарні об'єкти з розподіленими в просторі параметрами описуються в математиці диференційними рівняннями в частинних похідних, хвильовими процесами у фізиці, ірраціональними передаточними функціями в операційному зчисленні. Із теорії термодинаміки відомо, що передаточна функція *W(s)* для випадку поширення теплової хвилі в однорідному напівсередовищі для прийнятої схеми (рис. 2) є ірраціональною і має вигляд [1, 7]:

$$W1(s) = e^{-\sqrt{s \cdot \theta}}, \tag{1}$$

де e – число Ейлера, s – комплексний аргумент, ϑ – характеристичний час (параметр, що визначає часовий масштаб процесів), який залежить від глибини *H* пропорційно її квадрату:

$$\theta = H^2 \cdot C \tag{2}$$

C – константа, яка залежить від питомих теплопровідності й теплоємності ґрунту. Для типового ґрунту значення *C* становить орієнтовно 200 діб/м^2. Так, для глибини *H* = 0.71 м (варіант для прикладу), ϑ = 100 діб.

На жаль, точна ірраціональна модель теплової інерційності ґрунту з розподіленими параметрами (1) непридатна для реалізації на мікроконтролері програмно в реальному часі, тому пропонується замінити її наближеною дробно-раціональною передаточною функцією третього порядку (модель із зосередженими параметрами) із запізненням. Точність такого наближення достатня для нашої задачі. Відповідна передаточна функція має вигляд:

$$W2(s) = e^{-s\tau} \cdot \left\{ \left(\frac{C1}{T1 \cdot s + 1} \right) + \left(\frac{C2}{T2 \cdot s + 1} \right) + \left(\frac{C3}{T3 \cdot s + 1} \right) \right\} \tag{3}$$

Вона складається з трьох паралельних динамічних ланок першого порядку зі сталими часу *T*1, *T*2, *T*3 і коефіцієнтами впливу *C*1, *C*2, *C*3, а також ланки запізнення зі сталою часу τ. Указані параметри повинні бути підібрані так, щоб наближена модель (3) якнайкраще відповідала точній (1) для конкретного ϑ.

Поставлена задача раціоналізації ірраціональної передаточної функції *W*1(s) у вигляді *W*2(s) є типовою оптимізаційною задачею. Як критерій оптимальності було прийнято мінімум середньоквадратичного розугодження між точною ваговою функцією (реакцією на одиничний імпульс у часовій об-

ласті t) $G1(t)$ та її наближеним варіантом $G2(t)$. Варіювалися параметри наближеної моделі: τ, $T1$, $T2$, $T3$, $C1$, $C2$, $C3$. Як обмеження прийнята умова $C1+C2+C3 = 1$ (тобто статичний коефіцієнт передачі повинен дорівнювати одиниці).

Перехід від передаточних функцій $W1(s)$, $W2(s)$ операційного зчислення до відповідних вагових функцій у часовій області $G1(t)$, $G2(t)$ здійснювався частотними методами в чисельній формі в програмному середовищі MathCad за такою процедурою. Підстановкою $j\cdot\omega$ (j – уявна одиниця, ω – кругова частота) замість s, передаточні функції перетворені у відповідні амплітудо-фазочастотні характеристики (АФЧХ) $W1(j\cdot\omega)$, $W2(j\cdot\omega)$. АФЧХ підстановкою періодичної послідовності значень ω переведені в чисельну (табличну) форму у вигляді відповідних масивів 2^{16} комплексних чисел. За допомогою чисельного алгоритму зворотного перетворення Фур'є IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) були розраховані відповідні вагові функції в часовій області в табличній формі $G1_k$, $G2_k$ у вигляді відповідних масивів 2^{16} дійсних чисел (k – номер числа в масиві). Мінімізація середньоквадратичного розугодження між $G1_k$ і $G2_k$ здійснювалася з використанням алгоритму чисельної автоматичної оптимізації. Отримані вагові функції відображено в графічній формі на рис. 3.

У результаті вирішення поставленої оптимізаційної задачі були знайдені шукані чисельні значення параметрів наближеної дробово-раціональної передаточної функції $W2(s)$: $T1 = 6{,}61\cdot\vartheta$, $T2 = 0{,}48\cdot\vartheta$, $T3 = 0{,}043\cdot\vartheta$, $\tau = 0{,}046\cdot\vartheta$, $C1 = 0{,}507$, $C2 = 0{,}545$, $C3 = -0{,}052$.

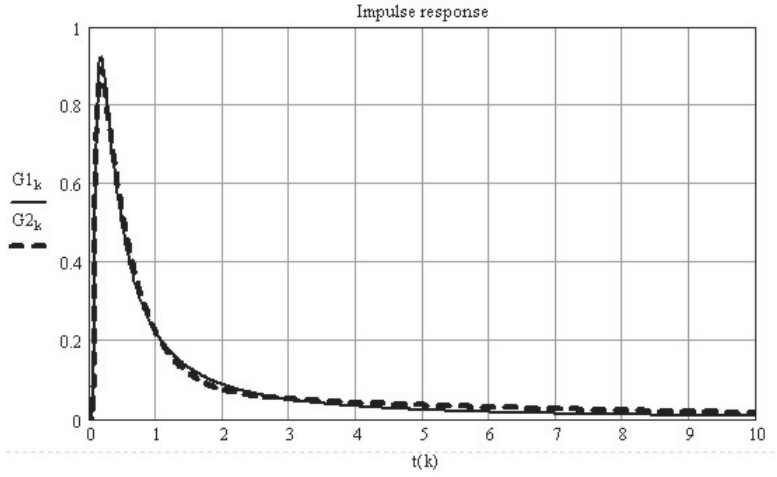


Рис. 3. Вагова функція (реакція на одиничний імпульс) теплової інерційності ґрунту (точна $G1_k$ і наближена $G2_k$) для випадку ϑ=1

Характеристичний час ϑ визначає масштаб часу для τ, T1, T2, T3. Наприклад, ϑ = 100 діб для глибини 0.71 м, тому τ = 4.6 діб, T1 = 661 діб, T2 = 48 діб, T3 = 4.3 діб. Коефіцієнти C1, C2, C3 безрозмірні і не мають масштабу.

У результаті ми отримали практичну модель (3) динаміки розповсюдження теплової хвилі в глибину ґрунту, придатну для будь-яких ґрунтів і будь-яких глибин, яка зручно реалізується програмно в реальному часі.

Адекватність отриманої моделі перевірялася в режимі імітації реального часу в програмному середовищі Visual Simulation кроковим чисельним методом Рунге – Кутта. На рис. 4 наведено результати статистичного моделювання поширення теплової хвилі в глибину ґрунту. Температурні осцилограми відповідають глибинам 0 м; 0,5 м; 1 м. Потік середньодобових значень температури зовнішнього повітря (збурення) імпортувався з файлу середньодобових температур у м. Київ за 100 років (за даними Гідрометцентру) [2]. Відповідний графік позначено 1 на рис. 4. Періодичний тренд відповідає сезонним коливанням, випадковий складник – погодним варіаціям. Теплова інерційність ґрунту на глибинах 0,5 м (графік 2) і 1 м (графік 3) моделювалася передаточною функцією $W2(s)$ з відповідними чисельними значеннями коефіцієнтів τ, $T1$, $T2$, $T3$, $C1$, $C2$, $C3$. Із рисунку видно, що погодні варіації температури згладжуються з глибиною, коливання наближаються до синусоїдальних, амплітуда коливань температури зменшується, а зсув за фазою збільшується зі зростанням глибини.

Між зовнішньою температурою та температурою в глибині є значна розбіжність. Наприклад, літня спека на поверхні відповідає мінімуму температури на достатній (близько 2 м) глибині. Саме тому регулювання потужності нагрівання потрібно здійснювати за розрахунковою глибинною температурою, а не за температурою на поверхні. Синтезована спрощена модель динаміки розповсюдження теплової хвилі вглиб ґрунту (3) зручно реалізується програмно в реальному часі і придатна для будь-яких ґрунтів і будь-яких глибин. Різними будуть лише чисельні значення коефіцієнтів τ, $T1$, $T2$, $T3$, $C1$, $C2$, $C3$.

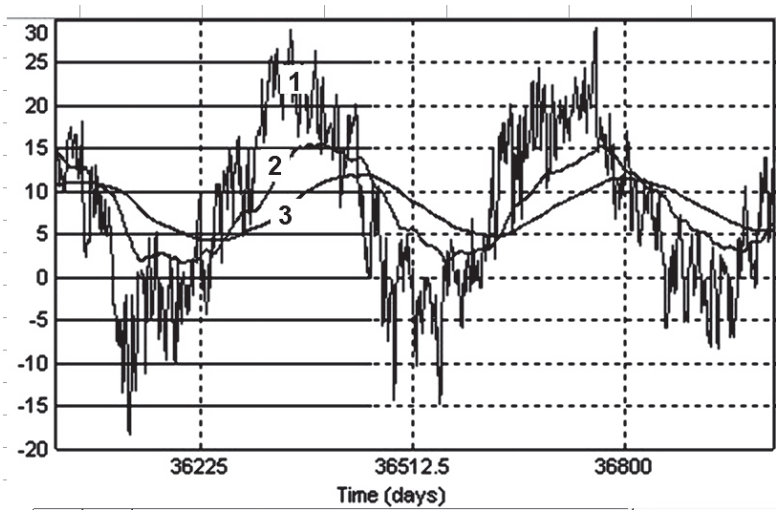


Рис. 4. Температурні осцилограми теплової хвилі на глибинах 0 м, 0,5 м, 1 м

На рис. 5. представлено залежність мінімальної температури від глибини за результатами імітаційного моделювання. На глибинах більше 1 м температура в Києві за 100 років не опускалася нижче нуля. На глибині 0,5 м за той же період температура стояла нижче нуля 5% часу і доходила до -5 градусів. На поверхні ґрунту температура стояла нижче нуля 25% часу і доходила до -29 градусів.

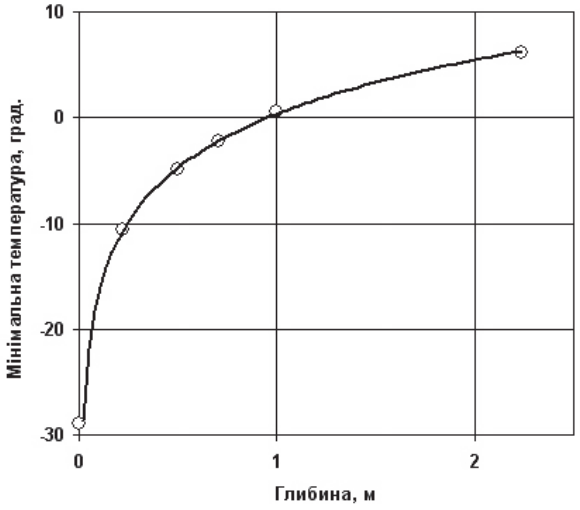


Рис. 5. Залежність мінімальної температури за 100 років від глибини

Висновки

Для автоматизації захисту водогону від промерзання пропонується використовувати регулювання за збуренням, із вимірюванням температури повітря і розрахунком температури на глибині, із використанням динамічної моделі розповсюдження теплової хвилі в глибину ґрунту.

Запропонована схема дає такі переваги: не треба встановлювати спеціальні датчики температури у глибині, що зменшує витрати і збільшує надійність системи, можна обійтися плинними даними Гідрометцентру; впливи можливих локальних неоднорідностей теплового поля ґрунту виключаються; можлива централізована реалізація системи, локальним підсистемам залишається тільки функції включення (виключення) нагріву окремих водогонів по командах з єдиного центру.

На жаль, точна теоретична модель розповсюдження теплової хвилі вглиб ґрунту непридатна для безпосередньої реалізації на мікроконтролері програмно в реальному часі, бо вона є ірраціональною передаточною функцією.

У роботі поставлена і вирішена оптимізаційна задача раціоналізації передаточної функції теплової інерційності ґрунту у вигляді наближеної дробово-раціональної передаточної функції третього порядку із запізненням. У результаті отримано універсальну практичну модель динаміки розповсю-

дження теплової хвилі вглиб ґрунту, придатну для будь-яких ґрунтів і будь-яких глибин, яка зручно реалізується програмно в реальному часі кроковими методами і забезпечує достатню для практики точність.

Література

1. Попович М., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування : підручник. Київ : Либідь, 2007. 656 с.
2. Іносов С., Соболевська Т., Самойленко Н., Сідун К. Дослідження температурних збурень для систем автоматизації опалення будівель. *Управління розвитком складних систем*. 2012. № 6. С. 159–161.
3. Іносов С., Корнієнко В. Оптимізація алгоритму автоматичного регулювання тепловими процесами. *Управління розвитком складних систем*. 2013. № 13. С. 104–108.
4. Іносов С., Бондарчук О. Аналіз можливих причин помилкової ідентифікації динамічних параметрів теплового об'єкта регулювання. *Управління розвитком складних систем*. 2023. № 54. С. 132–137.
5. Іносов С., Ілларіонов В., Сабалаєва Н. Ідентифікація системи стихійного електроопалення в районній електромережі. *Мехатронні системи: інновації та інжиніринг* : тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції. BoScience Publisher. Boston, USA. 2022. С. 171–175. URL: https://sci-conf.com.ua/iv-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-progressive-research-in-the-modern-world-28-30-12-2022-boston-ssha-arhiv/
6. Захист водопроводу від замерзання. *ПРаТ «Ensto Україна».* 2010. URL: http://sem-electro.com.ua/img/2015/04/7_ENSTO_Zahust vodonapory vid zanerzannia.pdf
7. Затула В., Титаренко Л. Режим температури ґрунту на глибинах. Черкаси, 2009. URL: https://studfile.net/preview/7455426/page:27/

References

1. Popovich M., Kovalchuk V. Teoriia avtomatychnoho keruvannia. [Theory of automatic control]: Tutorial. Kyiv. Lybid,. 2007. P. 656.
2. Inosov S., Sobolevska T., Samoylenko M., Sidun K. Doslidzhennia temperaturnykh zburen dlia system avtomatyzatsii opalennia budivel. Upravlinnia rozvytkom skladnykh system. [Study of temperature disturbanses in automation systems for heating buildings. Complex systems development managment.] Kyiv. 2012. № 6, P. 159–161.
3. Inosov S., Kornienko V. Optymizatsiia alhorytmu avtomatychnoho rehuliuvannia teplovymy protsesamy. Upravlinnia rozvytkom skladnykh system. [Optimization of the algorithm for automatic control of thermal processes. Complex systems development managment.] Kyiv. 2013. № 13. P. 104–108.
4. Inosov S., Bondarchuk O. Analiz mozhlyvykh prychyn pomylkovoi identyfikatsii dynamichnykh parametriv teplovoho obiekta rehuliuvannia. Upravlinnia rozvytkom skladnykh system. [Analysis of possible reasons of erronious identificationof the dynamic parameters of a controlled thermal plant. Management of Development of Complex Systems.] Kyiv. 2023. № 54. P. 132–137.
5. Inosov S., Illarionov V., Sabalaeva N. Identyfikatsiia systemy stykhiinoho elektroopalennia v raionnii elektromerezhi. Mekhatronni systemy: innovatsii ta inzhynirynh: tezy dopovidei VI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. [Research on identification of the spontaneous electrical heating system in the district electrical network. Proceedings of the 4th International scientific and practical conference.] BoScience Publisher. Boston, USA. 2022. P. 171–175. URL: https://sci-conf.com.ua/iv-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-progressive-research-in-the-modern-world-28-30-12-2022-boston-ssha-arhiv/
6. Zakhyst vodoprovodu vid zamerzannia. [Protection of water pipes from freezing.] «Ensto Ukraine», Kyiv. 2010. URL: http://sem-electro.com.ua/img/2015/04/7_ENSTO_Zahust vodonapory vid zanerzannia.pdf
7. Zatula V., Titarenko L. Rezhym temperatury gruntu na hlybynakh. [Soil temperature regime at depths.] Bohdan Khmelnytskyi National University of Cherkasy. Cherkasy. 2009. URL: https://studfile.net/preview/7455426/page:27/

УДК 004.4, 005.6
DOI: https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-09

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЇ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ У ІТ

Михайлюк І. Р., *к.пед.н., доц., Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна. https://orcid.org/0000-0002-6489-3982, iryna.mykhailiuk@nung.edu.ua*

Анотація. *Сучасний розвиток інформаційних технологій (ІТ) змінює підходи до організації робочих процесів у сфері технологій. ІТ-компанії зіштовхуються з численними викликами, пов'язаними з ефективним управлінням ресурсами, проєктами та співпрацею між співробітниками. Використання спеціалізованих програм стає необхідністю для забезпечення ефективного функціонування та підвищення продуктивності робочих процесів. У статті проведено порівняльний аналіз найпопулярніших інструментів для організації роботи в ІТ-компаніях: Jira, Trello, Asana, Monday.com, Basecamp, Slack та Microsoft Teams. Оцінено їхні функціональні можливості, гнучкість, інтеграційні можливості, зручність співпраці та цільову аудиторію. Результати аналізу показали, що Jira є найефективнішим інструментом для великих проєктів із багатьма завданнями, тоді як Microsoft Teams підходить для великих корпоративних команд, інтегрованих в екосистему Microsoft. Asana та Monday.com пропонують високу гнучкість та функціональність, що робить їх придатними для різних типів проєктів. У статті також розглядаються ключові тенденції, що впливають на розвиток організаційних програм, зокрема цифрова трансформація, гнучкі методології розроблення ПЗ, зростання кількості даних та використання штучного інтелекту. Для аналізу ефективності організаційних програм пропонуються різні методи, включаючи SWOT-аналіз, KPI, аналіз витрат і користі, а також оцінку задоволеності співробітників. Висновки підкреслюють важливість використання програм для підвищення продуктивності та ефективності ІТ-компаній, а також необхідність постійного аналізу та вдосконалення цих інструментів. Стаття пропонує матричний метод вибору програми для організації роботи, ураховуючи кілька ключових критеріїв, таких як функціональність, гнучкість, інтеграції, співпраця та цільова аудиторія. Ці критерії допоможуть ІТ-компаніям зробити обґрунтований вибір та забезпечити успішну реалізацію проєктів в умовах постійних змін.*

Ключові слова: *інформаційні технології, ІТ-компанія, управління ресурсами, організація роботи, робочий процес.*

COMPARATIVE ANALYSIS OF TOOLS FOR WORKFLOW ORGANIZATION IN IT

Iryna Mykhailiuk*, Ph.D., Ass. Prof., Ivano-Frankivsk National Technical University of, Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine. https://orcid.org/0000-0002-6489-3982, iryna.mykhailiuk@nung.edu.ua*

Abstract. *The modern development of information technologies (IT) is changing approaches to the organization of work processes in the field of technology. IT companies face numerous challenges related to effective management of resources, projects and collaboration between employees. The use of specialized programs becomes a necessity to ensure effective functioning and increase the productivity of work processes. The article provides a comparative analysis of the most popular tools for organizing work in IT companies: Jira, Trello, Asana, Monday.com, Basecamp, Slack and Microsoft Teams. Their functionality, flexibility, integration capabilities, ease of cooperation, and target audience were evaluated. The results of the analysis showed that Jira is the most effective tool for large projects with many tasks, while Microsoft Teams is suitable for large enterprise teams integrated into the Microsoft ecosystem. Asana and Monday.com offer high flexibility and functionality, making them suitable for different types of projects. The article also examines key trends affecting the development of organizational applications, including digital transformation, flexible software development methodologies, data growth, and the use of artificial intelligence. Various methods are offered to analyze the effectiveness of organizational programs, including SWOT analysis, KPI, cost-benefit analysis, and employee satisfaction. The findings emphasize the importance of using software to improve the productivity and efficiency of IT companies, as well as the need for constant analysis and improvement of these tools. The article proposes a matrix method for choosing a program for organizing work, taking into account several key criteria, such as functionality, flexibility, integrations, collaboration and target audience. These criteria will help IT*

companies make informed choices and ensure the successful implementation of projects in conditions of constant change.

Key words: *information technology, IT-company, resource management, work organization, work process.*

Вступ

Сучасний розвиток інформаційних технологій (ІТ) змінює підходи до організації робочих процесів у сфері технологій. ІТ-компанії стикаються з постійними викликами, пов'язаними з ефективним управлінням ресурсами, проєктами та співпрацею між співробітниками. У цьому контексті використання програм стає необхідністю для забезпечення ефективного функціонування і підвищення продуктивності робочих процесів.

Один із ключових аспектів організації роботи в ІТ-компаніях полягає в управлінні проєктами [1; 2]. Завдяки спеціалізованим програмам для проєктного менеджменту команди можуть ефективно планувати, виконувати та контролювати виконання завдань, ураховуючи ресурси та строки. Окрім того, засоби комунікації та співпраці, такі як месенджери та системи управління відносинами з клієнтами, роблять можливою взаємодію зі співробітниками та клієнтами безперервно та ефективно.

Управління часом та завданнями в ІТ-компаніях також потребує використання спеціальних програмних засобів для відстеження робочого часу, планування графіків роботи та контролю виконання завдань [3]. Ці інструменти дають змогу не лише підвищити продуктивність, а й ефективно розподілити ресурси та зберегти час.

Із розвитком технологій ІТ-компанії використовують різноманітні програми для організації роботи, що допомагає оптимізувати процеси, підвищити продуктивність та покращити співпрацю у командах. У статті розглянемо популярні інструменти, такі як Jira, Trello, Asana, Monday.com, Basecamp, Slack та Microsoft Teams, їхні функціональні можливості та вплив на ефективність роботи.

Виконання дослідження

Сучасні ІТ-компанії зіштовхуються з численними викликами в процесі управління проєктами, комунікацією та співпрацею команд. Задля ефективно вирішення цих завдань використовуються різноманітні програмні інструменти, що сприяють підвищенню продуктивності та оптимізації робочих процесів. Розглянемо найпопулярніші програми для організації роботи в ІТ-компаніях, їхні функціональні можливості та вплив на ефективність роботи.

Програми для організації роботи мають різні сильні боки та підходять для різних типів проєктів і команд:

– Jira, розроблена Atlassian, є потужним інструментом для управління проєктами, особливо в контексті agile-методологій. Вона дає змогу командам планувати спринти, відстежувати прогрес, керувати завданнями та інтегруватися з іншими інструментами розробки. Jira надає гнучкість у налаштуванні робочих процесів та створенні звітів, що робить її ідеальною для великих проєктів;

– Trello, також від Atlassian, використовує візуальний підхід до управління завданнями за допомогою дощок і карток. Він є простим у використанні та зручним для менших команд та проєктів. Trello підтримує інтеграції з популярними сервісами, такими як Slack і Google Drive, через систему Power-Ups;

– Asana надає інструменти для управління проєктами та завданнями, які допомагають командам планувати, відстежувати та керувати роботою. Її функціонал включає створення проєктів, завдань, підзавдань, а також можливість коментування та прикріплення файлів, що полегшує співпрацю;

– Monday.com пропонує гнучкі інструменти для управління проєктами та співпраці з великою кількістю шаблонів для різних типів робочих процесів. Ця платформа надає можливості для візуалізації робочих процесів, відстеження прогресу та налаштування інтерфейсу під конкретні потреби команди;

– Basecamp є системою для управління проєктами з акцентом на комунікацію та співпрацю. Вона включає функції для обміну повідомленнями, організації завдань, файлів та обговорень, що робить її зручною для роботи з розподіленими командами;

– Slack є платформою для миттєвих повідомлень та командної співпраці, яка інтегрується з багатьма іншими інструментами. Вона дає змогу створювати канали для різних проєктів чи команд, обмінюватися повідомленнями, файлами та інтегруватися з додатками, такими як Google Drive, Trello та ін.;

– Microsoft Teams є інструментом для комунікації та співпраці, інтегрованим з іншими продуктами Microsoft. Він підтримує відеоконференції, чати, обмін файлами та спільну роботу над документами, що робить його популярним вибором для корпоративного середовища.

Порівняння програм для організації роботи базується на аналізі основних аспектів цих програм, таких як функціональність, гнучкість, інтеграція, співпраця та цільова аудиторія. Аспекти були вибрані нами через їх важливість для ефективного управління проєктами в ІТ-компаніях (табл. 1).

Для порівняння використано такі критерії:

1. Функціональність: рівень можливостей та інструментів, які пропонує програма для управління проєктами.

2. Гнучкість і налаштування: можливість налаштування програми відповідно до специфічних потреб проєкту.
3. Інтеграція: здатність програми взаємодіяти з іншими інструментами та сервісами.
4. Співпраця та комунікація: зручність комунікації та спільної роботи між членами команди.
5. Цільова аудиторія: відповідність програми різним типам команд та проєктів.

Таблиця 1
Порівняльний аналіз програм

Програми	Функціональність	Гнучкість і налаштування	Інтеграція	Співпраця та комунікація	Цільова аудиторія
Jira	Потужне управління проєктами, підтримка Agile, планування спринтів, багатий функціонал звітності	Висока, налаштування робочих процесів та звітів	Bitbucket, Confluence, інші інструменти розробки	Обговорення завдань, коментарі, тегування	Великі IT-проєкти, команди розробників
Trello	Візуальне управління завданнями, дошки та картки, простота використання	Середня, основні налаштування для дощок та карток	Slack, Google Drive, інші через "Power-Ups"	Коментарі до завдань, обмін файлами	Малі та середні команди, прості проєкти
Asana	Управління проєктами та завданнями, підзавдання, коментарі, прикріплення файлів	Середня, налаштування проєктів і завдань	Slack, Google Drive, Microsoft Teams, інші	Коментування, спільне редагування, обмін файлами	Середні та великі команди, різні типи проєктів
Monday.com	Гнучкі інструменти для керування проєктами, шаблони робочих процесів	Висока, налаштування інтерфейсу та шаблонів	Slack, Google Drive, інші через API	Коментарі, візуалізація робочих процесів	Різні типи команд та проєктів, гнучке налаштування
Basecamp	Комунікація та співпраця, обмін повідомленнями, організація завдань	Середня, налаштування основних функцій	Email, календарі, документи	Обмін повідомленнями, обговорення, файли	Розподілені команди, проєкти з акцентом на комунікацію
Slack	Миттєві повідомлення, канали, інтеграція з багатьма додатками	Низька, основні налаштування для каналів	Google Drive, Trello, інших через API	Миттєві повідомленн, канали, обмін файлами	Команди, що потребують миттєвої комунікації та інтеграції
Microsoft Teams	Відеоконференції, чати, обмін файлами, інтеграція з продуктами Microsoft	Висока, налаштування для різних форм комунікації	Outlook, SharePoint, OneDrive, інші продукти Microsoft	Відеозв'язок, чати, спільна робота над документами	Великі корпоративні команди, інтегровані в Microsoft

Для вибору програми для організації роботи в IT-компанії можна застосувати матричний метод [4], ураховуючи кілька ключових критеріїв, таких як функціональність, гнучкість, інтеграція, співпраця та цільова аудиторія. Кожен критерій можна оцінити за шкалою від 1 до 5 для кожної програми, а потім підрахувати загальний бал (табл. 2).

Таблиця 2
Матриця оцінювання

Параметр/Програма	Jira	Trello	Asana	Monday.com	Basecamp	Slack	Microsoft Teams
Функціональність	5	3	4	4	3	2	4
Гнучкість	5	3	4	4	3	2	4
Інтеграція	5	4	4	4	3	5	5
Співпраця	4	3	4	4	3	5	5
Цільова аудиторія	5	3	4	4	3	4	5
Загальний бал	**24**	**16**	**20**	**20**	**15**	**18**	23

Дані для оцінювання програм для організації роботи в IT-компаніях узяті нами з таких джерел, як технічні блоги, дослідження користувачів, огляди програмного забезпечення та звіти про дос-

від використання за 2023 р. Основними джерелами були такі платформи публічні платформи, як: Gartner – платформа з оглядами та рейтингами програмного забезпечення від експертів і користувачів; Capterra – база даних з оглядами різноманітного програмного забезпечення.

Згідно з оцінками, Jira є найкращим вибором для управління роботою в IT-компаніях, особливо для великих проєктів із багатьма завданнями. Microsoft Teams також є потужним інструментом, особливо для великих корпоративних команд, інтегрованих в екосистему Microsoft. Asana та Monday.com пропонують хорошу гнучкість та функціональність, підходячи для різних типів проєктів.

IT-компанії постійно змінюються під впливом нових технологій, ринкових умов та внутрішніх потреб. Це вимагає постійного аналізу та вдосконалення їхніх організаційних програм. Пропонуємо ключові тенденції, які впливають на розвиток організаційних програм в IT-компаніях:

1. Цифрова трансформація. Цифрова трансформація перетворює бізнес-процеси та вимагає нових підходів до управління. Організаційні програми повинні бути спрямовані на підтримку цифрової стратегії компанії.

2. Гнучкі методології розроблення ПЗ. Використання гнучких методологій, таких як Scrum або Kanban, вимагає адаптації організаційних програм для підтримки ітеративного розвитку продуктів.

3. Зростання кількості даних. Обробка великих обсягів даних стає нормою для IT-компаній. Організаційні програми повинні включати в себе аналітичні інструменти для ефективного управління даними.

4. Використання штучного інтелекту та машинного навчання. Упровадження штучного інтелекту та машинного навчання вимагає нових підходів до управління персоналом та організаційними процесами.

