

СВІТЛІЙ ПАМ'ЯТІ ВИДАТНОМУ НАУКОВЦЮ ВІД УЧНІВ, ДРУЗІВ І КОЛЕГ ПО РОБОТІ



25 січня 2021 року після тривалої хвороби пішов з життя видатний вчений, винахідник, інженер, директор Інституту золотого перетину, доктор технічних наук, академік Академії інженерних наук України, професор **Олексій Петрович Стахов**.

Олексій Петрович народився 7-го травня 1939 року на станції Партизани Херсонської області. У 1961 році він закінчив Харківський авіаційний інститут.

У 1966 році захистив дисертацію на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності «Технічна кібернетика» на тему «Дослідження перетворювачів зі зворотним зв'язком, що використовують як порівняльні пристрої регенеративні компаратори».

У 1973 році захистив дисертацію на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності «Обчислювальна техніка» на тему «Синтез оптимальних алгоритмів аналого-цифрового перетворення

інформації».

Після закінчення аспірантури в 1966 році і захисту кандидатської дисертації під керівництвом професора Волкова А. А. працював до 1971 року в Харківському інституті радіоелектроніки доцентом, завідувачем кафедри і деканом факультету. З 1971 року завідував кафедрою інформаційно-вимірювальної техніки Таганрозького радіотехнічного інституту. В цей час ним було захищено докторську дисертацію. З 1977 р. по 1988 р. був завідувачем кафедри обчислювальної техніки Вінницького політехнічного інституту (нині – Вінницький національний технічний університет), паралельно в період 1986–1989 рр. він був директором Спеціального конструкторсько-технологічного бюро «Модуль» при Вінницькому політехнічному університеті.

Професор Стахов став першим деканом факультету обчислювальної техніки (1985–1987 рр.). З 1989 р. по 1995 р. завідувач кафедри прикладної математики та обчислювальних систем Вінницького технічного університету. Олексій Петрович працював професором кафедри математики Вінницького педагогічного університету, завідувачем кафедри інформатики Вінницького державного аграрного університету. На початку 2004 року Олексій Петрович переїжджає до Канади. В цей час він стає директором Інституту Золотого Перетину, працює науковим консультантом Канадської комп'ютерної фірми «Esinex», яка займається розробкою програмних продуктів в тому числі і на основі «фібоначчєвої» теорії кодування.

За своє наукове життя Олексій Петрович підготував біля 30 кандидатів наук. 4 учні професора Стахова захистили докторські дисертації: О. Д. Азаров, В. А. Лужецький (Вінницький національний технічний університет), Н. В. Аліпов (Харківський інститут радіоелектроніки), Ю. М. Вишняков (Таганрозький радіотехнічний інститут).

Олексій Петрович Стахов є автором і співавтором понад 500 публікацій, 14 монографій та 65 міжнародних патентів, 130 свідоцтв на винахід.

За час своєї викладацької і наукової діяльності:

- створив алгоритмічну теорію вимірювання;
- створив новий напрямок у розвитку обчислювальної техніки, а саме нові системи числення, засновані на числах Фібоначчі та золотій пропорції, висунув проект «Комп'ютери Фібоначчі». Світовий пріоритет в цьому напрямку захищений 65 зарубіжними патентами США, Японії, Англії, Німеччини, Франції, Канади та інших країн;
- узагальнив «Задачу про Золотий Перетин», відкрив новий клас ірраціональних чисел – Золоті p -Перетини;
- розробив теорію матриць Фібоначчі і «золотих» матриць та створив на їх основі нову теорію кодування в криптографії;
- запропонував клас гіперболічних функцій Фібоначчі і Люка (спільно з І. Ткаченко та Б. Розіним), і зв'язав їх з геометрією Лобачевського, Мінковського і теорією відносності Ейнштейна;
- узагальнив Принцип Золотого Перетину, який включає «Принцип дихотомії» і класичний «Принцип Золотого Перетину»;
- зробив внесок у теорію «формул Біне», теорію «золотих» алгебраїчних рівнянь і відкрив новий клас числових послідовностей – узагальнені числа Люка (спільно з Б. Розіним);
- запропонував Теорію Гармонії як нового міждисциплінарного напрямку, що поєднує основи математики, теоретичної фізики та комп'ютерної науки.

У 2003 році Олексій Петрович Стахов опублікував біографічну книгу «Під знаком Золотого Перетину: сповідь сина студбатівця». Про наукову біографію Олексія Петровича досить докладно описано в

статті його друга зі студентських років Юрія Івановича Цимбаліста «Подвижник в науці: про професора Олексія Стахова».

Олексій Петрович Стахов вписав своє ім'я в пантеон вчених, для яких гармонія Природи була не просто красивим словом, а відображалася у вигляді законів і формул.

З відходом з життя Олексія Петровича Стахова наука зазнала великої втрати. Але ще більшу втрату понесли його рідні, вчені та друзі.

Ми щиро співчуваємо рідним і близьким Олексія Петровича.

Царство йому Небесне і пам'ять людська.

Головний редактор
заступник головного редактора

Азаров О. Д.,
Лужецький В. А.

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.9+616.24

М. В. Барабан, С. В. Барабан, В. В. Гармаш

РОЗРОБКА ПРОГРЕСИВНОГО ВЕБ-ДОДАТКУ ЗІ
ЗГОРТКОВОЮ НЕЙРОННОЮ МЕРЕЖЕЮ ДЛЯ
РОЗПІЗНАВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. В даній роботі проаналізовано технології створення веб-додатків, внаслідок чого обрано Progressive Web App як найбільш відповідну для розв'язання поставлених задач. Досліджено особливості використання інтелектуальних технологій для проблеми розпізнавання зображень. Акцент зроблено на методах, які використовують бібліотеку для нейронних мереж TensorFlow. Створено власну модель згорткової нейронної мережі для розпізнавання зображень. Для навчання моделі було обрано набір даних «The Quick, Draw! Dataset» від корпорації Google. Визначено, що прогресивний веб-додаток надає можливість швидше за аналоги надавати результуючу вибірку користувачеві. Проілюстровано результат порівняння швидкодії розробленого та додатків-аналогів.

Ключові слова: Progressive Web App, веб-додаток, згорткова нейронна мережа, розпізнавання зображень.

Аннотация. В данной работе проанализированы технологии создания веб-приложений, в результате чего избран Progressive Web App как наиболее подходящая для решения поставленных задач. Исследовано особенности использования интеллектуальных технологий для проблемы распознавания изображений. Акцент сделан на методах, которые используют библиотеку для нейронных сетей TensorFlow. Создана собственная модель сверточной нейронной сети для распознавания изображений. Для обучения модели был выбран набор данных «The Quick, Draw! Dataset» от корпорации Google. Определено, что прогрессивной веб-приложение предоставляет возможность быстрее аналогов предоставлять результирующую выборку пользователю. Проиллюстрировано результат сравнения скорости разработанного и приложений-аналогов.

Ключевые слова: Progressive Web App, веб-приложение, сверточная нейронная сеть, распознавание изображений.

Abstract. In this paper the technologies for creating web applications are analyzed, in result Progressive Web App as the most suitable for solving the tasks is selected. The peculiarities of the use of intelligent technologies for the problem of image recognition are investigated. Emphasis is placed on methods that use the TensorFlow neural network library. The own model of convolutional neural network for image recognition has been created. The dataset «The Quick, Draw! Dataset» from Google is selected for model training. It has been determined that a progressive web application provides the ability to provide the resulting sample to the user faster than analogues. The result of comparing the speed of the developed and analog applications is illustrated.

Key words: Progressive Web App, web application, convolutional neural network, image recognition.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-50-1-7-14>.

Вступ

Технологічні інновації завжди впливають на розробку продуктів і послуг. В останні десятиліття спостерігається безпрецедентне зростання в області Web. Завдяки впровадженню нових і вдосконаленню існуючих технологій у світі Інтернету, те, що раніше не було можливим, почало існувати. Використання технологій можна знайти в усіх областях, від освіти до охорони здоров'я, досліджень і сільського господарства. Більшість компаній вже прийняли Інтернет як свою бізнес-платформу, і тенденція зростає. Таким чином, існує потреба в розробці швидких, привабливих і надійних додатків.

Native і Web – два основних типи додатків. Native додатки платформно залежні (Android, IOS, Windows), вони побудовані за допомогою спеціальних мов програмування та комплектів розробки програмного забезпечення, тоді як Web додатки є незалежними від платформи веб-сайтами, які багато в чому виглядають і відчуються як Native додатки [1]. Web додатки запускаються браузером і зазвичай написані на HTML5.

Протягом останніх кількох років використання нативних мобільних додатків показало зростання у порівнянні з мобільними веб-додатками [1]. Веб-додатки програють нативним додаткам з точки зору продуктивності, надійності та взаємодії. Підприємства та розробники часто бачать необхідність розробки власних мобільних додатків для подолання обмежень, які веб-сайт накладає на мобільні пристрої. Однак у нативних додатків є свої недоліки. Коли йдеться про доступність для користувача, нативні додатки програють веб-додаткам [2]. Нативні додатки витрачають більше ресурсів і часу для розробки та підтримки. Крім того, публікація нативного додатку – це досить складний процес. Також для використання нативного додатку користувачам необхідно пройти багато кроків, які включають в себе реєстрацію у відповідному магазині, перевірку пам'яті, завантаження, встановлення та, нарешті, відкриття для його використання. Дослідження показало, що в середньому додаток втрачає близько 20% своїх користувачів на кожному кроці між першим контактом користувача і початком його використання [3]. Багато користувачів також вважають цей процес складним і затратним. Це величезний недолік як для компаній, так і для розробників.

Веб і нативні платформи мають свої власні недоліки, тому існувала потреба в платформі, яка може поєднувати можливості та досвід нативних додатків з доступністю вебу. Progressive Web App об'єднує в собі все найкраще з світу веб та світу нативних додатків. Вони корисні для користувачів з першого

відкриття сторінки в браузері, не потребують інсталяції. По мірі того як користувач крок за кроком буде відносини з додатком, він стає все більш та більш корисним. Progressive Web App швидко завантажується, навіть у нестабільних мережах, відправляє пуш-повідомлення, має кнопку на домашньому екрані і дарує повноцінний повноекранний досвід [4].

Популярність Progressive Web App швидко зростає не лише серед користувачів а й серед дослідників. Progressive Web App дає можливість швидко розгорнути, перевірити та протестувати різноманітні моделі нейронних мереж. Сьогодні однією з провідних тем досліджень є розпізнавання зображень за допомогою нейронних мереж, що підтверджують наукові праці таких авторів як Р. Haffner, Y. Bengio, R. Fergus, J. Johnson [5]. Частиною даної теми є розпізнавання зображень. Зображення простіше всього створити за допомогою смартфона чи планшета. Тому, актуальною є задача створення прогресивного веб-додатку, адже дана технологія є зручною та працює на усіх можливих платформах: у веб-браузері, на IOS та Android [6].

Актуальність

Полягає в тому, що отримав подальший розвиток нейромережевий метод розпізнавання зображень шляхом використання згорткових нейронних мереж для аналізу зображень, що підвищило швидкодію та точність розпізнавання.

Практичне значення результатів роботи полягає в розробці алгоритмічних та програмних засобів, які реалізують веб-додаток для розпізнавання зображень, що може працювати на усіх доступних платформах: у веб-браузері, на IOS та Android.

Методи дослідження ґрунтуються на теорії обчислювального інтелекту, а саме, на методах теорії штучних нейронних мереж, які дозволили синтезувати нейромережеві моделі для подальшого використання у веб-додатку через бібліотеку tensorflow; методи теорії розпізнавання образів, на основі яких були синтезовані моделі аналізованих об'єктів, що використовуються для розпізнавання зображень; експериментальне дослідження для перевірки достовірності отриманих результатів.

Мета

Метою статті є підвищення швидкодії та точності розпізнавання зображень на основі загорткової нейронної мережі за рахунок застосування технології Progressive Web App.

Задачі

1. Проаналізувати особливості прогресивних веб додатків.
2. Дослідити особливості використання прогресивних технологій для проблеми розпізнавання зображень.
3. Розробити програмні засоби у вигляді прогресивного веб-додатку та оцінити ефективність роботи запропонованої технології.

Розв'язання задач

Основним призначенням програми є дослідження можливості розпізнавання зображень автономно за рахунок застосування технології Progressive Web App.

В програмі реалізовані наступні функції:

- 1) Можливість створення зображення в додатку.
- 2) Розпізнавання створеного зображення.
- 3) Розпізнавання зображення автономно.
- 4) Відображення результатів. Виведення можливих результатів у вигляді таблиці співпадінь.

Базовим будівельним блоком нейронної мережі є шар. Шари витягають образи з даних, які в них подаються, як зображено на рис. 1.

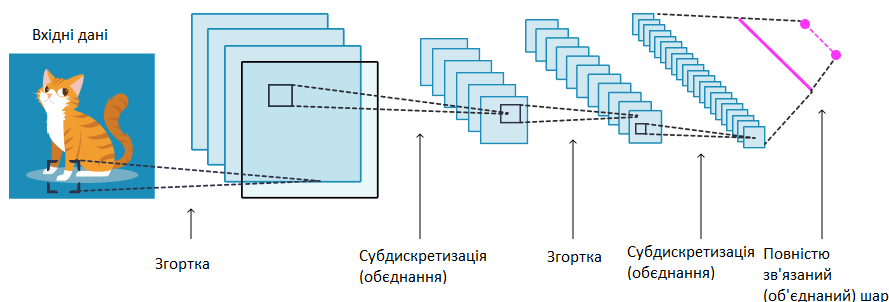


Рисунок 1 – Створення шарів нейронної мережі

Розроблено модель нейронної мережі для розпізнавання зображення. Згорткова нейронна мережа має три важливі будівельні блоки:

- згорнутий шар, який витягує ознаки із зображення або його частин;
- рівень субдискретизації (об'єднання), який зменшує розмірність кожної функції, щоб зосередитись на найважливіших елементах (зазвичай існує кілька кроків згортки та об'єднання);
- повністю зв'язаний шар, який приймає вирівняну форму ознак, визначених у попередніх шарах, і використовує їх для прогнозування зображення.

Велика частина глибокого навчання складається із з'єднання в послідовність простих шарів. Більшість шарів, таких як `tf.layers.conv2d`, мають параметри, які налаштовуються під час навчання. Наприклад, шар `tf.layers.conv2d` створює ядро згортки, яке перехресно корелюється із вхідним шаром для отримання тензора вихідних даних.

Шар згортки витягує елементи з вихідного зображення, «скануючи» зображення за допомогою фільтра, наприклад, 5×5 пікселів. Для кожної області 5×5 пікселів у зображенні операція згортки обчислює точкові добутки між значеннями пікселів зображення та вагами, визначеними у фільтрі, як показано на рис. 2.

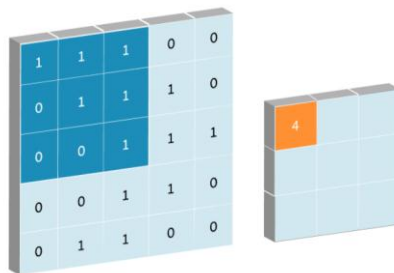


Рисунок 2 – Шар згортки (`conv2d`)

Двовимірний рівень згортки означає, що вхідні дані операції згортки є тривимірними. «2D» у «2D-згортці» відноситься до руху фільтра, який проходить зображення у двох вимірах. Наприклад, кольорове зображення, яке має значення для кожного пікселя у трьох шарах: червоному, синьому та зеленому. Потім фільтр запускається по зображенню тричі, по одному для кожного шару.

`tf.layers.dense` реалізує операцію: $output = activation(dot(input, kernel) + bias)$ де `activation` – це елементна функція активації, передана як аргумент активації, `kernel` – це матриця ваг, створена шаром, а `bias` – вектор зміщення, створений за шаром (застосовується лише якщо `use_bias` має значення `True`).

`tf.layers.dropout` полягає у випадковому встановленні частоти частки вхідних одиниць до 0 під час кожного оновлення під час навчання, що допомагає запобігти перенапруженню. Одиниці, що зберігаються, масштабуються на $1 / (1 - ставка)$, так що їхня сума не змінюється під час навчання та часу висновку.

Метою об'єднання шарів у згорткових нейронних мережах зменшення розмірності вхідного зображення. Об'єднання шарів робить виявлення функцій незалежним від шуму та незначних змін, таких як обертання або нахил зображення.

Об'єднання базується на концепції «розсувного вікна». Він застосовує статистичну функцію до значень у межах певного розміру вікна, відомого як фільтр згортки або ядро.

Шар `max_pooling` (об'єднання) приймає максимальне значення у фільтрі згортки. На рис. 3 показано `max_pooling` в дії.



Рисунок 3 – Шар `max_pooling`

На наведеній вище схемі кольорові рамки представляють функцію максимального об'єднання з розсунувим вікном (розмір фільтра) 2×2 . Просте максимальне значення береться з кожного вікна на вихідну карту ознак. Іншими словами, максимальне значення в синьому полі – 3. Це значення буде представляти чотири вузли в синьому полі. Те саме стосується зеленого та червоного поля.

Об'єднання невеликих зображень із невеликою кількістю ознак може допомогти запобігти перенавчанню. На великих зображеннях об'єднання може допомогти уникнути величезної кількості вимірів. Складність оптимізації зростає в геометричній прогресії із зростанням розмірності. Таким чином вийде надзвичайно повільна конвергенція, яка може спричинити перенавчання. Не має значення, чи відображається значення 4 у комірці 4×2 або комірці 3×1 , ми все одно отримуємо те саме максимальне значення з цієї комірки після операції максимального об'єднання, як зображено на рис. 4. Саме цей процес надає згортковій нейронній мережі можливість «просторової варіативності».