Для ефективного аналізу організаційних програм в IT-компаніях можна використовувати різноманітні методи та інструменти, такі як:

1. SWOT-аналіз [5]: аналіз сильних і слабких сторін, можливостей та загроз дає змогу ідентифікувати ключові аспекти організаційної програми. SWOT = Сильні сторони + Можливості – Слабкі сторони + Загрози.

2. KPI (ключові показники ефективності) [6]: визначення ключових показників ефективності дає змогу виміряти результативність організаційної програми та вчасно реагувати на зміни. KPI = Σ (ваговий коефіцієнт * показник ефективності).

3. Аналіз витрат і користі (ROI) [7]: оцінка витрат на реалізацію організаційної програми порівняно з отриманою користю допомагає визначити її ефективність та раціональність. ROI = валовий прибуток – витрати / витрати * 100%.

4. Оцінка задоволеності співробітників (ES) [8]: вивчення думки персоналу щодо організаційної програми допомагає ідентифікувати проблемні аспекти та здійснювати необхідні корекції. ES = Σ (оцінка співробітника)/кількість співробітників

Ці формули можуть бути використані для кількісного оцінювання ефективності організаційних програм в IT-компаніях.

Висновки

Використання програм для організації роботи значно підвищує ефективність та продуктивність IT-компаній. Поєднання різних програм може забезпечити комплексний підхід до управління завданнями, комунікацією та співпрацею, що сприяє досягненню успішних результатів. Вибір інструменту для організації робочих процесів в IT-компаніях залежить від конкретних потреб команди, розміру та складності проєктів, а також від власних уподобань користувачів. Після ретельного порівняльного аналізу програм, який описано у цій статті, команди можуть зробити обґрунтований вибір щодо найбільш ефективного інструменту для своїх потреб.

Організаційні програми в IT-компаніях відіграють ключову роль у забезпеченні успіху бізнесу в умовах постійних змін. Вони дають змогу компаніям адаптуватися до нових технологій, удосконалювати бізнес-процеси та забезпечувати конкурентоспроможність на ринку. Проте для досягнення максимальної ефективності організаційні програми потребують постійного аналізу та вдосконалення. Застосування різноманітних методів аналізу, таких як SWOT-аналіз, визначення KPI, оцінка витрат і користі, а також оцінка задоволеності співробітників, допомагає компаніям зрозуміти сильні та слабкі боки своїх програм і приймати обґрунтовані рішення для їх удосконалення.

Подальші кроки у дослідженні організаційних програм в IT-компаніях можуть включати розширення сфери дослідження на вивчення впливу програм на розвиток та задоволеність клієнтів, дослідження взаємозв'язку між організаційними програмами та інноваціями, а також розвиток нових підходів до аналізу, що враховують вплив швидкозмінюваних технологічних та ринкових умов на ефективність програм.

У цілому аналіз організаційних програм в IT-компаніях є важливим елементом стратегічного управління, який дає змогу компаніям залишатися конкурентоспроможними та успішними в динамічному середовищі сучасного бізнесу. Розуміння ключових тенденцій розвитку, використання ефективних методів аналізу та постійне вдосконалення програм допомагають компаніям досягати своїх стратегічних цілей та забезпечувати стабільний розвиток у майбутньому.

Література

1. Smith, J. Choosing the Right Project Management Tool: A Comprehensive Guide. *IT Management Journal* 25(3), 2022. P. 45–56.

2. Doe, A. Comparative Analysis of Task Management Software in IT Companies. *Journal of Information Technology*, 38(2), 2023. P. 112–128.

3. Гулага Я.С., Мнушка О.В. Критерії оцінки якості в проєктах, що використовують Agile. *Комп'ютерні технології і мехатроніка* : збірник наукових праць за матеріалами Міжнародної науково-практичної конференції. Харків : ХНАДУ, 2019. С. 82–85.

4. Тесля Ю., Латишева Т., Єгорченков О. Матричне управління портфелями проєктів і програм : навчальний посібник. Черкаси : ЧДТУ, 2022. 119 с.

5. SWOT-аналіз із прикладами. URL: https://esputnik.com/uk/blog/swot-analiz-iz-prikladami (дата звернення: 04.06.2024).

6. Ключові показники ефективності (KPI) у житті команди підтримки: які бувають та як їх вимірювати. URL: https://helpcrunch.com/blog/uk/kpi-abo-kliuchovi-pokaznyky-efektyvnosti/ (дата звернення: 04.06.2024).

7. Метод витрат та вигід. URL: https://www.rada.gov.ua/uploads/documents/38964.pdf (дата звернення: 04.06.2024).

8. Опитування задоволеності працівників. URL: https://ahaslides.com/uk/blog/employee-satisfaction-survey/ (дата звернення: 04.06.2024).

References

1. Smith, J. (2022). Choosing the Right Project Management Tool: A Comprehensive Guide. *IT Management Journal*, 25(3), P. 45–56.

2. Doe, A. (2023). Comparative Analysis of Task Management Software in IT Companies. *Journal of Information Technology*, 38(2), P. 112–128.

3. Hulaha Ya.S., Mnushka O.V. (2019). Kryterii otsinky yakosti v proektakh, shcho vykorystovuiut Agile. [Quality assessment criteria in Agile projects]. Kompiuterni tekhnolohii i mekhatronika. Zbirnyk naukovykh prats za materialamy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Kharkiv: KhNADU. S. 82–85 [in Ukrainian]

4. Teslia Yu., Latysheva T., Yehorchenkov O. (2022). Matrychne upravlinnia portfeliamy proiektiv i prohramm: navch. posib. [Matrix management of portfolios of projects and programs: Tutorial] Cherkask. derzh. tekhnoloh. un-t. Cherkasy: ChDTU, 119 s. [in Ukrainian]

5. SWOT-analiz iz prykladamy. URL: https://esputnik.com/uk/blog/swot-analiz-iz-prikladami (data zvernennia: 04.06.2024).

6. Kliuchovi pokaznyky efektyvnosti (KPI) u zhytti komandy pidtrymky: yaki buvaiut ta yak yikh vymiriuvaty. URL: https://helpcrunch.com/blog/uk/kpi-abo-kliuchovi-pokaznyky-efektyvnosti/ (data zvernennia: 04.06.2024).

7. Metod vytrat ta vyhid. URL: https://www.rada.gov.ua/uploads/documents/38964.pdf (data zvernennia: 04.06.2024).

8. Opytuvannia zadovolenosti pratsivnykiv. URL: https://ahaslides.com/uk/blog/employee-satisfaction-survey/ (data zvernennia: 04.06.2024).

УДК 004.891.3; 004.031.43 : 614.2
DOI: https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-10

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ВИКОРИСТАННЯ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ТЕЛЕМЕДИЦИНІ

Петренко А. І., *д.т.н., проф., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. https://orcid.org/0000-0001-6712-7792, tolja.petrenko@gmail.com*

Кандель К. В., *Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. https://orcid.org/0000-0001-7152-5945, kirill.kandel@gmail.com*

Анотація. *Хмарні технології стають усе більш важливими для трансформації системи охорони здоров'я, особливо у зв'язку з розвитком телемедицини. У статті досліджується роль хмарних обчислень у покращенні доступності, якості та ефективності медичних послуг. Розглянуто різні архітектурні підходи до створення телемедичних систем на основі хмарних технологій, включаючи використання сервіс-орієнтованої архітектури (SOA), яка забезпечує модульність, повторне використання компонентів та низьку зв'язність.*

Особливу увагу приділено взаємодії хмарних технологій з іншими сучасними підходами, такими як штучний інтелект (AI) та Інтернет речей (IoT). Інтеграція з AI допомагає поліпшити діагностику, персоналізувати лікування та оптимізувати клінічні процеси. Використання IoT забезпечує постійний моніторинг стану здоров'я пацієнтів і перехід до проактивної моделі надання медичної допомоги. Хмарні провайдери надають необхідну інфраструктуру разом з інструментами для розроблення, навчання та розгортання моделей штучного інтелекту. Також вони пропонують інструменти для збору, зберігання та обробки великих обсягів даних від медичних IoT-пристроїв.

Розглянуто реальні приклади успішних світових платформ та систем охорони здоров'я, які демонструють практичне застосування хмарних технологій для вирішення конкретних проблем у медицині. Ці проєкти поліпшують результати лікування, оптимізують витрати та розширюють доступ до якісних послуг. Також представлено огляд репозиторіїв та ініціатив із відкритим кодом, які надають багаторазові та сумісні сервіси для розроблення медичних додатків.

Зроблено висновок, що хмарні технології є ключовим чинником цифрової трансформації системи охорони здоров'я, а їх інтеграція з телемедициною та іншими інноваційними підходами має потенціал революціонізувати спосіб надання медичних послуг. Реальні приклади проєктів та оглянуті репозиторії демонструють, як інноваційні рішення на базі хмарних платформ можуть поліпшувати результати лікування, оптимізувати витрати та розширювати доступ до якісної медичної допомоги.

Ключові слова: *хмарні технології, телемедицина, охорона здоров'я, віддалений моніторинг пацієнтів, сервіс-орієнтована архітектура (SOA), штучний інтелект (AI), Інтернет речей (IoT).*

MODERN APPROACHES OF USING CLOUD TECHNOLOGIES IN TELEMEDICINE

Anatolii Petrenko, *Sc.D., Prof., National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0001-6712-7792, tolja.petrenko@gmail.com*

Kyrylo Kandel, *National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0001-7152-5945, kirill.kandel@gmail.com*

Abstract. *Cloud technologies are becoming increasingly important for the transformation of the healthcare system, especially in connection with the development of telemedicine. This article explores the role of cloud computing in improving the accessibility, quality, and efficiency of medical services. It also examines various architectural approaches to building cloud-based telemedicine systems, including the use of service-oriented architecture (SOA), which provides modularity, component reuse, and loose coupling.*

Particular attention is paid to the interaction of cloud technologies with other modern approaches, such as artificial intelligence (AI) and the Internet of Things (IoT). Integration with AI helps improve diagnostics, personalize treatment, and optimize clinical processes. The use of IoT ensures continuous monitoring of patients' health and a transition to a proactive model of medical care delivery. Cloud providers offer the necessary infrastructure along with tools for developing, training, and deploying artificial intelligence models. Clouds also provide tools for collecting, storing, and processing large volumes of data from medical IoT devices.

Real-world examples of successful global healthcare platforms and systems that demonstrate the practical application of cloud technologies to solve specific problems in medicine are considered. These projects improve treatment outcomes, optimize costs, and expand access to quality services. An overview of open-source repositories and initiatives that provide reusable and interoperable services for developing medical applications is also presented.

The conclusion is made that cloud technologies are a key factor in the digital transformation of the healthcare system, and their integration with telemedicine and other innovative approaches has the potential to revolutionize the way medical services are delivered. However, for the full realization of this potential, further research, development of standards and policies, as well as close collaboration between stakeholders are necessary.

Key words: *cloud technologies, telemedicine, healthcare, remote patient monitoring, service-oriented architecture (SOA), artificial intelligence (AI), Internet of Things (IoT).*

Вступ

Розвиток цифрових технологій відкриває нові можливості для трансформації системи охорони здоров'я. Одним із ключових напрямів є розгортання хмаро-орієнтованої інфраструктури для потреб телемедицини, популярність якої серед медичних установ у світі стрімко зростає завдяки перевагам хмарних платформ: масштабованості, гнучкості та економічній ефективності. В Україні нагальна потреба у таких рішеннях особливо загострилася на тлі двох глобальних криз – пандемії COVID-19 та повномасштабної війни. Хмарні сервіси можуть допомогти швидко розгорнути системи для надання віддаленої медичної допомоги та консультацій постраждалим, що критично важливо в умовах бойових дій та руйнування інфраструктури.

Однак широке застосування хмарних технологій у телемедицині стримується низкою проблем – від питань кібербезпеки до складнощів інтеграції з існуючими медичними IT-системами. Попри це, за прогнозами аналітиків, ринок хмарних рішень для медицини продовжить стрімке зростання, сягнувши $285,7 млрд до 2028 р. [1].

В Україні впровадження хмарних технологій у медицині також є стратегічним пріоритетом. МОЗ ініціює проєкти з розвитку телемедицини на базі хмарних платформ та планує до 2030 р. повноцінно впровадити інтелектуальні системи підтримки клінічних рішень та обробки великих даних на всіх рівнях [2].

Метою статті є комплексний аналіз сучасного стану, можливостей та викликів використання хмарних технологій для потреб телемедицини. У статті розглянуто основні переваги та проблеми, потенціал синергії хмарних обчислень із такими технологіями, як Інтернет речей (IoT), сервіс-орієнтована архітектура (SOA) та штучний інтелект (AI). Також наведено та проаналізовано реальні приклади застосування хмарних рішень у телемедицині в Україні та світі.

Виконання досліджень

Синергія хмарних технологій з іншими підходами

У сучасному технологічному ландшафті хмарні обчислення відіграють ключову роль у трансформації різних галузей, у тому числі охорони здоров'я. Поєднання хмарних платформ із такими концепціями, як сервіс-орієнтована архітектура (SOA), штучний інтелект (AI) та Інтернет речей (IoT), відкриває нові можливості для поліпшення якості, доступності та ефективності медичних послуг. Цей розділ присвячено розгляду синергії між хмарними технологіями та кожним із цих підходів.

Хмарні технології та SOA

Сервіс-орієнтована архітектура (SOA) – це архітектурний стиль, який дає змогу розбивати складні системи на більш прості, незалежні сервіси, що взаємодіють через стандартизовані інтерфейси. SOA базується на принципах модульності, багаторазового використання сервісів та слабкої зв'язності компонентів.

У контексті охорони здоров'я застосування SOA дає змогу розділити комплексні медичні системи на окремі функціональні одиниці, такі як сервіси управління електронними медичними записами (EMR), сервіси обробки діагностичних зображень, сервіси аналізу даних тощо. Кожен сервіс виконує специфічну функцію і може бути розроблений, розгорнутий та масштабований незалежно.

Поєднання SOA із хмарними платформами в медицині має низку переваг [3; 4]:

− *Гнучкість та адаптивність*: хмарні сервіси можуть виступати будівельними блоками для SOA, забезпечуючи масштабованість, надійність та доступність окремих компонентів системи охорони здоров'я. Це дає змогу швидко адаптуватися до мінливих потреб галузі, розгортаючи нові сервіси та функціональність за запитом.

− *Поліпшення інтеграції та обміну даними:* хмарні шлюзи та API, побудовані на принципах SOA, забезпечують стандартизовані інтерфейси для безпечного обміну медичними даними між різними системами, пристроями та організаціями. Це сприяє створенню інтегрованої екосистеми охорони здоров'я, де дані можуть безперешкодно передаватися між постачальниками медичних послуг, лабораторіями, страховими компаніями тощо.

− *Прискорення інновацій та зниження витрат*: мікросервісна архітектура на базі хмарних платформ спрощує розроблення, тестування та розгортання нових медичних застосунків. Розробники можуть створювати та оновлювати окремі сервіси незалежно, що прискорює впровадження інновацій. Окрім того, використання хмарної інфраструктури дає змогу медичним організаціям зменшити витрати на обслуговування власних IT-систем.

− *Підвищення відмовостійкості та безпеки*: хмарні провайдери, що підтримують SOA, зазвичай пропонують вбудовані механізми забезпечення відмовостійкості, такі як дублювання сервісів, балансування навантаження та автоматичне відновлення після збоїв. Окрім того, хмарні платформи надають розширені інструменти безпеки, шифрування даних та контролю доступу, що критично важливо для захисту конфіденційної медичної інформації.

Прикладами успішного застосування SOA та хмарних технологій у медицині можуть бути [5]:

− Телемедичні платформи, які інтегрують сервіси відеоконференцзв'язку, обміну медичними даними та віддаленого моніторингу пацієнтів.

− Регіональні системи обміну медичною інформацією (HIE), що дають змогу безпечно обмінюватися даними про пацієнтів між різними медичними закладами.

− Платформи віддаленого моніторингу хронічних захворювань, які дають змогу пацієнтам передавати дані про стан здоров'я (наприклад, рівень глюкози в крові, артеріальний тиск, вагу) із домашніх пристроїв до хмарного сховища, де лікарі можуть відстежувати прогрес і коригувати лікування.

Поєднання SOA із хмарними технологіями в медицині дає змогу створювати гнучкі, масштабовані та безпечні системи, що сприяють інтеграції медичних даних, поліпшенню якості обслуговування пацієнтів та прискоренню впровадження інноваційних рішень. Такий підхід забезпечує міцний фундамент для цифрової трансформації охорони здоров'я та адаптації до майбутніх викликів.

Хмарні технології та AI

Штучний інтелект (AI) – це галузь комп'ютерних наук, яка зосереджена на створенні інтелектуальних машин, здатних виконувати завдання, що зазвичай вимагають людського інтелекту. AI включає такі напрями, як машинне навчання, глибоке навчання, обробка природної мови, комп'ютерний зір та експертні системи.

Застосування AI в охороні здоров'я має значний потенціал для поліпшення діагностики, персоналізації лікування, оптимізації клінічних процесів та підтримки наукових досліджень. Однак розроблення та розгортання моделей AI часто потребують значних обчислювальних ресурсів та великих обсягів даних для навчання.

Поєднання AI із хмарними технологіями дає змогу подолати ці виклики та відкриває нові можливості для трансформації медицини [6; 7]:

− *Масштабована інфраструктура для обробки даних*: хмарні платформи надають практично необмежені обчислювальні потужності та сховища даних, що дає змогу обробляти та аналізувати величезні обсяги структурованих та неструктурованих медичних даних. Це особливо важливо для навчання моделей AI, які потребують значних ресурсів.

− *Доступ до агрегованих даних:* хмарні системи дають змогу збирати та інтегрувати анонімізовані медичні дані з різних джерел, таких як електронні медичні картки, діагностичні зображення, генетичні дані тощо. Доступ до таких багатих та різноманітних наборів даних поліпшує точність та узагальненість моделей AI.

− *Розгортання AI як хмарних сервісів*: натреновані моделі AI можуть бути розгорнуті як хмарні сервіси, доступні для використання медичним працівникам та пацієнтам через вебінтерфейси або API. Це дає змогу легко інтегрувати можливості AI в існуючі медичні системи та робочі процеси.

− *Співпраця та обмін знаннями*: хмарні платформи полегшують співпрацю між дослідниками, медичними закладами та технологічними компаніями у розробленні та вдосконаленні моделей AI. Це сприяє обміну знаннями, валідації результатів та прискоренню інновацій у сфері медичного AI.

Приклади застосування AI та хмарних технологій у медицині включають [8]:

− Системи для автоматизованого аналізу медичних зображень (рентгенівських знімків, КТ, МРТ) із метою виявлення патологій та підтримки діагностики.

− Платформи для персоналізації лікування на основі аналізу геномних, клінічних та життєвих даних пацієнтів.

− Чат-боти та віртуальні асистенти на базі AI для надання медичних консультацій, підтримки прийняття рішень та моніторингу стану здоров'я пацієнтів.

− Системи раннього попередження та прогнозування ризиків на основі аналізу даних з електронних медичних карток та носимих пристроїв.

Отже, синергія між AI та хмарними технологіями в медицині дає змогу розблокувати потенціал даних для поліпшення діагностики, лікування та профілактики захворювань. Хмарні платформи надають необхідну інфраструктуру та інструменти для розроблення, навчання та розгортання моделей AI, що сприяє трансформації охорони здоров'я у більш персоналізовану, превентивну та засновану на доказах галузь.

Хмарні технології та IoT

Інтернет речей (Internet of Things, IoT) – це концепція, що передбачає підключення різноманітних фізичних пристроїв, датчиків та об'єктів до Інтернету для збору, обміну та аналізу даних. У контексті охорони здоров'я IoT охоплює широкий спектр пристроїв, таких як носимі датчики, розумні медичні прилади, системи віддаленого моніторингу пацієнтів та підключені домашні пристрої.

Застосування IoT у медицині дає змогу збирати значно більше даних про стан здоров'я пацієнтів у режимі реального часу, що відкриває нові можливості для персоналізованої медицини, профілактики захворювань та віддаленого догляду. Однак ефективне використання цих даних вимагає надійної та масштабованої інфраструктури для їх збору, зберігання та обробки.

Поєднання IoT із хмарними технологіями створює потужний фундамент для трансформації охорони здоров'я [7; 9]:

− *Безпечний збір та зберігання даних*: хмарні платформи, такі як AWS IoT, Azure IoT Hub та Google Cloud IoT, надають безпечні та масштабовані рішення для збору, зберігання та управління великими обсягами даних із різноманітних медичних IoT-пристроїв. Ці платформи забезпечують шифрування даних, автентифікацію пристроїв та контроль доступу.

− *Обробка та аналіз даних у реальному часі*: хмарні сервіси дають змогу обробляти та аналізувати потоки даних IoT у режимі реального часу за допомогою інструментів потокової аналітики та машинного навчання. Це дає можливість виявляти тривожні сигнали, прогнозувати потенційні проблеми зі здоров'ям та вчасно інформувати медичних працівників.

− *Віддалений моніторинг та догляд*: поєднання IoT-пристроїв із хмарними платформами дає змогу створювати системи віддаленого моніторингу стану здоров'я пацієнтів. Дані з носимих датчиків, розумних медичних приладів та домашніх пристроїв можуть передаватися у хмару для аналізу та візуалізації, що дає змогу медичним працівникам віддалено спостерігати за пацієнтами та надавати своєчасну допомогу.

− *Персоналізовані рекомендації та інтервенції*: інтеграція даних IoT з електронними медичними записами та іншими джерелами медичної інформації дає змогу створювати більш повну картину здоров'я пацієнта. Застосування алгоритмів машинного навчання до цих даних може генерувати персоналізовані рекомендації щодо способу життя, дієти, фізичних вправ та лікування, а також автоматизовані інтервенції, такі як нагадування про прийом ліків.

Приклади використання IoT та хмарних технологій у медицині включають [10]:

− Системи віддаленого моніторингу пацієнтів із хронічними захворюваннями, такими як діабет, серцево-судинні хвороби та хронічні обструктивні захворювання легень (ХОЗЛ).

− Розумні медичні пристрої, такі як інгалятори з підключенням до хмари, які відстежують використання та надають зворотний зв'язок пацієнтам і лікарям.

− Носимі датчики для моніторингу життєво важливих показників, рівня активності та сну з передачею даних у хмарні платформи для аналізу та генерації інсайтів.

− Системи домашнього моніторингу для людей похилого віку та пацієнтів, які проходять реабілітацію, із використанням датчиків руху, розумних медичних приладів та відеоспостереження.

Поєднання IoT із хмарними технологіями в медицині створює нові можливості для збору та використання даних про здоров'я пацієнтів в режимі реального часу. Це дає змогу перейти від реактивної до проактивної та персоналізованої моделі охорони здоров'я, де проблеми можуть бути виявлені та попереджені на ранніх стадіях, а лікування та догляд адаптовані до індивідуальних потреб кожного пацієнта.

Загалом розглянуті підрозділи демонструють, що синергія хмарних технологій із такими підходами, як SOA, AI та IoT, має значний потенціал для трансформації системи охорони здоров'я. Ця синергія дає змогу створювати більш гнучкі, масштабовані та персоналізовані рішення, які поліпшують якість медичних послуг, оптимізують витрати та підвищують доступність медичної допомоги для пацієнтів.

Реальні приклади трансформації охорони здоров'я за допомогою хмарних технологій

У цьому підрозділі розглядаються кілька новаторських проєктів та ініціатив із різних куточків світу, які демонструють, як хмарні технології у поєднанні з іншими підходами вже змінюють спосіб надання медичних послуг та поліпшують результати для пацієнтів. Вони забезпечують більш комплексне та інтелектуальне надання медичних послуг, покращуючи результати лікування пацієнтів і кращу координацію між різними зацікавленими сторонами в екосистемі охорони здоров'я.

Ось кілька прикладів подібних до запропонованих проєктом платформ і систем охорони здоров'я, які були впроваджені або знаходяться на стадії розроблення в різних країнах світу (табл. 1).

Таблиця 1

Розумні світові платформи та системи охорони здоров'я

№	Країна, назва платформи	Функціональність
1	США: **Cerner Health**	*Cerner* пропонує низку рішень для охорони здоров'я, включаючи платформу HealtheLife, яка об'єднує переносні пристрої, дистанційне спостереження за пацієнтами та послуги телемедицини для лікування хронічних захворювань.
2	Великобританія: **NHS Digital's Remote Monitoring Platform**	*Національна служба охорони здоров'я* (NHS) у Великобританії розробляє платформу віддаленого моніторингу, яка дасть змогу постачальникам медичних послуг контролювати життєво важливі показники та дані про стан здоров'я пацієнтів за допомогою переносних пристроїв і домашніх датчиків.
3	Великобританія: **Babylon Health**	*Babylon Health* пропонує віртуальну медичну послугу, включаючи дистанційні консультації, засоби перевірки симптомів за допомогою ШІ та платформу для інтеграції переносних пристроїв і даних про здоров'я.
4	Канада: **TELUS Health Cloud**	*TELUS Health Cloud* – це платформа, яка поєднує електронні медичні записи, віртуальну допомогу та рішення для дистанційного моніторингу пацієнтів, що дає змогу постачальникам медичних послуг отримувати доступ до даних пацієнтів і надавати допомогу віддалено.
5	Канада: **Cloud DX**	*Cloud DX* – компанія, яка надає платформу віддаленого моніторингу пацієнтів, об'єднуючи переносні пристрої та домашні датчики для лікування хронічних захворювань і надання віртуальної допомоги..
6	Австралія: **Telstra Health**	*Telstra Health* надає цілу низку цифрових рішень для охорони здоров'я, включаючи дистанційний моніторинг пацієнтів, телемедицину та платформи віртуального догляду, використовуючи носимі пристрої та підключені технології охорони здоров'я.
7	Сінгапур: **Integrated Health Information Systems** (IHiS)	*IHiS* – це державна агенція, яка розробила різні цифрові платформи охорони здоров'я, включаючи Національну систему електронних медичних записів (NEHR) і платформу телемедичної допомоги для дистанційних консультацій і моніторингу.
8	Китай: **Ping An Good Doctor**	*Ping An Good Doctor* – це провідна онлайн-платформа охорони здоров'я, яка пропонує віртуальні консультації, послуги віддаленого моніторингу та інтеграцію з переносними пристроями та даними про здоров'я.
9	Китай: **Alibaba Cloud's Healthcare Solutions**	*Alibaba Cloud* надає хмарні рішення для охорони здоров'я, включаючи платформу для віддаленого моніторингу пацієнтів, аналітику даних і підтримку клінічних рішень на основі штучного інтелекту.
10	Німеччина: **Siemens Healthineers Digital Ecosystem**	*Siemens Healthineers* пропонує цифрову екосистему, яка включає дистанційне спостереження за пацієнтами, рішення телемедицини та можливості аналізу даних для різних медичних закладів.

Ці приклади демонструють глобальне впровадження та розвиток інтегрованих платформ охорони здоров'я, які використовують переносні пристрої, віддалений моніторинг, аналітику даних і хмарні технології, щоб забезпечити більш персоналізоване, доступне та ефективне надання медичних послуг. Видно, що в наведених прикладах країни ЄС не займають лідируючих позицій.

Варто сказати, що серед перерахованих вище платформ немає жодної, побудованої за сервісним принципом, тому варто впровадити сервісне ядро медичної платформи з широким набором функцій і додатків. Пацієнт, зареєстрований на такій платформі, може розраховувати на точний діагноз, а в екстремальній ситуації – на миттєве надання лікарям своєї історії хвороби. Дистанційна діагностика та моніторинг стану пацієнта мають вирішальне значення для охорони здоров'я сільського населення, де лікарів і лікарень мало.

Існує також кілька сховищ та ініціатив із відкритим вихідним кодом, які надають багаторазові та сумісні сервіси або модулі для охорони здоров'я та медичних програм, дотримуючись принципів FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable) (табл. 2).

Ці репозиторії та ініціативи пропонують низку повторно використовуваних і сумісних сервісів, модулів і ресурсів, які можна використовувати для розроблення інтелектуальних медичних завдань і платформ із мінімальними витратами. Знову ж таки, більшість із них розроблено поза Європою.

Висновки

У роботі розглянуто роль хмарних технологій у трансформації системи охорони здоров'я та їхній вплив на розвиток телемедицини. Аналіз переваг, архітектурних підходів та синергії з іншими технологіями дав змогу зробити кілька ключових висновків.

По-перше, хмарні технології мають значний потенціал для трансформації медичних послуг, забезпечуючи масштабованість, гнучкість та економічну ефективність. Вони відіграють ключову роль у розвитку телемедицини, даючи змогу долати географічні бар'єри та розширювати доступ до медичної допомоги.