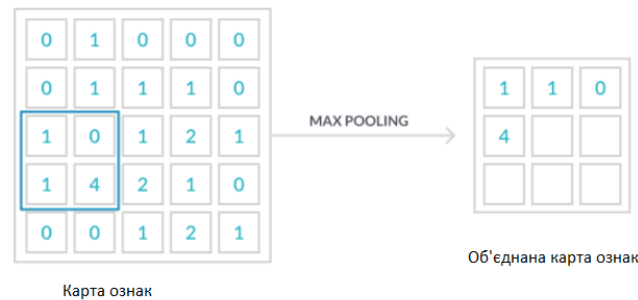


Рисунок 4 – Просторова варіативність згорткових нейронних мереж

Перш ніж модель буде готова для навчання, потрібно вказати ще кілька параметрів: функцію втрат, оптимізатор та метрики. Вони додаються на етапі компіляції моделі.

Функція втрат (Loss function) – вимірює точність моделі під час навчання. Необхідно мінімізувати цю функцію щоб «направити» модель в правильному напрямку.

Оптимізатор (Optimizer) – показує яким чином оновлюється модель на основі вхідних даних і функції втрат.

Метрики (Metrics) – використовуються для моніторингу тренування і тестування моделі.

Навчання моделі нейронної мережі вимагає виконання наступних кроків:

1. Потрібно подати тренувальні дані в модель.
2. Модель вчиться асоціювати зображення з правильними класами.
3. Модель робить прогнози для перевірочних даних.

Для початку навчання, потрібно викликати метод `model.fit`, який називається так, оскільки «тренує (fits)» модель на тренувальних даних. В процесі навчання моделі відображаються метрики втрати (loss) і точності (accuracy), як зображено на рис. 5. Ця модель досягає на тренувальних даних точності приблизно 0.88 (88%).

```
Epoch 1/10
1875/1875 [=====] - 2s 1ms/step - loss: 0.4996 - accuracy: 0.8239
Epoch 2/10
1875/1875 [=====] - 2s 1ms/step - loss: 0.3764 - accuracy: 0.8646
Epoch 3/10
1875/1875 [=====] - 2s 1ms/step - loss: 0.3342 - accuracy: 0.8781
Epoch 4/10
1875/1875 [=====] - 3s 1ms/step - loss: 0.3124 - accuracy: 0.8861
Epoch 5/10
1875/1875 [=====] - 3s 1ms/step - loss: 0.2921 - accuracy: 0.8926
Epoch 6/10
1875/1875 [=====] - 3s 1ms/step - loss: 0.2794 - accuracy: 0.8964
```

Рисунок 5 – Тренування моделі

Далі необхідно порівняти яку точність модель покаже на перевірочному наборі даних, рис. 6.

```
313/313 - 0s - loss: 0.3253 - accuracy: 0.8854
```

Рисунок 6 – Точність моделі на перевірочному наборі даних

Отримана на перевірконому сеті точність виявилася трохи нижче, ніж на тренувальному. Цей розрив між точністю на тренуванні і тесті є прикладом перенавчання (overfitting). Перенавчання виникає, коли модель машинного навчання показує на нових даних найгірший результат, ніж на тих, на яких вона навчалася. Після навчання моделі та перевірки метрик модель готова.

Для правильного функціонування додатку розроблено архітектуру системи та його логіку. Попередньо навчена модель TensorFlow перетворюється на веб-формат TensorFlow.js та інтегрується з додатком. Конвертер TensorFlow.js складається з двох компонентів: утиліта командного рядка, що перетворює модель TensorFlow для використання в TensorFlow.js та API для завантаження і виконання моделі в браузері за допомогою TensorFlow.js.

В процесі перетворення переглядається граф моделі і перевіряється, чи підтримується кожна операція TensorFlow.js. Якщо це так, записуємо графік у форматі, який може використовувати браузер. Щоб оптимізувати модель для обслуговування в Інтернеті, сегментовано ваги в файли розміром 4 МБ – таким чином вони можуть бути кешованими браузерами. Якщо під час оптимізації виявляється, що операція не підтримується, то процес завершується помилкою, і система виводить ім'я операції для користувача. Після перетворення моделі у веб-формат TensorFlow.js її можна використовувати за призначенням. Дана модель набуває вигляду таблиці з даними та зберігається у форматі json.

Як тільки користувач запускає прогресивний веб-додаток, активи програми та файли моделі TensorFlow.js завантажуються з Інтернету. Активи та модель зберігаються локально за допомогою кешу браузера. Користувач в спеціальному вікні робить зображення за допомогою комп'ютерної миші або тач скріну. Зображення розпізнається та даються найкращі прогнози. Схема роботи додатку зображена на рис. 7.

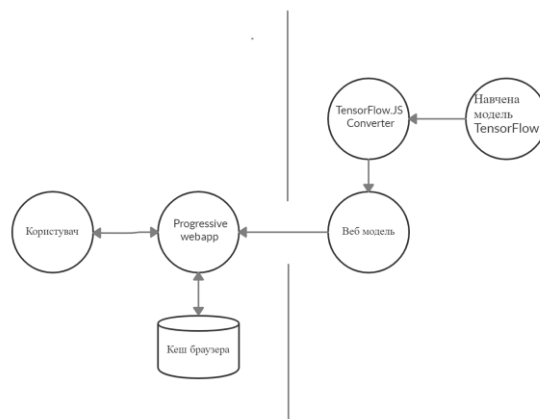


Рисунок 7 – Схема роботи додатку

Схема роботи системи використовує процедурний підхід. Дана схема зображено на рис. 8.

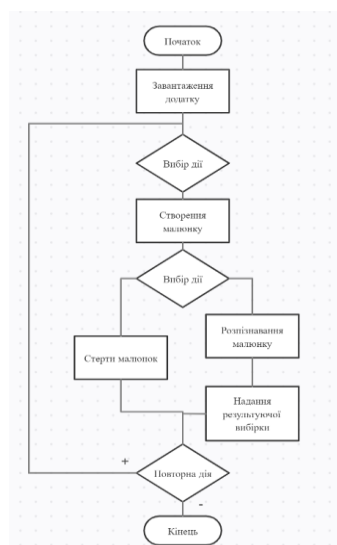


Рисунок 8 – Схема роботи системи використовуючи процедурний підхід

Для проведення аналізу та результатів дослідження, порівняємо розроблений додаток із вже існуючими на ринку. Одними із найпопулярніших на даний момент є Quickdraw, Autodraw, та Draw it. Розглянемо порівняльну таблицю даних програм (табл. 1), щоб дізнатись переваги розробленого PWA додатку.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз програм аналогів

Додаток/Особливості	Quickdraw	Autodraw	Draw it	PWA Draw
Надає доступ до тачскріну	Так	Так	Так	Так
Працює без підключення до інтернету	Ні	Ні	Так	Так
Використовує нейронні мережі для класифікації	Так	Так	Так	Так
Працює на усіх доступних платформах: IOS, Android, браузер	Працює на всіх платформах у вигляді сайту	Працює на всіх платформах у вигляді сайту	Встановлюється як додаток на смартфон з ОС Android	Працює на усіх доступних платформах
Класифікує зображення	Так	Так	Так	Так
Підтримує технологію PWA	Ні	Ні	Ні	Так

В якості аналога для розробки було обрано Draw it. Основними недоліками аналога є: висока вартість розробки, залучення великої команди розробників для створення програми та розробка додатку під кожен платформу окремо. У розробці дана проблема вирішується використанням технології Progressive Web App. Також програмний продукт випереджає аналог за швидкістю розпізнавання зображень.

Застосування розробленої програми дозволяє підвищити швидкодію та стабільність роботи розпізнавання зображень за рахунок застосування технології Progressive Web App та TensorFlow.js.

Після порівняльної таблиці протестуємо усі додатки та заміряємо час виконання розпізнавання зображень в кожному з них. Занесемо час виконання операцій у кожному із додатків в порівняльний графік. Даний графік наведено на рис. 9. Найбільший час виконання розпізнавання зображень 0.016 припадає на додаток Draw it. Найменший час 0.007 у розробленого PWA додатку.

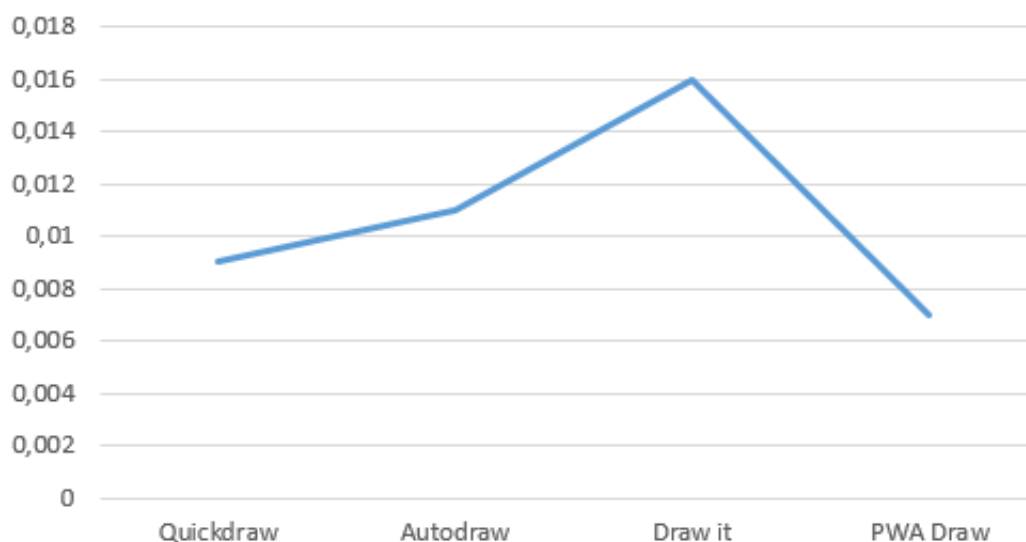


Рисунок 9 – Графік швидкості виконання операцій

З графіку можна зробити висновок, що створена програма на 0,02 секунди швидше розпізнає зображення в порівнянні з найшвидшим з представлених аналогів Quickdraw.

Висновки

1. У статті проведено аналіз технологій та підходів для створення мобільних додатків. Для створення додатку було обрано технологію Progressive Web App. Дана технологія має ряд суттєвих переваг, а саме: простоту в створенні, малу затрату ресурсів, високу швидкість роботи, підтримка різних операційних систем та можливість працювати офлайн.

2. Створено власну модель згорткової нейронної мережі для розпізнавання зображень. Для навчання моделі було обрано набір даних «The Quick, Draw! Dataset» від корпорації Google. Модель показала високу точність та швидкість розпізнавання зображень.

3. Розроблено архітектуру програми та усіх необхідних складових для конвертації моделей нейронних мереж у необхідний формат для роботи із зображеннями у веб-додатку.

4. Розроблено програмне забезпечення, в якому реалізовано усі необхідні функції, що притаманні PWA додатку. Завдяки даному програмному забезпеченню проведено розпізнавання зображень з використанням згорткової нейронної мережі і бібліотеки TensorFlow. Наведено успішні приклади розпізнавання різних зображень. Продемонстровано роботу програми на різних пристроях, а також у браузері. Визначено, що прогресивний веб-додаток покращений у багатьох параметрах і надає можливість швидше за аналоги надавати результуючу вибірку користувачеві. Проілюстровано результат порівняння швидкодії програм аналогів.

Список літератури

- [1] Making Progressive Web Apps (PWAs) with React, 2019. [Online]. Available: <https://alligator.io/react/react-progressive-web-apps/>. Accessed on: February 01, 2021.
- [2] Прогресивний веб-застосунок, 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Progressive_Web_Apps. Дата звернення: Лют. 01, 2021.
- [3] Progressive Web, 2018. [Online]. Available: <https://codelabs.developers.google.com/codelabs/your-first-pwapp-ru/index.html?index=.%2F.%2Flangru#0>. Accessed on: February 01, 2021.
- [4] M. D. Zeiler, R. Fergus, «Visualizing and understanding convolutional networks», in *European conference on computer vision*, Springer International Publishing, pp. 818–833, 2014.
- [5] Fei-Fei Li, A. Karpathy, J. Johnson, *CS231n Convolutional Neural Networks for Visual Recognition*, 2016. [Online]. Available: <https://cs231n.github.io/convolutional-networks>. Accessed on: Mar. 21, 2017.
- [6] Т. О. Ковтун, М. В. Барабан, В. В. Гармаш, «Прогресивний веб додаток для розпізнавання малюнків» на XV Міжнародній науковій конференції «Контроль і управління в складних системах», Вінниця: ВНТУ, 8–10 жовтня, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mccs/mccs2020/paper/view/10665/>. Дата звернення: Лют. 01, 2021.

Стаття надійшла: 08.02.2021.

References

- [1] Making Progressive Web Apps (PWAs) with React, 2019. [Online]. Available: <https://alligator.io/react/react-progressive-web-apps/>. Accessed on: February 01, 2021.
- [2] Prohresyvnnyi veb-zastosunok, 2018. [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: https://en.wikipedia.org/wiki/Progressive_Web_Apps. Data zvernennia: Liut. 01, 2021.
- [3] Progressive Web, 2018. [Online]. Available: <https://codelabs.developers.google.com/codelabs/your-first-pwapp-ru/index.html?index=.%2F.%2Flangru#0>. Accessed on: February 01, 2021.
- [4] M. D. Zeiler, R. Fergus, «Visualizing and understanding convolutional networks», in *European conference on computer vision*, Springer International Publishing, pp. 818–833, 2014.
- [5] Fei-Fei Li, A. Karpathy, J. Johnson, *CS231n Convolutional Neural Networks for Visual Recognition*, 2016. [Online]. Available: <https://cs231n.github.io/convolutional-networks>. Accessed on: Mar. 21, 2017.
- [6] Т. О. Kovtun, M. V. Baraban, V. V. Harmash, «Prohresyvnnyi veb dodatok dlia rozpiznavannia maliunkiv» na XV Mizhnarodnii naukovii konferentsii «Kontrol i upravlinnia v skladnykh systemakh», Vinnytsia: VNTU, 8–10 zhovtnia, 2020. [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mccs/mccs2020/paper/view/10665>. Data zvernennia: Liut. 01, 2021.

Відомості про авторів

Барабан Марія Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій.

Барабан Сергій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук.

Гармаш Володимир Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій.

М. В. Барабан, С. В. Барабан, В. В. Гармаш

**РАЗРАБОТКА ПРОГРЕССИВНОГО ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ СО
СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ ДЛЯ
РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Винницкий национальный технический университет, Винница

M. V. Baraban, S. V. Baraban, V. V. Garmash

**DEVELOPMENT OF A PROGRESSIVE WEB APPLICATION
WITH A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK FOR
IMAGE RECOGNITION**

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia

УДК 04.31

Я. М. Клятченко, О. С. Михайлюк, Л. М. Дудкова,
О. В. Тарасенко-Клятченко**ЗАХИСТ БЛОКІВ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ У
СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ ЗАСОБАХ НА
БАЗІ ПЛІС**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», Київ

Анотація. Поточний рівень розвитку архітектур мікросхем програмовної логіки обумовлює не тільки доцільність, але і бажаність їхнього використання при розробці спеціалізованих комп'ютерних засобів або комбінаційної частини пристроїв обчислювальної техніки. Підвищення складності цифрових обчислювальних засобів, особливо в спеціалізованих системах критичного застосування, локалізує увагу розробників та компаній-виробників напівфабрикатів програмовних логічних інтегральних схем (ПЛІС) на виникненні ситуацій, які пов'язані із порушенням правильної роботи пристроїв, що обумовлені як зовнішніми впливами так і втручаннями. Якщо явища, що викликані негативними зовнішніми впливами, наприклад, як Single-Event Effect, можуть бути пов'язані із переходом на нові технологічні норми виготовлення напівпровідникової продукції, а саме, мікросхем ПЛІС, то різні втручання у функціонування пристроїв мають антропогенне коріння.

Широке використання ПЛІС для реалізації спеціалізованих комп'ютерних засобів спонукає до використання блоків інтелектуальної власності (intellectual property core, IP-core), оскільки для створення деяких екземплярів апаратних засобів необхідно реалізувати широкі функціональні можливості, що здійснюється завдяки ІР. Такий підхід дозволяє втілити у спеціалізовані пристрої великий функціональний набір, подолати складності їхньої розробки та звужити часові рамки. В роботі наводиться частина огляду ефективних реалізацій захисту ІР, який є складною та важливою задачею. Описано різні підходи та методи організації такого захисту. Наводяться посилання на приклади використання додаткових структур – доповнюючих шифрування та аутентифікації, які унеможливають несанкціонований доступ.

Ключові слова: Блоки інтелектуальної власності, ІР-блоки, ПЛІС, bitstream encryption, AES, HMAC, ECC, CRC, SEU.

Аннотация. Текущий уровень развития архитектур микросхем программируемых логики обуславливает не только необходимость, но и желательность их использования при разработке специализированных компьютерных средств или комбинационной части устройств вычислительной техники. Повышение сложности цифровых вычислительных средств, особенно в специализированных системах критического назначения, локализует внимание разработчиков и компаний-производителей полупроводниковой продукции на возникновении ситуаций, связанных с нарушением правильной работы устройств, что обусловлено как внешними воздействиями, так и вмешательствами. Если явления, вызванные негативными внешними воздействиями, например, как Single-Event Effect, могут быть связаны с переходом на новые технологические нормы изготовления полупроводниковой продукции, а именно – микросхем ПЛІС, то вмешательство в функционирование устройств имеет антропогенные корни.

Широкое использование ПЛІС для реализации специализированных компьютерных средств побуждает к использованию блоков интеллектуальной собственности (intellectual property core, IP-core), поскольку для создания некоторых экземпляров апаратных средств необходимо реализовать широкие функциональные возможности, то это осуществляется благодаря использованию ІР. Такой подход позволяет воплотить в специализированные устройства большой функциональный набор, преодолеть сложности их разработки и сузить временные рамки. В работе приводится часть обзора эффективных реализаций защиты ІР который является сложной и важной задачей. Определены различные подходы и методы организации такой защиты. Приводятся ссылки на примеры использования дополнительных структур – дополняющих шифрования и аутентификации, которые делают невозможным несанкционированный доступ.

Ключевые слова: Блоки интеллектуальной собственности, ІР-блоки, ПЛІС, bitstream encryption, AES, HMAC, ECC, CRC, SEU.

Abstract. The current evolutionary stage of the microchips' architecture of programmable logic does precondition not only a rationale for but also desirability of its utilisation when developing specialised computer means or the combinatory part of devices of computing machines. The increase in complexity of digital computational devices, especially in the critical usage' computer systems, dramas and focuses the attention of developers and OEMs of FPGA to the occurrence of events related to the devices' correct operation' interruption, that may be caused both by external factors and intrusion. If events that are caused by negative external impacts such as a Single-Event Effect, may be related to the transition to new technological norms of the semiconductor products manufacturing, e.g. FPGA microchips, then any intrusions to the devices' operation have anthropological origins.

Widespread use of FPGA to implement the specialised computer means prompts the use of the intellectual property blocks (intellectual property core, IP-core) since to create certain samples of hardware the broad functional capabilities have to be implemented, which is effectuated by the IP. Such an approach enables materialisation of the substantial feature set in a specialised device, overcome the complexities in the devices' development and narrow down time-frames. A part of an overview of the efficient IP cores protection, being an important and complex task, is exemplified in the paper. Different approaches and methods are outlined for such protection organisation. Examples are given of the examples of the additional structures' usage, complementary to ciphering and authentication, that prohibit unauthorised access.

Key words: Intellectual property core, IP core, programmable logical devices, bitstream encryption, FPGA design protection, AES, HMAC, ECC, CRC, SEU.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-50-1-15-21>.

Вступ

Наявність загроз та слабких сторін у апаратних засобів, що реалізовані на ПЛІС, висвітлює важливість забезпечення інформаційної стійкості в розрізі протидії негативним явищам, таким як несанкціонований доступ до інтелектуальної власності або її крадіжка. Розробка сучасних комп'ютерних засобів, а особливо спеціалізованих, супроводжується використанням так званих ІР-блоків (блоків інтелектуальної власності, IP-core). Завдяки використанню ІР значно скорочується час реалізації пристроїв та значно ро-

зширюється їхній функціонал. IP – це складний, протестований, верифікований та оптимізований функціональний модуль, що забезпечує необхідні алгоритми обробки інформації та, який може бути використано декілька разів. IP, як правило, може бути центральним компонентом в пристрої, що проектується. Практика доводить той факт, що використання IP наближує момент появи цифрового пристрою на ринку. Процес проектування мінімізується завдяки включенню вже створених та протестованих модулів, скорочується час на верифікацію проекту. Статистичні дані говорять про те, що ринок IP-cores постійно розвивається та зростає [1].

Актуальність

Як не прикро, але існує зворотній бік використання IP: те, на що було витрачено інтелектуальні, матеріальні та часові ресурси, можна втратити за мить. Несанкціонований доступ до блоків інтелектуальної власності можливий завдяки копіюванню (клонуванню) пристрою та по причині здійснення дій із зворотньої розробки або інжинерингу (reverse engineering) [2]. Якщо у випадку клонування новий пристрій реалізується якомога більш схожим на оригінальний пристрій, то у другому випадку виконуються дії, що можуть призвести до отримання інформації про особливості інтелектуального продукту у вигляді алгоритмів роботи пристрою та дозволить створити нову специфікацію пристрою. До інших загроз для блоків інтелектуальної власності можна віднести такі ситуації, як несанкціонований надмірний випуск продукції OEM-виробниками; халатне ставлення інженерів до питань безпеки, наприклад, невиконання або повне ігнорування користувачами IP-cores інструкцій із заходів безпеки; наявність дірок у захисті (backdoor) які залишають розробники пристрою на етапі відлагодження або тестування; помилки у сфері безпеки проєктів.

До загроз неантропогенного характеру можна віднести одиничні збої SEU (англ. Single-Event Upset), що виникають внаслідок дії на чутливі структури пам'яті ПЛІС високоенергетичних часток із високою енергією (англ. Single-Event Effect, SEE) в результаті чого змінюється значення одного або декількох бітів пам'яті [3].

Мета

Метою даної роботи є визначення ефективних рішень у сфері захисту блоків інтелектуальної власності в спеціалізованих комп'ютерних засобах на ПЛІС за рахунок виявлення нових напрямків, огляду перспективних ідей, систематизації підходів, методів та засобів такого захисту.

Задачі

1. Провести огляд, систематизувати та визначити множину загроз, атак та впливів на IP-блоки у пристроях на ПЛІС. Узагальнити існуючі відомості про ефективність існуючих засобів протидії.
2. Оцінити множину існуючих рішень для захисту IP та, на основі цього визначити ефективність використовуваних підходів, методів та засобів.
3. Визначити найдієвіші підходи до захисту від одиничних збоїв та окреслити практичні рекомендації щодо їхньої організації.

Розв'язання задач

Негативні впливи у вигляді загроз та атак, що супутні процесу проектування та виготовлення обчислювальних засобів на ПЛІС, в першу чергу приводять до проблем із використанням блоків інтелектуальної власності, захист яких від несанкціонованого ознайомлення, використання, підробки, модифікації тощо є актуальною задачею. Тому враховуючи наведені приклади, постає задача оцінки ективності множини рішень для захисту апаратних засобів на ПЛІС в умовах дії на них негативних факторів.

Ефективність реалізації захисту IP

Компанії-виробники мікросхем програмовної логіки мають свої фірмові рішення для боротьби із загрозами та негативними впливами. Але, дивлячись на це, представляють загрозу саме атаки на проєкти (ПЛІС-реалізації) спеціалізованих комп'ютерних засобів. Такими атаками можна вважати дії по декодуванню bitstream (конфігураційної послідовності). Результатом цього є відновлення так званого netlist, що є ні що інше, як процес зворотнього інжинерингу. Оскільки процедура генерування bitstream вважається закритою, то у арсеналі виробників ПЛІС є свої фірмові рішення для унеможливлення зворотнього перетворення bitstream у netlist. Завдяки цьому стає дуже важко чітко співставити конфігураційну послідовність або її частину деякому списку з'днаних netlist, оскільки для реалізації цього можуть знадобитись значні ресурси. Таким чином генерування конфігураційної послідовності відносять до одного із механізмів захисту блоків інтелектуальної власності, оскільки у вигляді bitstream проєкт пристрою є неочевидним, заплутаним та незрозумілим для аналізу.

До особих випадків зламу проєкту можна віднести так звану підміну, коли зловмисник змінює (змішує) або фрагмент, або всю частину bitstream FPGA-проєкту із власним кодом конфігураційної послідовності та видає за власний проєкт.

Апаратний троєнець використовується для доступу до інформації, що зберігається в ПЛІС, і навіть для крадіжки IP. Зловмисники вбудовують цей інструмент у програмне забезпечення САПР або логіку проєкту. В результаті проєкт стає вразливим до хакерських атак вже під час процесу розробки.

Так зване зворотнє зчитування потоку бітів з FPGA може бути віднесене до загроз IP, оскільки за допомогою цих даних можна отримати інформацію про стан пам'яті користувача та стан внутрішніх ре-

гістрів системи. Зворотне зчитування потенційно може бути використано для відновлення конфігураційних даних проєкту.

При атаках за так званим стороннім каналом (Side-channel attack) [4] хакер бере за основу робочі характеристики системи та особливості протікання фізичних процесів у пристрої (атаки з використанням часових характеристик, параметрів енергоспоживання, електромагнітного випромінювання та помилки обчислень). За допомогою таких атак злозмісники можуть отримати ключі шифрування та дані щодо проєкту.

Атака шляхом внесення несправності – це метод, що використовується при тестуванні обладнання. Примушуючи пристрій перейти в режим тестування, відлагодження, аварійного стану або стану виведення службової інформації, забезпечується штучне введення різних несправностей для відмовостійкого тестування, тим паче в особливих ситуаціях обробки. Злозмісник змінює конструкцію, умови навколишнього середовища, напругу або температуру, щоб викликати надзвичайну ситуацію в роботі пристрою. Такі операції в пристроях на ПЛІС можуть змінювати біти в конфігураційній послідовності, що впливає на функціональність. Однак методи, що використовуються в сучасному апаратному проєктуванні (такі як визначення всіх станів та повний аналіз відмов) ускладнюють реалізацію таких атак на ПЛІС.

Ще одним класичним методом забезпечення безпеки є використання шифрування проєкту, де постачальник IP передає замовнику ключ дешифрування разом із IP, але знову ж таки, для досягнення згоди на використання IP та ключа необхідно укласти угоду. З точки зору захисту IP, ефективно розподіляти конфіденційні дані проєктів між різними компаніями, які беруть участь у виробництві комп'ютерного обладнання на ПЛІС, щоб не дати доступу до всієї інформації про проєкт. По суті, ПЛІС є надійною основою для реалізації обчислювальних засобів, оскільки при виробництві кінцевого продукту виробник обладнання (ОЕМ) відокремлюється від проєктувальника.

Провідні постачальники напівфабрикатів ПЛІС [5] пропонують широкий спектр рішень щодо захисту проєктів (IP): від впровадження ідентифікатора пристрою (DNA) та шифрування конфігураційної послідовності до використання механізму перевірки цілісності інформації (HMAC) [6] для аутентифікації bitstream. У процесі реалізації комп'ютерних засобів на ПЛІС шифрування бітового потоку може не тільки запобігти клонуванню пристрою, але й захистити конфіденційні конфігураційні дані проєкту. Кожен програмовий логічний пристрій містить спеціальний блок дешифрування бітового потоку для підтримки стандартного AES-шифрування [7].

На основі прикладу, описаного в [8], реалізація шифрування bitstream проєкту полягає в наступному. Система шифрування потоку бітів складається з двох частин: програмного забезпечення для шифрування потоку бітів та системи дешифрування потоку бітів на основі мікросхеми пам'яті, що використовується для зберігання 256-бітового ключа шифрування. Розробники проєктів використовують програмне забезпечення для створення ключів шифрування та зашифрованих бітових потоків. В подальшому ключ шифрування зберігається в спеціальній енергонезалежній RAM або із застосуванням технології eFUSE [9]. Насправді eFUSE є компонентами вбудованої системи самодіагностики і відновлення, яка безперервно здійснює моніторинг функціональних можливостей пристрою. При виявленні ознак нештатної роботи eFUSE здійснює коригування характеристик мікросхеми, «випалюючи» мікроскопічні плавкі запобіжники, вбудовані в її структуру.

Ключ шифрування надсилається у пристрій лише через порт JTAG. Під час процесу конфігурації ПЛІС виконує зворотну операцію і використовує блок дешифрування ПЛІС для дешифрування вхідного бітового потоку відповідно до алгоритму AES. Блок дешифрування AES на мікросхемі ПЛІС недоступний розробникам проєктів і не може використовуватися для дешифрування будь-яких даних, крім послідовності конфігурації. В якості додаткового рівня безпеки забороняється завантаження зашифрованого бітового потоку в ПЛІС. Якщо пам'ять конфігурації повністю не очищена, зашифрований бітовий потік проєкту не можна завантажити в мікросхему ПЛІС. Подібно діє правило, за яким за умови того, що якщо ПЛІС завантажена зашифрованим bitstream, то не можна туди завантажити незашифрований проєкт. Це допомагає протидіяти маніпуляціям reverse engineering.

З метою протидії атакам типу підміни (спуфінга) та троянців, довело свою ефективність використання криптографічно потужних засобів автентифікації [10]. Для передачі зашифрованого алгоритмом AES бітового потоку проєкту використовується вбудований блок ПЛІС для хешування потоку методом автентифікації повідомлень HMAC [11]. Використовуючи механізм цілісності інформації HMAC, засоби проєктування використовують ключ та саме повідомлення для створення коду автентифікації цього повідомлення (англ. Message Authentication Code, MAC). Приймаюча сторона (в даному контексті програмовне середовище, апаратна сторона) використовує той же самий ключ для обчислення цього хеш-коду (MAC) для отриманого повідомлення та порівняння результатів. Обидва ці компоненти генерують 256-бітний MAC на основі секретного ключа та захищеного хеш-алгоритму SHA256. Якщо ці два значення збігаються, то повідомлення вважається підтвердженим.

Отже, неможливо завантажити, змінити або клонувати бітовий потік IP, не знаючи ключів для AES та HMAC. Якщо алгоритм AES захищає вміст IP від копіювання або зворотного інжинерингу, то використання хеш-механізму HMAC може гарантувати, що бітовий потік конфігурації, що завантажений в ПЛІС, не змінився. Так виявляється будь-яка зміна потоку конфігурації, включаючи зміну значення принаймні одного біта.

Яскравим та ефективним прикладом забезпечення необхідного рівня захисту від апаратних троянських програм є так званий багатоваріантний метод реалізації [12], який пропонує задіювати декілька блоків IP від різних постачальників та використовувати блок виявлення троянських програм для ідентифікації підозрілих IP ядер. На рис.1 показано схему, що ілюструє механізм роботи такого захисту. Тут

порівнюються виходи множини IP ядер, і якщо існує розбіжність між значеннями на виходах, то, ймовірно, присутній троянець. Якщо IP блоків більше ніж три, можна скористатися спеціальною схемою, яка вибирає правильний результат і, при необхідності, активує в систему повідомлення про апаратного троянця.

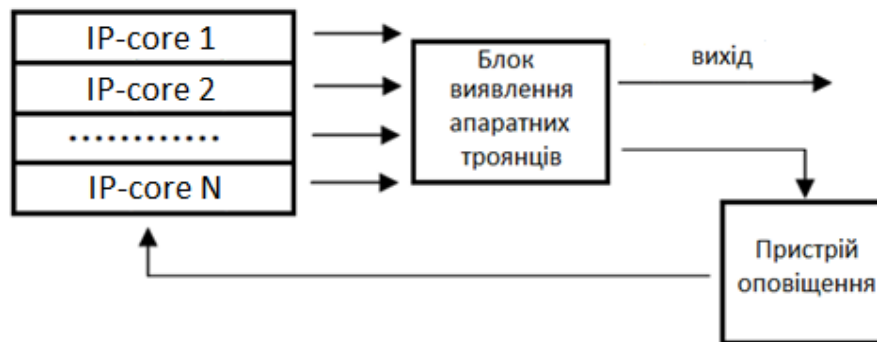


Рисунок 1 – Механізм захисту IP від апаратних троянців

Далі блок оповіщення щодо присутності троянських програм може частково реконфігурувати ПЛІС для видалення зараженого блоку та заміни його новим, поки решта логіки ПЛІС буде функціонувати. Такий блок виявлення троянців може використовуватись для виявлення IP від ненадійних або невідомих постачальників та їх позначення як підозріле IP.

Для оцінки ефективності застосування схеми виявлення апаратних троянців аналогічно із [12] проведено експеримент, що полягає у реалізації на ПЛІС п'яти IP, які представляють собою різні АЛП. Також, реалізовано збірний IP, що представляє собою всі АЛП разом із інтегрованою схемою виявлення троянців. Із таблиці 1 виходить, що час затримки збірного IP сумірний із максимальною затримкою одного із п'яти реалізованих ядер.

Таблиця 1 – Багатоваріантна реалізація

	LUT	Затримка (нс)
IP 1	54	11.0
IP 2	48	4.8
IP 3	172	4.1
IP 4	78	6.7
IP 5	68	5.1
Збірний IP	187	12.7

Підходи до організації захисту від одиночних збоїв

Сучасні дослідження [13] вказують на існування проблем в розрізі надійності у сучасних напівпровідникових кристалах, виготовлених за сучасними зменшеними техпроцесами. Серед причин, на які було вказано, є такі явища, як SEE – одноразовий вплив на роботу високоенергетичних частинок (важких іонів або протонів) чіпів [14]. Наслідки SEE можуть мати різний характер: руйнівні випадки (SEB, SEL – так звані hard errors) або неруйнівні (SEU, SET, SEFI – так звані soft errors). Оцінка достовірності функціонування цифрових обчислювальних засобів у мовах дії таких деструктивних факторів досліджувалась у [15].

Одиночні збої SEU (англ. Single-Event Upset) можуть впливати на комірки пам'яті та призводять до зміни значення одного або декількох бітів і тут важливо, в якому типі пам'яті сталися ці спотворення і де ця сама пам'ять розташовується. Спотворені біти можуть належати конфігураційній пам'яті ПЛІС, яка містить проєкт. Ця пам'ять найбільша за об'ємом та фізично розподілена по площині мікросхеми, але лише частина бітів має важливе значення для правильної роботи в пристрою, що реалізується на ПЛІС. Інші елементи пам'яті високої ємності, які використовуються для зберігання стану проєкту називають блочною пам'яттю. Ця пам'ять є другою за ємністю. Елементи блочної пам'яті об'єднані в групи та розташовані по всій ПЛІС. До розподіленої пам'яті належать запам'ятовуючі елементи для зберігання стану проєкту на ПЛІС. Цей тип пам'яті реалізовано на базі матриці конфігурованих логічних блоків (англ. Configurable Logic Block, CLB) та розподілено по всьому програмовному кристалу [16].

В ПЛІС використовуються спеціальні структури для боротьби із такими негативними явищами як одиночні збої (SEU), а також атаками за стороннім каналом та зломом. Такі засоби реалізують постійне зчитування у фоновому режимі конфігураційної послідовності проєкту [17]. Також, застосовуються засоби виявлення та корекції помилок, що відомі як ECC (error correcting code) [18]. Цей відомий прийом збільшує ймовірність знаходження змін конфігурації у пам'яті внаслідок одиночного збою (SEU) або через атаку на проєкт.