Таблиця 2
FAIR-репозиторій інваріантних сервісів

№	Назва репозиторія	Функціональність
1	**FHIR (Fast Healthcare Interoperability Resources)**	FHIR – це міжнародний стандарт для електронного обміну медичними даними, розроблений HL7 (Health Level Seven International). Репозиторій FHIR (https://www.hl7.org/fhir/) надає набір ресурсів і API, які можна використовувати як будівельні блоки для розроблення сумісних програм охорони здоров'я, включаючи модулі для керування даними, зв'язку та інтеграції із зовнішніми системами.
2	**OpenEHR**	OpenEHR (https://www.openehr.org/) – це система з відкритим вихідним кодом, яка забезпечує нейтральну та сумісну структуру для електронних медичних записів (EHR). Вона пропонує сховище клінічних моделей, архетипів і термінологічних ресурсів, які можна використовувати як будівельні блоки для розроблення програм охорони здоров'я, включаючи модулі для моделювання даних, запитів та обміну.
3	**Open Health Services and Integration Resources (OHSIR)**	OHSIR (https://ohsir.org/) – це спільний проєкт, метою якого є створення репозиторію багаторазових сервісів і компонентів із відкритим кодом для програм охорони здоров'я. Він надає низку послуг і модулів, пов'язаних з інтеграцією даних, керуванням термінологією, підтримкою клінічних рішень і взаємодією.
4	**OHDSI (Observational Health Data Sciences and Informatics)**	OHDSI (https://www.ohdsi.org/) – міжнародна спільна організація, яка зосереджена на розробленні рішень із відкритим кодом для доглядових досліджень і охорони здоров'я на основі цінностей. Вона пропонує низку інструментів і ресурсів, у тому числі OMOP Common Data Model (CDM) і стандартизовані словники, які можна використовувати як будівельні блоки для інтеграції даних, аналітики та дослідницьких програм у сфері охорони здоров'я.
5	**OpenMRS**	OpenMRS (https://openmrs.org/) – це платформа електронної системи медичних записів із відкритим кодом. Незважаючи на те що воно не є явно сховищем, вона надає модульну структуру для спільноти розробників, які вносять багаторазові модулі для різних функціональних можливостей охорони здоров'я, таких як керування пацієнтами, збір даних, звітування та інтеграція із зовнішніми системами.
6	**SMART (Substitutable Medical Applications and Reusable Technologies)**	SMART (https://smarthealthit.org/) – це відкрита стандартизована платформа для розроблення та інтеграції програм охорони здоров'я. Вона надає набір API, бібліотек і інструментів, які можна використовувати для створення сумісних і взаємозамінних сервісів охорони здоров'я, забезпечуючи повну інтеграцію з електронними системами медичних записів (EHR) та іншими джерелами медичних даних.

По-друге, поєднання хмарних технологій із сервіс-орієнтованою архітектурою (SOA), штучним інтелектом (AI) та Інтернетом речей (IoT) відкриває нові можливості для трансформації охорони здоров'я. Це дає змогу створювати гнучкі та масштабовані системи телемедицини, покращувати діагностику, персоналізувати лікування, оптимізувати клінічні процеси та забезпечувати безперервний моніторинг стану здоров'я пацієнтів, сприяючи переходу до проактивної моделі медичної допомоги.

Нарешті, реальні приклади успішних проєктів демонструють практичне застосування хмарних технологій для вирішення конкретних проблем охорони здоров'я, а оглянуті репозиторії та ініціативи з відкритим кодом надають багаторазові та сумісні сервіси для швидкого та зручного розроблення медичних додатків. Ці проєкти показують, як інноваційні рішення на базі хмарних платформ можуть поліпшувати результати лікування, оптимізувати витрати та розширювати доступ до якісної медичної допомоги.

Література

1. Telehealth & telemedicine market by component (software & services (RPM, real-time), hardware (monitors)), delivery (0n-premise, cloud-based), application (teleradiology, telestroke), end user (provider, payer) & region – global forecast to 2028. *MarketsAndMarkets*. URL: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/telehealth-market-201868927.html (дата звернення: 21.03.2024).

2. МОЗ України. Стратегія розвитку системи охорони здоров'я до 2030 року. URL: https://moz.gov.ua/uploads/ckeditor/Стратегія/UKR%20Health%20Strategy%20Feb%2024.2022.pdf(дата звернення: 21.03.2024).

3. Božić V. Service oriented architecture & smart hospital. 2023. DOI: https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33654.37447 (дата звернення: 04.04.2024).

4. A microservice-based system for industrial internet of things in fog-cloud assisted network / F.H. Khoso et al. *Engineering, technology & applied science research*. 2021. T. 11. № 2. P. 7029–7032. DOI: https://doi.org/10.48084/etasr.4077 (дата звернення: 04.04.2024).

5. The role of service oriented architecture in telemedicine healthcare system / A. Shaikh et al. 2009 international conference on complex, intelligent and software intensive systems (CISIS), Fukuoka, Japan, 2009. DOI: https://doi.org/10.1109/cisis.2009.181 (дата звернення: 04.04.2024).

6. Artificial intelligence in healthcare: transforming the practice of medicine / J. Bajwa et al. *Future healthcare journal*. 2021. Т. 8. № 2. P. e188-e194. DOI: https://doi.org/10.7861/fhj.2021-0095 (дата звернення: 04.04.2024).

7. Rosoł K. Cloud computing, artificial intelligence and machine learning in healthcare. the future of patient care. *Inetum*. URL: https://www.nearshore-it.eu/articles/technologies/machine-learning-in-healthcare/.

8. The future of healthcare: how cloud technology and AI are transforming medicine. DOIT Security. URL: https://doitsecurity.com/the-future-of-healthcare-how-cloud-technology-and-ai-are-transforming-medicine/ (дата звернення: 04.04.2024).

9. Rayan R.A., Tsagkaris C. IoT technologies for smart healthcare. *Assistive technology intervention in healthcare*. Boca Raton, 2021. P. 29–46. DOI: https://doi.org/10.1201/9781003207856-3 (дата звернення: 04.04.2024).

10. Towards fog-driven IoT eHealth: Promises and challenges of IoT in medicine and healthcare / B. Farahani et al. Future generation computer systems. 2018. Т. 78. P. 659–676. DOI: https://doi.org/10.1016/j.future.2017.04.036 (дата звернення: 04.04.2024).

References

1. *Telehealth & telemedicine market by component (software & services (RPM, real-time), hardware (monitors)), delivery (0n-premise, cioud-based), appiication (teleradiology, telestroke, teieicu), end user (provider, payer) & region – global forecast to 2028*. (2023, december). MarketsAndMarkets. https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/telehealth-market-201868927.html

2. Ministerstvo okhorony zdorovia Ukrainy [Ministry of Health of Ukraine]. (2022, february). *Stratehiia rozvytku systemy okhorony zdorov'ia do 2030 roku* [Strategy for the Development of the Healthcare System until 2030]. https://moz.gov.ua/uploads/ckeditor/Стратегія/UKR%20Health%20Strategy%20Feb%2024.2022.pdf

3. Božić, V. (2023). Service oriented architecture & smart hospital. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33654.37447

4. Khoso, F.H., Lakhan, A., Arain, A.A., Soomro, M.A., Nizamani, S.Z., & Kanwar, K. (2021). A microservice-based system for industrial internet of things in fog-cloud assisted network. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, *11*(2), 7029–7032. https://doi.org/10.48084/etasr.4077

5. Shaikh, A., Memon, M., Memon, N., & Misbahuddin, M. (2009). The role of service oriented architecture in telemedicine healthcare system. У 2009 international conference on complex, intelligent and software intensive systems (CISIS). IEEE. https://doi.org/10.1109/cisis.2009.181

6. Bajwa, J., Munir, U., Nori, A., & Williams, B. (2021). Artificial intelligence in healthcare: Transforming the practice of medicine. *Future Healthcare Journal*, *8*(2), Paper e188–e194. https://doi.org/10.7861/fhj.2021-0095

7. Rosoł, K. (2023, 23 of November). *Cloud computing, artificial intelligence and machine learning in healthcare. the future of patient care*. Inetum. https://www.nearshore-it.eu/articles/technologies/machine-learning-in-healthcare/

8. The future of healthcare: How cloud technology and AI are transforming medicine. (б.д.). DOIT Security. https://doitsecurity.com/the-future-of-healthcare-how-cloud-technology-and-ai-are-transforming-medicine/

9. Rayan, R.A., & Tsagkaris, C. (2021). IoT technologies for smart healthcare. У *Assistive technology intervention in healthcare* (p. 29–46). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003207856-3

10. Farahani, B., Firouzi, F., Chang, V., Badaroglu, M., Constant, N., & Mankodiya, K. (2018). Towards fog-driven IoT eHealth: Promises and challenges of IoT in medicine and healthcare. Future Generation Computer Systems, 78, 659–676. https://doi.org/10.1016/j.future.2017.04.036

УДК 004.056
DOI: https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-11

АНАЛІЗ ІНДИКАТОРІВ ЗАГРОЗ ІНФОРМАЦІЙНІЙ БЕЗПЕЦІ В ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЗАСТОСУВАННЯ SIEM-СИСТЕМ

Писарчук О. О., *д.т.н., проф., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. https://orcid.org/0000-0001-5271-0248, platinumpa2212@gmail.com*

Кошара А. В., *аспірант, Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Київ, Україна. https://orcid.org/0009-0000-8468-2704, artemkosharaa@gmail.com*

Анотація*. У статті проведено аналіз особливостей аналітичної обробки інформації для виявлення загроз інформаційній безпеці в інформаційно-телекомунікаційних системах за результатами застосування SIEM-систем. Зокрема, розглянуто актуальну проблему зростання кіберзагроз у світі, що посилюється з розвитком технологій штучного інтелекту. Наголошено на необхідності впровадження передових методів аналітики для ефективного виявлення загроз та оцінки ризиків, пов'язаних з інформаційною безпекою. Особливу увагу приділено впливу кіберзагроз на нацбезпеку держав, зокрема на державний сектор, який є однією з основних мішеней для кібератак. Відзначено, що кібератаки на держсектор можуть мати значні негативні наслідки, включаючи порушення функціонування критичної інфраструктури, витік конфіденційної інформації та підрив довіри до урядових органів. Застосовано поняття інфологічної моделі факторів, що дає змогу оцінити рівень захищеності інформаційно-телекомунікаційних систем від кіберзагроз за даними від SIEM. Модель включає аналіз різноманітних чинників, що можуть впливати на безпеку систем: технічних, організаційних, людських. У результаті застосування моделі можна отримати комплексну картину стану безпеки системи та виявити слабкі місця, які потребують додаткової уваги. Кіберзагрози класифіковано на три рівні: рівень соціальної інженерії, мережевий рівень та рівень кінцевої точки. Для кожного із цих рівнів надано детальний опис індикаторів, що дають змогу виявити загрози. Наголошено на важливості аналізу індикаторів ризиків інформаційної безпеки та окреслено перспективи подальших досліджень, спрямованих на формалізацію системи індикаторів загроз і багатофакторного оцінювання. Установлено ієрархію індикаторів загроз, яка базується на чинниках їх появи, що дає змогу ефективніше управляти безпекою інформаційно-телекомунікаційних систем та своєчасно реагувати на нові виклики.*

Ключові слова: *SIEM, індикатори, ризики, інформаційна безпека, багатофакторне оцінювання, державний сектор, аналіз.*

ANALYSIS OF INDICATORS OF INFORMATION SECURITY THREATS IN INFORMATION AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS ACCORDING TO THE RESULTS OF THE APPLICATION OF SIEM SYSTEMS

Oleksii Pysarchuk, *Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Computer Engineering Department of the Faculty of Informatics and Computing, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0001-5271-0248, platinumpa2212@gmail.com*

Artem Koshara, *postgraduate, Open International University of Human Development «Ukraine», Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0009-0000-8468-2704, artemkosharaa@gmail.com*

Abstract. *The article analyzes the features of analytical processing of information to identify threats to information security in information and telecommunication systems based on the results of the use of SIEM systems. In particular, the current problem of the growth of cyber threats in the world, which is increasing with the development of artificial intelligence technologies, is considered. It is emphasized the need to implement advanced analytical methods for effective threat detection and risk assessment related to information security. Special attention is paid to the impact of cyber threats on the national security of states, in particular on the public sector, which is one of the main targets for cyber attacks. It was noted that cyber-attacks on the public sector can have significant negative consequences, including disruption of critical infrastructure, leakage of confidential information and undermining of trust in government agencies. The concept of an infological model of*

factors is used, which allows you to assess the level of security of ITS against cyber threats based on data from SIEM. The model includes the analysis of various factors that can affect the security of systems: technical, organizational, and human factors. As a result of applying the model, you can get a comprehensive picture of the state of system security and identify weak points that require additional attention. Cyber threats are classified into three levels: the social engineering level, the network level, and the endpoint level. For each of these levels, a detailed description of indicators that allow detecting threats is provided. The importance of the analysis of information security risk indicators is emphasized and the prospects for further research aimed at formalizing the system of threat indicators and multifactorial assessment are outlined. A hierarchy of threat indicators has been established, which is based on the factors of their appearance, which allows for more effective management of the security of information and telecommunication systems and a timely response to new challenges.

Key words: *SIEM, indicators, risks, information security, multi-factor assessment, public sector, analysis.*

Вступ

Досвід сьогодення переконливо доводить актуальність та нагальність питань забезпечення інформаційної безпеки (ІБ) інформаційно-телекомунікаційних систем (ІТС). Особливо ці питання загострюються для сектору державних ІТС. Державний сектор залишається однією з основних мішеней для зловмисників. Так, лише протягом цього року зафіксовано 12 217 інцидентів (позначено синім кольором на рис. 1), із них 1 085 – із підтвердженим оприлюдненням/компрометацією інформації, що захищалася [1].

	Incidents				Breaches			
Industry	Total	Small (1–1,000)	Large (1,000+)	Unknown	Total	Small (1–1,000)	Large (1,000+)	Unknown
Total	30,458	919	1,298	28,241	10,626	617	986	9,023
Accommodation (72)	220	16	9	195	106	16	9	81
Administrative (56)	28	7	7	14	21	6	4	11
Agriculture (11)	79	5	0	74	56	4	0	52
Construction (23)	249	17	6	226	220	12	5	203
Education (61)	1,780	82	630	1,068	1,537	56	618	863
Entertainment (71)	447	16	2	429	306	10	1	295
Finance (52)	3,348	75	122	3,151	1,115	54	87	974
Healthcare (62)	1,378	54	21	1,303	1,220	41	18	1,161
Information (51)	1,367	79	62	1,226	602	49	19	534
Management (55)	22	4	1	17	19	4	1	14
Manufacturing (31–33)	2,305	102	81	2,122	849	62	49	738
Mining (21)	30	1	2	27	20	1	1	18
Other Services (81)	462	13	5	444	417	8	5	404
Professional (54)	2,599	205	102	2,292	1,314	124	73	1,117
Public Administration (92)	12,217	56	115	12,046	1,085	39	27	1,019
Real Estate (53)	432	35	5	392	399	29	2	368
Retail (44–45)	725	90	47	588	369	55	32	282
Transportation (48–49)	260	21	38	201	138	17	12	109
Utilities (22)	191	17	11	163	130	12	6	112
Wholesale Trade (42)	76	22	21	33	54	17	14	23
Unknown	2,243	2	11	2,230	649	1	3	645
Total	30,458	919	1,298	28,241	10,626	617	986	9,023

Рис. 1. Кількість інцидентів із ІБ за галуззю

Об'єктами атаки є ІТС елементів критичної інфраструктури держави: системи державного управління, сектор безпеки і оборони, енергетика, зв'язок, банківська сфера тощо [2]. Метою інформаційного впливу є порушення цілісності, конфіденційності та/або доступності інформації, що циркулює в ІТС критичної інфраструктури. Таким чином, *забезпечення ІБ в ІТС об'єктів критичної інфраструктури загалом та державного сектору зокрема є важливим і нагальним завданням*.

Практика забезпечення ІБ в ІТС може здійснюватися з використанням інструментів SIEM – систем забезпечення управління інформаційною безпекою ІТС [3]. Це забезпечує отримання, акумуляцію та можливість комплексного аналізу даних про процеси функціонування компонент ІТС: програм, комп'ютерних систем, мережевого обладнання тощо в реальному масштабі часу в різних умовах поточної обстановки. Базовим функціоналом SIEM-системи будь-якого типу є: акумуляція даних та керування журналами подій; відстеження інцидентів і реагування на них; виявлення підозрілих дій користувачів та ін.

Процеси забезпечення інформаційної безпеки є суттю антагоністичного конфлікту порушника та суб'єкта забезпечення інформаційної безпеки. Це виявляється у постійній модифікації способів та сценаріїв нападу на інформацію з формуванням заходів протидій на досвіді успішних інцидентів за апріорною невизначеністю потенційних та реальних загроз. Тому реалізують динамічний процес управління інформаційною безпекою, тобто реагування на загрози в реальному часі з використанням заздалегідь побудованої та відкритої до модифікації системи забезпечення ІБ в ІТС.

Апріорна невизначеність про конкретику методів і способів нападу на інформацію в ІТС потребує організації адаптивного аналітичного аналізу інформації від SIEM-систем суб'єктами забезпечення ІБ (фахівцями із кібербезпеки) в реальному масштабі часу. Тобто маємо ергатичну (за участю людини) автоматизовану систему управління інформаційною безпекою. Її недоліки полягають у відносній інертності прийняття рішень, обмеженій пропускній здатності, залежності результатів від психофізіологічного стану людини та її підготовки. Тому *важливим є розроблення автоматизованої системи підтримки прийняття рішень (СППР) (класу smart ERP), яка б моделювала аналітичну діяльність суб'єкта забезпечення ІБ за даними від SIEM-систем.*

Реалізація процесу автоматизації прийняття рішень про інформаційні загрози в ІТС має базуватися на математичному моделюванні аналітичної діяльності суб'єкта забезпечення ІБ за даними від SIEM-систем. Це можливо з використанням методів машинного навчання, зокрема багатокритеріального scoring-у (оцінювання) [4; 5].

Для застосування багатокритеріального scoring-у необхідно описати предметну сферу прийняття рішень – аналітичну роботу суб'єкта забезпечення ІБ у взаємозв'язку факторів, показників та критеріїв загроз. Зазначене має відображати інфологічну модель предметної сфери виявлення загроз ІБ за результатами роботи SIEM-систем. Тобто необхідно створити scoring-гову карту індикаторів загроз ІБ, на якій на рівні *образів* у ментальності «як найкраще, як найгірше» сформувати сценарії можливих загроз. Це дасть змогу в подальшому «навчити» *smart ERP-систему ідентифікувати загрози ІБ за індикаторами від SIEM-систем.* Де факто надати суб'єкту забезпечення ІБ компетентне рішення про загрози для управління ІБ. *Образи* мають формувати дійсні експерти-професіонали у сфері ІБ, що підвищує ефективність синергетичного об'єднання дій пересічного суб'єкта забезпечення ІБ та smart ERP-системи виявлення загроз ІБ.

Таким чином, метою статті є перший етап створення інфології загроз ІБ – аналіз індикаторів загроз інформаційній безпеці в інформаційно-телекомунікаційних системах за результатами застосування SIEM-систем.

Із позицій методології завдання ідентифікації загроз ІБ полягає у бінарній класифікації/кластеризації за множиною (вектором) ознак. У такій інтерпретації відома доволі значна кількість методів машинного навчання, зокрема [6–9]: k-Means / Hard-c-means / k-середніх; метод «найближчого сусіда» / k-nearest neighbors algorithm / k-NN; метод опорних векторів (support vector machine – SVM); ієрархічна кластеризація; дискримінантний аналіз; логістична регресія; наївний байесовский класифікатор; методи глибинного навчання із застосуванням штучних нейронних мереж; багатофакторний/багатокритеріальний скоринговий аналіз.

Зазначені підходи, безумовно, мають свої переваги та недоліки та практику успішного використання в багатьох прикладних задачах. У ході досліджень буде використаний багатофакторний/багатокритеріальний скоринговий аналіз. Причинами цього є таке: можливість відносно більшої адекватності відображення міркувань суб'єкта забезпечення ІБ у формуванні образів загроз на рівні ментальних суджень «як найкраще, як найгірше»; можливість отримання рішень, оптимальних за Парето; відносна невелика обчислювальна складність; структурна відкритість підходу до додавання індикаторів загроз; пропорційність інтегрованого скору загроз ІБ імовірності їх виявлення; реалізація схеми навчання без учителя, що спрощує вимоги до вхідних даних.

Для формування інфологічних моделей предметної галузі існує практика унітарного чи комбінаторного використання аналітичних, евристичних та експериментальних підходів. Для виявлення взаємозв'язку факторів та показників загроз ІБ за індикаторами від SIEM-систем природно використати на первинному етапі (реалізовано в статті) аналітичний, евристичний аналіз.

Виконання досліджень

Забезпечення ІБ – це комплексне поняття, що характеризується різноманітними індикаторами (потенційні та/або реальні факти (прямі, непрямі), ризики тощо). Залежно від комбінаторики цих індикаторів визначається тип загроз та їхній рівень (severity). Задля визначення рівня загроз та захищеності ІТС за даними від SIEM на основі таких індикаторів необхідно сформувати інфологічну модель факторів, показників та критеріїв загроз інформаційній безпеці. Водночас рішення про включення категорії індикаторів до інфологічної моделі має базуватися на прагматиці та суті аналітичної обробки індикаторів для виявлення загроз ІБ. Тому, перш за все, слід розглянути суть процесів аналітичної обробки інформації від SIEM-системи, які визначатимуть зміст скорингової карти інфологічної моделі. Надалі слід сформувати головні категорії показників загроз ІБ в ІТС.

І. Опис процесів аналітичної обробки інформації SIEM-системами.

Функціонування SIEM-систем орієнтовано на реалізацію суб'єкта забезпечення ІБ: агрегація та моніторинг реєстрації користувачів ІТС (логування) у реальному часі; зіставлення подій безпеки;

аналіз атрибутів доступу користувачів і звітність щодо відповідності вимогам; виявлення шкідливого програмного забезпечення; аналіз мережевого трафіку та інформаційне сприяння проведенню розслідувань; оцінювання вразливостей ІТС; аналітика поведінки користувачів ІТС. Зазначені процеси спрямовані на виявлення підозрілих дій та запобігання інформаційним потенційним інтендантам, локалізація та призупинення інцидентів, що сталися, ліквідація їхніх наслідків та розслідування подій. Зазначені процеси реалізуються на множині індикаторів, які можна узагальнити в три головні категорії: *індикатори атак соціальної інженерії (наприклад, фішинг); індикатори мережевого рівня; індикатори рівня кінцевої точки.* Кожен із них має прямі та опосередковані індикатори, які об'єктивно визначаються SIEM-системою та аналізуються суб'єктом забезпечення ІБ. Їх аналітична обробка передбачає комплексний аналіз часткових індикаторів зазначених груп. Цей процес базується на врахуванні та порівнянні поточної ситуації з ретроспективним досвідом інцидентів що відбулися на об'єкті інформаційної діяльності, оприлюднені іншими фахівцями та за досвідом суб'єкта забезпечення ІБ. При цьому типові загрози ІБ виявляються за допомогою імплантованих до SIEM-систем алгоритмів. Складності в аналітиці виникають відносно апріорно невідомих сценаріїв дій зловмисників відносно ІТС. А отже, це і є предметом автоматизації за допомогою smart ERP-системи ідентифікації загроз ІБ, для якої формуються причинно-наслідкові зв'язки факторів, показників та критеріїв виявлення загроз. Конкретика аналізу наводиться в описі категорій загроз ІБ.

ІІ. Головні категорії показників загроз ІБ в ІТС.

Індикатори атак соціальної інженерії. Атаки соціальної інженерії через засоби комунікації можуть бути класифіковані за ознаками: мета, спосіб доставки, тип умісту, ступінь персоналізації тощо. Але всі вони мають спільну ознаку в меті – використати користувачів ІТС для цілей атаки. Наприклад, отримати корисні дані через шкідливе посилання, що переадресує користувача на сторінку, для викрадення облікових даних (логін, пароль), текстовий файл (документ пакету Office, PDF-файл тощо), що міститиме посилання або шкідливий макрос для завантаження шкідливого навантаження та розгортання на пристрої. За допомогою SIEM-систем суб'єкт забезпечення ІБ аналізує отримані індикатори загроз із поштового сервера, що містяться в метаданих листа: невідповідність доменів, електронних адрес, IP-адрес, підписів, умісту, вкладень, підписів SPF, DKIM і DMARC тощо.

Відповідно, якщо перевірка індикаторів SPF, DKIM і DMARC провалилася – це одна з ознак фішингу, що впливатиме на оцінку загроз (до scor-у мають додаватися бали до рівня ризику). На рис. 2 наведено ілюстрацію успішної перевірки SPF та DKIM – IP-адреса відповідає заявленому домену відправника.

Received-SPF	pass (google.com: domain of icct@uu.kyiv.ua designates 178.20.159.40 as permitted sender) client-ip=178.20.159.40;
Authentication-Results	mx.google.com; dkim=temperror (no key for signature) header.i=@uu.kyiv.ua header.s=dkim header.b=MrSpcoEy; spf=pass (google.com: domain of icct@uu.kyiv.ua designates 178.20.159.40 as permitted sender) smtp.mailfrom=icct@uu.kyiv.ua
DKIM-Signature	v=1; a=rsa-sha256; q=dns/txt; c=relaxed/relaxed; d=uu.kyiv.ua; s=dkim; h=Content-Transfer-Encoding:Content-Type:MIME-Version:Subject: Message-ID:Date:From:To:Sender:Reply-To:Cc:Content-ID:Content-Description: Resent-Date:Resent-From:Resent-Sender:Resent-To:Resent-Cc:Resent-Message-ID: In-Reply-To:References:List-Id:List-Help:List-Unsubscribe:List-Subscribe: List-Post:List-Owner:List-Archive; bh=9jzPyymu9+vYwlDW5Jy0xSg7DAD3/7pMHxaddZEYlJ8=; b=MrSpcoEyHkAMjPZg2qTecqmxbH qAiS/C4jwCfjHSWl3pqDC4DxwO6mX26sQMyp+4GyRwGM394xyZgQIN6fdgi7yXctgaZr8RfconPVR rItoT77BPrdfqmfJBjThH1pySlC9lDZBcjy7YPTd7Q2m4cXiZRj+5ol+6uXL+Vmm4NV0=;

Рис. 2. Аналіз індикаторів електронного листа на наявність перевірок SPF, DKIM, DMARC

Індикатори мережевого рівня. Під час мережевої комунікації або спроб такої комунікації SIEM-системи здатні «підсвічувати» аномальний мережевий трафік, якщо отримують дані з мережевого обладнання. Індикаторами загроз інформаційної безпеки мережевого рівня доречно визначити: протоколи, порти, репутацію IP-адреси, уміст пакету та успішність мережевої комунікації. На рис. 3 зображено результат перевірки IP-адреси, що має вкрай негативну репутацію на сервісі IBM X-Force Exchange і тісну інтеграцію з SIEM Qradar. Відповідно, результат розрахунку оцінки загроз – scor має бути більш відповідним у бік високих ризиків ІБ.

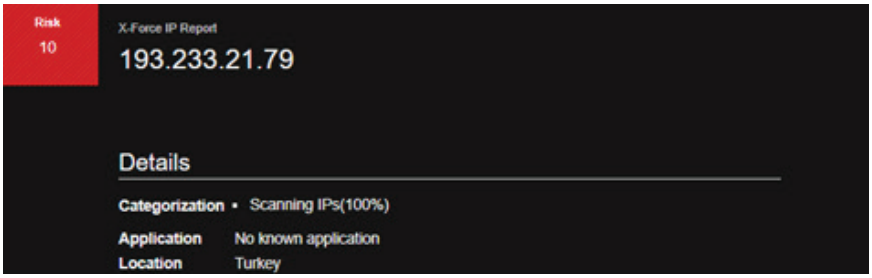


Рис. 3. Результат перевірки репутації IP-адреси, що має негативну репутацію

Індикатори рівня кінцевої точки. Серед індикаторів загроз даного рівня доцільно визначити такі: актуальність версії програмного забезпечення, результати перевірки файлів системи антивірусними засобами, їх контрольних сум (хешів) серед існуючих баз шкідливих файлів, зміни реєстру, зафіксована аномальна активність процесів на кінцевому пристрої. SIEM-системи в інтеграції з такими системами сканування файлів, як VirusTotal, здатні перевіряти репутацію програм, файлів хешів. На рис. 4 зображено результат пошуку за хешем файлу у базі знань VirusTotal. За результатами перевірки встановлено, що файл має негативну репутацію серед більшості існуючих антивірусних систем захисту.

Рис. 4. Результат пошуку за хешем у базі знань VirusTotal

Таким чином, виходячи наведених міркувань, можливо встановити головні категорії показників загроз ІБ в ІТС та на їх підставі сформувати систему часткових показників (табл. 1). Зазначена структура скорингової карти є основою для формування інфологічної моделі факторів, показників та критеріїв виявлення загроз ІТС за даними від SIEM-систем.

Таблиця 1

Головні категорії показників загроз ІБ в ІТС

Рівень	Індикатори загроз	Позначення
Соціальна інженерія	Інсайдерська загроза, фішинг	F_{soc}
Мережевий рівень	Комунікація з IP	F_{ip}
	Комунікація з URL	F_{url}
	Застосування експлойтів мережевих служб, баз даних, застосунків	F_{ex}
Рівень кінцевої точки	Брутфорс	F_{b}
	Актуальність версії ПЗ	F_{s}
	Використання неліцензійного ПЗ	F_{lic}
	Стан роботи модулів антивірусної системи захисту	F_{mal}
	Адміністративний доступ у звичайного користувача	F_{adm}
	Виявлення шкідливого файлу	F_{mf}

Інформаційні складові табл.1 дозволяють сформувати вектор індикаторів загроз ІБ в ІТС за даними від SIEM-систем:

$$D = \left[F_{soc} F_{ip} F_{url} F_{ex} F_{b} F_{s} F_{lic} F_{mal} F_{adm} F_{mf} \right]^{T} \quad (1)$$

Таким чином, маємо первинний рівень класів індикаторів загроз ІБ в ІТС. У подальшому буде реалізовано: декомпозицію класів на унітарні часткові показники; установлення джерел даних, порядку їх розрахунку; ревізію індикаторів на всебічність відображення загроз ІБ; аналіз на співвідношення об'єктивних/суб'єктивних індикаторів; установлення вимог екстремуму – формування критеріїв виявлення загроз ІБ в ІТС за даними від SIEM-систем. Запропонована структура відріз-

няється комплексним підходом до всіх груп показників з урахуванням поточних технічних можливостей SIEM-систем.

Висновки

Аналіз проблематики забезпечення ІБ в ІТС, що здійснюється за даними від SIEM-систем, показав таке. Для реакції на актуальні загрози реалізується контур управління ІБ із залученням ергатичного складника – суб'єкта забезпечення ІБ (фахівці у сфері кібербезпеки). Рішення про конкретику загроз ІБ приймається суб'єктивно, на підставі аналітичної обробки множини індикаторів, що отримується за даними від SIEM-систем. Недоліки автоматизованих систем спонукають до розроблення та впровадження smart ERP-систем ідентифікації загроз ІБ за індикаторами від SIEM-систем. Розроблення такої системи має базуватися на методах багатофакторного/багатокритеріального scoring-у, що, своєю чергою, потребує побудови інфологічної моделі факторів, показників та критеріїв ІБ в ІТС за даними від SIEM-систем. У ході досліджень запропоновано головні категорії показників загроз ІБ в ІТС (див. табл. 1 та вир. (1)).

У подальших дослідженнях передбачається уточнення запропонованої структури до унітарних часткових показників та доведення їх до рівня критеріїв.

Література

1. Verizon. 2024 Data Breach Investigations Report. URL: https://www.verizon.com/business/resources/T500/reports/2024-dbir-data-breach-investigations-report.pdf

2. РНБО. Стратегія кібербезпеки України (2021–2025 роки). URL: https://www.rnbo.gov.ua/files/2021/STRATEGIYA%20KYBERBEZPEKI/proekt%20strategii_kyberbezpeki_Ukr.pdf

3. Gómez, E.C.F., Almeida, O.X.B., & Arévalo Gamboa, L.M. (2022). Analysis of centralized computer security systems through the alienvault ossim tool. *[Espacios: Revista de Gestión Empresarial y Perspectivas Tecnológicas (https://dx.doi.org/10.46480/esj.6.1.181)*, 6(1).

4. Писарчук О.О. Оцінювання ефективності інформаційних систем за вектором критеріїв. *Збірник наукових праць ЖВІ НАУ*. 2010. Вип. 3. С. 117–123.

5. Писарчук О.О., Соколов К.О., Гудима О.П. Розроблення багатокритеріальної методики ситуаційного управління структурою і параметрами системи забезпечення інформаційної безпеки. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняховського*. 2016. № 3. С. 24–32.

6. P. Yuan, Y. Chen, H. Jin, L. Huang. MSVM-kNN: Combining SVM and k-NN for Multi-class Text Classification. *Proceedings of the 2008 IEEE World Congress on Services*, (1), 384–389. https://dx.doi.org/10.1109/WSCS.2008.36

7. H. Xiao, F. Sun, Y. Liang. A Fast Incremental Learning Algorithm for SVM Based on K Nearest Neighbors. *Proceedings of the 2010 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence (AICI)*, (1), 157–161. https://dx.doi.org/10.1109/AICI.2010.207

8. S. Lahmiri, R. Saadé, D. Morin, F. Nebebe. Learning Analytics based on Bayesian Optimization of Support Vector Machines with Application to Student Success Prediction in Mathematics Course. *Proceedings of the 2020 International Conference on Cloud Technologies and Applications (CloudTech)*, (1), 1–4. https://dx.doi.org/10.1109/CloudTech49835.2020.9365915

9. Pacheco W.D.N., López F.R.J. Tomato classification according to organoleptic maturity (coloration) using machine learning algorithms K-NN, MLP, and K-Means Clustering. *Proceedings of the 2019 24th Symposium on Signal Processing, Images and Computer Vision (STSIVA)*, (1), 1–6. https://dx.doi.org/10.1109/STSIVA.2019.8730232

References

1. Verizon. 2024 Data Breach Investigations Report. URL: https://www.verizon.com/business/resources/T500/reports/2024-dbir-data-breach-investigations-report.pdf

2. NSDO Cybersecurity Strategy of Ukraine (2021-2025) Resource access mode: https://www.rnbo.gov.ua/files/2021/STRATEGIYA%20KYBERBEZPEKI/proekt%20strategii_kyberbezpeki_Ukr.pdf

3. Gómez, E.C.F., Almeida, O.X.B., & Arévalo Gamboa, L.M. (2022). Analysis of centralized computer security systems through the alienvault ossim tool. *[Espacios: Revista de Gestión Empresarial y Perspectivas Tecnológicas (https://dx.doi.org/10.46480/esj.6.1.181)*, 6(1).

4. Pysarchuk O.O. Evaluation of the effectiveness of information systems by a vector of criteria // Zbirnyk naukovyx pracz ZhVI NAU - Collection of scientific works of ZVI NAU vol 3. 2010. P. 117–123.

5. Pysarchuk O.O., Sokolov K.O., Gudyma O.P. Development methods multi situational management structure and parameters of information security system / O.O. Pysarchuk, Collection of scientific works of the Center for Military and Strategic Research of the National University of Defense of Ukraine Ivan Chernyakhovskyi. - 2016. No. 3. P. 24–32.

6. P. Yuan, Y. Chen, H. Jin, L. Huang. MSVM-kNN: Combining SVM and k-NN for Multi-class Text Classification. *Proceedings of the 2008 IEEE World Congress on Services*, (1), 384-389. https://dx.doi.org/10.1109/WSCS.2008.36

7. H. Xiao, F. Sun, Y. Liang. A Fast Incremental Learning Algorithm for SVM Based on K Nearest Neighbors. *Proceedings of the 2010 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence (AICI)*, (1), 157-161. https://dx.doi.org/10.1109/AICI.2010.207

8. S. Lahmiri, R. Saadé, D. Morin, F. Nebebe. Learning Analytics based on Bayesian Optimization of Support Vector Machines with Application to Student Success Prediction in Mathematics Course. *Proceedings of the 2020 International Conference on Cloud Technologies and Applications (CloudTech)*, (1), 1–4. https://dx.doi.org/10.1109/CloudTech49835.2020.9365915

9. Pacheco W.D.N., López F.R.J. Tomato classification according to organoleptic maturity (coloration) using machine learning algorithms K-NN, MLP, and K-Means Clustering. *Proceedings of the 2019 24th Symposium on Signal Processing, Images and Computer Vision (STSIVA)*, (1), 1–6. https://dx.doi.org/10.1109/STSIVA.2019.8730232

УДК 004.658.2
DOI: https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-12

ОПТИМІЗАЦІЯ ІНФРАСТРУКТУРИ БАЗ ДАНИХ НА ОСНОВІ AWS I3: ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ

***Рожков С. М.**, Інститут комп'ютерних технологій Університету «Україна», Київ, Україна. https://orcid.org/0009-0004-2972-7163, serj.rozhkov@gmail.com*

***Павленко В. І.**, к.ф.-м.н., доц., Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Інститут комп'ютерних технологій, Київ, Україна. https://orcid.org/0000-0002-3958-0415, pavlenko.v@i.ua*

***Анотація.** У статті розглянуто оптимізацію інфраструктури баз даних шляхом упровадження ефемерних реплік на інстансах AWS i3, що дало змогу підвищити продуктивність та економічну ефективність систем, що працюють із великими обсягами даних. У сучасних умовах бізнесу, який усе більше покладається на аналітичну обробку в режимі реального часу, зниження витрат та підвищення продуктивності інфраструктури стають ключовими завданнями. Інстанси AWS i3, що використовують локальні NVMe SSD-диски, є ідеальним рішенням для високонавантажених баз даних, оскільки забезпечують високу продуктивність вводу-виводу та значно зменшують затримки під час запису даних.*

Автори пропонують архітектуру, що включає ефемерні репліки для обробки запитів лише для читання та аналітичних запитів. Також розглянуто впровадження додаткових резервних вузлів для підвищення надійності та відмовостійкості системи. Запропоновані зміни передбачають збереження Master DB без змін, додавання третього вузла бази даних з ефемерним сховищем для перенесення навантаження лише для читання, а також зменшення розміру резервного вузла DR до мінімального робочого рівня.

На основі проведеного дослідження автори демонструють ефективність використання ефемерних реплік у середовищах із високим навантаженням. Використання інстансів i3 дає змогу знизити витрати на інфраструктуру до 30% порівняно зі стандартними схемами та до 75–80% порівняно з RDS (SaaS). Водночас підвищується продуктивність системи, що дає змогу ефективніше обслуговувати запити для читання.

Висновки статті підкреслюють переваги ефемерних реплік у підвищенні продуктивності вводу-виводу, зниженні витрат на інфраструктуру, підвищенні надійності та відмовостійкості, а також у зменшенні навантаження на основний сервер. Автори рекомендують упровадження цього підходу для організацій, які працюють із великими обсягами даних і прагнуть досягти високої продуктивності та економічної ефективності своєї інфраструктури баз даних.

***Ключові слова:** бази даних, AWS, публічна хмара, безсерверні технології, RDS, EC2, фінансовий сектор.*

OPTIMIZING DATABASE INFRASTRUCTURE BASED ON AWS I3: IMPROVING EFFICIENCY AND REDUCING COSTS

***Sergii Rozhkov**, Institute of Computer Technologies of the University «Ukraine», Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0009-0004-2972-7163, serj.rozhkov@gmail.com*

***Volodymyr Pavlenko**, Ph.D., Ass. Prof., Open University of Human Development «Ukraine», Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0002-3958-0415, pavlenko.v@i.ua*

***Abstract.** The article discusses the optimization of database infrastructure through the implementation of ephemeral replicas on AWS i3 instances, which enhances the performance and cost efficiency of systems that handle large volumes of data. In today's business environment, which increasingly relies on real-time analytical processing, reducing costs and improving infrastructure performance has become a key priority. AWS i3 instances, utilizing local NVMe SSDs, provide an ideal solution for high-load databases, ensuring high I/O performance and significantly reducing data write latency.*

The authors propose an architecture that includes ephemeral replicas for handling read-only and analytical queries. The implementation of additional backup nodes to enhance the reliability and fault tolerance of the system is also discussed. The proposed changes involve maintaining the Master DB unchanged, adding a third database node with ephemeral storage to offload read-only tasks, and reducing the size of the DR backup node to a minimal operational level.

Based on the research conducted, the authors demonstrate the effectiveness of using ephemeral replicas in high-load environments. Utilizing i3 instances can reduce infrastructure costs by up to 30% compared to standard setups and by 75-80% compared to RDS (SaaS). At the same time, system performance is improved, allowing more efficient processing of read queries.

The article's conclusions highlight the advantages of ephemeral replicas in enhancing I/O performance, reducing infrastructure costs, increasing reliability and fault tolerance, and alleviating the load on the primary server. The authors recommend adopting this approach for organizations that work with large volumes of data and seek to achieve high performance and cost efficiency in their database infrastructure.

Key words: *databases, AWS, public cloud, serverless services, RDS, EC2, fintech.*

Вступ

У сучасних умовах бізнесу, який усе більше покладається на великі обсяги даних і аналітичну обробку в режимі реального часу, забезпечення високої продуктивності та економічної ефективності інфраструктури баз даних стає критично важливим. Одним із рішень, яке може значно покращити ці показники, є використання ефемерних реплік на інстансах AWS i3 [1].

Інстанси i3 в Amazon Web Services (AWS) спеціально розроблені для забезпечення високої продуктивності вводу-виводу завдяки використанню локальних NVMe та SSD дисків. Це робить їх ідеальним вибором для високонавантажених баз даних, які обробляють великі обсяги SQL-запитів та OLAP-запитів. Використання таких інстансів дає змогу не лише знизити затримки під час запису в базу даних, а й значно зменшити витрати на інфраструктуру, що є важливим чинником для багатьох організацій.

Тож розглянемо підходи до оптимізації інфраструктури баз даних на основі AWS i3 інстансів, які спрямовані на підвищення продуктивності та зниження витрат. Зокрема, розглянемо використання ефемерних реплік для обробки запитів лише для читання та аналітичних запитів, а також упровадження додаткових резервних вузлів для підвищення надійності та відмовостійкості системи.

Метою дослідження є оцінка ефективності запропонованих рішень, демонстрація їхнього впливу на продуктивність баз даних та надання рекомендацій щодо впровадження ефемерних реплік у високонавантажених середовищах.

Виконання досліджень

Для економії на витратах EBS і EC2 та забезпечення кращого обслуговування SQL-запитів лише для читання (англ. online analytical processing (OLAP), аналітична обробка у реальному часі), високонавантажені бази даних (приміром, для застосунків, що використовуються для торгівлі на ринках цінних паперів, і т. д.) та торгівлі гарним тоном є використання реплік для читання (read only replica), що зменшує навантаження на основний сервер (primary), що дає змогу зменшити затримки під час запису в базу даних [3].

Інстанси i3 в AWS використовують локальні NVMe- та SSD-диски, які забезпечують високу продуктивність вводу-виводу. Параметри продуктивності для дисків на інстансах i3 можуть варіюватися залежно від конкретної моделі інстансу. Ось основна інформація про продуктивність вводу-виводу (IOPS) для деяких інстансів i3[1].

Характеристики дисків NVMe SSD на інстансах i3

i3.large:

- NVMe SSD обсягом 475 ГБ;
- до 100 000 IOPS;

i3.xlarge:

- NVMe SSD обсягом 950 ГБ;
- до 200 000 IOPS.

Розглянемо стандартну архітектуру (рис. 1) [2]:

- 2 вузли бази даних (primary + standby);
- 1 резервний вузол (для BCP та DR).

Вузли бази даних однієї платформи асинхронно реплікуються між двома зонами доступності AWS, щоб забезпечити можливості відновлення після катастроф (DR) для наших систем [4]. Ми також використовуємо репліку DR як джерело лише для читання для SAS та подібних систем.

Запропоновані зміни:

- master DB залишається без змін;
- додавання третього вузла бази даних із родини i3 з «ефемерним» сховищем (інстанс має додатковий розділ диску, який є дуже швидким, бо працює на локальних NVMe-, SSD-дисках, але за рестарту такого типу інстансу дані не зберігаються);
- перенесення навантаження лише для читання (RO) на цей «ефемерний» резервний вузол;
- зменшення розміру резервного вузла DR до мінімально робочого.

Ці зміни дадуть змогу зробити вузол для читання значно продуктивнішим, оскільки OLAP-запити є дуже інтенсивними щодо вводу-виводу та зменшать загальні витрати на інфраструктуру. Упровадження четвертого вузла бази даних на іншому інстансі i3 в іншій зоні доступності (AZ) додатково підвищує надійність та відмовостійкість системи.

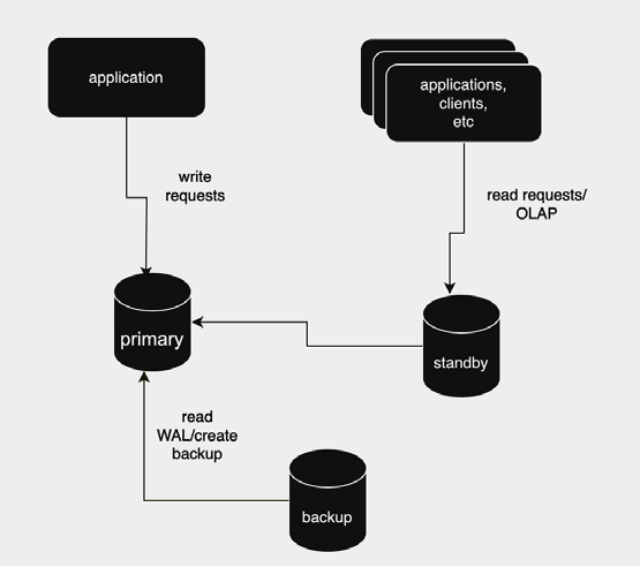


Рис. 1 Стандартна архітектура бази даних

Загальний огляд.

Варіант 1 (рис. 2):

− Master DB (primary): велика інстанція m6 із великою потужністю та багатьма PIOPS EBS-томами;

− Replica DR (standby): мала інстанція m6, без автоматичного переходу, перемикання здійснюється вручну;

− Ephemerial replica: два інстанси сімейства i3 в різних зонах.

Ефемерні репліки знаходяться у кластері Keepalived, який перевіряє працездатність служби Postgres і здійснює перехід у разі непрацездатності. Ефемерні репліки ніколи не повинні бути підвищені до основних. Перехід перемикає DNS псевдонім standby.replica на іншу репліку.

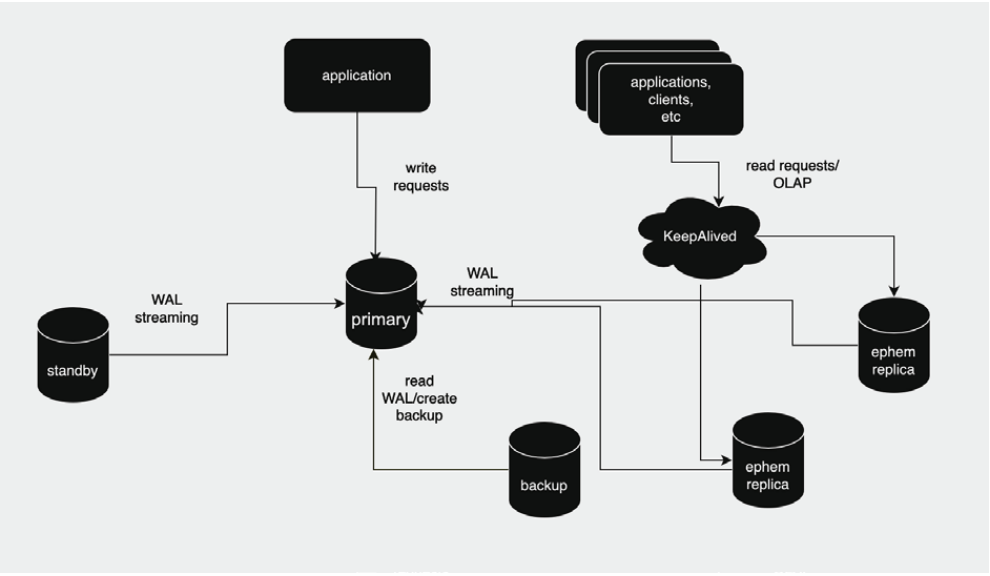


Рис. 2. Архітектура з двома ефемернимим репліками

Варіант 2 (рис. 3):

− Master DB (primary): велика інстанція m6 із великою потужністю та багатьма PIOPS EBS-томами;

− Replica DR (standby): мала інстанція m6, без автоматичного переходу, перемикання здійснюється вручну;

− Ephemerial replica: один інстанс сімейства i3 у тій самій зоні.

Replica DR та Ephemerial replica знаходяться у кластері Keepalived, який перевіряє працездатність служби Postgres на Ephemerial replica і здійснює перехід на standby у разі непрацездатності [5]. Перехід перемикає DNS псевдонім standby.replica із Replica DR на Ephemerial replica.

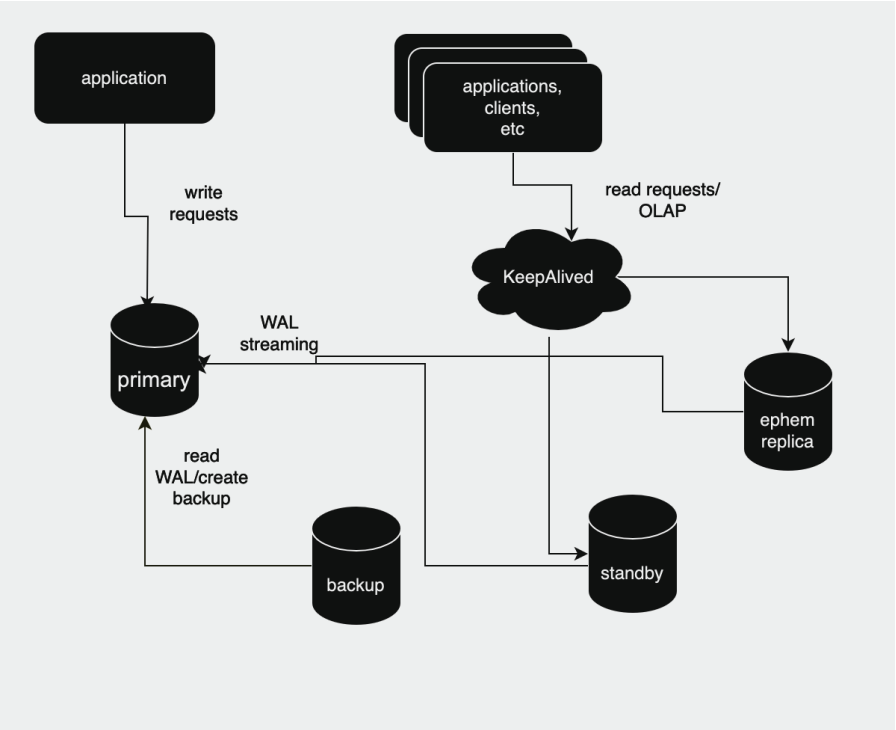


Рис. 3. Архітектура з одною ефемерною реплікою

Процедури переходу реплік:
- Автоматичні.
- Сповіщення для перевірки інженером.
- Репліка завантажується з іншої репліки.
- Репліка реплікується з поточного первинного вузла.

У разі рестарту обох реплік їх потрібно буде завантажити з первинної або резервної репліки. Звичайне завантаження можна здійснити автоматично через crontab, використовуючи ansible:

[root@i3.db03 ~]# crontab -l | grep reboot
@reboot ansible-playbook -b restart-setup 1>/root/ansible.log 2>&1

Playbook викликає ролі максимально автоматизовано:
- hosts: localhost roles: - postgres_ephemeral_ro_standby_setup.

Нижче приведено Ansible-роль, за допомогою якої можна синхронізувати ефемерну репліку після рестарту:

```
- name: Create partitions
  parted:
    device: «{{ device }}»
    label: gpt
    number: 1
    name: «{{ systemname }}»
    state: present

- name: Create filesystems
  filesystem:
    fstype: «{{ fstype }}»
    dev: «{{ device }}p1»
    opts: «-L {{ fslabel }} -E {{ fscrtopts }}»

- name: Mount filesystems (paths are created automatically)
  mount:
```

```
      path: «/db{{ systemname }}»
      src: «LABEL={{ fslabel }}»
      fstype: «{{ fstype }}»
      opts: «{{ fstabopts }}»
      dump: 0
      passno: 2
      state: mounted

  ##### PG part
  - name: Create cluster directories and set owner
    file:
      path: «{{ item }}»
      state: directory
      owner: «{{ pg_user }}»
      group: «{{ pg_group }}»
      mode: 0700
    with_items:
      - «{{ pg_data_dir }}»
      - «{{ pg_tbs_dir }}»

  - name: Make sure scripts directory exists
    file:
      path: «{{ pg_scripts_dir }}»
      state: directory
      owner: «{{ pg_user }}»
      group: «{{ pg_group }}»

  - name: Copy primary cluster with pg_basebackup
    command: '{{ pg_bin_dir }}/pg_basebackup -h {{ pg_bootstrap_hostname }} -p {{ pg_port|default(5432)
}} -D {{ pg_data_dir }} {{ pg_basebackup_options }}'
    args:
      creates: «{{ pg_data_dir }}/pg_xlog»
    become_user: «{{ pg_user }}»
    register: copy_primary

  - name: Remove primary serverlog
    file:
      path: «{{ pg_data_dir }}/serverlog»
      state: absent
    when: copy_primary.changed

  - name: Copy templated recovery.conf
    template:
      src: «{{ role_path }}/templates/recovery.conf.j2»
      dest: «{{ pg_data_dir }}/recovery.conf»
      owner: «{{ pg_user }}»
      group: «{{ pg_group }}»
  - name: Start postgres cluster
    service:
      name: «postgres-{{ systemname }}»
      state: started
  - name: Chown serverlog
    file:
      path: «{{ pg_data_dir }}/serverlog»
      owner: «{{ pg_user }}»
      group: «{{ pg_group }}»
    when: copy_primary.changed
```

Розрахунок кошторису.

Нижче буде проведено розрахунок вартості вищеописаних варіантів. Розраховувалася вартість EC2 інстанса, а також вартість дисків. Розрахунки зроблено з реальної високонавантаженої бази даних [1].

		CPU	RAM	EBS Tb	hour	day	month	year
primary	m6a.4xlarge	16	64	6	0,7704	18,4896	1154,688	13994,8186
standby	m6a.large	2	8	1,4	0,0963	2,3112	209,336	2537,15232
ephemerial replica db1	i3.xlarge	4	30	0,95	0,344	8,256	247,68	3013,44
ephemerial replica db2	i3.xlarge	4	30	0,95	0,344	8,256	247,68	3013,44
							Total year	22558,8509

Рис. 4. Розрахунок кошторису для варіанта з двома ефемерними репліками

		CPU	RAM	EBS Tb	hour	day	month	year
primary	m6a.4xlarge	16	64	6	0,7704	18,4896	1154,688	13994,8186
standby	m6a.large	2	8	1,4	0,0963	2,3112	209,336	2537,15232
ephemerial replica db1	i3.xlarge	4	30	0,95	0,344	8,256	247,68	3013,44
							Total year	19545,4109

Рис. 5. Розрахунок кошторису для варіанта з однією ефемерною реплікою

		CPU	RAM	EBS Tb	hour	day	month	year
primary	m6a.4xlarge	16	64	6	0,7704	18,4896	1154,688	13994,8186
standby	m6a.4xlarge	16	64	6	0,7704	18,4896	1154,688	13994,8186
							Total year	27989,6371

Рис. 6. Розрахунок кошторису для класичного варіанта

		CPU	RAM	EBS Tb	IOPs	month	year	
RDS multicluster	m6gd.xlarge	16	64	1,5 TB	15000	8942,14	107305,68	
						Total year	107305,68	

Рис. 7. Розрахунок кошторису за використання RDS

Classic	27989	**Saving of costs vs Classic**	**Saving of costs vs RDS**
RDS	107305		
1 ephem repl	19545	**30,17%**	**81,79%**
2 ephem repl	22558	**19,40%**	**78,98%**

Рис. 8. Порівняльна таблиця

Як ми бачимо, це рішення дає змогу оптимізувати витрати на інфраструктуру порівняно зі стандартною схемою на 30%, порівняно з RDS(Saas) – на 75– 80%, що є дуже суттєвим. Також за рахунок дуже швидких дисків можна підвищити продуктивність системи та забезпечити надійне обслуговування запитів для читання.

Висновки

Упровадження ефемерних реплік на інстансах AWS i3 є ефективним рішенням для оптимізації витрат на інфраструктуру та підвищення продуктивності високонавантажених баз даних, що використовуються для аналітичних запитів (OLAP) та обробки SQL-запитів лише для читання. Основні переваги цього підходу включають:

1. Підвищення продуктивності вводу-виводу: використання локальних NVMe- та SSD-дисків на інстансах i3 значно покращує продуктивність вводу-виводу, що особливо важливо для OLAP-запитів, які є дуже інтенсивними щодо вводу-виводу.

2. Зниження витрат: завдяки високій продуктивності ефемерних реплік можна зменшити розмір резервного вузла DR до мінімально необхідного, що знижує загальні витрати на інфраструктуру. Наші розрахунки показують, що це рішення дає змогу знизити витрати на інфраструктуру на 30% порівняно зі стандартною схемою та на 75–80% – порівняно з RDS (SaaS).

3. Підвищення надійності та відмовостійкості: упровадження додаткових ефемерних реплік у різних зонах доступності (AZ) підвищує надійність та відмовостійкість системи. Репліки знаходяться

у кластері Keepalived, який перевіряє працездатність служби Postgres і здійснює перехід у разі непрацездатності, що забезпечує безперервність обслуговування запитів.

4. Зменшення навантаження на основний сервер: перенесення навантаження лише для читання на ефемерні репліки дає змогу зменшити затримки під час запису в базу даних, що сприяє підвищенню продуктивності основного сервера.

Таким чином, упровадження ефемерних реплік на інстансах AWS i3 є доцільним рішенням для забезпечення високої продуктивності та економічної ефективності інфраструктури баз даних, що відповідає сучасним вимогам бізнесу щодо обробки великих обсягів даних у режимі реального часу.