Виділимо особливі риси таких засобів. У першу чергу визначимо характер функціонування цих засобів – реалізація пом'якшення впливів одиночних збоїв у розглянутих типах пам'яті ПЛІС, а не запобігання появи таких помилок. Це може бути створено шляхом внесення в проєкт пристрою додаткових апаратних структур для виявлення та корекції помилок або із застосуванням надмірності. Помилки в логічних ресурсах ПЛІС що не зайняті проєктом і які виникли в результаті дії SEU ігноруються. Крім цього відбувається класифікація помилок на «суттєві» та «неважливі». Це дає змогу враховувати та корегувати не всі помилки, а тільки значущі.

Характеристики реалізації відомих рішень [19] включають:

- малий час виявлення несправностей – близько 20-30 мілісекунд;
- застосування апаратних примітивів, що вбудовані в програмовну мікросхему для виявлення та виправлення помилок;
- застосування засобів відновлення, що основані на ECC або разом з алгоритмом CRC;
- виправлення шляхом повної заміни даних шляхом їхнього перезавантаження;
- визначення ступеня впливу помилок на функціонування проєкту;
- продовження часу безперервної роботи пристрою на ПЛІС за рахунок обробки «неважливих» помилок.

Додаткові засоби захисту ІР

Останні моделі ПЛІС можуть видаляти ключ шифрування у відповідному блоці пам'яті, конфігураційній та тригерній пам'яті за спеціальним сигналом. Цей механізм може бути активований у відповідь на зловмисні дії.

Щоб запобігти клонуванню пристрою, останнє покоління ПЛІС також має вбудований унікальний ідентифікатор пристрою. Унікальний ідентифікатор (схожий на серійний номер) зберігається в енергонезалежній пам'яті. При розробці пристрою користувачі можуть використовувати цей унікальний ідентифікатор для реалізації нового механізму захисту ІР від крадіжки.

Висновки

1. Не зважаючи на високий рівень оснащення сучасних зловмисників, які втручаються в intellectual property core, різноманіття їхнього арсеналу для зламу, а також, наявності множини загроз правильному функціонуванню обчислювальних засобів на ПЛІС, існує багата множина засобів захисту цих ІР. Такі засоби вирішують завдання із захисту та дозволяють клієнтам створювати проєкти комп'ютерних засобів на ПЛІС, які є не тільки захищеними, але й стійкими до підробки та клонування. В роботі проведено огляд загроз та виділено найдієвіші напрямки для забезпечення захисту ІР у проєктиві на ПЛІС.

2. В доповнення до відомих методів шифрування та криптографічно стійкої аутентифікації, які дозволяють значно підвищити рівень захищеності проєктів на ПЛІС запропоновано звернути увагу на використання технології eFUSE, що дозволяє унеможливити злам.

3. Надано практичні рекомендації щодо захисту проєктів на ПЛІС від впливів, що спричинені, наприклад, одиночними збоями. Наслідків від одиночних збоїв можна уникнути якщо використовувати наявні апаратні засоби, що вбудовані в ПЛІС для виявлення та корекції помилок. На прикладі ефективної реалізації схеми захисту ІР-блоків в проєктах обчислювальних засобів на ПЛІС показано суттєве покращення рівня захисту, що може бути застосовно до сучасних ПЛІС з незначними внесеннями змін до набору функцій та архітектури пристрою.

4. Проведено експеримент із засобами виявлення апаратних троянців, що представляють собою багатоваріантну реалізацію. Дані цієї практичної реалізації показують, що впровадження разом із ІР ядрами, які виконують однакову функцію, засобів виявлення апаратних троянців вносить несуттєвий вплив на швидкодію пристрою.

Список літератури

- [1] Dylan. McGrath, «Report: Semiconductor IP market to double in five years», *EETIMES*, 2012, 2014. [Online]. Available: <https://www.eetimes.com/report-semiconductor-ip-market-to-double-in-five-years>.
- [2] J.-B. Note, E. Rannaud, «From the bitstream to netlist», Proc. 16th Int.ACM/SIGDA Symp. On FPGA, N.Y.: ACM, 2008.
- [3] Device Reliability Report. Second half 2020, *Xilinx Inc., User Guides*, 2020. [Online]. Available: https://www.xilinx.com/support/documentation/user_guides/ug116.pdf.
- [4] M. McLean and J. Moore, «FPGA-Based Single Chip Cryptographic Solution», *Military Embedded Systems*, 2007.
- [5] S. McNeil, «Solving Today's Design Security Concerns», *WP365*, (v1.2) July 30, 2012. [Online]. Available: https://www.xilinx.com/support/documentation/white_papers/wp365_Solving_Security_Concerns.
- [6] HMAC: Keyed-Hashing for Message Authentication. [Online]. Available: <https://www.ietf.org/rfc/rfc2104.txt>.
- [7] Advanced Encryption Standard (AES). (FIPS PUB 197). [Online]. Available: <https://csrc.nist.gov/csrc/media/publications/fips/197/final/documents/fips-197.pdf>.
- [8] K. Wilkinson, «Using Encryption to Secure a 7 Series FPGA Bitstream», *XAPP1239* (v1.0) April 15, 2015. [Online]. Available: https://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp1239-fpga-bitstream-encryption.pdf.

- [9] Randal Kuramoto, *eFUSE Programming on a Device Programmer*, 2015. [Online]. Available: <https://vdocuments.mx/xapp1260-efuse-programmer.html>.
- [10] Amir Moradi, Tobias Schneider, «Improved SideChannel Analysis Attacks», *Xilinx Bitstream Encryption of 5 6 and 7 Series, Constructive Side-Channel Analysis and Secure Design: 7th International Workshop, COSADE 2016*, Graz, Austria, April 14-15, 2016.
- [11] FIPS-198-1, Keyed-Hash Message Authentication Code, Federal Information Processing Standards, U.S. National Institute of Standards and Technology. [Online]. Available: http://www.nist.gov/itl/upload/FIPS-198-1_final.pdf.
- [12] A. Al-Anwar, Y. Alkabani, M. W. El-Kharashi, and H. Bedour, «Hardware Trojan detection methodology for FPGA», in *Proceedings of the 2013 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers, and Signal Processing (PacRim)*, Victoria, BC, Canada, pp. 177–182.
- [13] Jameel Hussein and Gary Swif, «Mitigating Single-Event Upsets», *Xilinx Inc. WP395* (v1.1) May 19, 2015. [Online]. Available: http://www.xilinx.com/support/documentation/white_papers/wp395-Mitigating-SEUs.pdf.
- [14] R. Rajaei, B. Asgari, M. Tabandeh, M. Fazeli, «Single Event Multiple Upset-Tolerant SRAM Cell Designs or Nano-scale CMOS Technology», *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2016.
- [15] Я. М. Клятченко, «Визначення достовірності функціонування апаратних засобів на ПЛІС в умовах спотворення логічних сигналів», *ІТКІ*, вип. 34, т. 3, с. 9–12, Лют. 2016.
- [16] О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, Я. М. Клятченко, В. П. Тарасенко, *Комп'ютерна схемотехніка: підручник*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2018. 230 с.
- [17] Soft Error Mitigation Controller v4.1 LogiCORE IP. Product Guide, 2017. [Online]. Available: https://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/sem/v4_1/pg036_sem.pdf.
- [18] E. Gabidulin, N. Pilipchuk, «Error and erasure correcting algorithms for rank codes», *Des. Codes Cryptogr*, 2008.
- [19] LogiCORE IP Soft Error Mitigation Controller v3.4.1. Product Guide. September 30, 2015. [Online]. Available: https://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/sem/v3_4/pg036_sem.pdf.

Стаття надійшла: 01.02.2021.

References

- [1] Dylan. McGrath, «Report: Semiconductor IP market to double in five years», *EETIMES*, 2012, 2014. [Online]. Available: <https://www.eetimes.com/report-semiconductor-ip-market-to-double-in-five-years>.
- [2] J.-B. Note, E. Rannaud, «From the bitstream to netlist», *Proc. 16th Int.ACM/SIGDA Symp. On FPGA*, N.Y.: ACM, 2008.
- [3] Device Reliability Report. Second half 2020, *Xilinx Inc., User Guides*, 2020. [Online]. Available: https://www.xilinx.com/support/documentation/user_guides/ug116.pdf.
- [4] M. McLean and J. Moore, «FPGA-Based Single Chip Cryptographic Solution», *Military Embedded Systems*, 2007.
- [5] S. McNeil, «Solving Today's Design Security Concerns», *WP365*, (v1.2) July 30, 2012. [Online]. Available: https://www.xilinx.com/support/documentation/white_papers/wp365_Solving_Security_Concerns.
- [6] HMAC: Keyed-Hashing for Message Authentication. [Online]. Available: <https://www.ietf.org/rfc/rfc2104.txt>.
- [7] Advanced Encryption Standard (AES). (FIPS PUB 197). [Online]. Available: <https://csrc.nist.gov/csrc/media/publications/fips/197/final/documents/fips-197.pdf>.
- [8] K. Wilkinson, «Using Encryption to Secure a 7 Series FPGA Bitstream», *XAPP1239* (v1.0) April 15, 2015. [Online]. Available: https://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp1239-fpga-bitstream-encryption.pdf.
- [9] Randal Kuramoto, *eFUSE Programming on a Device Programmer*, 2015. [Online]. Available: <https://vdocuments.mx/xapp1260-efuse-programmer.html>.
- [10] Amir Moradi, Tobias Schneider, «Improved SideChannel Analysis Attacks», *Xilinx Bitstream Encryption of 5 6 and 7 Series, Constructive Side-Channel Analysis and Secure Design: 7th International Workshop, COSADE 2016*, Graz, Austria, April 14-15, 2016.
- [11] FIPS-198-1, Keyed-Hash Message Authentication Code, Federal Information Processing Standards, U.S. National Institute of Standards and Technology. [Online]. Available: http://www.nist.gov/itl/upload/FIPS-198-1_final.pdf.
- [12] A. Al-Anwar, Y. Alkabani, M. W. El-Kharashi, and H. Bedour, «Hardware Trojan detection methodology for FPGA», in *Proceedings of the 2013 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers, and Signal Processing (PacRim)*, Victoria, BC, Canada, pp. 177–182.

- [13] Jameel Hussein and Gary Swif, «Mitigating Single-Event Upsets», *Xilinx Inc. WP395* (v1.1) May 19, 2015. [Online]. Available: http://www.xilinx.com/support/documentation/white_papers/wp395-Mitigating-SEUs.pdf.
- [14] R. Rajaei, B. Asgari, M. Tabandeh, M. Fazeli, «Single Event Multiple Upset-Tolerant SRAM Cell Designs or Nano-scale CMOS Technology», *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2016.
- [15] Y. M. Klyatchenko, «Vyznachinennya dostivirnosti funktsionuvannya aparnykh zazobiv na PLIS v umovakh spotvorennya lohichnykh syhnaliv», *ITKI*, вып. 34, т. 3, с. 9–12, Lyut. 2016.
- [16] O. D. Azarov, V. A. Harnaha, Y. M. Klyatchenko, V. P. Tarasenko, *Komp'yuterna skhemotekhnika: pidruchnyk*. Vinnytsya, Ukraina: VNTU, 2018. 230 s.
- [17] Soft Error Mitigation Controller v4.1 LogiCORE IP. Product Guide, 2017. [Online]. Available: https://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/sem/v4_1/pg036_sem.pdf.
- [18] E. Gabidulin, N. Pilipchuk, «Error and erasure correcting algorithms for rank codes», *Des. Codes Cryptogr*, 2008.
- [19] LogiCORE IP Soft Error Mitigation Controller v3.4.1. Product Guide. September 30, 2015. [Online]. Available: https://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/sem/v3_4/pg036_sem.pdf.

Відомості про авторів

Клятченко Ярослав Михайлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем.

Михайлюк Олена Станіславівна – асистент кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем.

Дудкова Лариса Миколаївна – асистент кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем.

Тарасенко-Клятченко Оксана Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем.

Я. М. Клятченко, Е. С. Михайлюк, Л. Н. Дудкова,
О. В. Тарасенко-Клятченко

ЗАЩИТА БЛОКОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СРЕДСТВАХ НА БАЗЕ ПЛИС

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев

Y. M. Klyatchenko, O. S. Mykhailyuk, L. M. Dudkova,
O. V. Tarasenko-Klyatchenko

INTELLECTUAL PROPERTY CORES PROTECTION IN FPGA-BASED SPECIALIZED DEVICES

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv

УДК 004.94:519.816

В. В. Колодний, Д. О. Зелінська, В. А. Гірдвайніс

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ КОЛЕКТИВНОГО ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З ВИБОРОМ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ ОЦІНЮВАННЯ АЛЬТЕРНАТИВ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. У роботі розроблено інформаційну технологію, що заснована на впровадженні, проведенні та обробці експертних оцінювань та колективних опитувань. Описано основні етапи та задачі дослідження, приведено етапи прототипування застосунок на концептуальному рівні та рівні дизайну. Обґрунтовано вибір архітектурного шаблону проектування програмного продукту. Розподіл ролей між користувачами здійснено шляхом дослідження потреб цільової аудиторії програми та засобами UML-моделювання. В дослідженні показано поетапну розробку основних алгоритмів експертного оцінювання та колективного опитування. Ретельно вивчено питання вибору експертами найбільш привабливого методу оцінювання альтернатив, що впроваджується шляхом покрокової розробки та додавання методів у застосунок. База даних, створена в процесі роботи, відповідає усім сучасним стандартам баз даних та має підвищений захист завдяки її розміщенню на хостингу. Описано процедуру проектування та апробації окремих модулів візуалізації результатів розрахунків, розроблено нові якісні шкали для некрітеріального та критеріального оцінювання альтернатив. Застосунок протестовано із залученням достатньої кількості користувачів та підтверджено його ефективність та інноваційність. Обчислено середнє значення юзабіліті додатку з використанням сучасної інтегрованої метрики оцінювання. Створену інформаційну технологію можна використовувати як ефективний засіб проведення широкомасштабних оцінювань з професійно важливих питань на будь-яких рівнях.

Ключові слова: інформаційна технологія, експертні оцінювання, колективні опитування, альтернатива.

Анотация. В работе разработана информационная технология, основанная на внедрении, проведении и обработке экспертных оценок и коллективных опросов. Описаны основные этапы и задачи исследования, приведены этапы прототипирования приложений на концептуальном уровне и уровне дизайна. Обоснован выбор архитектурного шаблона проектирования программного продукта. Распределение ролей между пользователями осуществлено путем исследования потребностей целевой аудитории программы и средствами UML-моделирования. В исследовании показано поэтапную разработку основных алгоритмов экспертного оценивания и коллективного опроса. Тщательно изучены вопросы выбора экспертами наиболее привлекательного метода оценки альтернатив, внедряются путем пошаговой разработки и добавления методов в приложение. База данных, созданная в процессе работы, отвечает всем современным стандартам баз данных и имеет повышенную защиту благодаря ее размещению на хостинге. Описана процедура проектирования и апробации отдельных модулей визуализации результатов расчетов, разработаны новые качественные шкалы для некритериального и критериального оценивания альтернатив. Приложение протестировано с привлечением достаточного количества пользователей и признана его эффективность и инновационность. Вычислено среднее значение юзабилити приложения с использованием современной интегрированной метрики оценивания. Созданную информационную технологию можно использовать как эффективное средство проведения широкомасштабных оценок по профессионально важным вопросам на различных уровнях.

Ключевые слова: информационная технология, экспертные оценивания, коллективные опросы, альтернатива.

Abstract. The paper develops information technology based on the implementation, conduct and processing of expert assessments and collective surveys. The main stages and tasks of the research are described, the stages of prototyping the application at the conceptual level and design level are represented. The choice of an architectural template for software product design is substantiated. The distribution of roles between users is carried out by studying the needs of the target audience of the program and UML-modeling tools. The study shows the gradual development of basic algorithms for expert evaluation and collective survey. The issue of choosing by experts the most attractive method of evaluating alternatives, which is implemented by step-by-step development and adding methods to the application, has been carefully studied. The database created in the process of work meets all modern standards of databases and has increased protection due to its placement on the hosting. The procedure of designing and approbation of separate modules of visualization of results of calculations is described, new qualitative scales for non-criteria and criterion estimation of alternatives are developed. The application has been tested with the involvement of a sufficient number of users and its effectiveness and innovation have been confirmed. The average value of the usability of the application is calculated using modern integrated evaluation metrics. The created information technology can be used as an effective means of conducting large-scale assessments on professionally important issues at any level.

Keywords: information technology, expert evaluations, collective surveys, alternative.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-50-1-22-30>.

Вступ

Різноманітні опитування як метод збору інформації все частіше застосовуються в соціології, політології, психології, маркетингу, кваліметрії та інших галузях. Питання мають бути простими, лаконічними та зрозумілими для більшості респондентів-непрофесіоналів, а відповіді – належати невеликій множині значень на вербальних шкалах. Колективні опитування часто використовуються для «вимірювання» громадських думок.

Експертні оцінювання (на відміну від опитувань) передбачають обов'язкову високу фахову компетентність експертів, а об'єкти оцінювання (альтернативи) можуть бути досить складними і оцінюватися як цілісно, так і з допомогою різноманітних критеріїв і багатовимірних шкал. Цілком природно, що від експертних оцінювань вимагається набагато більша точність, ніж від колективних опитувань.

Традиційно вважається, що експерти під час оцінювань мають користуватися єдиними правилами прийняття рішень в однаково структурованих індивідуальних задачах (фіксована кількість і назва критеріїв, фіксовані шкали для вербальних оцінок або числового вимірювання, фіксовані значення вагових коефіцієнтів, єдиний обраний метод розв'язання багатокритеріальних задач тощо). Насправді в реально-

му житті досить рідко виникає така однорідність думок експертів щодо структуризації та формалізації власних індивідуальних задач прийняття рішень, навіть при невеликій їх кількості [1].