Література

1. Amazon Web Services Documentation**:** AWS Instance Types. Amazon Web Services, Inc. Available at: https://docs.aws.amazon.com/AWSEC2/latest/UserGuide/instance-types.html Amazon EC2 Instance Storage. Amazon Web Services, Inc. Available at: https://docs.aws.amazon.com/AWSEC2/latest/UserGuide/InstanceStorage.html

2. High Performance MySQL: Optimization, Backups, and Replication.
Baron Schwartz, Peter Zaitsev, Vadim Tkachenko. O'Reilly Media, 2012. ISBN: 978-1-449-35650-3.

3. Designing Data-Intensive Applications: The Big Ideas Behind Reliable, Scalable, and Maintainable Systems. Martin Kleppmann. O'Reilly Media, 2017. ISBN: 978-1-449-37453-8.

4. Database Systems: The Complete Book. Hector Garcia-Molina, Jeffrey D. Ullman, Jennifer Widom. Pearson, 2008. ISBN: 978-0-136-00864-4.

5. PostgreSQL: Up and Running: A Practical Guide to the Advanced Open Source Database. Regina O. Obe, Leo S. Hsu. O'Reilly Media, 2017. ISBN: 978-1-491-96926-6.

References

1. Amazon Web Services Documentation**:** AWS Instance Types. Amazon Web Services, Inc. Available at: https://docs.aws.amazon.com/AWSEC2/latest/UserGuide/instance-types.html Amazon EC2 Instance Storage. Amazon Web Services, Inc. Available at: https://docs.aws.amazon.com/AWSEC2/latest/UserGuide/InstanceStorage.html

2. High Performance MySQL: Optimization, Backups, and Replication. Baron Schwartz, Peter Zaitsev, Vadim Tkachenko. O'Reilly Media, 2012. ISBN: 978-1-449-35650-3.

3. Designing Data-Intensive Applications: The Big Ideas Behind Reliable, Scalable, and Maintainable Systems. Martin Kleppmann. O'Reilly Media, 2017. ISBN: 978-1-449-37453-8.

4. Database Systems: The Complete Book. Hector Garcia-Molina, Jeffrey D. Ullman, Jennifer Widom. Pearson, 2008. ISBN: 978-0-136-00864-4.

5. PostgreSQL: Up and Running: A Practical Guide to the Advanced Open Source Database. Regina O. Obe, Leo S. Hsu. O'Reilly Media, 2017. ISBN: 978-1-491-96926-6.

УДК 004.9:536
DOI: https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-13

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ ТА ГІДРОДИНАМІКИ ПЕРЕБІГУ РІДИН У ТРУБАХ

Свинчук О. В., *к.ф.-м.н., доц., Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. https://orcid.org/0000-0003-1715-0761, 7011990@ukr.net*

Клименко Я. В., *аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. yaroslav.klymenko98@gmail.com*

Анотація*. У статті проведено детальний аналіз основних програмних інструментів, які використовуються для моделювання процесів теплообміну та гідродинаміки в системах із турбінним маслом. Досліджено такі системи, як ANSYS Fluent, SimScale, OpenFOAM, Elmer та COMSOL Multiphysics. Ці інструменти були вибрані через їх популярність та широке використання в інженерних дослідженнях і промислових застосуваннях. Кожна з них була оцінена з погляду її здатності вирішувати завдання, пов'язані з теплом та рухом рідин у складних інженерних застосуваннях, які включають великі обчислювальні моделі й високі вимоги до точності результатів. Аналіз показав, що кожна з програм має свої сильні боки, а також значні недоліки, які можуть обмежувати їх використання в певних умовах. Окрім того, існують важливі технічні виклики, які потребують уваги під час розроблення майбутніх версій програмного забезпечення. Наприклад, підвищення масштабованості обчислень для великомасштабних моделювань, які стають дедалі більш важливими у багатьох галузях, включаючи енергетику. Пропонується низка рекомендацій щодо вибору найкращого програмного забезпечення залежно від специфічних потреб проєкту, а також визначає ключові напрями для розвитку майбутнього програмного забезпечення, що могло б поліпшити існуючі рішення за ефективністю, вартістю та користувацькою зручністю. Розглядаються також потенційні інноваційні технології, такі як штучний інтелект і машинне навчання, які можуть бути інтегровані в нові системи для поліпшення їх функціональності та автоматизації процесів розроблення. Метою роботи є підвищення обізнаності про сучасні можливості й обмеження програмного забезпечення для моделювання та сприяння розвитку нових підходів і технологій, які можуть значно покращити процеси проєктування і дослідження в інженерії.*

Ключові слова: *програмне забезпечення, моделювання, теплообмін, гідродинаміка, рівняння теплопередачі, інноваційні технології, хмарні обчислення.*

ANALYSIS OF MODERN MEANS OF SIMULATION OF HEAT EXCHANGE PROCESSES AND HYDRODYNAMICS OF FLUID FLOW IN PIPES

Olha Svynchuk*, Candidate of Physics Mathematics, Associate Professor of the Department of Software Engineering in Energy, The National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0003-1715-0761, 7011990@ukr.net*

Yaroslav Klymenko*, PhD, The National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine. yaroslav.klymenko98@gmail.com*

Abstract*. The article provides a detailed analysis of the main software tools used to model heat transfer and hydrodynamics in turbine oil systems. The following systems have been studied as ANSYS Fluent, SimScale, OpenFOAM, Elmer, and COMSOL Multiphysics were investigated. These tools were chosen because of their popularity and widespread use in engineering research and industrial applications. Each of the systems was evaluated in terms of its ability to solve problems related to heat and fluid motion in complex engineering applications that involve large computational models and high demands on the accuracy of the results. The analysis showed that each of the programs has its strengths and also has significant disadvantages that may limit their use in certain conditions. In addition, there are important technical challenges that require attention in the development of future versions of the software. For example, increasing the scalability of calculations for large-scale simulations, which are becoming increasingly important in many industries, including energy. This article offers a number of recommendations for choosing the most suitable software depending on the specific needs of the project, and also identifies key directions for the development of future software that could surpass existing solutions in terms of efficiency, cost and user-friendliness. Also considered*

are potential innovative technologies, such as artificial intelligence and machine learning, which can be integrated into new systems to improve their functionality. This work aims to raise awareness of the capabilities and limitations of modeling software, also to contribute to the development of new approaches and technologies that can significantly improve the design and research processes in engineering.

Key words: *software, modeling, heat transfer, hydrodynamics, heat transfer equations, innovative technologies, cloud computing.*

Вступ

Моделювання теплообміну та гідродинаміки є фундаментальним елементом для оптимізації інженерних систем, особливо у секторах, де застосовується турбінне мастило в системах трубопроводів. Ці процеси мають вирішальне значення для підвищення ефективності, забезпечення надійності та покращення безпеки обладнання. У цьому контексті важливим завданням є розроблення програмного забезпечення, яке не лише буде відповідати сучасним вимогам, а й буде вдосконалено порівняно з існуючими аналогами за ключовими параметрами ефективності, точності та універсальності застосування.

Проводиться аналіз наявних програмних рішень у сфері моделювання теплообміну та гідродинаміки з акцентом на такі інструменти, як ANSYS Fluent, SimScale, OpenFOAM, Elmer, та COMSOL Multiphysics. Основна увага буде зосереджена на виявленні потенційних векторів для розроблення нового програмного забезпечення, яке могло б задовольнити інженерні потреби краще, ніж існуючі рішення. У процесі аналізу будуть ідентифіковані ключові недоліки сучасних систем та визначені, які функціональні можливості є найбільш критичними для поліпшення.

Розроблення такого роду програмного забезпечення вимагає не лише розуміння нинішніх можливостей існуючих систем, а й високого рівня інноваційного мислення для впровадження нових технологій та підходів, які можуть реалізувати потенціал цієї галузі. Дослідження спрямоване на розроблення рекомендацій, які допоможуть у майбутньому створити більш продуктивне, точне та гнучке програмне забезпечення. Новий продукт має на меті не лише вдосконалити процеси проєктування та експлуатації інженерних систем, а й стати взірцем у галузі, установлюючи нові стандарти для наступних поколінь інженерного програмного забезпечення.

Метою дослідження є аналіз спеціального програмного забезпечення для моделювання процесів теплообміну та гідродинаміки перебігу рідин у трубах із подальшими рекомендаціями для розроблення нового програмного продукту.

Виконання досліджень

Аналіз останніх досліджень та публікацій показав, що нині існує вже багато програмних продуктів, які користуються популярністю під час моделювання процесів теплообміну та гідродинаміки за перебігу рідини всередину труб. Розглянемо деякі з них.

ANSYS Fluent є одним із провідних інструментів у сфері моделювання динаміки рідин і теплообміну [1]. Завдяки можливостям деталізованого моделювання та оптимізації програма Fluent є незамінним інструментом для інженерів-дослідників, даючи їм змогу виконувати складні обчислення для різноманітних інженерних задач. Цей програмний продукт дає змогу виконувати комплексні обчислення потоків, що включають ламінарні, турбулентні, нерівноважні багатофазні потоки, а також розрахунки згоряння і радіації. Завдяки вбудованій технології масштабування Fluent може використовуватися для задач, які вимагають значних обчислювальних ресурсів, включаючи великі промислові аплікації. Наведемо деякі застосування. У статті [2] описується комп'ютерне моделювання руху повітря в каналі насадки з використанням пакету ANSYS FLUENT. У статті [3] досліджено вплив якості моделювання пограничного шару під час виконання CFD-розрахунку аеродинамічних характеристик літального апарата замкненої схеми в середовищі ANSYS FLUENT. Статтю [4] присвячено розробленню методики побудови журналу команд для моделювання теплофізичного стану експериментальних пристроїв у реакторних експериментах, що дають змогу керувати командою для збереження розв'язувача програми ANSYS FLUENT як коду в окремому файлі. У статті [5] розроблено та описано код на основі Python для автоматизації повторюваних обчислень у CFD-моделюванні.

SimScale є хмарною платформою для інженерного моделювання, яка пропонує інструменти для CFD-аналізу, структурного аналізу та термодинаміки [7]. Надає інженерам можливості: динаміку рідини, структурну механіку, термодинаміку, електромагнетику та мультифізичний аналіз у хмарі. Основною перевагою SimScale є її доступність через веббраузер без необхідності інсталяції дорогих ліцензій на локальні машини. Ця платформа забезпечує колаборацію в реальному часі, що дає змогу командам інженерів ефективно співпрацювати над складними проєктами. Програмне забезпечення знаходить застосування в широкому спектрі галузей промисловості: вітроенергетиці, автомобільній промисловості, аерокосмічній галузі, електроніці, промисловому устаткуванні та ін. У статті [7] досліджується ефективність використання різних охолоджувачів на літій-іонних елементах 18650 із застосуванням сполученого моделювання

теплопередачі за допомогою SimScale. У статті [8] автори розробляють динаміку та систему керування для безпілотної парашутної системи, і для оцінки аеродинамічних коефіцієнтів використовується симуляція обчислювальної гідродинаміки CFD із використанням SimScale.

Для вирішення завдань обчислювальної гідроаеродинаміки на мові C++ розроблений пакет OpenFOAM, який використовує об'єктно-орієнтовані методи програмування [9]. OpenFOAM – це один із найбільш відомих відкритих інструментів для CFD-моделювання. Його особливістю є високий ступінь налаштування й адаптивності, даючи змогу користувачам самостійно розробляти нові моделі та розширювати функціональність. OpenFOAM надає могутні можливості для розв'язання широкого спектру інженерних задач – від моделювання складних потоків рідини, що включають хімічні реакції, турбулентність і теплообмін, до акустики, механіки твердого тіла та електромагнетики. Програмне забезпечення включає як готові модулі рішення широкого кола завдань механіки суцільного середовища, так і дає змогу розробляти власні моделі під різні завдання. У статті [10] для аналізу теплового режиму та розроблення конструкції тепловідводу теплонавантажуваного світлодіодного освітлювача синтезовано структуру вирішувача задачі, яка основана на структурі базового вирішувача laplacianFoam та функціях бібліотеки swak4foam системи математичного моделювання OpenFOAM. У статті [11] описано чисельне моделювання просторового потоку високонапірної радіально-осьової гідротурбіни РО 310 для двох варіантів проточної частини з використанням пакета прикладних програм OpenFOAM. У роботі [12] проведено дослідження кавітаційних характеристик високонапірної радіально-осьової гідротурбіни за допомогою OpenFOAM. У роботі [13] представлено бібліотеку SparseLinSol для розв'язування великих розріджених систем лінійних алгебраїчних рівнянь. Обговорюються попередні результати об'єднання розробленої бібліотеки з пакетом OpenFOAM для прискорення завдань гідродинамічного моделювання.

Elmer – це програмне забезпечення для мультифізичного моделювання з відкритим кодом, включає фізичні моделі гідродинаміки, електромагнетизму, теплопередачі та акустики, які описуються диференціальними рівняннями, у частинних похідних розв'язуються методом кінцевих елементів [14]. Elmer особливо підходить для комплексних наукових досліджень, що вимагають детального моделювання взаємодій між різними фізичними процесами. У статті [15] досліджується перевірка конструкції плазмової техніки за допомогою Elmer, яка представлена як доступний інструмент, який може допомогти моделювати багатофізичні процеси та перевіряти пристрої генерації плазми. У статті [16] описується програмне забезпечення EOF-Library, яке поєднує пакети моделювання Elmer і OpenFOAM, що забезпечує ефективну інтерполяцію внутрішнього поля та зв'язок між рамками кінцевого елемента та кінцевого об'єму.

COMSOL Multiphysics – це універсальний інструмент для моделювання, який дає змогу вирішувати майже будь-які науково-технічні завдання [17]. Ця система особливо відома своїми можливостями мультифізичного моделювання, здатністю легко моделювати різні фізичні процеси в єдиному інтерфейсі. COMSOL також має бібліотеку застосунків, яка дає змогу користувачам створювати спеціалізовані рішення для специфічних задач і надавати їх кінцевим користувачам як інтерактивні програми. Середовище розроблення програм дає змогу доповнювати програми інтерфейсами на основі власних моделей. Це потужне інтерактивне середовище для моделювання та розрахунків більшості наукових та інженерних задач, основаних на диференціальних рівняннях із частковими похідними PDE, методом кінцевих елементів. У статті [18] представлені результати роботи стосуються холодильної установки рефрижераторного контейнера і спрямовані на розв'язання задачі конвективного теплообміну навколо трубчатого випарника з вентилятором примусового обдування, які розташовано в металевому кожусі. У статті [19] описано фізичну модель проникного термоелемента з розвиненою поверхнею теплообміну для охолодження потоку повітря за допомогою комп'ютерного модулювання у програмному пакеті COMSOL Multiphysics. У статті [20] представлено моделювання обчислювальної гідродинаміки для вивчення гідротермальної карбонізації кісточки авокадо (AS) у реакторі з періодичним перемішуванням за допомогою системи керування з відкритим контуром, яке було виконано в COMSOL Multiphysics 5.2.

Отже, дані програмні продукти різняться за своїм функціоналом, доступністю, масштабом і здатністю до кастомізації. Детальний аналіз кожного з них допоможе зрозуміти, які аспекти необхідно покращити у новому програмному забезпеченні з акцентом на перевищення існуючих аналогів за ключовими параметрами.

Для дослідження турбулентних та теплових процесів у трубопроводах використовуються фундаментальні рівняння рідинної динаміки та теплообміну.

Рівняння Нав'є – Стокса для нестисливих рідин:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u}\nabla)\vec{u} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + v\nabla^2\vec{u} + \vec{f}, \quad (1)$$

де $\vec{u}$ – вектор швидкості рідини, t – час, r – тиск, υ – кінематична в'язкість, $\vec{f}$ – вектор масових сил.

Рівняння Нав'є – Стокса дає змогу моделювати складні течії, включаючи турбулентність, вплив температури, в'язкості, тиску та інших чинників на поведінку рідини. Рівняння є нелінійними та часто важко розв'язуваними аналітично, особливо для складних геометрій або турбулентних течій. Тому велике значення мають чисельні методи та комп'ютерне моделювання. Ці теоретичні основи є критично важливими для розуміння і моделювання поведінки турбінного мастила в трубах, що забезпечує точність, надійність та ефективність у проєктуванні та експлуатації турбінних систем.

Рівняння енергії:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \mathrm{T} = \pm \nabla^2 T + \Phi, \tag{2}$$

де *T* – температура рідини, *α* – температурна дифузність, Ф – генерація або поглинання.

Рівняння турбулентної кінетичної енергії *k* та швидкості дисипації *ε*:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \mathrm{k} = P_k - \varepsilon + \nabla\left(\left(\nu + \sigma_k \nu_t\right)\nabla \mathrm{k}\right), \tag{3}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \varepsilon = \frac{\varepsilon}{k}\left(C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2}\varepsilon\right) + \nabla\left(\left(\nu + \sigma_\varepsilon \nu_t\right)\nabla \varepsilon\right), \tag{4}$$

де P_k – вироблення турбулентної кінетичної енергії, ν_t – турбулентна в'язкість, σ_k, σ_ε, $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ – константами моделі, $\vec{u}$ – вектор миттєвої швидкості рідини, T – миттєва температура, *k*– турбулентна кінетична енергія, ε– швидкість дисипації турбулентної кінетичної енергії.

Рівняння неперервності:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla\left(\rho \vec{u}\right) = 0, \tag{5}$$

де ρ – щільність, $\vec{u}$ – вектор швидкості.

Дані рівняння є основою для більшості CFD (обчислювальна гідродинаміка) програм і застосовуються для різноманітних інженерних завдань – від аеродинамічного моделювання до вирішення проблем теплообміну в енергетичних системах. Основні переваги та недоліки даних програм представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Переваги та недоліки основних CFD-систем

Програмне забезпечення	**Переваги**	**Недоліки**
ANSYS Fluent	1) Висока точність моделювання складних фізичних процесів. 2) Широкий набір можливостей для моделювання турбулентності, теплообміну та хімічних реакцій. 3) Потужна підтримка паралельних обчислень для обробки великих датасетів.	1) Висока вартість ліцензій та потреба в значних обчислювальних ресурсах. 2) Складність налаштування моделей та висока крива навчання.
SimScale	1) Хмарна платформа, доступна з будь-якого місця. 2) Не вимагає інвестицій в апаратне забезпечення. 3) Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс і спрощена колаборація.	1) Обмеження на доступність ресурсів залежно від тарифного плану. 2) Менша контрольованість і гнучкість порівняно з десктопними аплікаціями.
OpenFOAM	1) Відкрите програмне забезпечення з можливістю кастомізації. 2) Потужні засоби для розв'язання складних інженерних завдань. 3) Велика спільнота користувачів та розробників.	1) Складність використання та необхідність глибоких технічних знань. 2) Відсутність офіційної технічної підтримки.
Elmer	1) Багатофункціональне мультифізичне моделювання. 2) Відкритий код, що дозволяє адаптацію під специфічні потреби. 3) Немає вартості ліцензії.	1) Обмежені ресурси для великих або промислових масштабних завдань. 2) Потребує значних зусиль для налаштування та інтеграції з іншими системами.
COMSOL Multiphysics	1) Широкі можливості для мультифізичного моделювання. 2) Велика кількість готових модулів для різних застосувань. 3) Інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс користувача.	1) Висока вартість ліцензії. 2) Може вимагати значних обчислювальних ресурсів для складних моделей.

Рекомендації для розроблення нового програмного забезпечення

На основі вищезазначеного аналізу нове програмне забезпечення повинно врахувати такі аспекти:

– масштабованість та доступність: інтеграція хмарних технологій для забезпечення легкого доступу та масштабованості без великих витрат на апаратне забезпечення;

– інтуїтивність та простота використання: розроблення зрозумілого інтерфейсу, який знижує криву навчання і робить інструмент доступним широкому колу інженерів;

– гнучкість та кастомізація: надання можливостей для адаптації інструменту під специфічні потреби користувача, зберігаючи при цьому високу точність і ефективність обчислень;

– економічна доступність: пропозиція конкурентоспроможної вартості з можливістю масштабування функціоналу згідно з потребами користувача.

Із цими керівними принципами новий інструмент зможе не лише конкурувати з існуючими рішеннями, а й установити нові стандарти в індустрії інженерного моделювання.

Висновки

Проведено детальний аналіз сучасних програмних засобів для моделювання процесів теплообміну та гідродинаміки з використанням турбінного масла в системах трубопроводів. Огляд включав такі інструменти, як ANSYS Fluent, SimScale, OpenFOAM, Elmer та COMSOL Multiphysics, кожен з яких має свої унікальні переваги та обмеження. Кожна із цих систем має потенціал для вирішення складних інженерних завдань, проте існує низка спільних викликів, таких як висока вартість ліцензій, складність управління ресурсами та потреба в значних обчислювальних потужностях.

Виходячи з проведеного аналізу, визначено ключові напрями для розроблення нового програмного забезпечення, яке змогло б конкурувати з існуючими рішеннями. Новий програмний продукт повинен бути більш економічно доступним, інтуїтивно зрозумілим та гнучким у використанні. Це дасть змогу зробити високоякісне інженерне моделювання доступним для ширшого кола фахівців та забезпечити ефективнішу колаборацію у командних проєктах. Завдання розроблення такого програмного забезпечення вимагатиме інтеграції передових технологій, таких як хмарні обчислення, штучний інтелект, для оптимізації моделювання та забезпечення високої точності обчислень. Також критично важливою буде підтримка спільноти користувачів та розробників через відкриту архітектуру та можливість кастомізації інструменту.

Подальші дослідження будуть спрямовані на тестування й валідацію нової системи в реальних умовах, щоб забезпечити її надійність та ефективність. Такий підхід не лише сприятиме інноваційному розвитку інженерних дисциплін, а й забезпечить більшу адаптивність та стійкість виробничих процесів.

Література

1. Stolarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. Engineering Analysis with ANSYS Software. Butterworth-Heinemann, 2nd Edition, 2018. 562 p.
2. Кузьменко І.М. Комп'ютерне моделювання руху повітря по каналу насадки з використанням пакету ANSYS FLUENT. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія «Технічні науки»*. 2014. № 11. С. 72–78.
3. Хомінич О.О. Дослідження якості моделювання пограничного шару при виконанні CFD-розрахунку аеродинамічних характеристик літального апарата замкненої схеми в середовищі ANSYS FLUENT. *Прилади та методи контролю*. 2016. № 31. С. 65–74. https://doi.org/10.20535/0203-377131201686969
4. Kabdylkakov Ye.A., Surayev A., Irkimbekov R.A. Application of the text interface of the ANSYS FLUENT program for simulation of the thermophysical state of a typical experimental device. *NNC RK Bulletin.* 2022. № 3. P. 55–63. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-3-55-63
5. Papkov V., Shadymov N., Pashchenko D. CFD-modeling of fluid flow in ANSYS FLUENT using Python-based code for automation of repeating calculations. *International Journal of Modern Physics*. Vol. 34, no. 9. 2023. 2350114. https://doi.org/10.1142/s0129183123501140
6. Simscale. https://www.simscale.com/
7. Sharma M.S. , Jayagopal A. , Ramesha D.K. , Murali K., Tiwari P. Exploring the efficacy of using various coolants on lithium-ion 18650 cell employing conjugate heat transfer simulation. *Materials Today: Proceedings.* 2020. Vol. 20, part 2. P. 222–227. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.221
8. Fiedler B., Redkar S. Control design and simulation framework for an autonomous paramotor UAV. *ASME 2022 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, IDETC-CIE 2022. Vol. 7. V007T07A059. https://doi.org/10.1115/DETC2022-91283
9. OpenFOAM. The open source CFD toolbox. http://www.openfoam.com
10. Собіян І.В., Трофимов В.Е. Синтез структури вирішувача системи математичного моделювання OpenFOAM для аналізу теплового режиму світлодіодного світильника. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*. 2019. № 5–6. С. 25–33. https://doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.25
11. Крупа Є.С., Дмитрієнко О.В., Тиньянова І.І., Недовєсов В.О. Прогнозування енергетичних характеристик високонапірної радіально-осьової гідротурбіни з використанням програмного комплексу CFD. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Гідравлічні машини та гідроагрегати»*. 2020. № 1. С. 102–110. https://doi.org/10.20998/2411-3441.2020.1.14
12. Zhang H., Zhang L. Numerical simulation of cavitating turbulent flow in a high head Francis turbine at part load operation with OpenFOAM. *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 31. P. 156–165. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1006

13. Krasnopolsky B., Medvedev A. Acceleration of large scale OpenFOAM simulations on distributed systems with multicore cpus and gpus. *Parallel Computing: On the Road to Exascale. Series: Advances in Parallel Computing. Amsterdam: IOS Press*. 2016. Vol. 27. P. 93–102. https://doi.org/10.3233/978-1-61499-621-7-93

14. Elmer FEM: open source multiphysical simulation software. http://www.elmerfem.org (дата звернення: 06.05.2024).

15. Bondarenko D., Gabbar H.A., Barry Stoute C.A. Engineering design of plasma generation devices using Elmer finite element simulation methods. *Engineering Science and Technology, an International Journal.* Vol. 20, no. 1. 2017. Pp. 160–167. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.07.015

16. Vencels J., Råback P., Geža V. EOF-Library: Open-source Elmer FEM and OpenFOAM coupler for electromagnetics and fluid dynamics. *SoftwareX*. Vol. 9. 2019. P. 68–72. https://doi.org/10.1016/j.softx.2019.01.007

17. Comsol. https://www.comsol.com/ (дата звернення: 06.05.2024).

18. Байдак Ю.В., Смик В.А. Моделювання задачі конвективного теплообміну з поверхні випар-ника холодильної установки рефрижераторного контейнера. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2016. Т. 52. № 1. С. 5–11. https://doi.org/10.21691/ret.v52i1.31

19. Черкез Р.Г., Семешкін В.А., Жукова А.С., Стефюк В.В. Вплив висоти пластин на ефективність проникного термоелемента в режимі охолодження. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2023. Т. 24. № 2. С. 385–391. https://doi.org/10.15330/pcss.24.2.385-391

20. Sangare D., Bostyn S., Moscosa-Santillan M., Gökalp I. Hydrodynamics, heat transfer and kinetics reaction of CFD modeling of a batch stirred reactor under hydrothermal carbonization conditions. *Energy*. 2021. Vol. 219. 119635. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119635

References

1. Stolarski, T., Nakasone, Y., & Yoshimoto, S. (2018). Engineering Analysis with ANSYS Software. Butterworth-Heinemann, 2nd Edition, 2018.

2. Kuzjmenko, I.M. (2014). Komp'juterne modeljuvannja rukhu povitrja po kanalu nasadky z vykorystannjam paketu ANSYS FLUENT [Computer modeling of air movement through the nozzle channel using the ANSYS FLUENT package]. *Matematychne ta komp'juterne modeljuvannja. Serija: Tekhnichni nauky, Zbirnyk naukovykh pracj, Kam'janecj-Podiljsjkyj,* 11, 72–78 [in Ukrainian].

3. Khominych, O.O. (2016). Doslidzhennja jakosti modeljuvannja poghranychnogho sharu pry vykonanni CFD-rozrakhunku aerodynamichnykh kharakterystyk litaljnogho aparata zamknenoji skhemy v seredovyshhi ANSYS FLUENT [Study of the quality of boundary layer modeling when performing CFD calculation of the aerodynamic characteristics of a closed circuit aircraft in the ANSYS FLUENT environment]. *Prylady ta metody kontrolju*, 31, 65–74 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.20535/0203-377131201686969

4. Kabdylkakov, Ye.A., Surayev, A., & Irkimbekov R.A. (2022). Application of the text interface of the ANSYS FLUENT program for simulation of the thermophysical state of a typical experimental device. *NNC RK Bulletin*, 3, 55–63. https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-3-55-63

5. Papkov, V., Shadymov, N., & Pashchenko, D. (2023). CFD-modeling of fluid flow in ANSYS FLUENT using Python-based code for automation of repeating calculations. *International Journal of Modern Physics*, 34 (9), 2350114. https://doi.org/10.1142/s0129183123501140

6. Simscale. https://www.simscale.com/ (data zvernennja 06.05.2024)

7. Sharma, M.S. , Jayagopal, A. , Ramesha, D.K., Murali, K., & Tiwari, P. (2020). Exploring the efficacy of using various coolants on lithium-ion 18650 cell employing conjugate heat transfer simulation. *Materials Today: Proceedings*, 20 (2), 222–227. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.221

8. Fiedler, B., & Redkar, S. Control design and simulation framework for an autonomous paramotor UAV. *ASME 2022 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 7, V007T07A059. https://doi.org/10.1115/DETC2022-91283

9. OpenFOAM. The open source CFD toolbox. http://www.openfoam.com (data zvernennja 06.05.2024).

10. Sobijan, I.V., & Trofymov, V.E. (2019). Syntez struktury vyrishuvacha systemy matematychnogho modeljuvannja OpenFOAM dlja analiza teplovogho rezhymu svitlodiodnogho svityljnyka [Synthesis of the solver structure of the OpenFOAM mathematical modeling system for the analysis of the thermal mode of the LED lamp]. *Tekhnologhija i konstrujuvannja v elektronnij aparaturi*, 5–6, 25–33 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.25

11. Krupa, Je.S., Dmytrijenko, O.V., Tynjjanova, I.I., & Nedovjesov, V.O. (2020). Proghnozuvannja energhetychnykh kharakterystyk vysokonapirnoji radialjno-osjovoji ghidroturbiny z vykorystannjam proghramnogho kompleksu CFD [Prediction of energy characteristics of a high-pressure radial-axial hydroturbine using the CFD software complex]. *Visnyk Nacionaljnogho tekhnichnogho universytetu «KhPI». Serija: Ghidravlichni mashyny ta ghidroaghreghaty,* 1, 102–110 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.20998/2411-3441.2020.1.14

12. Zhang, H., & Zhang, L. (2012). Numerical simulation of cavitating turbulent flow in a high head Francis turbine at part load operation with OpenFOAM. *Procedia Engineering*, 31, 156–165. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1006

13. Krasnopolsky, B., & Medvedev, A. (2016). Acceleration of large scale OpenFOAM simulations on distributed systems with multicore cpus and gpus. *Parallel Computing: On the Road to Exascale. Series: Advances in Parallel Computing. Amsterdam: IOS Press*, 27, 93–102. https://doi.org/10.3233/978-1-61499-621-7-93

14. Elmer FEM: open source multiphysical simulation software. http://www.elmerfem.org (data zvernennja 06.05.2024).

15. Bondarenko, D., Gabbar, H.A., & Barry Stoute, C.A. (2017). Engineering design of plasma generation devices using Elmer finite element simulation methods. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20 (1), 160–167. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.07.015

16. Vencels, J., Råback, P., & Geža, V. (2019). EOF-Library: Open-source Elmer FEM and OpenFOAM coupler for electromagnetics and fluid dynamics. *SoftwareX,* 9, 68–72. https://doi.org/10.1016/j.softx.2019.01.007

17. Comsol. https://www.comsol.com/ (data zvernennja 06.05.2024)

18. Bajdak, Ju.V., & Smyk, V.A. (2016). Modeljuvannja zadachi konvektyvnogho teploobminu z poverkhni vypar-nyka kholodyljnoji ustanovky refryzheratornogho kontejnera [Modeling of the problem of convective heat transfer from the surface

of the evaporator of the refrigerating unit of the refrigerated container]. *Refrigeration Engineering and Technology*, 52 (1), 5–11 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.21691/ret.v52i1.31

19. Cherkez, R.Gh., Semeshkin, V.A., Zhukova, A.S., & Stefjuk, V.V. (2023). Vplyv vysoty plastyn na efektyvnistj pronyknogho termoelementa v rezhymi okholodzhennja [The influence of the height of the plates on the efficiency of the penetrating thermocouple in the cooling mode]. *Fizyka i khimija tverdogho tila,* 24 (2), 385–391 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.15330/pcss.24.2.385-391

20. Sangare, D., Bostyn, S., Moscosa-Santillan, M., & Gökalp, I. (2021). Hydrodynamics, heat transfer and kinetics reaction of CFD modeling of a batch stirred reactor under hydrothermal carbonization conditions. *Energy*, 219, 119635. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119635

УДК 004.021, 004.588, 004.78
DOI: https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-14

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІТРУ НА УПРАВЛІННЯ БЕЗПІЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ У ВІРТУАЛЬНОМУ СЕРЕДОВИЩІ UNITY3D

Середа А. В., *Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Інститут комп'ютерних технологій, Київ, Україна. https://orcid.org/0000-0002-4779-5475, andrew.sereda@gmail.com*

Даценко І. П.*, к.т.н., доц., Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Інститут комп'ютерних технологій, Київ, Україна. https://orcid.org/0000-0002-0047-413X, docik_ivan@ukr.net*

Анотація. *У статті досліджується вплив вітру на управління безпілотним літальним апаратом (БПЛА) у віртуальному середовищі Unity3D. Безпілотні літальні апарати відіграють усе більшу роль у різних галузях, включаючи логістику, сільське господарство, моніторинг навколишнього середовища та рятувальні операції. Однак ефективне керування такими апаратами в реальних умовах може бути складним завданням через різноманітні зовнішні чинники, які можуть значно впливати на стабільність та маневреність дрону, що може призводити до зниження його ефективності та підвищення ризику аварій. У статті представлено модель симуляції, що враховує різні параметри вітру, такі як швидкість і напрямок, проаналізовано вплив цих чинників на поведінку дрона. Використання Unity3D як платформи для моделювання дає змогу створювати реалістичні сценарії польотів без ризику пошкодження обладнання або загрози безпеці людей. Для реалізації моделі розроблено алгоритми управління, які адаптуються до змінних вітрових умов, зокрема використано PID-регулятор та фільтр Калмана. Результати симуляцій показують, що зі збільшенням швидкості вітру зростає нестабільність польоту, що вимагає більш точного управління для утримання курсу та висоти. Окрім того, напрямок вітру відносно траєкторії польоту має значний вплив: попутний вітер сприяє зниженню енергоспоживання, тоді як зустрічний та боковий вітер вимагають додаткових коригувальних маневрів. Виявлено, що адаптивні алгоритми можуть значно покращити реакцію дрона на зміни вітрових умов, зменшуючи відхилення від заданої траєкторії. У дослідженні наведено детальний код на C# для Unity3D, який може бути використаний для відтворення результатів та подальших експериментів. Практичні рекомендації для розробників та операторів БПЛА включають налаштування параметрів управління залежно від очікуваних вітрових умов і врахування додаткових атмосферних чинників для покращення точності симуляцій.*

Ключові слова: *вплив вітру, БПЛА, Unity3D, симуляція, стабільність, дрон, маневреність, критерій вітру, алгоритми управління, віртуальне середовище.*

EFFECT OF WIND ON UAV CONTROL IN UNITY3D ENVIRONMENT

Andrii Sereda*, Open University of Human Development «Ukraine», Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0002-4779-5475, andrew.sereda@gmail.com*

Ivan Datsenko*, Ph.D., Open University of Human Development «Ukraine», Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0002-0047-413X, docik_ivan@ukr.net*

Abstract. *The paper investigates the impact of wind conditions on the control of an unmanned aerial vehicle (UAV) in the virtual environment of Unity3D. UAVs are increasingly playing a significant role in various fields, including logistics, agriculture, environmental monitoring, and rescue operations. However, effective control of these vehicles in real-world conditions can be challenging due to various external factors, particularly wind conditions. Wind can significantly affect the stability and maneuverability of the drone, leading to reduced efficiency and increased risk of accidents. The article presents a simulation model that considers different wind parameters, such as speed and direction, to analyze the impact of these factors on the drone's behavior. Utilizing Unity3D as a modeling platform allows for the creation of realistic flight scenarios without the risk of equipment damage or safety threats to people. Control algorithms that adapt to changing wind conditions, including PID controller and Kalman filter, were developed for the implementation of the model. Simulation results show that as wind speed increases, flight instability rises, requiring more precise control to maintain course and altitude. Additionally, the wind direction relative to the flight trajectory has a significant impact: tailwinds contribute to reduced energy consumption, while headwinds and crosswinds require additional corrective maneuvers. It was found that adaptive algorithms can significantly improve the drone's response to wind changes, reducing deviations from the set trajectory. The study also provides detailed C# code for Unity3D, which can be used to reproduce the results and conduct further experiments. Practical recommendations for UAV developers and operators include adjusting control parameters based*

on expected wind conditions and considering additional atmospheric factors to improve simulation accuracy. Thus, this article makes a significant contribution to the understanding and improvement of UAV control in windy conditions, offering innovative approaches to modeling and compensation algorithms that can be applied in various fields where unmanned aerial vehicles are used.

Key words: *wind influence, UAV, Unity3D, simulation, stability, drone, maneuverability, wind criterion, control algorithms, virtual environment.*

Вступ

У сучасному світі безпілотні літальні апарати (БПЛА) знаходять широке застосування у різних сферах, включаючи доставку вантажів, зйомки з повітря, сільське господарство та наукові дослідження. Однак ефективне управління БПЛА в реальних умовах є складним завданням через вплив різноманітних зовнішніх чинників, серед яких – вітер, що відіграють одну з ключових ролей. Пориви вітру можуть значно впливати на стабільність та маневреність дрона, що, своєю чергою, може призводити до зниження ефективності його використання та підвищення ризику аварій. Статтю присвячено дослідженню впливу такого критерію, як вітер, на управління БПЛА за допомогою моделювання у середовищі Unity3D. Рушій Unity3D є потужним інструментом для створення реалістичних симуляцій, що дає змогу досліджувати різні сценарії без необхідності проведення дорогих та ризикованих експериментів у реальному світі. Метою цього дослідження є аналіз впливу швидкості та напрямку вітру на поведінку дрона, а також розроблення рекомендацій для покращення алгоритмів його управління в умовах змінного вітру. У першій частині статті розглянуто основні теоретичні аспекти впливу вітру на дрони. Далі описано методику моделювання вітрових умов у Unity3D та наведено результати симуляцій, які демонструють характерні патерни поведінки БПЛА за різних умов. Нарешті, стаття пропонує висновки та рекомендації, які можуть бути корисними для розробників систем управління дроном та дослідників у цій галузі.

Виконання досліджень

Змоделюємо потік вітру, що впливає на БПЛА у віртуальному середовищі Unity3D. Представимо вітер як вектор сили, яка впливає на компонент Rigidbody – тіло дрону. Ось ключові аспекти та формули для опису умов вітру:

Основну силу вітру, що діє на дрон, можна представити вектором:

$$\vec{F}wind = \rho \cdot A \cdot Cd \cdot \vec{v}wind, \quad (1)$$

де ρ – густина повітря (кг/м³), A – ефективна площа дрона, перпендикулярна до напрямку вітру (м²), Cd – коефіцієнт лобового опору, що залежить від форми та орієнтації дрона, $\vec{v}wind$ – вектор швидкості вітру (м/с).

Щоб застосувати силу вітру до жорсткого корпусу дрона, потрібно обчислити результуючий вектор сили:

$$\vec{F}total = \vec{F}wind - \vec{F}drone, \quad (2)$$

де $\vec{F}drone$ – сила, спричинена рухом дрона відносно вітру.

Динамічні ефекти вітру

1. Зміни швидкості та напрямку вітру:
- Швидкість вітру $vwind$ може змінюватися з часом: $vwind(t)$.
- Напрямок вітру може змінюватися, зазвичай представлений у вигляді кута $\theta(t)$.

2. Пориви і турбулентність:
- Пориви можна змоделювати як раптові зміни швидкості чи напрямку вітру.
- Турбулентність можна моделювати за допомогою функції шуму, наприклад шуму Перліна, для створення випадкових коливань швидкості та напрямку вітру.

Формули швидкості та напрямку вітру

1. Постійний вітер:

$$\vec{v}wind = vwind \cdot (cos(\theta), sin(\theta), 0), \quad (3)$$

де vwind – це постійна швидкість вітру, θ – кут напрямку вітру.

2. Змінна швидкість вітру:

$$vwind(t) = v0 + \Delta v \cdot sin(\omega t), \quad (4)$$

де *v0* – базова швидкість вітру, Δ v – амплітуда зміни швидкості вітру, ω – частота зміни швидкості вітру, *t* – час.

3. Пориви:

$$\vec{v}gust(t) = vgust \cdot (cos(\theta gust(t)), sin(\theta gust(t)), 0), \quad (5)$$

де *vgust* – швидкість пориву, $\theta gust(t)$ може змінюватися з часом, представляючи напрямок пориву.

Для реалізації в Unity3D застосуємо ці формули, щоб регулювати сили, що діють на корпус дрона:
1. Розрахунок сили вітру:
Vector3 windVelocity = new Vector3(windSpeed * Mathf.Cos(windDirection * Mathf.Deg2Rad),0, windSpeed * Mathf.Sin(windDirection * Mathf.Deg2Rad));

Vector3 windForce = airDensity * effectiveArea * dragCoefficient * windVelocity;
2. Додання сили вітру до тіла:
Rigidbody droneRigidbody; // Переконайтеся, що тіло створено
droneRigidbody.AddForce(windForce);
3. Імітація поривів і турбулентності:
float gustSpeed = baseGustSpeed + gustAmplitude * Mathf.PerlinNoise(Time.time * gustFrequency, 0);

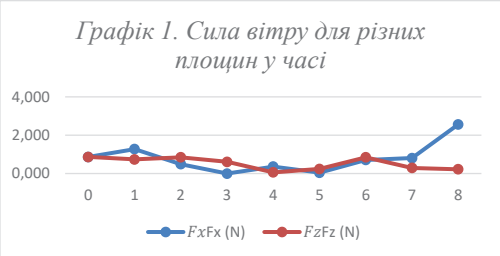
float gustDirection = baseGustDirection + gustDirectionVariation * Mathf.PerlinNoise(0, Time.time * gustFrequency);

Vector3 gustVelocity = new Vector3(gustSpeed*Mathf.Cos(gustDirection*Mathf.Deg2Rad),0, gustSpeed*Mathf.Sin(gustDirection * Mathf.Deg2Rad));

Vector3 gustForce = airDensity * effectiveArea * dragCoefficient * gustVelocity;
droneRigidbody.AddForce(gustForce);
Застосувавши ці формули та прийоми, створено реалістичну симуляцію вітру, яка впливає на можливість здійснення маневрів моделі дрона для віртуального середовища Unity3D.
Для перевірки вірності наших розрахунків зробимо тестові розрахунки в Ексель:

Таблиця 1
Тестові дані та розрахунок сили вітру для двох площин

Час (с)	Швидкість вітру (м/с)	Напрям вітру (°)	vx (м/с)	vz (м/с)	Fx (N)	Fz (N)
0	10	45	7,071	7,071	0,866	0,866
1	12	30	10,392	6,000	1,273	0,735
2	8	60	4,000	6,928	0,490	0,849
3	5	90	0,000	5,000	0,000	0,613
4	3	10	2,954	0,521	0,362	0,064
5	2	80	0,347	1,970	0,043	0,241
6	9	50	5,785	6,894	0,709	0,845
7	7	20	6,578	2,394	0,806	0,293
8	21	5	20,920	1,830	2,563	0,224



Графік 1. Сила вітру для різних площин у часі

Висновки

У рамках дослідження розроблено та реалізовано модель симуляції вітру, яка враховує різні параметри, включаючи швидкість та напрямок, надано код на C#. Основні результати дослідження показують:

- *Вплив швидкості вітру*: зі збільшенням швидкості вітру значно зростає нестабільність польоту БПЛА, що призводить до підвищеної похибки в утриманні курсу та висоти. Це підтверджено розрахунками, що демонструють збільшення середнього відхилення від заданої траєкторії за різних швидкостей вітру (табл. 1).
- *Вплив напрямку вітру*: напрямок вітру відносно траєкторії польоту також має значний вплив. Попутний вітер може зменшити споживання енергії, тоді як зустрічний вітер і боковий вітер вимагають від дрона додаткових коригувальних маневрів.

• *Алгоритми компенсації*: розроблені алгоритми компенсації для управління БПЛА в умовах вітру показали свою ефективність у зменшенні відхилень та підвищенні стабільності польоту. Використання адаптивних PID-регуляторів та фільтрів Калмана дало змогу значно покращити реакцію дрона на змінні вітрові умови.

Результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення систем управління дроном, що працює у реальних умовах, а також для розвитку більш реалістичних навчальних симуляцій у середовищі Unity3D.

Література

1. Андерсон, Дж.Д. (2016). Основи аеродинаміки. 6-е вид. McGraw-Hill Education.
2. Еріксон, К. (2004). Виявлення зіткнень в реальному часі. Morgan Kaufmann.
3. Міллінгтон, І. (2010). Розроблення ігрового фізичного движка: Як створити надійний комерційний фізичний движок для вашої гри. CRC Press.
4. Сміт, М., і Фернс, С. (2021). Unity 2021 Cookbook: Понад 140 рецептів для виведення ваших проєктів із розробки 2D- та 3D-ігор на новий рівень. 4-е вид. Packt Publishing.
5. NASA. (2024). Посібник для початківців з аеродинаміки від NASA. https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/learn-about-aerodynamics/

References

1. Anderson, J.D. (2016). Fundamentals of aerodynamics (6th ed.). McGraw-Hill Education.
2. Ericson, C. (2004). Real-time collision detection. Morgan Kaufmann.
3. Millington, I. (2010). Game physics engine development: How to build a robust commercial-grade physics engine for your game. CRC Press.
4. Smith, M., & Ferns, S. (2021). Unity 2021 cookbook: Over 140 recipes to take your 2D and 3D game development projects to the next level (4th ed.). Packt Publishing.
5. NASA. (2024). NASA's beginner's guide to aerodynamics. Retrieved from https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/learn-about-aerodynamics/

UDC 004.9
DOI: https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-15

RULE BASED MATCHMAKING SYSTEM

Sergii Suglobov, *Open International University of Human Development «Ukraine», Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0009-0004-6784-0968, s.suglobov@gmail.com*

Anatolii Tymoshenko*, Ph.D., Ass Prof., Open International University of Human Development «Ukraine», Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0003-0954-3186, timoshag@i.ua*

Abstract. *In modern online gaming, the issue of effective matchmaking is becoming increasingly important for ensuring fairness and player satisfaction. As the number of participants in a game grows, it is necessary to develop systems that can not only quickly and accurately determine team compositions but also consider numerous factors that impact the quality of the gameplay. This article presents an approach to building a rule-based matchmaking system. It combines algorithmic logic and expert knowledge to allocate players into teams based on predefined criteria, such as skill level, geographic location, preferences in game modes, and other parameters.*

The article discusses the operation of the system, which includes creating and processing complex metadata structures known as query schemas. In the initial stage, the system collects all player requests, sorts them by priority and creation time, and then applies various rules to calculate similarity matrices between these requests. Each rule computes the similarity between pairs of elements from the source and target schema, creating a similarity matrix where each element reflects the degree of similarity between two elements. The results of these matrices are then aggregated to create a unified similarity matrix, from which the system selects the most similar requests to form teams. The final stage involves evaluating the proposed matchmaking options to ensure the quality and balance of the gameplay.

The system is also adaptable to various matchmaking scenarios due to the use of rules that can dynamically alter the system's behavior depending on the characteristics of the input data. This improves the accuracy and efficiency of the matchmaking process. As a result, the developed matchmaking system is a versatile tool for creating balanced teams that meet the demands of different gaming environments.

Key words: *matching system, matching rules, schema matching.*

СИСТЕМА МАТЧМЕЙКІНГУ НА ОСНОВІ ПРАВИЛ

Суглобов С. В.*, Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Київ, Україна. https://orcid.org/0009-0004-6784-0968, s.suglobov@gmail.com*

Тимошенко А. Г.*, к.т.н., доц., Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Київ, Україна. https://orcid.org/0000-0003-0954-3186, timoshag@i.ua*

Анотація. *У сучасному онлайн-геймінгу питання ефективного матчмейкінгу стає усе більш важливим для забезпечення справедливості та задоволення гравців. В умовах, коли кількість учасників у грі зростає, необхідно створювати системи, здатні не лише швидко та точно визначати склади команд, а й ураховувати безліч чинників, які впливають на якість гри. У статті представлено підхід до побудови системи матчмейкінгу, що базується на правилах. Вона поєднує у собі алгоритмічну логіку та знання експертів, забезпечуючи розподіл гравців у команді на основі попередньо заданих критеріїв, таких як рівень навичок, географічне розташування, переваги в ігрових режимах та інші параметри.*

Розглянуто процес роботи системи, який включає створення та обробку складних структур метаданих, відомих як схеми запитів. На першому етапі система отримує усі запити гравців, сортує їх за пріоритетом та часом створення, після чого застосовує різні правила для обчислення матриць схожості між цими запитами. Кожне правило обчислює схожість між парами елементів із вихідної та цільової схем, створюючи матрицю схожості, де кожен елемент матриці відображає ступінь подібності між двома елементами. Далі результати цих матриць агрегуються для створення єдиної підсумкової матриці схожості, з якої система відбирає найбільш схожі запити для формування команд. Останнім етапом є оцінка запропонованих варіантів матчування для забезпечення якості та збалансованості гри.

Система також здатна адаптуватися до різних сценаріїв матчмейкінгу завдяки використанню правил, які можуть динамічно змінювати поведінку системи залежно від характеристик вхідних даних. Це дає змогу поліпшити точність та ефективність процесу матчування. Таким чином, розроблена система матчмейкінгу є універсальним інструментом для створення збалансованих команд, що відповідають вимогам різних геймерських середовищ.

Ключові слова: *система матчмейкінгу, правила матчмейкінгу, відповідність схеми.*

Introduction

Player request represents a comprehensive set of data encompassing a player's preferences, constraints, and requirements for online gaming or just a complex data structure for system to operate. It includes information such as game and mode preferences, skill levels, geographical considerations, and other relevant factors. The matchmaking system utilizes this data to create balanced and enjoyable team compositions tailored to individual players' needs.

Matching complex metadata structures is crucial in various domains often referred to as schema matching or ontology alignment. To expedite this task, schema matching systems have to be developed. These systems leverage matching algorithms, also known as matchers, to analyze the structural and semantic similarities between schema elements or instance data. However, the effectiveness of these systems heavily relies on the incorporation of domain-specific knowledge and rules.

Rules play a crucial role in schema matching systems by guiding the matching process and shaping the decisions made by the algorithm. These rules encapsulate expert knowledge and heuristics, enabling the system to interpret and adapt to diverse matching scenarios. For instance, a rule might prioritize structural similarities over semantic ones in certain contexts, or it might adjust matching thresholds based on the characteristics of the input schemes.

By integrating rules into the matching process, schema matching systems can enhance their accuracy, efficiency, and adaptability. Rules provide a means to encode domain-specific insights and preferences, empowering the system to navigate complex matching challenges effectively. Moreover, rules enable the system to dynamically adjust its behavior based on the characteristics of the input data, leading to more robust and reliable matching outcomes.

In essence, the incorporation of rules into schema matching systems represents a critical step towards developing efficient and adaptable solutions capable of addressing the diverse matching needs across different domains. These rules serve as the guiding principles that govern the system's decision-making process, ensuring that it can effectively handle various matching scenarios and produce high-quality mapping suggestions.

Workflow

A matchmaking request or schema comprises various schema elements, each characterized by a name, value with different data type. The scope of schemes is broad and encompasses diverse metadata structures. The objective of a schema matching system is to derive mapping suggestions between a given source schema (S) and a target schema (T).

To accomplish this, most schema matching systems employ a combination of matching operators, including rules, aggregation, and selection. Rules compute similarity values for pairs of schema elements from S and T, generating a similarity matrix of size |S|*|T|. Each entry in this matrix represents the similarity between two elements, ranging from 0 (low similarity) to 1 (high similarity).

So, each rule computes a similarity value for all elements from the source and the target request and constructs a similarity matrix of size |S|*|T| as output.

Matching sequence:

1. Get all requests, sorted by priority and creation time.
2. Compute similarity matrix of all requests by each rule that responsible by specified values.
3. Combines results of rules similarity matrix to a single aggregated similarity matrix.
4. Iterate over aggregated matrix and select the most similar requests.
5. Evaluate final match proposal.

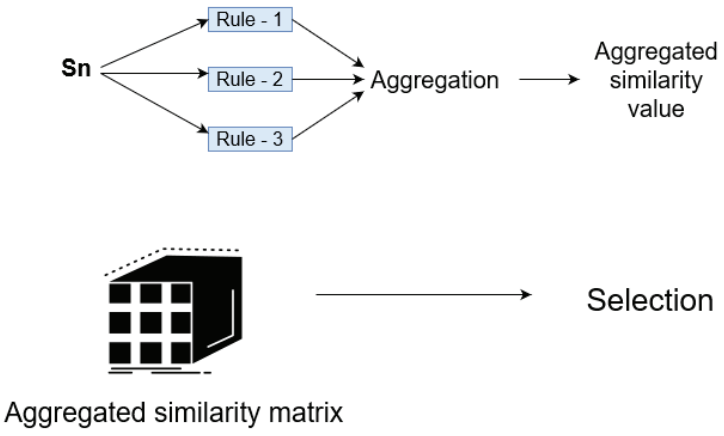


Fig. 1. Processing request schemes using matrices

To enhance the quality of matching results, aggregation operators are utilized to consolidate the output of multiple rules into a single aggregated similarity matrix. Subsequently, selection operators are employed to identify the most probable element pairs, typically using strategies such as Threshold, MaxN, etc.

– **Threshold**: Filters entries above a specified threshold.

– **MaxN**: Returns the N highest entries in each row or column.

Selection strategies accommodate scenarios involving n:m mappings, allowing elements to participate in multiple correspondences. From the selected matrix, a mapping between the source schema S and the target schema T is constructed, comprising a set of correspondences (s, t, sim) denoting source and target elements along with their similarity values.

From aggregated matrix we will try to select the most similar players.

– Exclude all zero values

– For better matches it is recommended to use threshold for final selection.

Selection produce matching proposals that should be evaluated to finalize proposal, because among 3 players with similarity 0.5 they can be totally different, for example we can get a raise condition situation when 3 players can't be intersected by territory, like in example: (eu, us), (us, cis), (cis, eu), we have a situation when for this players we can't chose a territory that suits them.

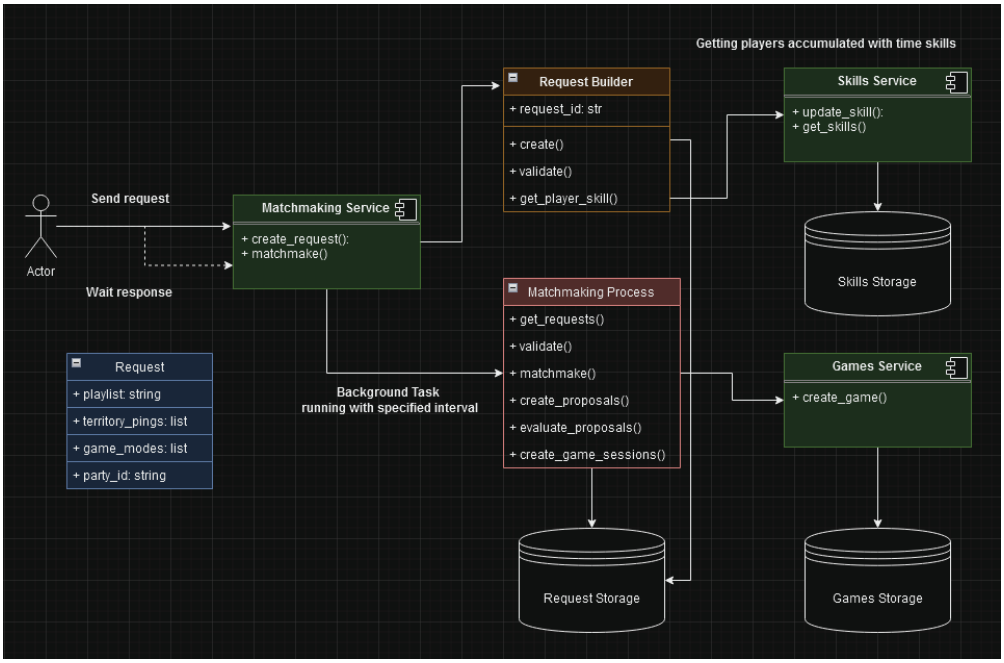


Fig. 2. Components high level vision

Matching Rule

The Rule serves as a fundamental component within the schema matching system, encapsulating specific guidelines or directives governing the matching process. Essentially, a Rule object embodies expert knowledge or heuristics aimed at guiding the system's decision-making and adaptation capabilities.

A matching rule comprises the following components:

– **Pattern**: This component delineates a segment of the process graph where the rule can be applied. The pattern may be empty, particularly within rules initiating the process construction.

– **Action**: The action defines a prescribed alteration to instances of the identified pattern. This encompasses additions or modifications of one or multiple operators within the process.

– **Relevance Function**: Responsible for computing the relevance of the rule within the current matching process and match task. Leveraging computed schema and matrix features from the input schemas and existing similarity matrices, the relevance function generates a relevance value ranging from 0 to 1. This value dictates whether the rule is executed.

– **Optional Check Function**: This function evaluates the quality of the changes introduced by the action subsequent to rule application. It also utilizes matrix features to compute a value between 0 and 1, serving as an assessment of the alterations' efficacy.

To better explain the parts of a matching rule we introduce few simple examples (it is not production ready examples, just to get an idea):

Matching by territories

Assume that we need to match players over the world with many territories and ping (important parameter in games) is different for every player, so from full list of territories player can choose only one/few.

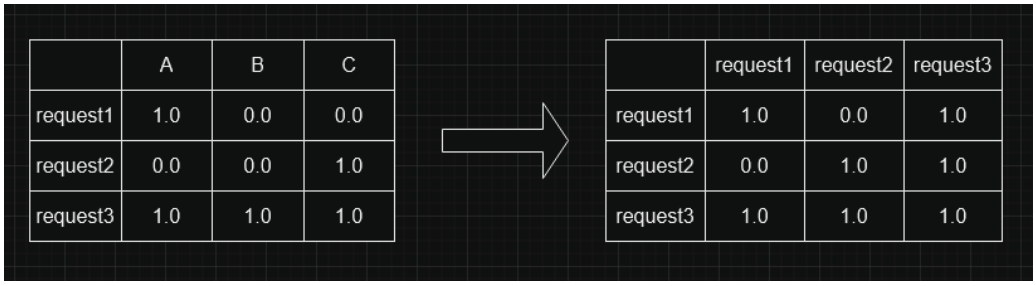
```
import pandas as pd

ALL_TERRITORIES = ['A', 'B', 'C']

def close_territories(requests: list[Request]) -> pd.DataFrame:
    request_ids = [req.id for req in requests]
    df = pd.DataFrame([

        [1 if t in req.territories else 0 for t in ALL_TERRITORIES] for req in requests],

        index=request_ids, columns=ALL_TERRITORIES)
    return df.dot(df.T)
```



	A	B	C
request1	1.0	0.0	0.0
request2	0.0	0.0	1.0
request3	1.0	1.0	1.0

	request1	request2	request3
request1	1.0	0.0	1.0
request2	0.0	1.0	1.0
request3	1.0	1.0	1.0

Fig. 3. Converting raw territory data to mapping among player requests

Here is a brief summary of the function:

– This function computes a similarity matrix based on the proximity of territories between different requests.