Наприклад, при проведенні певної експертизи один з експертів може віддавати перевагу методу аналізу ієрархій, другий – лінійній згортці п'ятьох критеріїв, а третій – мультиплікативній згортці двох критеріїв. Четвертий експерт хотів би попарно порівнювати всі альтернативи, а п'ятий експерт-інтуїтивіст взагалі не хоче використовувати ніяких критеріїв і порівнянь, але в змозі безпосередньо виконати результуюче гештальт-ранжування [2] всіх альтернатив при їх некрітеріальному оцінюванні [3]. Навіть при однакових (погоджених) критеріях різні експерти досить часто по різному оцінюють їхню відносну вагу, тобто значення коефіцієнтів важливості критеріїв.

Перед системним аналітиком (керівником експертної групи) у випадках структурно-неоднорідних індивідуальних задач постає складне завдання: врахувати думки всіх експертів, не примушуючи їх працювати в когнітивно-дискомфортних уніфікованих умовах однорідних задач індивідуального прийняття рішень [1].

Актуальність

В теперішній час суцільної діджиталізації всіх сфер життя з'являється багато нових інформаційних технологій, але існує відчутна потреба в універсальних, надійних, зручних, точних інструментах для отримання та агрегування індивідуальних думок при колективних опитуваннях і експертних оцінюваннях. В цій статті описуються можливі підходи до вирішення цієї актуальної проблеми та відповідна розроблена авторами інформаційна технологія [4, 5, 6, 7]. Необхідність розробки даної методології обумовлена такими перевагами порівняно з традиційними аналогами: підвищення когнітивного комфорту експертів шляхом якісної візуалізації, потужний математичний інструментарій, що дозволяє досягти точності результатів та досягнення максимальної об'єктивності експертних оцінювань шляхом проектування якісного графічного інтерфейсу технології.

Мета

Метою створення даної інформаційної технології є підвищення ефективності, зручності і наочності процедур проведення колективних опитувань та експертних оцінювань, точності і достовірності відповідей експертів та коректне агрегування індивідуальних оцінок в загальну експертну оцінку.

Задачі

Основною задачею було створення ефективної, надійної, зручної, універсальної інформаційної технології для проведення колективних опитувань та експертних оцінювань з можливістю одночасного користування програмним застосунком з розподілом ролей в ньому (експерт, адміністратор та гість).

Додатковими задачами є:

- забезпечення можливості індивідуального вибору експертами найбільш привабливого для них методу оцінювання альтернатив;
- забезпечення відкритості бази даних для створення інформаційного банку методів експертних оцінювань та можливості його поповнення новими методами;
- розробка нових зручних та наочних візуальних, візуально-вербальних і візуально-числових шкал.

Формування списку вимог до програмного продукту

В ході аналізу архітектурних шаблонів, було вирішено розробити новітню комбіновану модель архітектури застосунку на основі базових моделей «клієнт-сервер» та «інтерпретатор». Поєднання переваг даних архітектур дозволяє отримати сучасне продуктивне рішення з класичним підходом до обміну даними, що забезпечує надійність, та водночас з надзвичайно гнучким інтерфейсом користувача.

Після вибору архітектури додатку в ході дослідження важливим є формування списку вимог на технічне завдання. Вимоги формуються згідно з потребами кінцевих користувачів продукту, таким чином, необхідно врахувати вимоги одразу трьох категорій (аудиторій споживання): адміністраторів, що будуть створювати та керувати експертними оцінюваннями, експертів, що будуть брати участь безпосередньо у процедурі експертних оцінювань та гостей, які можуть мати як професійний, так і зовсім незначний ступінь обізнаності у предметній області. Отже, є актуальним наступний список вимог до розробки:

1. Можливість перегляду результатів експертних оцінювань та колективних опитувань без реєстрації.
2. Забезпечення інтернаціоналізації програмного продукту.
3. Візуалізація результатів експертних оцінювань та колективних опитувань.
4. Впровадження підтримки створення нових алгоритмів та нових методів обробки результатів експертних оцінювань та колективних опитувань.
5. Захист від некоректного введення даних користувачем.
6. Забезпечення захисту та відновлення даних.

7. Система повинна коректно реагувати на навантаження великим потоком запитів на сервер одночасно. У загальному випадку час відгуку програми не повинен перевищувати 5 секунд, дане значення є граничним показником, при якому продукт вважається невиконаним для використання.

8. Інтерфейс користувача повинен бути user-friendly та гнучким.

Розподіл ролей користувачів у системі

Повноцінними ролями користувача у системі є адміністратор та експерт, адже вони здійснюють вхід до системи за допомогою звичайної аутентифікації. Гість же має можливість переглянути всі результати експертних оцінювань, не здійснюючи входу.

Адаптація програмного продукту під кожного з видів користувачів потребує комплексного підходу, і є надзвичайно важливим застосування прототипування на даному етапі. Для цього необхідно скористатись UML-моделюванням, а саме створити діаграму прецедентів, на якій буде відображено усі можливі ролі користувачів та дії, які вони можуть виконувати (рис. 1).

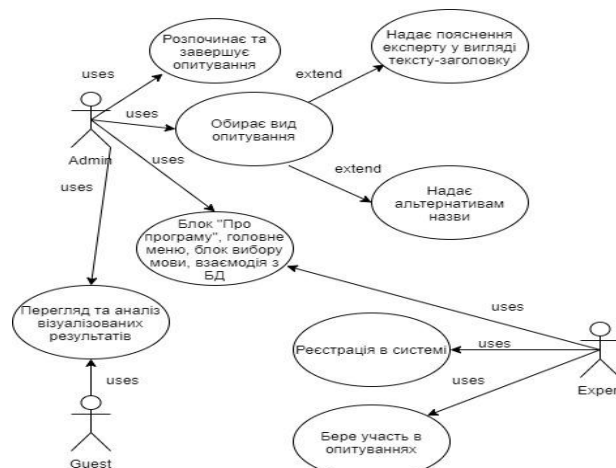


Рисунок 1 – Спрощена діаграма прецедентів інформаційної технології

При схематичному зображенні розподілу ролей на діаграмі, потрібно одразу втілити певні концепції у макети розробки, здійснені вже безпосередньо у програмному середовищі, проте ще без прив'язки до протоколів, логіки баз даних та інших властивостей кінцевого продукту. Макети зроблені з використанням технології Windows Presentation Foundation, що надає широкі можливості для експериментів з графічним інтерфейсом користувача та створення унікального оформлення застосунку в цілому.

Підвищення об'єктивності експертних оцінювань

Реалізація об'єктивності експертних оцінювань є важливою задачею даної розробки, адже у більшості сучасних аналогів розробники не звертають уваги на дану особливість програмних продуктів.

Як показує статистика, при проведенні політичних виборів кандидат, що має перше місце у бюлетені, отримує на 3-5% більше голосів за умови однакової популярності з іншими кандидатами. І це лише один з багатьох прикладів, адже подібні випадки трапляються і на основі певних психологічних факторів експерта, його уподобань у візуальному, аудіальному, сенсорному чи будь-яких інших аспектах.

Під час проектування даної інформаційної технології було створено вербально-візуальний метод для проведення і обробки колективних опитувань під умовною назвою – «розширений світлофор», де п'ять кольорів від насичено-червоного до насичено-зеленого відповідають п'яти оцінкам від «дуже погано» до «дуже добре» (назви оцінок можуть варіюватись). Були витримані основні психологічно коректні умови розміщення варіантів відповідей на екрані для максимізації об'єктивності під час проведення експертного оцінювання – всі варіанти оцінок розміщені горизонтально, з однаковим вирівнюванням кнопок та тексту, однаковим шрифтом та іншими важливими вимогами. Під час вибору певної відповіді, дана кнопка підсвічується і помічається рамкою для вказування на неї (рис. 2).

Застосування методу попарних порівнянь при проведенні колективних експертних оцінювань

В ході проектування програмного продукту з колективного експертного оцінювання, було вирішено застосовувати метод попарних порівнянь усіх альтернатив між собою з використанням нової наочної візуальної дискретної шкали. Користувач обирає на шкалі необхідну оцінку від 1 до 9 (інтуїтивно та візуально, цифри на шкалі не відмічено для запобігання суб'єктивізму та відволікання уваги від процедури оцінювання). Програмний модуль обраховує на сервері після завершення колективного оцінювання інтегральну оцінку та зводить всі значення такого оцінювання у таблиці.

Розроблена візуальна шкала інтегрувала в себе багато переваг різних шкал оцінювання і була створена з врахуванням найсучасніших методик. На першому етапі створення шкали було визначено цілі вимірювання, вибір її розмірності та конструкту. Було обрано дискретну дев'ятизначну шкалу з ціною поділки один бал та візуально її адаптовано під потреби користувача з налаштуванням інтуїтивного вибору будь-якого значення.

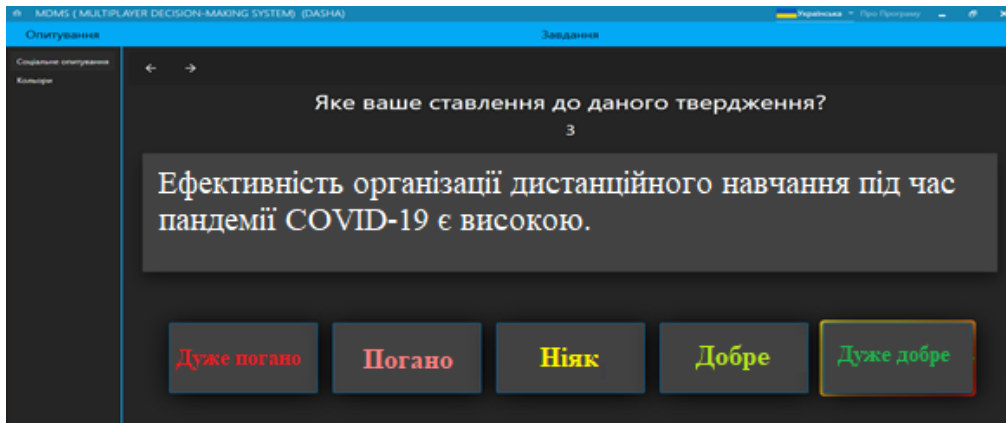


Рисунок 2 – Застосування вербально-візуального методу «розширений світлофор»

Другий етап розробки шкалювання потребує експертне обґрунтування якості новоствореної шкали. Отже, візуальна шкала експертного оцінювання має наступні переваги: об'єктивність оцінювання шляхом уникнення текстових підказок і однакового вигляду шкали на всьому відрізку; проте водночас при тривалому натисненні мишкою на певне місце шкали можна побачити цифрову підказку; попарне порівняння реалізоване шляхом розміщення альтернатив по обидві сторони від шкали, що надає можливість якісно оцінити їх цифрове відношення між собою; адміністратор може визначати порядок формування пар для підвищення об'єктивності оцінювання шляхом їх покрокового додавання. Третім етапом експериментального шкалювання, як і у інших галузях, являється апробація та емпіричний аналіз якості розробки, зокрема і підвищення надійності і валідності шкали. Апробація була здійснена випускниками спеціальності «Комп'ютерні науки та інформаційні технології» на тематику попарного порівняння чотирьох фахових дисциплін по рівню застосування в програмістській діяльності між собою. Задля забезпечення максимально чесних відповідей та збереження анонімності учасникам надано можливість реєструватися за ніками, а не реальними іменами. Колективна апробація експертного оцінювання «Дисципліни КН» показала достатній рівень новизни та зручності даного модуля застосунку, а саме якісну організацію процедури шкалювання. Таким чином, на останньому етапі здійснено підтвердження якості новоствореної шкали шляхом емпіричного дослідження (рис. 3-4).

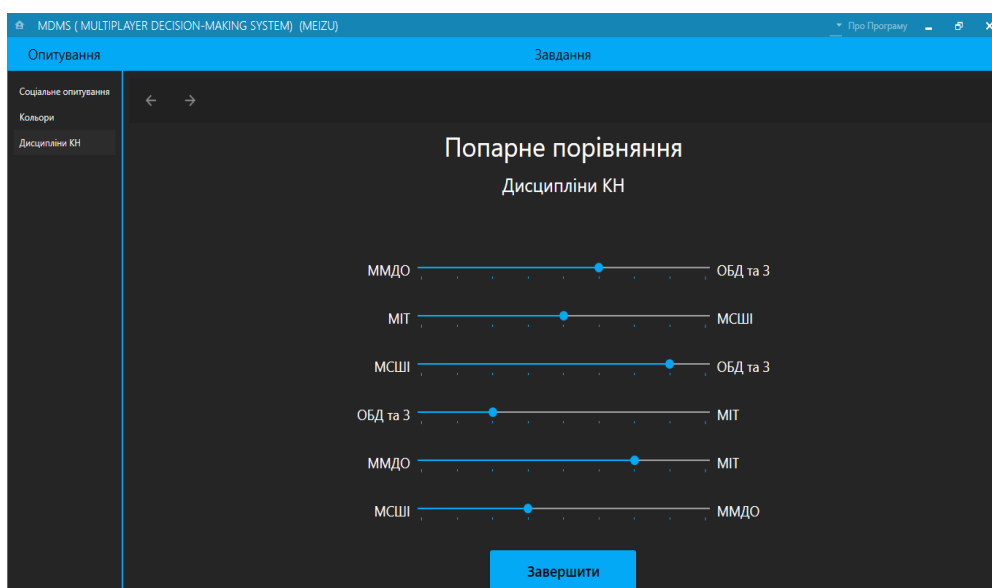


Рисунок 3 – Проведення експертного оцінювання «Дисципліни КН»

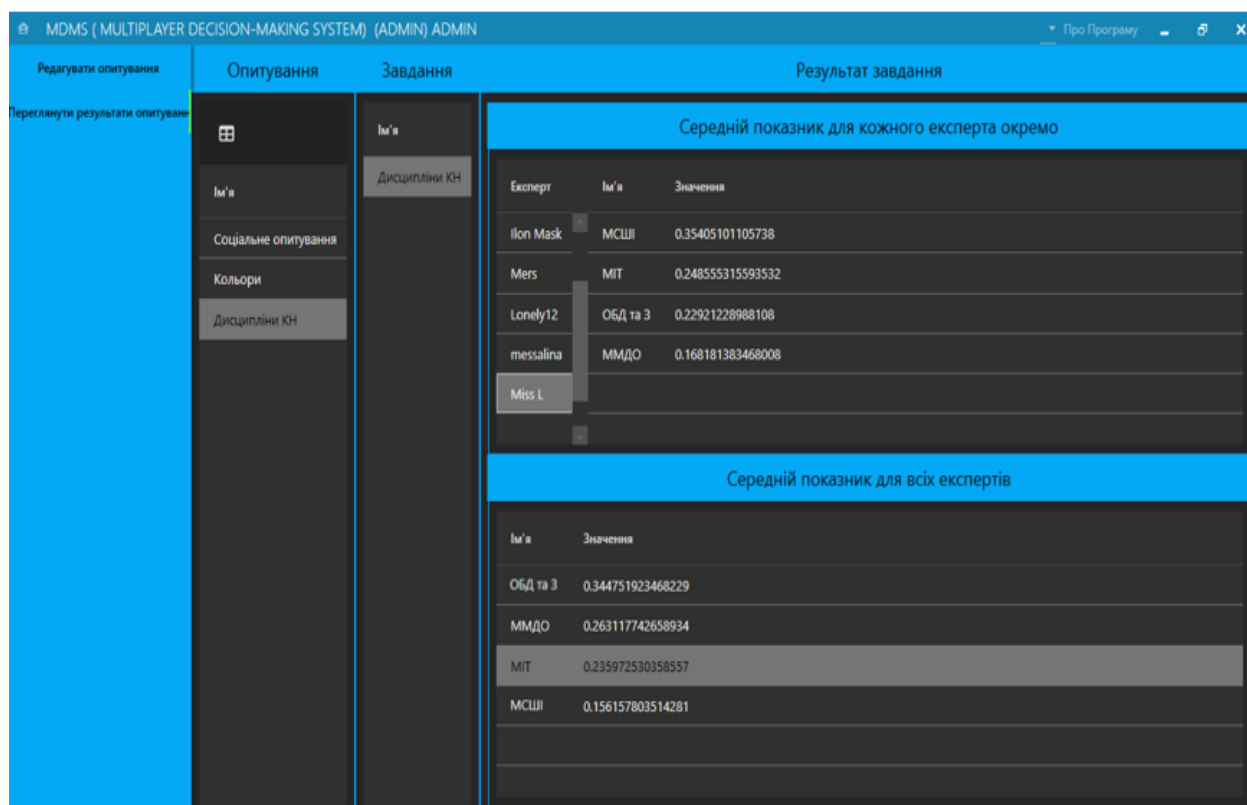


Рисунок 4– Виведення результатів обрахунку експертного оцінювання «Дисципліни КН»

Алгоритм чисельних розрахунків інтегральної оцінки кожної альтернативи, отриманої в результаті колективного експертного оцінювання, базується на аналітичній ієрархічній процедурі Сааті [8]. Відмічені на шкалі оцінки однієї альтернативи відносно іншої трансформуються у чисельні значення, що записують у квадратну матрицю розмірністю $n \times n$, n – загальна кількість усіх альтернатив. На діагоналі матриці усі значення позначаються автоматично як 1, оскільки саме таке значення має альтернатива відносно себе. На наступному етапі проводяться розрахунки власних векторів матриці попарних порівнянь, на основі яких і знаходиться інтегральна оцінка кожної альтернативи.

Створення бази даних для інформаційної технології колективного експертного оцінювання

База даних для системи колективних експертних оцінювань повинна бути гнучкою та пристосованою для можливих змін, адже з часом буде додаватись все більше нових методів оцінювання. Для її побудови найкраще підходить технологія Entity Framework, що комбінується з мовою запитів MySQL та синтаксисом запитів T-SQL. Entity Framework інтегрується з мовою програмування C# та відіграє роль перетворювача коду C# в набір SQL-інструкцій. Після завершення проектування бази даних її необхідно розмістити на безкоштовному хостингу для запобігання втрати даних та для їх розміщення на віртуальному сервері.