– It creates a DataFrame where each row corresponds to a request and each column represents a territory. The cell values are binary, indicating whether a request includes a particular territory.

– The function then calculates the dot product of the DataFrame with its transpose, resulting in a square matrix where each element represents the number of common territories between two requests.

– Normalization is performed to scale the values between 0 and 1, ensuring uniformity across different datasets.

– The resulting similarity matrix is returned.

Matching by skill

Assume that we need to match players that have different skills, all players are unique, some player may play more time, etc.

The idea of every rule is particularly the same, we need to normalize initial data, map it on other players and get players similarity among each other.

```
import pandas as pd

def fair_skill(requests: list[Request]) -> pd.DataFrame:
    skills = [req.skill for req in requests]
    min_s, max_s = min(skills), max(skills)
    request_ids = [req.id for req in requests]
    df = pd.DataFrame([skills] * len(skills), index=request_ids, columns=request_ids)
    df = (df - min_s) / (max_s - min_s)
    df = df.sub(df.T).abs()
    df = 1 / (1 + df)
    return df
```

Here is a brief summary of the function:

– This function computes a similarity matrix based on the fairness of skill levels between different requests.

– It creates a DataFrame where each row and column represent a request, with the cell values indicating the skill level of each request.

– The function normalizes the skill levels within the range [0, 1] based on the minimum and maximum skill levels among all requests.

– It calculates the absolute difference between the normalized skill levels of each pair of requests and computes the reciprocal to obtain similarity values. Higher skill differences result in lower similarity scores.

– The resulting similarity matrix is returned.

Both functions utilize the Pandas library to handle data manipulation efficiently, providing a convenient interface for working with tabular data structures.

Take a look on the example of matching three requests in that way:

Table 1

Explaining rule results

x	Territories			Skills			Aggregated		
x	request1	request2	request3	request1	request2	request3	request1	request2	request3
request1	1.0	0.0	0.5	1.0	0.66	0.83	1.0	0.0	0.64
request2	0.0	1.0	0.5	0.66	1.0	0.58	0.0	1.0	0.54
request3	0.5	1.0	1.0	0.83	0.58	1.0	0.64	0.76	1.0

After applying rules to requests we will get resulted aggregated matrices that show us next:

– Request1 is incompatible with Request2

– Request1 is better matching with Request3 than Request2

– Request3 is compatible with both other.

– Resulted value in 0 mean that players can't play together at all, this parameter can be further optimized by adding threshold value for example equal to 0.2-0.4 to skip all resulted similarity values.

Aggregate rules

Aggregation rules enhance a process by introducing aggregation operators and consolidating dangling operators from a matching process. These dangling operators may have been generated by initiating rules. Various aggregation operators are available, including AVERAGE, OWA, HARMONY, or MIN/MAX, each offering distinct advantages and drawbacks.

In my works I use weighted geometric average to derive a final matrix from multiple matrices. Utilizing a weighted geometric average offers several advantages, including the ability to incorporate multiple sources of information while considering their relative importance. Additionally, it provides a flexible framework for combining diverse matrices, enabling robust aggregation of similarity scores in the context of schema matching or other matching tasks.

Example using pure numpy (as np):

```
np.exp(np.average(np.log(matrices), axis=0, weights=np.array(self._rule_weights)))
```

or scipy library can be used: from scipy.stats.mstats import gmean

Selection

The selection process from an aggregated matrix and splitting on teams involves identifying the most suitable correspondences between elements from the source and target schemas, followed by grouping these correspondences into teams based on specific criteria. Here's a description of the combined selection and team-splitting process:

Aggregated Matrix: Start with the aggregated similarity matrix, which combines the similarity scores from multiple individual matrices. Each row of the matrix is a players sorted by creation time, so we need to iterate over each row and check if we have enough players to create a game for them.

Thresholding: Optionally, apply a threshold to the values in the aggregated matrix to filter out less significant similarity scores. This helps focus on the most relevant correspondences.

Team Formation: Once the correspondences are identified, proceed to split them into teams based on predetermined criteria. This could involve factors such as balancing skill levels, ensuring diversity in roles or positions, or maximizing overall team cohesion.

Team Splitting Criteria: Determine the criteria for splitting correspondences into teams. This could include factors such as:

– Skill Level: Ensure that each team has a balanced distribution of skill levels to promote fair competition.

Matchmaking flow

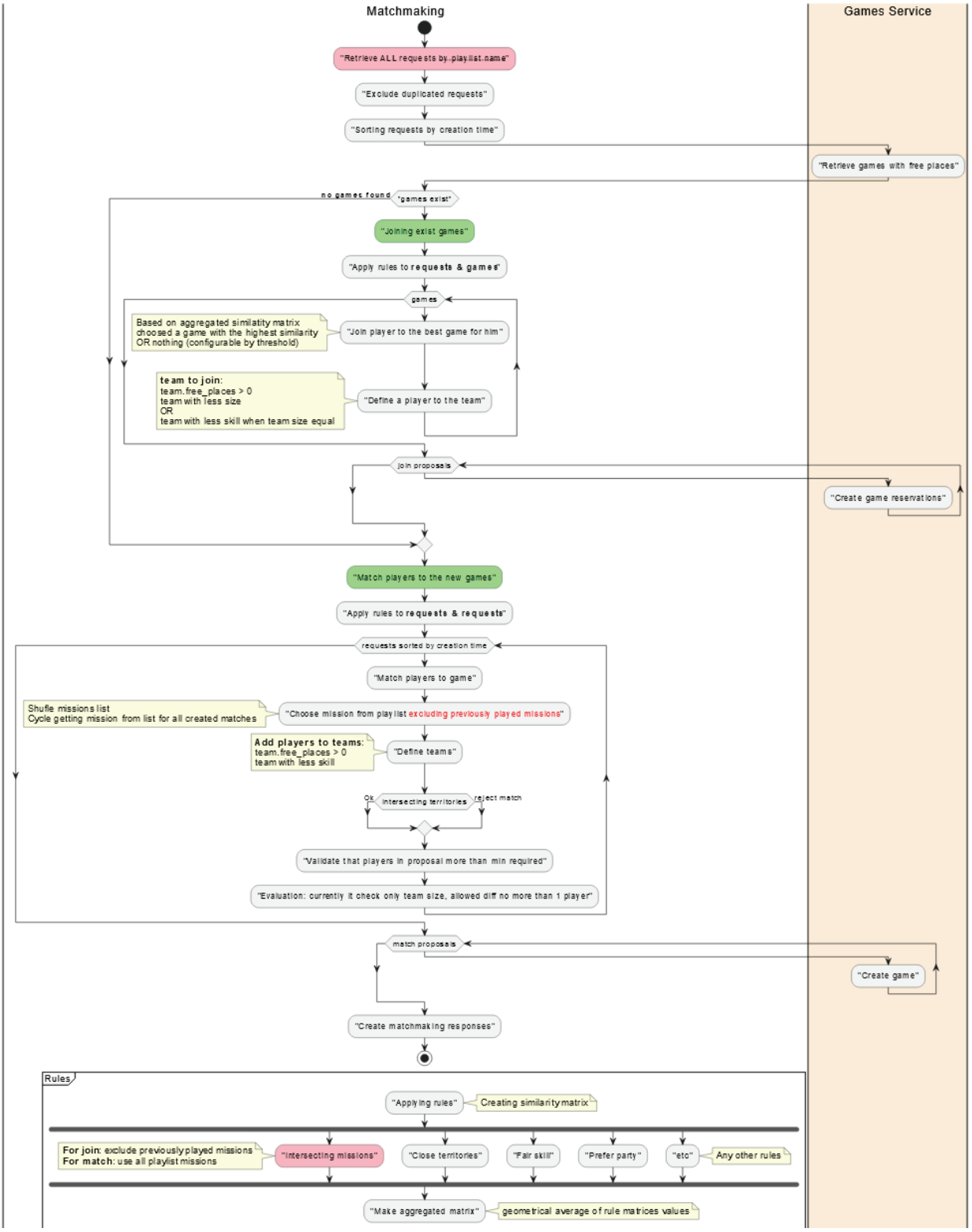


Fig. 4. Full matchmaking flow diagram

– Role Diversity: Ensure that each team has a diverse mix of roles or positions to facilitate strategic gameplay.
– Communication Preferences: Consider players' communication preferences
– Etc

Final Mapping and Team Assignment: Construct a final mapping between the source and target schemas, incorporating the team assignments. This mapping represents the recommended associations between elements from the two schemas, grouped into teams based on the specified criteria.

Evaluation

In evaluating the final mapping result, several key aspects need consideration to ensure the fairness, diversity, and overall quality of the gameplay experience. Here's a breakdown of the evaluation process, encompassing various criteria and potential adjustments:

Re-balancing teams:
– Evaluate the distribution of skill levels, roles, or other relevant factors across the teams.
– If significant imbalances are detected, consider re-balancing teams to ensure fair competition.
– This may involve redistributing players, adjusting team compositions, or implementing dynamic balancing mechanisms during gameplay.

Randomizing:
– Assess the variety and suitability of game modes assigned to each team.
– Introduce randomness or rotation in game mode selection to prevent monotony and enhance player engagement.

Raising conditions for choosing territory:
– Review the criteria for selecting territories and assess their impact on gameplay dynamics.
– Consider raising the conditions for choosing territories to introduce strategic depth and challenge.
– This could involve implementing additional criteria such as territorial control objectives, resource allocation, or strategic advantages/disadvantages.

Continuous monitoring and iterative improvement:
– Continuously monitor gameplay metrics, player feedback, and performance data to identify areas for improvement.
– Iterate on the matchmaking and team allocation algorithms based on real-world observations and feedback from players.
– Strive for a balance between fairness, competitiveness, and enjoyment, and be prepared to adapt the matchmaking system accordingly to meet evolving player needs and expectations.

By carefully evaluating the final mapping result and implementing adjustments as necessary, you can ensure a balanced, diverse, and engaging gameplay experience for all participant

Conclusion

The rule-based matchmaking system presented in this article offers a promising approach to enhancing the multiplayer gaming experience. By intelligently allocating players into teams based on predefined criteria and leveraging matching rules to determine player similarity and construct similarity matrices, the system strives to promote fairness, balance, and enjoyment in gaming environments. Through the aggregation of similarity matrices and the selection of optimal match proposals, the system aims to optimize team compositions and ultimately improve the quality of matchmaking outcomes. Additionally, empirical evaluation and real-world testing are essential to validate the effectiveness and robustness of the system across diverse gaming scenarios and player demographics.

References

1. Kim, D., & Kim, J. (2018). Multiplayer Online Game Matchmaking with Fuzzy C-Means Clustering. Sensors, 18(6), 1967.
2. Wang, L., Chen, H., Yang, B., & Li, Y. (2021). Multiplayer Online Game Matching Method Based on Comprehensive Weight. IEEE Access, 9, 46178–46188.
3. Xu, Z., Wang, W., & Wei, X. (2019). Multiplayer Online Game Matchmaking Method Based on User Preference. In 2019 International Conference on Artificial Intelligence and Computer Engineering (ICAICE) (pp. 141–144). IEEE.
4. Lee, J., Kim, D., & Lee, D. (2017). Matchmaking System Using Bayesian Networks in Online Games. In Proceedings of the 19th ACM International Conference on Multimodal Interaction (pp. 467–471). ACM.
5. Hsieh, C. L., Hsiao, J. H., Chen, M. Y., & Chen, M. S. (2018). Adaptive Matchmaking Algorithm for Games. IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games, 10(4), 382–395.
6. Eric Peukert., & Julian Eberius. (2011). Rule-based Construction of Matching Processes
7. Lian, Y., Zeng, X., & Xiong, L. (2019). A Multiagent Q-Learning-Based Matchmaking Algorithm for Online Games. IEEE Transactions on Games, 11(3), 288–300.
8. Nieuwoudt, C. (2018). Online Game Matchmaking: An Introduction to Automated Player Grouping Algorithms. arXiv preprint arXiv:1810.08343.
9. Tan, C. T., Aung, K. M., & Lin, M. (2021). A Hierarchical Matchmaking Algorithm for Online Multiplayer Games. Applied Sciences, 11(3), 1413.
10. Salim, F., Zainuddin, Z., Jaafar, A., & Hamid, F. (2020). A Comprehensive Review on Multiplayer Online Game Matchmaking Algorithms. IEEE Access, 8, 15944–15960.

UDC 004.855.5
DOI: https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-16

ADAPTING AUDIO SPECTROGRAM TRANSFORMERS FOR RESPIRATORY RATE ESTIMATION

***Dmytro Tkachenko**, Ph.D. student, Open International University of Human Development «Ukraine», Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0003-2804-7305, dmitriytkachenko1994@gmail.com*

***Serhii Odribets**, Ph.D., Ass. Prof., Open International University of Human Development «Ukraine», Kyiv, Ukraine. onspo@ukr.net*

***Abstract.** This paper investigates the application of Audio Spectrogram Transformers (AST) for the task of respiratory rate estimation from audio recordings, a critical metric in the screening for sleep apnea. Traditional methods like polysomnography, used for sleep apnea diagnosis, are resource-intensive and not widely accessible, making automated respiratory rate estimation a valuable alternative. Recent advancements in deep learning, particularly transformer-based models, offer promising solutions. This study adapts a pre-trained AST model, originally designed for audio classification tasks, for respiratory rate estimation by incorporating attention mechanisms and a regression layer.*

We fine-tune the AST model on the ICBHI 2017 challenge dataset, utilizing transfer learning to leverage the robust feature representations learned from large-scale audio datasets like AudioSet. Our methodology includes resampling audio files, applying band-pass filters, and converting audio signals into mel-spectrograms. To address the limited size of the ICBHI dataset, we employ data augmentation techniques such as SpecAugment, which introduces variations in the spectrograms to improve the model's generalizability.

We propose two pooling approaches – attention pooling and convolutional pooling – to effectively capture temporal dependencies in respiratory sounds. Experimental results demonstrate that the convolutional pooling variant of our model achieves a Mean Absolute Error (MAE) of 0.8320 and a Mean Relative Error (MRE) of 12.56% on the ICBHI dataset, outperforming the previous model by 16.8% in MAE. These findings highlight the efficacy of transformer-based models in handling complex audio patterns and underscore the potential of AST models for broader applications in respiratory sound analysis.

Our research contributes to the machine learning field by presenting an effective method for respiratory rate estimation using transformer-based models. Future work will explore further refinements in model architecture and the integration of additional physiological signals to enhance predictive accuracy.

***Key words:** audio spectrogram transformer, transfer learning, respiratory rate estimation, sleep apnea.*

АДАПТАЦІЯ АУДІОСПЕКТРОГРАМНИХ ТРАНСФОРМЕРІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТИ ДИХАННЯ

***Ткаченко Д. А.**, аспірант, Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Київ, Україна. https://orcid.org/0000-0003-2804-7305, dmitriytkachenko1994@gmail.com*

***Одрібець С. П.**, к.ф.-м.н., доц., Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Київ, Україна. onspo@ukr.net*

***Анотація.** Ця стаття досліджує застосування аудіоспектрограмних трансформерів (AST) для задачі визначення частоти дихання з аудіозаписів, що є критичним показником під час скринінгу на апное уві сні. Традиційні методи, такі як полісомнографія, що використовуються для діагностики апное уві сні, є ресурсоємними та не широко доступними, що робить автоматизоване визначення частоти дихання цінною альтернативою. Останні досягнення в галузі глибокого навчання, зокрема моделі на основі трансформерів, пропонують перспективні рішення. Це дослідження адаптує попередньо навчену модель AST, первісно розроблену для задач класифікації аудіо, для визначення частоти дихання шляхом додавання механізмів уваги та регресійного шару.*

Ми донавчаємо модель AST на наборі даних ICBHI 2017 challenge, застосовуючи передавальне навчання для використання стійких представлень ознак, отриманих із великих наборів аудіоданих, таких як AudioSet. Наша методологія включає передискретизацію аудіофайлів, застосування смугових фільтрів та перетворення аудіосигналів у мел-спектрограми. Щоб вирішити проблему обмеженого розміру набору даних ICBHI, ми використовуємо методи нарощення даних, такі як SpecAugment, які вносять варіації у спектрограми для покращення узагальнюваності моделі.

Ми пропонуємо два підходи до агрегації: агрегування з механізмом уваги та згорткове агрегування – для ефективного врахування часових залежностей у дихальних звуках. Експериментальні

результати демонструють, що наша модель зі згортковим агрегуванням досягає середньої абсолютної похибки (MAE) 0,8320 та середньої відносної похибки (MRE) 12,56% на наборі даних ICBHI, перевершуючи попередню модель на 16,8% за MAE. Ці результати підкреслюють ефективність моделей на основі трансформерів в обробці складних аудіопатернів і висвітлюють потенціал моделей AST для ширшого застосування в аналізі дихальних звуків.

Наше дослідження робить внесок у галузь машинного навчання, пропонуючи ефективний метод визначення частоти дихання з використанням моделей на основі трансформерів. Подальші дослідження будуть спрямовані на вдосконалення архітектури моделі та інтеграцію додаткових фізіологічних сигналів для підвищення точності.

Ключові слова: *аудіоспектрограмний трансформер, передавальне навчання, визначення частоти дихання, апное уві сні.*

Introduction

Sleep apnea is a prevalent sleep disorder characterized by repeated interruptions in breathing during sleep. These interruptions, or apneas, can lead to various health complications, including cardiovascular disease, cognitive impairment, and daytime fatigue. Early detection and continuous monitoring of sleep apnea are crucial for effective management and treatment. One critical metric in screening for sleep apnea is the respiratory rate, as irregular breathing patterns indicate the disorder.

Traditionally, respiratory rate estimation and sleep apnea diagnosis have relied on polysomnography (PSG), a comprehensive recording of the bio-physiological signals that occur during sleep. However, PSG is expensive, labor-intensive, and requires specialized equipment, making it inaccessible for widespread screening. In contrast, using audio recordings for respiratory rate estimation offers a cost-effective and accessible alternative. Audio-based methods can leverage readily available recording devices and simplify the screening process.

Recent studies have explored various machine learning models for respiratory rate estimation using the ICBHI dataset [1]. Notably, a BiLSTM (Bidirectional Long Short-Term Memory) model [2] achieved a mean absolute error (MAE) of 1.0, demonstrating the potential of deep learning techniques in this domain. However, given the advancements in transformer-based models, we hypothesize that Audio Spectrogram Transformers (AST) [3] could outperform existing approaches due to their superior ability to capture and model temporal dependencies in audio data.

In a related study, the authors of [4] used an AST-based model to achieve state-of-the-art results on the ICBHI dataset for respiratory sound classification. Their success underscores the efficacy of AST models in capturing complex audio patterns and highlights their potential for broader applications, including respiratory rate estimation.

In this study, we investigate an adaptation of the AST model for respiratory rate estimation using audio recordings, specifically incorporating attention mechanisms and a regression layer. This paper details our methodology, the architecture of the proposed model, and the experimental setup, followed by an evaluation of the results.

Methodology and results

Audio Spectrogram Transformer

The Audio Spectrogram Transformer (AST) is a deep learning model designed for audio classification tasks. It converts raw audio waveforms into mel-filter bank features, which are refined representations capturing essential frequency components over time. These mel-filter bank features are treated as images and fed into a vision transformer (ViT) [5]. The vision transformer leverages self-attention mechanisms to model the complex temporal and frequency dependencies in the audio data, allowing it to learn hierarchical representations of the audio signals. The transformer consists of multiple layers of attention heads and feed-forward networks, enabling the model to capture intricate patterns within the spectrogram images.

This study employed a pre-trained Audio Spectrogram Transformer (AST) model [6]. The AST model achieved a mean average precision (mAP) score of 0.4593 on the AudioSet evaluation. Initially, the Vision Transformer (ViT) component of the model was pre-trained on the ImageNet dataset. Subsequently, the entire AST was fine-tuned on the AudioSet dataset, enabling it to learn robust audio and visual features from these extensive datasets.

Transfer learning was employed to adapt the pre-trained AST model for respiratory rate estimation. This involves fine-tuning the model on the ICBHI 2017 challenge dataset, enabling it to leverage the rich feature representations learned from the large-scale AudioSet and ImageNet datasets while adapting to the specific characteristics of respiratory sounds. Given the relatively small size of the ICBHI dataset, using a pre-trained model was crucial for achieving the observed performance improvements, as it allowed the model to build on the comprehensive knowledge acquired from diverse audio and visual data.

Dataset and feature extraction

The dataset utilized is the ICBHI 2017 challenge dataset, containing audio recordings annotated with start and end timestamps of respiratory cycles. The ICBHI dataset contains 6898 respiratory cycles, spanning around 5.5 hours (Table 1). It is officially divided into a training set (60%) and a test set (40%), ensuring no patient appears in both sets.

Table 1
Dataset characteristics

	Train set	Test set
Number of recordings	539	381
Number of patients	79	49
Average length, seconds	21.03	19.14
Average number of respiratory cycles	7.68	7.23

The raw audio files are resampled to 16 kHz for consistency. Band-pass filters, focusing on the 50-2500 Hz range – generally accepted [7] as the range where breathing sounds are – are applied to remove noise and enhance the quality of the recordings. Each audio file is segmented into fixed lengths of 10.24 seconds, compatible with the input requirements of the AST model.

The AST feature extractor converts raw audio into mel-filter bank features (or mel spectrograms). Mel-filter bank features transform the spectrogram (the raw frequency content of the signal over time) into a representation that mimics human auditory perception. The extractor generates 128 mel-frequency bins. It pads or truncates the features to a fixed length of 1024 frames and normalizes them using a mean of -4.27 and a standard deviation of 4.57, parameters chosen to match those from AudioSet.

Model adaptation for respiratory rate estimation

To adapt the AST model for respiratory rate estimation, the following modifications were implemented (figure 1):

1. **Pretrained Model and Fine-Tuning:** The AST model was initialized using the pre-trained checkpoint [6]. During the fine-tuning phase, we chose to freeze the first ten layers and only fine-tune the last two layers. This approach leverages the pre-trained knowledge encoded in the initial layers while adapting the final layers to the specific task of respiratory rate estimation. Freezing most layers helps retain the general audio feature extraction capabilities while allowing task-specific features to be learned in the fine-tuned layers.

2. **Pooling Approaches:** Two different pooling methods were explored to aggregate features across the time dimension: attention pooling and convolutional pooling.

• **Attention Pooling:** Attention pooling computes a weighted sum of input features, where the weights are learned during training. This approach allows the model to focus on the most relevant parts of the audio signal for respiratory rate estimation. The following formulas describe the attention mechanism:

- Compute attention scores using a simple dot product: $s = xW_a$, where x is the input feature matrix of the shape $[\text{batch}, \text{time}, \text{features}]$ and W_a are the learnable attention weights of shape $[\text{features}, 1]$.
- Apply softmax to get attention weights: $a = softmax(s)$
- Compute the weighted sum of input features: $y = \sum_i x_i a_i$, where i indexes the time dimension.

• **Convolutional Pooling:** Convolutional pooling involves passing the input features through a series of convolutional layers followed by global pooling. Specifically, the input features are first transposed to shape $[\text{batch}, \text{features}, \text{time}]$. They are then processed by two 1D convolutional layers, each with a kernel size of 5, stride of 1, padding of 2, and dilation of 1. Each convolutional layer is followed by batch normalization and ReLU activation. Dropout with a rate of 0.1 is applied after each batch normalization layer to prevent overfitting. Finally, an adaptive average pooling layer reduces the time dimension to one, producing a fixed-length feature vector for each input sample.

3. **Fully-Connected Layer:** The output of the pooling layer, whether from attention pooling or convolutional pooling, is fed into a fully-connected layer. This layer produces the final prediction of the number of breathing cycles, which can be converted to respiratory rate.

The modified architecture thus combines the AST model's powerful feature extraction capabilities with task-specific adaptations for effective respiratory rate estimation.

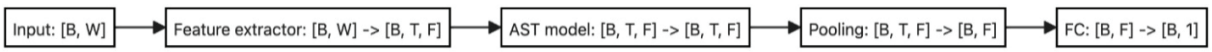


Fig. 1. Overall architecture of AST model adapted for respiratory rate estimation. In square brackets are tensor shapes: B – batch, W – waveform, T – time, F – features. FC denotes the fully connected layer

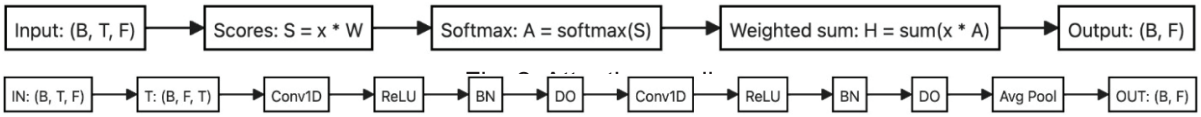


Fig. 3. Convolutional pooling. Layer abbreviations: BN – batch normalization, DO – dropout

Data Augmentation

To improve the robustness and generalizability of the AST model, data augmentation was applied using the SpecAugment technique (introduced in [8], applied to the classification problem on the ICBHI dataset in [4]). SpecAugment is particularly effective for audio data, as it introduces spectrogram variations without altering the underlying audio content. The augmentation process involved both frequency and time masking. Frequency masking was applied with a parameter $F = 48$ (maximum number of masked frequency bins; the actual length is sampled for each batch uniformly from $[0;48)$) and two frequency masks per spectrogram. Time masking was applied with a parameter T=160 (maximum number of masked audio frames) and two time masks per spectrogram. This augmentation strategy helps the model learn more invariant features by simulating the effect of missing frequencies and time segments in the input spectrograms.

Training

The training was conducted with a batch size of 64, and the model was trained for up to 100 epochs. Throughout the training process, we observed that the best performance was typically achieved between epochs 30 and 50. This observation guided the early stopping criteria, ensuring the model training was efficient and effective without overfitting.

The Mean Absolute Error (MAE) was used as the loss function, which is suitable for regression tasks like respiratory rate estimation. The MAE formula is:

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|y_i - \hat{y}_i\right|$$

where y_i and $\hat{y}_i$ are the true and predicted values, respectively.

Our Audio Spectrogram Transformer (AST) model was optimized using the AdamW optimizer [9]. This optimizer is well-suited for transformer architectures due to its ability to handle weight decay decoupled from the gradient update step. The learning rate was set to 10^{-3}, with betas $(0.9, 0.999)$, an epsilon value of 10^{-6}, and a weight decay of 0.01. To enhance the training process, a cosine learning rate scheduler with warmup was employed. This scheduler included 120 warmup steps and was applied over 2000 training steps, adjusting the learning rate dynamically at each step to improve convergence and model performance.

Results

The results are summarized in Table 2 below and include two variants of our model: one with attention pooling and another with convolutional pooling. The parity plot (figure 4) compares predicted and expected respiratory cycle counts for our best model (convolutional pooling). The result from the prior publication [2] is also included for comparison. Note that its authors used a smaller dataset with 335 samples in the training set (out of 539), and the test set consisted of 84 samples (out of 381). Our results are from a final training run performed on the entire training dataset and evaluated on the whole test set. In addition to the MAE described above, the table includes two other metrics:

- MRE (Mean Relative Error, %):

$$MRE = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\left|y_i - \hat{y}_i\right|}{y_i}$$

- R^2 (coefficient of determination)

Table 2
Results

Method	Dataset	MAE	MRE, %	R^2
Prior work – BiLSTM [2]	ICBHI (subset)	1.0	Not specified	Not specified
Our model (AST + attention pooling)	IBCHI (full)	0.9948	15.33	0.7594
Our model (AST + convolutional pooling)		**0.8320**	**12.56**	**0.8192**

Conclusions

In this study, we successfully adapted the Audio Spectrogram Transformer (AST) model for respiratory rate estimation using audio recordings. Our approach leverages the AST's robust feature extraction capabilities and introduces task-specific adaptations, such as attention pooling and convolutional pooling, to effectively capture the temporal dependencies and complex patterns in respiratory sounds.

The results indicate that our model, particularly the variant with convolutional pooling, outperforms previous approaches, achieving a Mean Absolute Error (MAE) of 0.8320 and a Mean Relative Error (MRE) of 12.56% on the ICBHI dataset. This result represents a 16.8% improvement in MAE over the previous best result. This performance highlights the efficacy of transformer-based models in handling audio data for respiratory rate estimation. Furthermore, the use of data augmentation techniques like

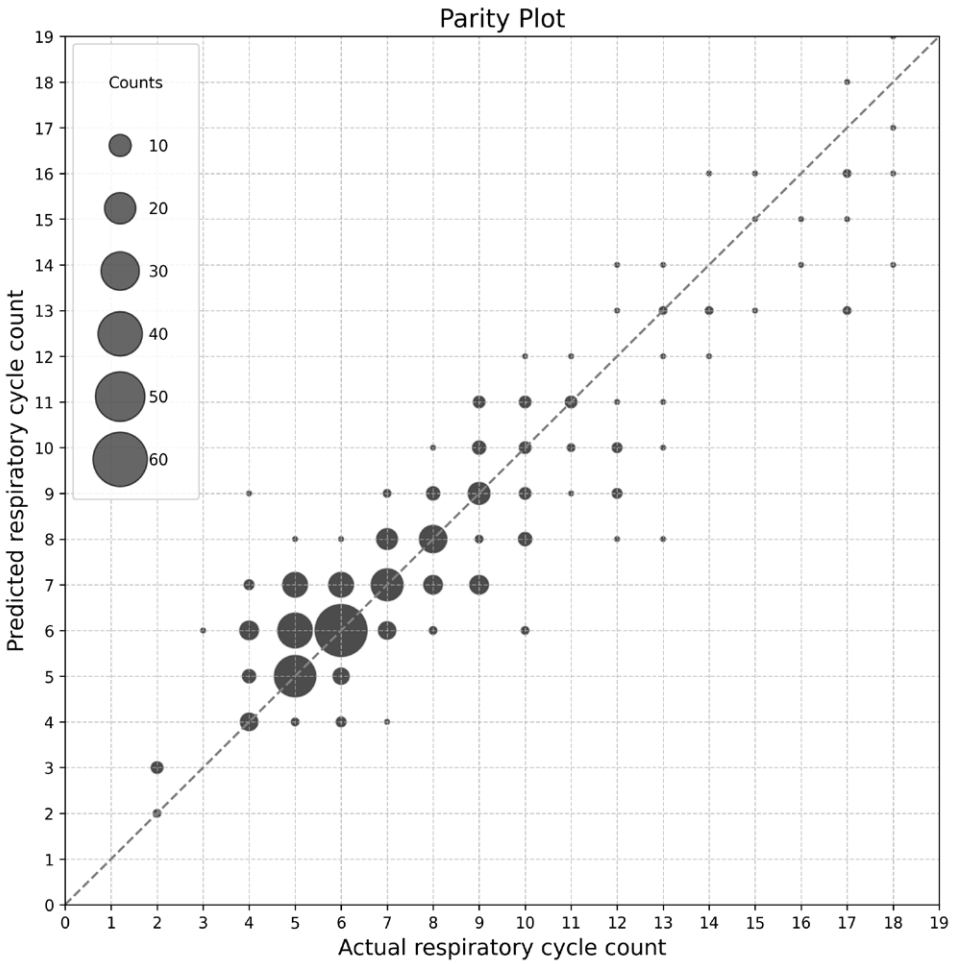


Fig. 4. Parity plot comparing actual respiratory cycle counts to those predicted by our convolutional pooling model variant. The dashed 45-degree line corresponding to perfect predictions is shown for reference

SpecAugment significantly enhances the model's robustness, ensuring reliable predictions across diverse audio samples.

Our findings underscore the potential of utilizing pre-trained AST models for health-related applications, where capturing subtle variations in audio signals is crucial. The approach presented in this paper offers a cost-effective, non-invasive alternative to traditional methods like polysomnography, making continuous monitoring and early detection of sleep apnea more accessible.

Future work could explore further refinements to the model architecture and investigate the integration of additional physiological signals to enhance the predictive accuracy.

References

1. Rocha, B. M., Filos, D., Mendes, L., Serbes, G., Ulukaya, S., Kahya, Y. P., Jakovljevic, N., Turukalo, T. L., Vogiatzis, I. M., Perantoni, E., Kaimakamis, E., Natsiavas, P., Oliveira, A., Jácome, C., Marques, A., Maglaveras, N., Pedro Paiva, R., Chouvarda, I., & de Carvalho, P. (2019). An open access database for the evaluation of respiratory sound classification algorithms. *Physiological measurement, 40(3)*. https://doi.org/10.1088/1361-6579/ab03ea

2. Harvill, J., Wani, Y., Alam, M., Ahuja, N., Hasegawa-Johnsor, M., Chestek, D., & Beiser, D. G. (2022). Estimation of Respiratory Rate from Breathing Audio. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2022, 4599–4603. https://doi.org/10.1109/EMBC48229.2022.9871897

3. Gong, Y., Chung, Y., & Glass, J.R. (2021). AST: Audio Spectrogram Transformer. *Interspeech*. https://doi.org/10.21437/interspeech.2021-698

4. Bae, S., Kim, J., Cho, W., Baek, H., Son, S., Lee, B.H., Ha, C.W., Tae, K., Kim, S., & Yun, S. (2023). Patch-Mix Contrastive Learning with Audio Spectrogram Transformer on Respiratory Sound Classification. *Interspeech*. https://doi.org/10.21437/interspeech.2023-1426

5. Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., Dehghani, M., Minderer, M., Heigold, G., Gelly, S., Uszkoreit, J., & Houlsby, N. (2020). An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11929

6. Gong, Y., Chung, Y.-A., & Glass, J. (2021). *Checkpoint of Audio Spectrogram Transformer (AST) model fine-tuned on AudioSet (0.4593 mAP)* [Model checkpoint]. Hugging Face. https://huggingface.co/MIT/ast-finetuned-audioset-10-10-0.4593

7. Reichert, S., Gass, R., Brandt, C., & Andrès, E. (2008). Analysis of respiratory sounds: state of the art. *Clinical medicine. Circulatory, respiratory and pulmonary medicine, 2*, 45–58. https://doi.org/10.4137/ccrpm.s530

8. Park, D.S., Chan, W., Zhang, Y., Chiu, C., Zoph, B., Cubuk, E.D., & Le, Q.V. (2019). SpecAugment: A Simple Data Augmentation Method for Automatic Speech Recognition. *Interspeech*. https://doi.org/10.21437/interspeech.2019-2680

9. Loshchilov, I., Hutter, F. (2017). Decoupled Weight Decay Regularization. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*. https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.05101

Література

1. An open access database for the evaluation of respiratory sound classification algorithms / B. M. Rocha et al. *Physiological measurement*. 2019. Т. 40, № 3. URL: https://doi.org/10.1088/1361-6579/ab03ea (дата звернення: 27.05.2024).

2. Estimation of respiratory rate from breathing audio / J. Harvill et al. *44th annual international conference of the IEEE engineering in medicine & biology society (EMBC)*, м. Glasgow, Scotland, United Kingdom, 11–15 лип. 2022 р. 2022. С. 4599–4603. URL: https://doi.org/10.1109/embc48229.2022.9871897 (дата звернення: 27.05.2024).

3. Gong Y., Chung Y.-A., Glass J. AST: audio spectrogram transformer. *Interspeech*. 2021. URL: https://doi.org/10.21437/interspeech.2021-698 (дата звернення: 27.05.2024).

4. Patch-Mix contrastive learning with audio spectrogram transformer on respiratory sound classification / S. Bae et al. *Interspeech*. 2023. URL: https://doi.org/10.21437/interspeech.2023-1426 (дата звернення: 27.05.2024).

5. An image is worth 16x16 words: transformers for image recognition at scale / A. Dosovitskiy et al. *International conference on learning representations (ICLR)*. 2020. URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11929 (дата звернення: 27.05.2024).

6. Gong Y., Chung Y.-A., Glass J. Checkpoint of audio spectrogram transformer (AST) model fine-tuned on audioset (0.4593 mAP). URL: https://huggingface.co/MIT/ast-finetuned-audioset-10-10-0.4593 (дата звернення: 27.05.2024).

7. Analysis of respiratory sounds: state of the art / S. Reichert et al. *Clinical medicine. Circulatory, respiratory and pulmonary medicine*. 2008. Т. 2. P. 45–58. URL: https://doi.org/10.4137/ccrpm.s530 (дата звернення: 27.05.2024).

8. SpecAugment: a simple data augmentation method for automatic speech recognition / D. S. Park et al. *Interspeech*. 2019. URL: https://doi.org/10.21437/interspeech.2019-2680 (дата звернення: 27.05.2024).

9. Loshchilov I., Hutter F. Decoupled weight decay regularization. *International conference on learning representations (ICLR)*. 2019. URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.05101 (дата звернення: 27.05.2024).

УДК 004.42, 004.8
DOI: https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-17

ПРОБЛЕМИ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ ТА ПОРІВНЯННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ПІД ЧАС НАВІГАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

***Юшко О.В.**, аспірант, Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Київ, Україна. https://orcid.org/0009-0008-7686-3503, olegushko94@gmail.com.*

***Самарай В. П.**, к.т.н., доц., Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Київ, Україна. https://orcid.org/0000-0003-4419-1366, samaraj@ukr.net*

***Анотація.** Через специфіку завдань та сфери використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у сьогоденні на навігаційну частину покладається значна роль і водночас багато обмежень. Завдання ускладнюється в умовах сильного впливу ворожих комплексів радіоелектронної боротьби. У цій роботі запропоновано використання методів порівняння та розпізнавання зображень для підвищення точності навігації. Основні вимоги для доцільного та ефективного використання БПЛА полягають у можливості використовувати його на будь-якій висоті та в будь-який час доби. Такі вимоги призводять до виникнення певних ускладнень підготовки як еталонів зображень, так і їх порівняння з отриманими зображеннями з дрону. У роботі розглянуто основні проблеми, з якими доводиться стикатись у використанні методів розпізнавання чи порівняння зображень для підвищення точності навігації безпілотних літальних апаратів.*

У статті проаналізовано різні варіанти джерел отримання еталонних зображень та як результат запропоновано використання супутникових знімків земної поверхні. Такий підхід дає низку переваг, адже супутникові знімки охоплюють чи не всю територію планети, а якщо говорити про комерційні платформи, які надають такі знімки (EOSDA LandViewer, NASA EarthData, OnGEO, PlanetLab), то постійне оновлення та висока роздільна здатність зображень забезпечують якісні та актуальні еталонні знімки.

Вибравши супутникові знімки як джерело еталонних зображень, надалі виникають такі питання: різність висот, перспектив, масштабів та переведення в інфрачервоний спектр. У роботі проводиться огляд алгоритмів перетворення та їх порівняльний аналіз. У підсумку бачимо, що варто виконати більше число випробувань за різних умов для подальшої оцінки можливості використання цього методу покращення точності навігації БПЛА.

***Ключові слова:** БПЛА, дрон, навігація, розпізнавання зображень, інфрачервоний.*

PROBLEMS OF APPLICATION OF IMAGE RECOGNITION AND COMPARISON METHODS IN UAV NAVIGATION

***Oleh Yushko**, Ph.D. student, Open International University of Human Development "Ukraine", Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0009-0008-7686-3503, olegushko94@gmail.com.*

***Valery Samarai**, Ph.D., Ass. Prof., Open International University of Human Development "Ukraine", Kyiv, Ukraine. https://orcid.org/0000-0003-4419-1366, samaraj@ukr.net*

***Abstract.** Due to the specificity of the tasks and areas of use of UAVs today, the navigation part has a significant role and at the same time many limitations. The task is complicated in conditions of strong influence of enemy radio-electronic warfare systems. Therefore, this paper proposes the use of image comparison and recognition methods to increase the accuracy of navigation, which is the key to completing the task. The main requirements for the appropriate and effective use of a UAV are the ability to use it at any height and at any time of the day. Such requirements lead to the emergence of certain complications for the preparation of both image standards and their comparison with images obtained from a drone. The paper examines the main problems that have to be faced when using methods of recognition or image comparison to increase the accuracy of navigation of unmanned aerial vehicles.*

The article analyzes various options for obtaining reference images and, as a result, proposes the use of satellite images of the Earth's surface. This approach offers a number of advantages, because satellite images cover almost the entire territory of the planet, and if we talk about commercial platforms that provide such images (EOSDA LandViewer, NASA EarthData, OnGEO, PlanetLab), then the constant updating and high resolution of the images provide high-quality and current reference images.

Having chosen satellite images as a source of reference images, the following questions arise in the future: differences in heights, perspectives, scales and conversion to the infrared spectrum.

The paper provides an overview of transformation algorithms and their comparative analysis. As a result, we can see that it is worth conducting a larger number of tests under different conditions, in order to further evaluate the possibility of using this method to improve the accuracy of UAV navigation.

Key words: *UAV, drone, navigation, image recognition, infrared.*

Вступ

Сучасні важкі воєнні умови диктують свої правила у всіх сферах життя, і наука не є виключенням, адже саме наукові дослідження є основою для вдосконалення та створення новітніх систем озброєння та захисту. Тому основним завданням вітчизняної науки у воєнний час мають бути дослідження, результати яких так чи інакше будуть пришвидшувати перемогу.

Важливість використання безпілотних літальних апаратів важко недооцінювати, з кожного джерела інформації щодня лине інформація про БПЛА. Але разом з розвитком безпілотників відбувається і розвиток ворожих засобів протидії. Одним з таких засобів протидії є радіоелектронна боротьба, яка, на жаль, у нашого ворога дуже розвинена і вважається чи не найкращою у світі. Зважаючи на цей чинник, постає актуальна тема вдосконалення наявних систем навігації з метою захисту їх від впливу ворожого РЕБ.

Основними підходами для навігації БПЛА та ракет є:

1. GPS-навігація.
2. Інерційна система навігації.

Ці підходи мають певні переваги та недоліки. Якщо говорити про GPS, то це надточна та компактна система, проте може бути вразлива до перешкод від РЕБ. Інерційна навігація своєю чергою не підвладна дії радіоелектронних перешкод, проте дуже громіздка та дорога в реалізації, і, крім того, може накопичувати значну похибку на своїй траєкторії.

Необхідність розробки компактної, точної, економічно вигідної та завадостійкої навігаційної системи залишається важливим та актуальним завданням, що підтверджується великою кількістю досліджень, таких як [1; 2]. Автор вважає, що створення ефективного прототипу можливе шляхом інтеграції найкращих аспектів наявних рішень та усунення їхніх недоліків. Перспективним підходом може бути гібридна система, яка поєднує GPS та інерційне наведення з додатковим механізмом верифікації, таким як фотознімки. У програмуванні маршруту оператор або програма створення польотного маршруту заповнює візуальні орієнтири або інші дані для точнішого визначення позиції, що дозволяє компенсувати похибки інерційної системи, особливо якщо сигнал GPS втрачено або підмінено. Ці фото задаються з певним інтервалом на всьому шляху, що забезпечує можливість коригування на будь-якій ділянці траєкторії та не дозволяє значного відхилення від запланованого маршруту.

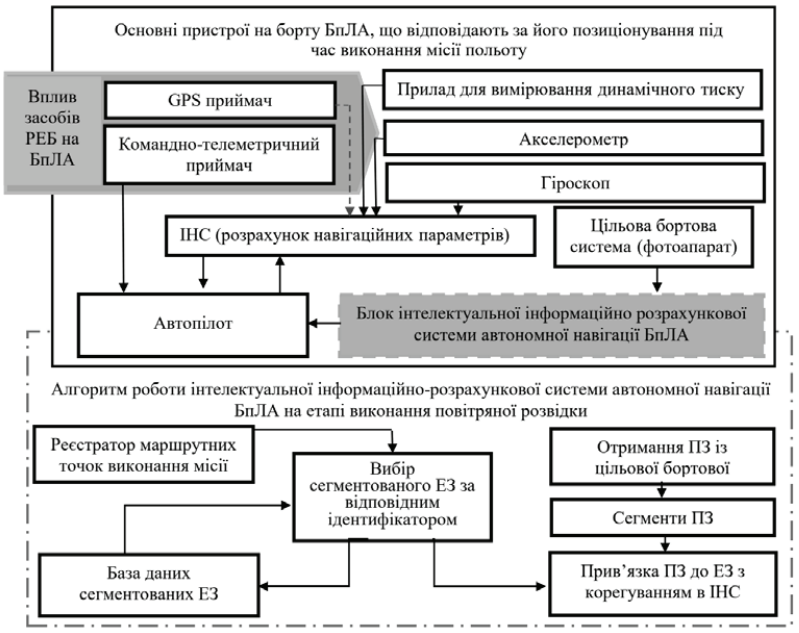


Рис. 1. Пропонована блок-схема роботи навігаційної системи БПЛА

На рисунку 1 зображена запропонована схема роботи комбінованого алгоритму навігації. Якщо коротко, то суть роботи цього методу можна описати таким чином. Оператор програмує польотне

завдання з використанням певного програмного забезпечення, де задаються точка запуску та цільова точка, а також визначаються певні проміжні орієнтири на протяжності всього маршруту, а також візуальні дані самої цілі для донаведення на фінальному етапі. Вся ця інформація завантажується в БПЛА, і він стає готовим для запуску. Відбувається запуск з визначеної точки, дрон летить та порівнює координати GPS із візуальними орієнтирами, якщо відзначається невідповідність, дрон переходить на інерційну систему до тих пір, поки координати не будуть відповідати реальним. Відповідно, за виконання цих обрахунків коригування польоту відповідає блок інтелектуальної інформаційно-розрахункової системи автономної навігації БПЛА.

Постає питання, де брати ці еталонні зображення, адже якщо говорити про військову специфіку, то отримати знімки території ворога з розвіддрона на велику глибину території неможливо. Як варіант рішення для дослідження пропоную використовувати супутникові знімки земної поверхні. Такі знімки можна отримати на різних сервісах. Наявні безкоштовні та платні варіанти, всі вони відрізняються різним рівнем деталізації знімків, форматом зображень, масштабом тощо. Для подальшого етапу дослідження можна вибрати супутникові знімки Google Maps. Таким чином, ми підійшли до теми використання методів розпізнавання зображень для покращення навігації БПЛА. А саме порівняння еталонних супутникових знімків з фотографіями, отриманими з камери дрона.

Дослідження

У зв'язку з великими відмінностями у перспективі спостереження із супутника та дрона та відстані між об'єктом та самим пристроєм зйомки візуальні характеристики однієї й тієї ж цілі можуть доволі сильно різнитись. Це створює значні труднощі для кореляції між такими зображеннями. На цю тему є багато досліджень з різними результатами та підсумками. Хочу відзначити доволі змістовне дослідження [4], в якому проаналізовано значну кількість наявних досліджень, у тому числі і роботу [3], яка містить відкритий набір даних різних знімків із супутника та БПЛА. Що цікаво, знімки дрона відбуваються під кутом (рисунок 2), що ускладнює завдання, тим не менше, як показується у статті [3], результати навчання дають доволі високі показники точності.

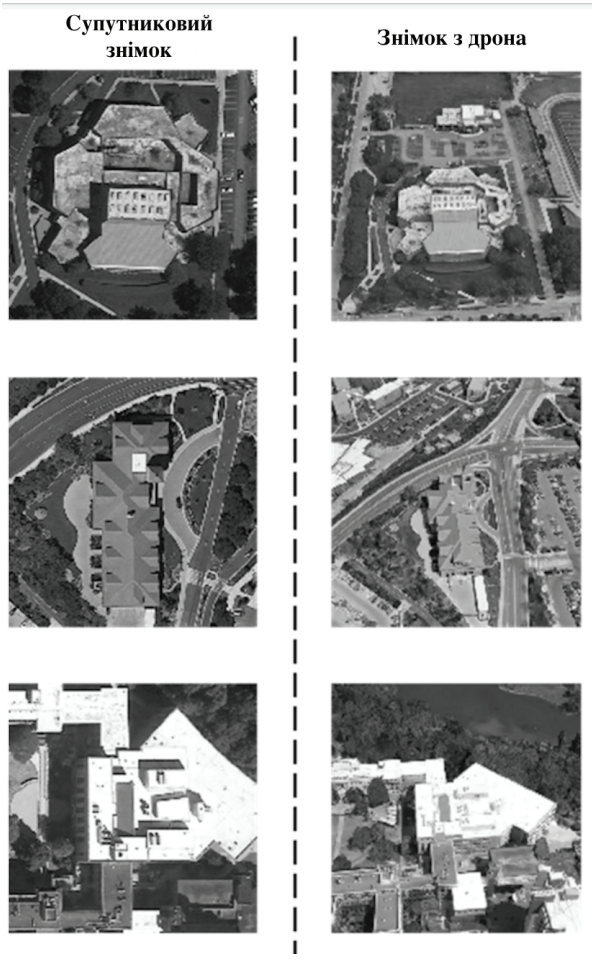


Рис. 2. Приклади зображень із супутника та БПЛА

Всі знайдені та проаналізовані дослідження на тему використання зображень, отриманих з безпілотника, для навігації використовують кольорові (RGB) зображення як із супутника, так і із самого дрона. Проте якщо говорити про військову сферу застосування, то доволі часто ударні БПЛА більш ефективні в темну пору доби, тому варто працювати в інфрачервоному діапазоні (IR). Отже, варто провести дослідження можливості використання фотоматеріалів у інфрачервоному спектрі, а саме: провести навчання нейромережі з використанням фото в інфрачервоному діапазоні та надати оцінку одержаним результатам.

Пошук відкритих можливих джерел супутникових знімків, виконаних в інфрачервоному діапазоні, результатів не дав. Адже такі знімки або поширюються на комерційній основі, або взагалі мають обмежений доступ. А для проведення дослідження виникла ідея застосувати алгоритм перетворення кольорового зображення в інфрачервоний діапазон, що дозволить використовувати будь-які супутникові знімки, а їх база у відкритому доступі величезна. Але варто зауважити, що перетворити RGB зображення у IR фізично неможливо, адже принцип роботи фотоелементів зовсім інший. Але якщо говорити про короткий інфрачервоний спектр, то він подібний до R каналу класичної RGB камери, що вселяє надію на отримання конвертованого зображення доволі високого рівня схожості зі справжнім IR. Проте якщо використовувати Pix2Pix та CycleGAN перетворення, що представлені в роботі [5] та дослідженні [6], то результати мають доволі високий рівень схожості з реальним IR зображенням. Як бачимо на рисунку 3, кожен підхід містить певні вади, проте це можна списати на лімітований датасет, на якому навчалися нейромережі.

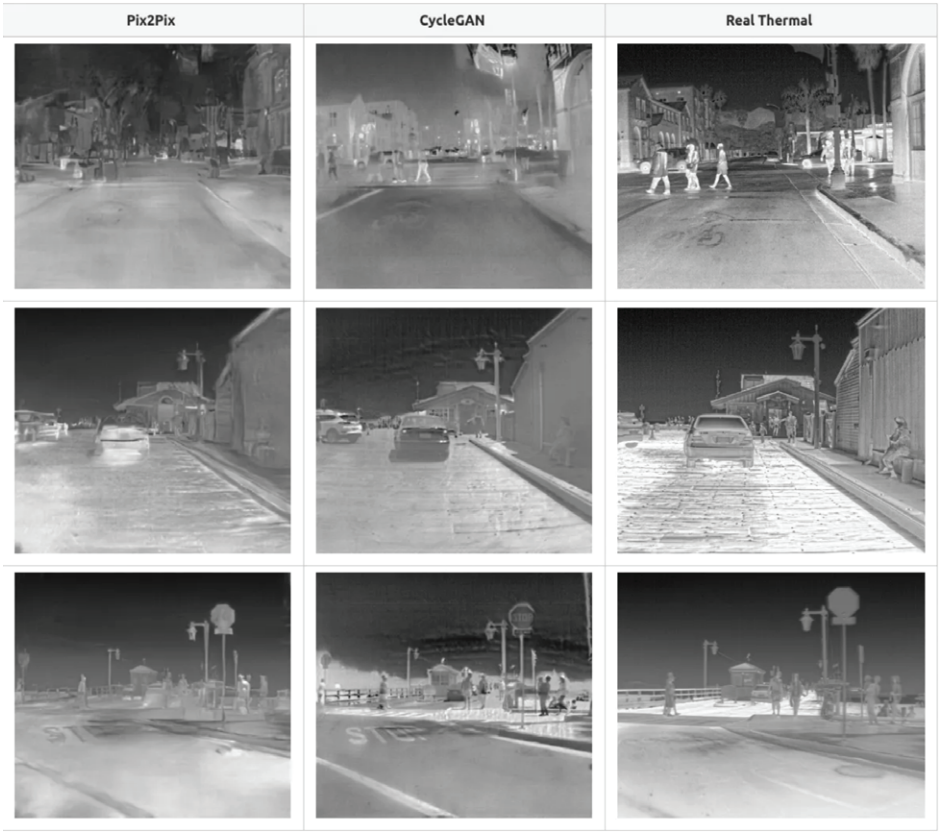


Рис. 3. Порівняння перетворених (Pix2Pix та CycleGAN) та реальних інфрачервоних зображень

Розглядаючи отримані підсумки роботи [7], а саме алгоритм VQ-InfraTrans, де вже значно покращено процес конвертації RGB в IR, можна помітити зменшення кількості випадкових артефактів у результаті перетворення, що свідчить про кращу структуру та навчаність мережі, а отже, і більший рівень точності, а саме 85–90%, про що і заявляють автори. Отже, надалі продовжуємо дослідження з використанням цього підходу.

Використаємо VQ-InfraTrans [10] для переведення набору даних University-1652 [3]. Виконавши таке перетворення супутникових зображень та зображень з дрона, які представлені в наборі, ми отримали зображення, схожі на інфрачервоний спектр. Далі, використовуючи підхід статті [3], виконаємо навчання мережі, але не на оригінальному наборі даних, а на отриманому після застосування перетворення в IR. Після успішного навчання отримуємо результати, які схожі на дослідження [3],

а саме рівень точності визначення відповідає рівню 50–60%. Отже, можна зробити припущення, що конвертування RGB зображень на IR не змінило точність порівняння знімків.

Висновок

Дослідження показали, що рівень відповідності між перетвореними зображеннями та реальними інфрачервоними знімками досягає 85–90%, що дозволяє надійно використовувати ці алгоритми для орієнтації БПЛА в темну пору доби.

Результати навчання моделі порівняння та розпізнавання зображень показали доволі високу точність до 60% візуальної відповідності, що свідчить про те, що перехід на інфрачервоний діапазон не вплинув на точність і відповідає результатам RGB.

Література

1. Erick Menezes Moreira, Otavio Augusto Maciel Camargo, Julio Cesar Duarte, Paulo Fernando F. Rosa. Scene matching in GPS denied environments: a comparison of methods for orthophoto registration, 2019.

2. Bhakti Chindhe, Archana Ramalingam, Shravani Chavan, Shreya Hardas, Dipti Durgesh Patil. Advances in Vision-Based UAV Manoeuvring Techniques, 2023.

3. Zheng Z., Wei Y. and Yang Y. "University-1652: A multi-view multi-source benchmark for drone-based geo-localization", Proc. 28th ACM Int. Conf. Multimedia, 2020. Pp. 1395–1403.

4. Zhuang, J., Chen, X., Dai, M., Lan, W., Cai, Y., Zheng, E. A Semantic Guidance and Transformer-Based Matching Method for UAVs and Satellite Images for UAV Geo-Localization. *IEEE Access*, 2022, 10, 34277–34287.

5. Hannes Liik. Thermal Image Generation from RGB. Medium, 2019.

6. El Mahdi B.M., Abdelkrim N., Abdenour A., et al. A novel multispectral maritime target classification based on ThermalGAN (RGB-to-thermal image translation). *J Exp Theor Artif Intell*, 2023.

7. Sun Q., Wang X., Yan C., Zhang X. VQ-InfraTrans: A Unified Framework for RGB-IR Translation with Hybrid Transformer. Remote Sensing. 2023.

References

1. Erick Menezes Moreira, Otavio Augusto Maciel Camargo, Julio Cesar Duarte, Paulo Fernando F. Rosa. (2019). Scene matching in GPS denied environments: a comparison of methods for orthophoto registration.

2. Bhakti Chindhe, Archana Ramalingam, Shravani Chavan, Shreya Hardas, Dipti Durgesh Patil. (2023). Advances in Vision-Based UAV Manoeuvring Techniques.

3. Zheng, Z., Wei, Y. and Yang, Y. (2020). "University-1652: A multi-view multi-source benchmark for drone-based geo-localization", Proc. 28th ACM Int. Conf. Multimedia, pp. 1395–1403.

4. Zhuang, J., Chen, X., Dai, M., Lan, W., Cai, Y., Zheng, E. (2022). A Semantic Guidance and Transformer-Based Matching Method for UAVs and Satellite Images for UAV Geo-Localization. *IEEE Access*, 10, 34277–34287.

5. Hannes, Liik. Thermal Image Generation from RGB. (2019). Medium.

6. El Mahdi, B.M., Abdelkrim, N., Abdenour, A., et al. (2023). A novel multispectral maritime target classification based on ThermalGAN (RGB-to-thermal image translation). *J Exp Theor Artif Intell*.

7. Sun, Q., Wang, X., Yan, C., Zhang, X. (2023). VQ-InfraTrans: A Unified Framework for RGB-IR Translation with Hybrid Transformer.

НОТАТКИ

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ІНФОКОМУНІКАЦІЙНІ ТА КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

INFOCOMMUNICATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

№ 1 (07) 2024

Підписано до друку: 02.07.2024.
Формат 60x84/8. Arial.
Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 14,18. Замов. № 1124/743. Наклад 300 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 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.