Існує три найвідоміших підходи проектування БД за допомогою Entity Framework: Database-First (спочатку створено БД, потім згенеровано її EDMX-модель), Model-First (спочатку створено EDMX-модель, потім на її основі згенеровано БД) та Code-First (налагодження класів БД вручну без використання графічної моделі). Застосуємо підхід проектування Model-First, оскільки додаток передбачається з доволі складною структурою, і тому даний метод буде найзручнішим. На рисунку 5 зображена EDMX-модель бази даних програмного продукту, яку в майбутньому можна змінити та доповнити.

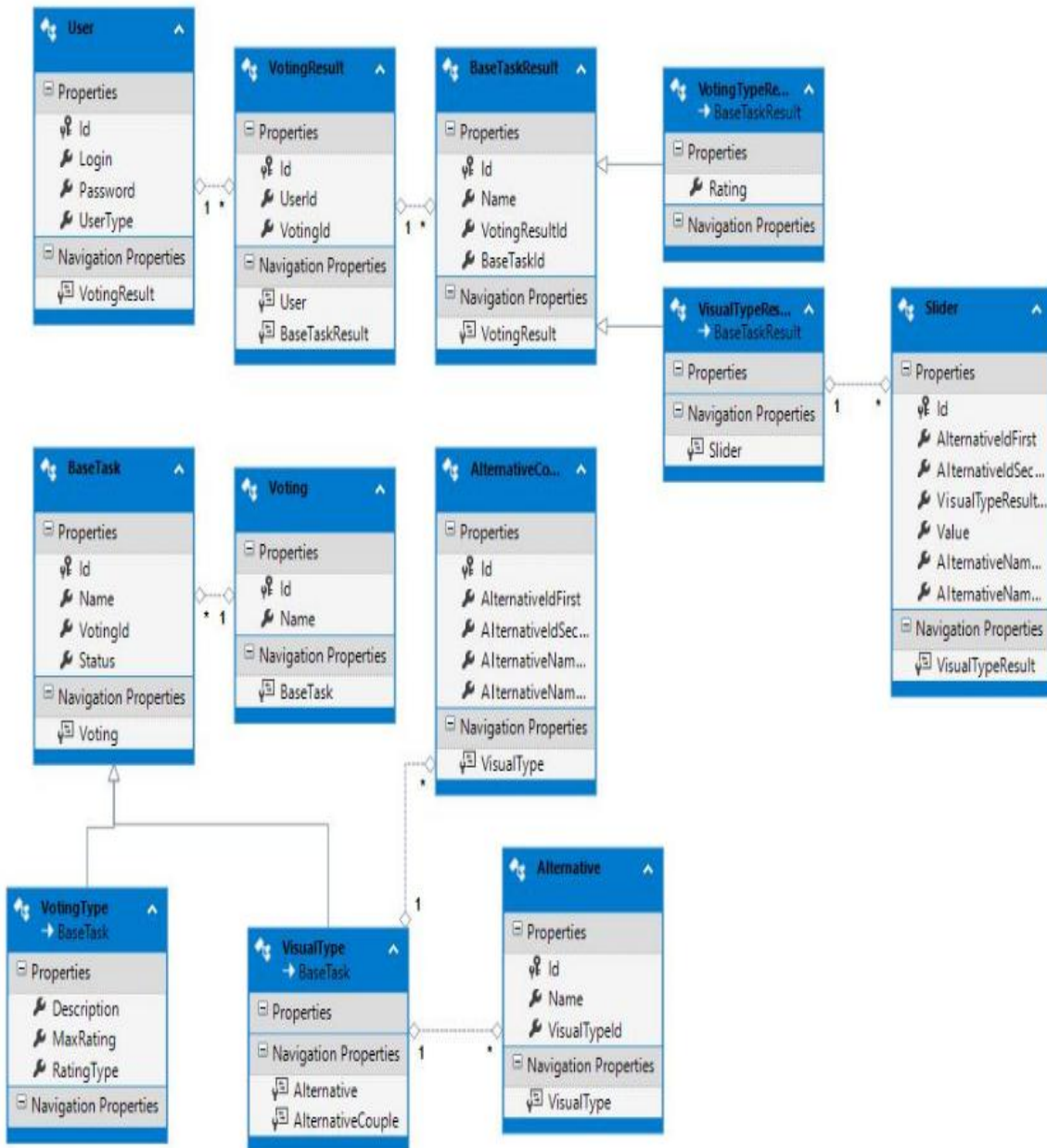


Рисунок 5 – EDMX-модель бази даних програмного продукту

Тестування модуля колективного опитування розробленої інформаційної технології

Для модуля колективного опитування даної інформаційної технології було проведено тестування за умов наявних 10 альтернатив та 50 експертів. Опитування проводилося щодо відношення студентів-програмістів до шкільних предметів. Експерти скористались системою одночасно з різних пристроїв, час відгуку програми був не менше 5 секунд. На рисунку 6 зображено фрагмент результатів, отриманих в ході тестування, що підтвердило високий рівень адаптації програмного продукту.



Рисунок 6 – Фрагмент колективного опитування щодо відношення студентів-програмістів до шкільних предметів

Обчислення показників юзабіліті інформаційної технології

Для отримання ще одного уявлення щодо загальної зручності інтерфейсу та привабливості застосування не буде зайвим провести дослідження його юзабіліті. Оцінка юзабіліті дає можливість визначити наскільки продукт може бути використовуваним, зрозумілим та цікавим для його аудиторії.

На сьогоднішній день існує не так багато метрик виміру оцінки юзабіліті програмних додатків, найвідомішою з яких є метрика Single Usability Metrics (SUM), розроблена аналітиком Джефом Соро [9]. Ідея даного методу полягає у зведенні усіх відомих метрик юзабіліті в оцінку інтегральної якості.

Причому час, витрачений на завдання, вимірюють в секундах, помилки рахують кількісно (поштучно), завершеність завдання містить бінарний показник (0 або 1), а усереднене значення задовільненості вимірюється в балах Лікерта (градація від 1 до 5).

Соро пропонує звести всі ці показники в однорозмірну шкалу, реалізуючи підхід Z-оцінювання. Формула Z-оцінювання має стандартизований вигляд:

$$Z(x) = \frac{x - \mu}{\sigma},$$

де μ — середнє значення, σ — стандартне відхилення, а x — елемент вибірки.

Було проведено опитування 10 користувачів даної програми за чотирма метриками, представленими вище, та вирівнюємо дані показники за формулою Z-оцінювання.

Далі необхідно провести зведення за методикою Z-оцінювання та розрахувати усереднені показники за метрикою SUM, скориставшись формулою

$$SUM = \frac{SM_{comp} + SM_{sat} + SM_{time} + SM_{gr}}{4}.$$

У таблиці 1 можна побачити результати обчислень за метрикою SUM.

Таблиця 1 – Результати обчислень за метрикою SUM

User	Satisfaction	Completion	Errors	Times	Average
1	5	1	2	155	76%
2	4	1	0	240	81,5%
3	5	0	1	125	86,5%
4	5	0	3	310	66%
5	4	1	0	155	77%
6	5	1	0	217	87,2%
7	5	1	0	245	88,75%
8	4	1	1	318	64,75%
9	5	1	0	111	100%
10	4	1	1	366	69%

Середній показник за метрикою SUM по всім користувачам відповідно становитиме 79,67%, що є досить непоганим показником для юзабіліті програмного застосунку.

Висновки

У статті запропоновано інформаційну технологію, яка включає:

- створення системи проведення та обробки експертних оцінювань і колективних опитувань різними методами та алгоритмами, з можливістю додавання нових методологій;
- забезпечення одночасної відкритості та захищеності бази даних інформаційної технології;
- підвищення об'єктивності під час процесу вибору та оцінювання альтернатив;
- тестування додатку та обчислення показника його юзабіліті.

Список літератури

- [1] В. В. Колодний, «Методологічний підхід до прийняття колективних рішень на основі аналізу структурно-неоднорідних індивідуальних задач», на *XLIX Науково-технічна конференція факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії (2020)*, Вінниця.
- [2] В. В. Колодний, та В. В. Зубко, «Застосування гештальт-ранжувань для виявлення переваг ОПР», на *ІНТЕРНЕТ-ОСВІТА-НАУКА-2016*, Вінниця, 2016, с. 43-44.
- [3] В. В. Колодний, та В. В. Зубко, «Метод некрітеріального структурування множини альтернатив за допомогою аналізу тернарних тривірневих ранжувань», на *ІНТЕРНЕТ-ОСВІТА-НАУКА-2014*: Вінниця, 2014, с. 13-14.
- [4] Д. О. Зелінська, В. В. Колодний, «Розробка серверного модуля багатокористувацької системи опитувань», на *XLIX Науково-технічна конференція факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії (2020)*, Вінниця.
- [5] Д. О. Зелінська, В. В. Колодний, «Проектування серверного модуля в колективній системі експертного оцінювання», на *ІНТЕРНЕТ-ОСВІТА-НАУКА-2020*, Вінниця, 2020, с. 51-52.
- [6] В. А. Гірдавайніс, В. В. Колодний, «Розробка клієнтського модуля багатокористувацької системи опитувань», на *XLIX Науково-технічна конференція факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії (2020)*, Вінниця.
- [7] В. А. Гірдавайніс, В. В. Колодний, «Проектування клієнтського модуля в колективній системі експертного оцінювання», на *ІНТЕРНЕТ-ОСВІТА-НАУКА-2020*, Вінниця, 2020, с. 53-54.
- [8] Т. Л. Саати, *Принятие решений. Метод анализа иерархий*. Москва, Росія: Радио и связь, 1989
- [9] Измерение Юзабилити #4. Расчет SUM. Подход от Джефа Соро [Електронний ресурс]. Режим доступу до матеріалу: <https://v-shliachkov.medium.com/расчет-sum-подход-от-джефа-соро-c1ecf796f1b2> – Назва з екрана.

Стаття надійшла: 22.12.2020.

References

- [1] V. V. Kolodnyi, «Metodolohichniy pidkhid do pryiniattia kolektyvnykh rishen na osnovi analizu strukturno-neodnorodnykh indyvidualnykh zadach», na *XLIX Naukovo-tekhnichna konferentsiia fakultetu in-formatsiinykh tekhnolohii ta kompiuternoї inzhenerii (2020)*, Vynnytsia.
- [2] V. V. Kolodnyi, ta V. V. Zubko, «Zastosuvannia geshtalt-ranjuvan` dlia viyavlennia perevag OPR», na *INTERNET-OSVITA-NAUKA-2016*, Vinnitsia, 2016, s. 43-44.
- [3] V. V. Kolodnyi, ta V. V. Zubko, «Metod nekriterialnogo strukturuvannia mnojini alternativ za dopomogoyou analizu ternarnih tririvnevih ranjuvan», na *INTERNET-OSVITA-NAUKA-2014*: Vinnitsia, 2014, s. 13-14.
- [4] D O. Zelinska, V. V. Kolodnyi, «Rozrobka kliientskoho modulia bahatokorystuvatskoi systemy opytuvan», na *XLIX Naukovo-tekhnichna konferentsiia fakultetu informatsiinykh tekhnolohii ta kompiuternoї inzhenerii (2020)*, Vynnytsia.

- [5] D. O. Zelinska, V. V. Kolodnyi, «Proektuvannia servernogo modulia v kolektivniy sistemi expertnogo otsiniuvannia», na *INTERNET-OSVITA-NAUKA-2020*, Vinnitsia, 2020, s. 51-52.
- [6] V. A. Girdvainis, V. V. Kolodnyi, «Rozrobka klientskoho modulia bahatokorystuvatskoi systemy opytuvan», na *XLIX Naukovo-tekhnichna konferentsiia fakultetu informatiinykh tekhnolohii ta kompiuternoї inzhenerii (2020)*, Vinnytsia.
- [7] V. A. Girdvainis, V. V. Kolodnyi, «Proektuvannia klientskoho modulia v kolektivniy sistemi expertnogo otsiniuvannia», na *INTERNET-OSVITA-NAUKA-2020*, Vinnitsia, 2020, s. 53-54.
- [8] T. L. Saati, *Priniatie resheniy. Metod analiza ierarhiy*. Moskva, Rossiia: Radio i sviaz, 1989
- [9] Izmereniye Usability #4. Raschet SUM. Podhod ot Jeffa Soro [Elektronniy Resurs]. Rejim dostupu do materialu: <https://v-shliachkov.medium.com/расчет-sum-подход-от-джефа-соро-c1ecf796f1b2> – Nazva z ekrana.

Відомості про авторів

Колодний Володимир Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук.

Зелінська Дарія Олегівна – магістрантка групи ІКН-20м, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії.

Гірдвайніс Владислав Аудрісович – магістрант групи ІКН-20м, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії.

V. V. Kolodnyi, D. O. Zelinska, V. A. Girdvainis

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КОЛЛЕКТИВНОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ВЫБОРУ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ОЦЕНКИ АЛЬТЕРНАТИВ

Винницкий национальный технический университет, Винница

V. V. Kolodnyi, D. O. Zelinska, V. A. Girdvainis

INFORMATION TECHNOLOGY OF COLLECTIVE DECISION-MAKING WITH THE CHOICE OF INDIVIDUAL ALTERNATIVE EVALUATION TOOLS

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

УДК 004.455.2:004.738.1

Т. І. Коробейнікова¹, Л. А. Савицька²

УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД РОЗРОБКИ API ПІДВИЩЕНОЇ ШВИДКОДІЇ

1 – Національний університет «Львівська Політехніка», Львів

2 – Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. Дана робота присвячена дослідженню методів та засобів розробки API з метою розробки удосконалених підходів для підвищення швидкодії API, його захищеності, орієнтованості в першу чергу на мобільний трафік, на кросплатформенність, можливість користувачам самостійно популяризувати його, знаходити нові сфери застосування та простоти розробки.

Ключові слова: методи та засоби розробки API, Web-API, підвищення швидкодії API, проблеми розробки API, інтеграція додатків, REST-API, middleware, вимоги до Web-API.

Аннотація. Данная работа посвящена исследованию методов и средств разработки API с целью разработки усовершенствованных подходов для повышения быстродействия API, его защищенности, ориентированности в первую очередь на мобильный трафик, на кроссплатформенность, возможность пользователям самостоятельно популяризировать его, находить новые сферы применения и простоты разработки.

Ключевые слова: методы и средства разработки API, Web-API, повышение быстродействия API, проблемы разработки API, интеграция приложений, REST-API, middleware, требования к Web-API.

Abstract. This work is devoted to the study of methods and tools for developing API in order to develop improved approaches to improve the performance of API, its security, focus primarily on mobile traffic, cross-platform, the ability to promote it, find new applications and ease of development.

Keywords: methods and means of API development, Web-API, increase of API performance, problems of API development, application integration, REST-API, middleware, Web-API requirements.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-50-1-31-35>.

Вступ

Із розвитком сучасних інтернет-технологій перед програмістами часто постає задача переносу продукту на інші платформи, розширення функціоналу та створення додаткових клієнтів веб-сервісів. Нині за оцінками експертів близько 75% інтернет трафіку припадає на мобільні пристрої. Відповідно, набагато збільшилась потреба у мобільних клієнтах інтернет-додатків та веб-сервісів [1, 2]. Все більшого поширення набуває стратегія «mobile first». Відповідно, підвищуються вимоги до швидкості та продуктивності API (Application Programming Interface), який забезпечує зручну інтеграцію веб-сервісів, конфіденційність та захищеність.

Актуальність

Нині популярність веб-сервісів та платформ багато в чому залежить від внутрішньої структури ПЗ та його ієрархії. Розробка ефективного та швидкодіючого API дозволяє легко інтегрувати продукт в інші сервіси та додатки. Добре організована серверна частина програми є запорукою безпроблемного та швидкого розширення функціоналу та легко масштабування. Продукт, який пропонує API розробникам, дає можливість користувачам самим популяризувати його, знайти нові сфери застосування програми. API має бути орієнтований в першу чергу на мобільний трафік, на кросплатформенність продукту та його захищеність від DDOS-, csrf-атак та інших кіберзагроз. Тому виникає необхідність у методі вдосконалення розробки API для підвищення його швидкодії та захищеності.

Мета

Метою статті є розробка удосконаленого методу розробки API підвищеної швидкодії та захищеності за рахунок використання додаткового шару функцій проміжної обробки та принципу незбереження стану клієнта.

Для досягнення поставленої у статті мети необхідно вирішити задачі, що наведені нижче:

1. Проаналізувати сучасні методи та засоби розробки API, виконати їх порівняльну характеристику;
2. Визначити основні вимоги до створення ефективного та швидкісного API;
3. Розробити метод розробки API для підвищення його швидкодії та захищеності.

Аналіз сучасних методів та засобів розробки API та їх порівняльна характеристика

До основних технологій розробки API відносять SOAP. SOAP (англ. Simple Object Access Protocol) – протокол обміну структурованими повідомленнями в розподілених обчислювальних системах, базується на форматі XML. Спочатку SOAP призначався, в основному, для реалізації віддаленого виклику процедур (RPC). Зараз протокол використовується для обміну повідомленнями в форматі XML, а не тільки для виклику процедур. SOAP може використовуватися з будь-яким протоколом прикладного рівня: SMTP, FTP, HTTP та інші. Проте, його взаємодія з кожним із цих протоколів має свої особливості, які

потрібно відзначити окремо. Найчастіше SOAP використовується разом з HTTP. SOAP є одним із стандартів, на яких ґрунтується технологія веб-сервісів.

Основним конкурентом SOAP є REST архітектура. REST (англ. Representational State Transfer, «передача репрезентативного стану») — підхід до архітектури мережеских протоколів, які забезпечують доступ до інформаційних ресурсів [3]. Системи, що підтримують REST, називаються RESTful-системами. У загальному випадку REST є дуже простим інтерфейсом управління інформацією без використання якихось додаткових внутрішніх прошарків. Кожна одиниця інформації однозначно визначається глобальним ідентифікатором, таким як URL. Кожна URL в свою чергу має строго заданий формат.

Відсутність додаткових внутрішніх прошарків означає передачу даних в тому ж вигляді, що і самі дані. Тобто ми не загортаємо дані в XML, як це робить SOAP і XML-RPC, не використовуємо AMF, як це робить Flash і так далі. Просто віддаємо самі дані. Але це може спричинити за собою проблеми пов'язані з безпекою передачі даних.

Основні принципи REST:

- кожна одиниця інформації повинна мати ID;
- зв'язок між ресурсами (гіперпосилання);
- використання стандартних методів (CRUD);
- ресурси можуть мати багато представлень;
- незбереження стану клієнта.

Порівнюючи SOAP з REST, слід сказати, що SOAP підтримує WS-Security (Web Services Security), яка надає додаткові функції безпеки. Крім того, SOAP підтримує набір властивостей ACID атомарність, узгодженість, ізолюваність та довговічність. Хоча, зазвичай, інтернет-додатки не вимагають транзакційної надійності такого рівня. Серед недоліків SOAP слід відзначити невиправдано великий об'єм повідомлень. SOAP використовує XML, формат якого надлишковий і містить багато некорисної інформації. Відповідно, це суттєво впливає на швидкодію системи. Крім цього, це накладає певні обмеження на формат відповідей та формат представлення даних. Одним із суттєвих недоліків є те, що SOAP не підтримує кешування запитів.

Серед переваг REST API слід зауважити, що REST дозволяє багато різних форматів даних, а не тільки XML, а також забезпечує кращу підтримку браузерних клієнтів, так як підтримує JSONP. REST має кращу продуктивність та масштабованість, так як не зберігає стан клієнта. На відміну від SOAP, запити REST можуть бути закешовані. Розробка API та створення клієнтів є також набагато легшою. У швидкості REST набагато випереджає SOAP за рахунок незбереження стану клієнта, підтримки різноманітних форматів даних та кешування.

Розглянемо основні інструменти для розробки API:

- API на Sinatra мовою Ruby;
- API мовою Python на основі Flask;
- API на основі Slim мовою PHP;
- API на NodeJS.

Ruby – інтерпретована, повністю об'єктно-орієнтована мова з чіткою динамічною типізацією. Серед її особливостей слід відзначити лаконічний і простий синтаксис, наявність автоматичного прибиральника сміття, реалізацію багатьох шаблонів програмування, незалежну від операційної системи підтримку невитискальної багатопоточності, кросплатформенність та ін. Sinatra – безкоштовний і відкритий програмний каркас, призначений для розробки веб-додатків. Серед його переваг слід виділити простоту та гнучкість, а також підтримку «прошарків» (middleware) – компонентів, які знаходяться між сервером і вашим додатком які відстежують або/і маніпулюють HTTP-запитами та відповідями для надання різної функціональності. Одним з головних недоліків є те, що Sinatra не підтримує архітектурний шаблон MVC [4].

Python – високорівнева мова програмування, орієнтована на підвищення ефективності та читабельності коду. Він відрізняється чітким послідовним синтаксисом, продуманою модульністю та масштабованістю. Flask – мікрофреймворк для створення веб-додатків. Це мінімалістичний програмований каркас, який надає лише базові можливості. За замовчуванням він не включає в себе рівень абстракції бази даних, валідацію форм та інші додаткові можливості. Але Flask підтримує розширення, які можуть задовольнити фактично будь-які потреби.

PHP – скриптова мова програмування, яка є однією з найпоширеніших мов, що використовуються у сфері веб-розробок. Серед її переваг можна виділити ефективність, наявність інтерфейсів до багатьох баз даних, універсальність. До її недоліків можна віднести відсутність строгої типізації, відсутність підтримки Unicode у версіях до 6.0. Крім того, PHP дозволяє вставляти html-код безпосередньо в код скрипта. Це порушує принцип розподілення програмної логіки від її представлення. Slim – це PHP мікрофреймворк, який призначений для розробки API та невеликих веб-додатків. Він містить дуже зручну структуру URL з шаблонами сторінок, флеш-повідомленнями, зашифрованими cookies та іншими особливостями. Основ-

ним призначенням цього фреймворку є саме розробка API. Він містить додаткові компоненти, які дозволяють захистити систему від підробки крос-доменних запитів та кешування запитів.

NodeJS – платформа з відкритим кодом для виконання високопродуктивних мережевих застосунків, написаних мовою JavaScript. Використання JavaScript у якості серверної мови надає такі переваги як асинхронна однопотокова модель виконання запитів, неблокуючий ввід/вивід. Однією з головних переваг платформи NodeJS є пакетний менеджер модулів npm (node package manager) [5]. Його ідея – створення маленького програмного блоку, який вирішує одну проблему, але робить це добре і якісно. Ці маленькі побудовані блоки дозволяють компонувати величезні проекти з цих невеликих частин. Це відповідає принципу відкритості та багаторазового використання коду. NodeJS надзвичайно зручний для створення швидких масштабованих мережевих додатків, оскільки дозволяє одночасно обробляти величезну кількість з'єднань з високою пропускну здатністю, що є рівноцінним високій масштабованості. У порівнянні із традиційними веб-сервісами, де кожне з'єднання (запит) породжує новий потік, навантажуючи оперативну пам'ять системи і, врешті-решт, розбираючи цю пам'ять без залишку, NodeJS працює набагато економніше [6]. Він працює в єдиному потоці, при викликах використовує неблокуюче введення/виведення, яке дозволяє підтримувати десятки тисяч конкурентних з'єднань. Крім того, ця платформа чудово поєднується з NoSQL базами даних, зокрема MongoDB, які є дуже гнучкими при зміні чи масштабуванні та здатні до розподілених обчислень.

Основні вимоги до розробки ефективного та швидкісного API

Удосконалений ефективний та швидкісний API повинен мати такі характеристики:

1. Масштабованість. API має бути структурований і спроектований так, щоб була можливість легко масштабувати систему або розширити її функціонал без погіршення швидкості та ефективності роботи.
2. API повинен мати стандартизований та зручний формат запитів. Крім того, для підвищення швидкодії системи слід використовувати засоби кешування запитів. В свою чергу, відповіді сервера повинні мати явне чи неявне позначення як кешовані чи некашовані з метою попередження отримання клієнтами застарілих або невірних даних у відповідь на подальші запити.
3. API повинен мати стандартизований та зручний формат відповідей та підтримувати різні формати представлення даних. Це дозволить забезпечити кросплатформенність системи, розширити сфери використання продукту, полегшить його популяризацію та інтеграцію в інші веб-сервіси.
4. Виконання принципу «незбереження стану клієнта» (stateless). Серверна сторона не повинна якимось чином залежати від того, з мобільного чи настільного пристрою підключився клієнт. Всі запити від клієнта мають бути складені так, щоб сервер отримав всю необхідну інформацію для виконання запиту без необхідності зберігання стану клієнта в період між запитами.
5. API має реалізовувати модель клієнт-сервер. Відділення потреб клієнта від потреб сервера, який зберігає дані, полегшує перенесення коду клієнтського інтерфейсу на інші платформи, а спрощення серверної частини покращує масштабованість. Такий підхід дозволяє клієнту та серверу розвиватися незалежно один від одного.
6. Має бути передбачена можливість повернення помилок виконання запиту. Причому помилки мають бути чітко описані, щоб не тільки користувач знав, що йому необхідно зробити, але й ви легко орієнтувалися, коли користувач надсилає вам запит для вирішення проблеми. Але необхідно також уникати зайвої надлишковості, щоб не заплутувати користувачів.
7. Забезпечення захищеності та конфіденційності системи. API має бути захищений від таких загроз як DDOS-атаки, csrf-атаки.
8. Застосування проміжних серверів може суттєво підвищити масштабованість системи за рахунок балансування навантаження і розподіленого кешування. Причому завдяки ієрархічності структури клієнт зазвичай не може визначити, взаємодіє він напряму з сервером чи з проміжним вузлом системи.

Дотримання вищенаведених вимог дозволить створити якісний та ефективний API, який буде забезпечувати надійність, масштабованість, портативність компонентів, прозорість системи взаємодії, здатність еволюціонувати та легко змінюватися по мірі необхідності [7].

Розробка удосконаленого методу розробки API для підвищення його швидкодії та захищеності

Так як API повинен працювати швидко, а також легко масштабуватися та бути здатним до безпроблемної зміни чи розширення функціоналу, запропонуємо використати нереляційну базу даних. Так як вона не потребує опису схеми таблиць та використовує JSON-подібні документи, то нереляційна база даних є дуже гнучкою та зручною при зміні та масштабуванні. Крім того, вона здатна до більш швидкого вилучення простих структур даних, а також має розподілений доступ до даних, розміщених на різних серверах. До того ж, є можливість використовувати MapReduce для задач обробки даних. Це потужний інструмент для розподілених обчислень.

Для покращення швидкодії та захищеності API пропонується створити проміжний шар за допомогою функцій проміжної обробки. Це допоможе збалансувати навантаження, і за рахунок цього підвищити швидкодію. Крім цього, в цьому додатковому шарі буде відбуватися перевірка механізму CORS, захист від крос-доменних підробок запитів та автентифікація. Це допоможе суттєво підвищити конфіденційність та захищеність системи.

Функції проміжної обробки можуть виконувати такі завдання:

- виконання будь-якого коду.
- внесення змін до об'єктів запитів і відповідей.
- завершення циклу «запит-відповідь».

виклик наступного проміжного обробника зі стеку.

Приклад виклику функції проміжної обробки зображено на рисунку 1.

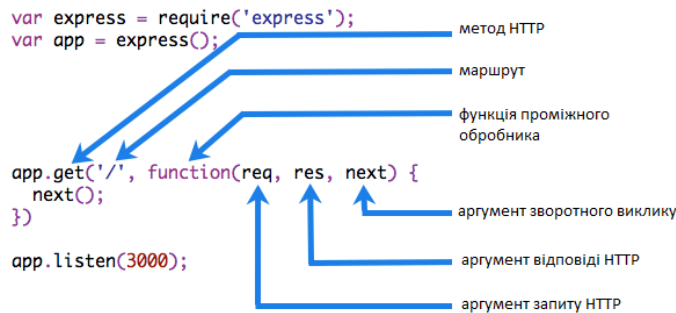


Рисунок 1 – Елементи виклику функції проміжної обробки

Запити будуть проходити через функції проміжного шару перед тим, як виконати своє основне завдання. Ці функції мають доступ до об'єкту запиту, об'єкту відповіді та до наступної функції проміжної обробки. Кожна з цих функцій зможе певним чином змінювати запит чи відповідь, переправити запит на іншу адресу, передавати керування іншій функції. Крім цього, проміжна функція може генерувати кінцеву відповідь та віддати її користувачеві, зупиняючи тим самим рух у проміжному стеку. Схема проміжного шару зображена на рисунку 2.



Рисунок 2 – Шар функцій проміжної обробки

Висновки

У даній статті був проведений аналіз методів та засобів розробки API, виконано їх порівняльну характеристику та аналіз їх відповідності визначеним вимогам, було визначено основні вимоги до створення удосконаленого ефективного та захищеного API. Також було проаналізовано критичні задачі, які виникають у процесі розробки API, що дало можливість запропонувати шляхи їх вирішення.

Запропонований удосконалений метод розробки API дозволяє забезпечити підвищення швидкодії та захищеності системи за рахунок створення додаткового шару функцій проміжної обробки, який також допоможе збалансувати навантаження. Використання NoSQL баз даних зробить систему більш гнучкою та масштабованою і дозволить орієнтувати її на виконання конкретних задач.

Список літератури

- [1] О. І. Гороховський, Т. І. Трояновська, О. Д. Азаров, *Інформаційна технологія доставки контенту у системах комп'ютеризованої підготовки спеціалістів: монографія*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2016, 160 с.
- [2] Oleg I. Pursky, *Big Data Processing: methods, models and information technologies: monograph*. Steyr, Austria: Shoida GmbH, 2019, 234 p.
- [3] С. Ньюмен, *Создание микросервисов*. Питер, Россия: ООО Издательство «Питер», 2016, 300 с.

- [4] М. Таллоч, *Знакомство с Windows Azure. Для ИТ-специалистов*. Москва, Россия: ЭКОМ Паблишерз, 2014, 154 с.
- [5] Подробное описание возможностей разработки с Microsoft Azure Cloud Services. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://habrahabr.ru/company/microsoft/blog/242543>. Дата звернення: Лют., 20, 2016.
- [6] О. Г. Тімінський, «Виникнення, розвиток і проблеми інформаційних технологій управління», *Управління розвитком складних систем*, № 25, с. 86–90, 2016.
- [7] М. В. Князева та ін., *Рівень розвитку техніки і технологій в XXI столітті. Частина 1: Серія монографій*. Одеса, Україна: КУПРІЄНКО СВ, 2019, 227 с.

Стаття надійшла: 11.12.2020.

References

- [1] О. І. Horokhovskiy, Т. І. Troianovska, О. D. Azarov, *Informatsiina tekhnolohiia dostavky kontentu u systemakh kompiuteryzovanoi pidhotovky spetsialistiv: monohrafiia*. Vinnytsia, Ukraina: VNTU, 2016, 160 s.
- [2] Oleg I. Pursky, *Big Data Processing: methods, models and information technologies: monograph*. Steyr, Austria: Shoida GmbH, 2019, 234 p.
- [3] S. N'jumen, *Sozdanie mikroservisov*. Piter, Rossija: ООО Izdatel'stvo «Piter», 2016, 300 s.
- [4] М. Talloch, *Znakomstvo s Windows Azure. Dlja IT-specialistov*. Moskva, Rossija: JeKOM Publisherz, 2014, 154 s.
- [5] Подробное описание возможностей разработки с Microsoft Azure Cloud Services. [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <http://habrahabr.ru/company/microsoft/blog/242543>. Data zvernennia: Liut. 20, 2016.
- [6] О. Н. Timinsky, «Vynyknennia, rozvytok i problemy informatsiinykh tekhnolohiï upravlinnia», *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*, № 25, s. 86–90, 2016.
- [7] М. V. Kniazieva ta in., *Riven rozvytku tekhniky i tekhnolohii v XXI stolitti. Chastyna 1: Seriia monohrafiï*. Odesa, Ukraina: KUPRIENKO SV, 2019, 227 s.

Відомості про авторів

Коробейнікова Тетяна Іванівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри безпеки інформаційних технологій.

Савицька Людмила Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки.

Т. И. Коробейникова¹, Л. А. Савицкая²

УСОВЕРШЕНСТВОВАНЫЙ МЕТОД РАЗРАБОТКИ API ПОВЫШЕННОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ

1 – Национальный университет «Львовская Политехника», Львов

2 – Винницкий национальный технический университет, Винница

T. I. Korobeinikova¹, L. A. Savytska²

IMPROVED METHOD OF INCREASED SPEED API DEVELOPMENT

1 – National university «Lvivska Politechnika», Lviv

2 – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

УДК 004.93

В. В. Куцман, О. К. Колесницький

ВЕРИФІКАЦІЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ПІДПИСУ ЯК БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОГО ПРОЦЕСУ НА ОСНОВІ СПАЙКІНГОВОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. У статті проведено аналіз відомих методів динамічної верифікації підпису, які зведено у класифікаційну таблицю. Запропоновано метод динамічної верифікації підпису на основі спайкінгової нейронної мережі. Обрано три динамічних параметри підпису $l(t)$, $\Delta\alpha(t)$, $Z(t)$, які є інваріантними до кута нахилу підпису, а після їх нормалізації – ще й до просторового та часового масштабів підпису. Ці динамічні параметри підпису подаються на спайкінгову нейронну мережу для розпізнавання одночасно у вигляді часових рядів без попереднього перетворення у вектор статичних ознак, що, з одного боку, спрощує метод завдяки відсутності складних обчислювальних процедур перетворення, а з іншого боку, перешкоджає втраті корисної інформації, а тому – підвищує точність і достовірність верифікації та розпізнавання підписів (особливо при розпізнаванні підроблених підписів, які сильно корельовані з оригіналами). Використовувана нейронна мережа має просту процедуру навчання, причому навчаються не всі нейрони мережі, а тільки вихідні. При необхідності додавання нових підписів не потрібно перенавчати всю мережу повністю, а достатньо додати кілька вихідних нейронів і навчити тільки їхні зв'язки.

Ключові слова: online верифікація підпису, спайкінгова нейронна мережа, інваріантні динамічні параметри, розпізнавання підпису, біометрія, контроль доступу.

Анотация. В статье проведен обзор известных методов динамической верификации подписи, которые сведены в классификационную таблицу. Предложен метод динамической верификации подписи на основе спайкинговой нейронной сети. Выбраны три динамических параметра подписи $l(t)$, $\Delta\alpha(t)$, $Z(t)$, которые являются инвариантными к углу наклона подписи, а после их нормализации – еще и к пространственному и временному масштабам подписи. Эти динамические параметры подписи подаются на спайкингую нейронную сеть для распознавания одновременно в виде временных рядов без предварительного преобразования в вектор статических признаков, что, с одной стороны, упрощает метод благодаря отсутствию сложных вычислительных процедур преобразования, а с другой стороны, препятствует потере полезной информации, а поэтому – повышает точность и достоверность верификации и распознавания подписей (особенно при распознавании поддельных подписей, которые сильно коррелированы с оригиналами). Используемая нейронная сеть имеет несложную процедуру обучения, причем обучаются не все нейроны сети, а только выходные. При необходимости добавления новых подписей не нужно переучивать всю сеть целиком, а достаточно добавить несколько выходных нейронов и научить только их связи.

Ключевые слова: online верификация подписи, спайкинговая нейронная сеть, инвариантные динамические параметры, распознавание подписи, биометрия, контроль доступа.

Abstract. The article reviews the known methods of dynamic signature verification, which are summarized in the classification table. A method of dynamic signature verification based on a spiking neural network is proposed. Three dynamic parameters of the signature $l(t)$, $\Delta\alpha(t)$, $Z(t)$ are chosen, which are invariant to the angle of inclination of the signature, and after their normalization – also to the spatial and temporal scales of the signature. These dynamic signature parameters are simultaneously fed to the spiking neural network for recognition in the form of time series without prior conversion into a vector of static features. This, on the one hand, simplifies the method due to the absence of complex computational conversion procedures and, on the other hand, prevents the loss of useful information and therefore increases the accuracy and reliability of signature verification and recognition (especially for forgery signatures that are highly correlated with genuine ones). The used neural network has a simple learning procedure, and not all neurons of the network are trained, but only the output neurons. If you need to add new signatures, you do not need to retrain the entire network, but just add a few output neurons and learn only their connections.

Key words: online signature verification, spiking neural network, invariant dynamic parameters, signature recognition, biometrics, access control.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-50-1-36-44>.

Вступ

Біометричні методи аутентифікації, включаючи ідентифікацію голосу, відбитків пальців, розпізнавання обличчя, сканування сітківки ока та перевірка підпису стають все більш популярними для широкого діапазону практичних застосувань, починаючи від контролю доступу до закритих зон і закінчуючи за-побіганням шахрайству у фінансових операціях. Верифікація підпису має особливо важливе значення, оскільки вона є загальноприйнятим методом схвалення фінансових операцій. Важлива перевага підпису над іншими біометричними показниками – це давня стійка традиція його використання у багатьох розповсюджених завданнях верифікації. Він використовується десятки років у повсякденному житті і є дуже зручним.

Усі методи верифікації підпису можна поділити на 2 великі групи: статична (Offline) верифікація підпису та динамічна (Online) верифікація підпису [1,2]. Статична верифікація підпису основана на аналізі самого зображення підпису і використовує різноманітні методи розпізнавання графічних образів. Вона є малонадійною, тому що зображення підпису легко сфальшувати обведенням наявного оригіналу за допомогою копіювального паперу, на просвічення або зробивши скан-копію чи фото-копію. Більш надійною є динамічна верифікація підпису, оскільки вона передбачає аналіз параметрів коливання пера автора при відтворенні їм підпису. У найпростішому випадку такими параметрами динаміки відтворення підпису можуть бути три функції часу: дві функції зміни координати $X(t)$ та координати $Y(t)$ коливань пера в площині графічного планшета і ще одна функція – зміна тиску пера на графічний

планшет $Z(t)$. Навіть якщо зловмисник навчиться відтворювати графічно схожий на оригінал підпис, навряд чи він зможе у точності відтворити динаміку рухів автора підпису, тому що вона є індивідуальною для кожної людини. Тому найбільш перспективною є динамічна (On-line) верифікація підпису. До того ж вона максимально придатна до реалізації сучасними засобами інформаційних технологій і перевершує можливості людини-оператора в цьому процесі.

Актуальність

Незважаючи на великий обсяг досліджень за цією тематикою, створення систем динамічної (Online) верифікації підпису з потрібною достовірністю і якістю роботи лишається проблематичним. Складності практичного застосування різних інформаційних технологій динамічної (Online) верифікації підпису викликані недоліками самого явища формування підпису, як об'єкту інформаційного процесу. Так, підпис однієї і тієї ж людини через природню варіабельність почерку людини є нестабільно відтворюваним процесом і має такі недоліки [3]:

- варіабельність геометричних розмірів (просторового масштабу) різних реалізацій підпису;
- варіабельність часу написання (часового масштабу) різних реалізацій підпису;
- варіабельність кута нахилу підпису відносно сторін планшету різних реалізацій підпису.

Крім цього, динамічні параметри підпису (координати $X(t)$ та $Y(t)$, тиск пера на графічний планшет $Z(t)$ та ін.) часто перетворюють у вектор статичних ознак, які потім використовують у класифікаторах різних типів для отримання результату верифікації. При такому перетворенні динамічних параметрів у статичні часто втрачається корисна інформація, що зменшує розбіжність між справжнім та підробленим підписом і тим самим знижує достовірність верифікації.

Часто наряду з верифікацією виникає задача розпізнавання підпису, а точніше – парольного слова. Тобто, потрібно не просто підтвердити наперед відому особу за її підписом, а розпізнати хто саме ця особа із переліку валідних осіб за написанням слова-пароллю. Задача розпізнавання підпису є більш складною за задачу верифікації і вимагає більш складних і потужних методів та засобів класифікації.

Мета

Мета статті – представити новий метод динамічної верифікації підпису, що базується на використанні динамічних параметрів процесу підпису (без їх перетворення у статичні параметри) і спайкінгових нейронних мереж, та дозволяє спростити процес і підвищити достовірність верифікації підпису.

Задачі

1. Проаналізувати загальну схему динамічної верифікації підпису.
2. Провести аналітичний огляд і класифікацію існуючих методів динамічної верифікації підпису.
3. Розробити метод Online верифікації підпису на основі динамічних параметрів підпису та спайкінгових нейронних мереж.
4. Сформулювати переваги запропонованого методу.

Загальна схема динамічної верифікації підпису

Загальна схема динамічної верифікації підпису зображена на рис. 1. Користувач здійснює процес написання підпису на графічному планшеті, який видає такі динамічні параметри підпису: координати $X(t)$ та $Y(t)$, тиск пера на графічний планшет $Z(t)$ та ін. Ці параметри видаються у вигляді оцифрованих відліків відповідних величин у дискретні моменти часу із певним часовим кроком.

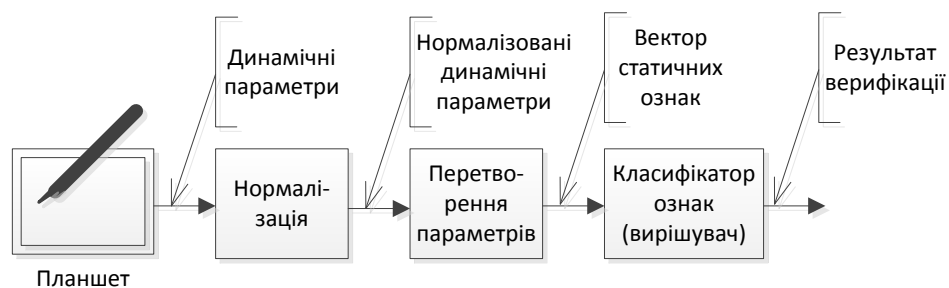


Рисунок 1 – Загальна схема динамічної верифікації підпису

Оскільки різні реалізації підпису однієї особи відрізняються за масштабом, часом і нахилом, то їх нормалізують (приводять до єдиного масштабу по простору, часу та нахилу). Потім для нормалізованих динамічних параметрів виконують функцію перетворення у вектор статичних ознак. Як перетворення часто використовують перетворення Фур'є [3], Уолша [2], Хаара [2], вейвлет [4], сплайни [5] та ін. У результаті отримують вектор чисел (статичних ознак), які потім використовуються у класифікаторах

різних типів для отримання результату верифікації. Як класифікатори використовують структурні, статистичні, нейромережеві та ін.,

Які слабкі місця такої схеми верифікації? По-перше, при перетворенні динамічних параметрів у статичні втрачається велика частина корисної інформації, що знижує достовірність верифікації. По-друге, достовірність верифікації дуже залежить від обраної пари (вид перетворення)-(вид класифікатора). А якщо для класифікації використовувати динамічні параметри без їх перетворення у статичний вектор, то потрібні і динамічні класифікатори, тобто класифікатори часових рядів, які є набагато складнішими.

Аналітичний огляд і класифікація існуючих методів динамічної верифікації підпису

У науковій літературі наведено детальний аналіз методів і засобів верифікації підписів [1,2]. Але для наочності варто було б розробити класифікаційну таблицю. Головною класифікаційною ознакою є вид процесу верифікації підпису: статична (Offline) або динамічна (Online) верифікація підпису. Класифікаційна таблиця методів верифікації підписів зображена на рис. 2. Статична (Offline) верифікації підписів є менш перспективною, тому в рамках цієї статті не розглядається.

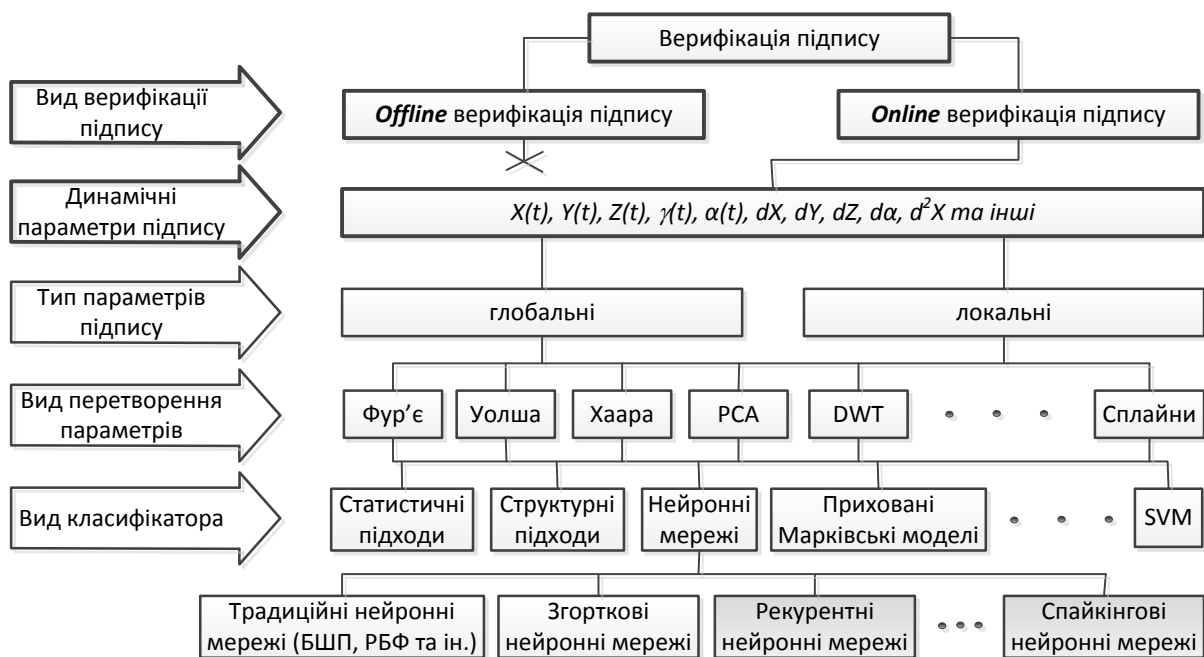


Рисунок 2 – Класифікаційна таблиця методів верифікації підписів

Динамічну (Online) верифікацію підпису можна класифікувати за такими ознаками:

1) *Динамічні параметри підпису*. Взагалі, більшість графічних планшетів видає такі динамічні параметри підпису як координати $X(t)$ та $Y(t)$, тиск пера на графічний планшет $Z(t)$, кут нахилу пера до площини планшета $\gamma(t)$, азимут руху пера $\alpha(t)$. Із цих основних динамічних параметрів часто пропонують отримувати похідні параметри та використовувати їх. Такими похідними параметрами пропонують брати швидкості зміни координат ($v_x=dX/dt, v_y=dY/dt$), прискорення зміни координат ($a_x=dv_x/dt, a_y=dv_y/dt$), а також різноманітні дискретні ознаки, наприклад, кількість максимумів, мінімумів, опуклих та увігнутих ділянок та ін. Беруться не одночасно всі динамічні параметри, а певні їх набори. Навіть проводяться дослідження по порівнянню інформативності різних динамічних параметрів та їх стійкості до інтраперсональної варіабельності підписів [6].

2) *Тип параметрів підпису*. У більшості робіт використовують глобальні динамічні параметри підпису, тобто часові ряди обраних параметрів за всю тривалість підпису. У деяких роботах використовують локальні фрагменти динамічних параметрів у певному часовому діапазоні, або на певних виділених характерних ділянках підпису. Також використовують такі локальні параметри як центри мас або моменти різних порядків [7].

3) *Вид перетворення параметрів*. Динамічні параметри підпису є функціями від часу, тому у такому вигляді їх важко класифікувати. Легше процес класифікації здійснювати над векторами чисел, тому із динамічних параметрів виділяють певні «ознаки», які є числами і замінюють функції від часу (часові ряди) набором чисел (числовим вектором). Для переходу від функцій часу до числових векторів ознак використовують різні види перетворень: Фур'є [3], Уолша [2], Хаара [2], виділення головних компонент (Principal Component Analysis – PCA [8]), дискретне вейвлет-перетворення (DWT) [4], сплайни [5] та ін.

4) Вид класифікатора. Після того як процес підписування закодовано у вигляді числового вектора ознак, його можна класифікувати будь-яким із відомих методів класифікації. Найпростішим є метод порівняння з еталоном, при якому обчислюються певні міри схожості векторів [9] (Евклідова, Махалонобіса та ін.). Більше переваг мають методи на основі прихованих марковських моделей [10], машин опорних векторів (support vector machine – SVM) [11] та штучних нейронних мереж (ШНМ) [4,8]. Останні все частіше використовуються у процесі Online верифікації підпису. В останні роки спостерігається перехід від традиційних ШНМ (багатошаровий перцептрон – БШП, РБФ та нейро-нечіткі [12]) до сучасних парадигм ШНМ (згорткові [13], рекурентні [14], спайкінгові [15]). Найперспективнішими є рекурентні та спайкінгові нейронні мережі, оскільки вони дозволяють класифікувати функції часу (часові ряди) як вони є без перетворення у вектори статичних ознак.

Було знайдено 2 публікації [15,16] про верифікацію підпису на основі спайкінгових ШНМ, де використовуються зовсім інші структури спайкінгових ШНМ, на інших моделях спайкінгових нейронів та з іншим набором динамічних параметрів підпису, ніж пропонується у цій статті.

Метод динамічної верифікації підпису на основі спайкінгових нейронних мереж

Вибір динамічних параметрів підпису.

Такі динамічні параметри підпису як координати $X(t)$ та $Y(t)$ не є інваріантними до просторового та часового масштабу підпису, а також до нахилу написання. Тому пропонується використовувати відстань від поточного часового відліку координат пера (x_i, y_i) до наступного (x_{i+1}, y_{i+1}) (див. рис. 3а). Тобто, згідно теореми Піфагора:

$$l_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (1.1)$$

Якщо координати $X(t)$ та $Y(t)$ знімаються з часовим кроком Δt і під час написання підпису їх буде N , то значень l_i буде отримано $(N-1)$. Залежність $l(t)$ буде інваріантна до кута нахилу підпису, але деякі неточності будуть мати місце через квадратну координатну сітку. Інваріантність залежності $l(t)$ до просторового та часового масштабів можна забезпечити її подальшою нормалізацією. Якщо взяти відношення $l_i/\Delta t$, то це буде швидкість пера на відрізьку між точками (x_i, y_i) та (x_{i+1}, y_{i+1}) . А поскільки всі Δt однакові, то l_i є пропорційною швидкості пера на відрізьку $[(x_i, y_i); (x_{i+1}, y_{i+1})]$. При $\Delta t \rightarrow 0$ величина l_i пропорційна миттєвій швидкості пера у точці (x_i, y_i) . Якщо миттєву швидкість пера розглядати як вектор (однозначно визначається довжиною та кутом нахилу до осі абсцисс), то залежність його довжини $l(t)$ та залежність кута нахилу $\alpha(t)$ до осі абсцисс будуть однозначно визначати намальований графічний образ з урахуванням динаміки його написання. Іншими словами, динаміка лінійної та кутової швидкості пера однозначно визначає не тільки намальовану фігуру, але і «особливості» її написання. Але залежність $\alpha(t)$ не буде інваріантна до нахилу всього підпису відносно осі абсцисс. Саме тому краще брати різницю $\Delta\alpha_i$ сусідніх кутів α_{i+1} і α_i .

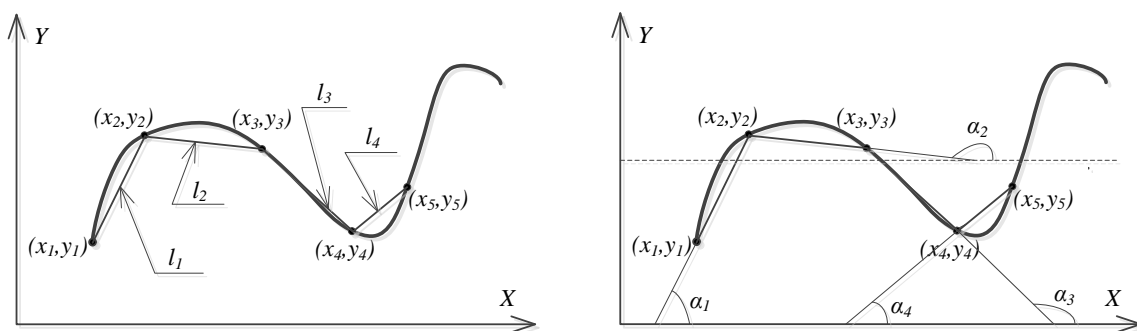


Рисунок 3 – Отримання динамічних параметрів підпису $L(t)$ та $\Delta\alpha(t)$

На основі вищесказаного другим динамічним параметром підпису оберемо різницю кутів $\Delta\alpha_i = \alpha_{i+1} - \alpha_i$ нахилу двох сусідніх відрізків, що з'єднують дискретні точки (просторові відліки) підпису (див. рис. 3б). Кут α_i знаходиться із прямокутного трикутника, катетами якого є різниці координат точок (x_{i+1}, y_{i+1}) та (x_i, y_i) .

Якщо координати $X(t)$ та $Y(t)$ знімаються з часовим кроком Δt та під час написання підпису їх буде N , то значень α_i буде отримано $(N-1)$, а значень $\Delta\alpha_i$ – $(N-2)$. Залежність $\Delta\alpha(t)$ буде інваріантна до кута нахилу підпису, але деякі неточності будуть мати місце через квадратну координатну сітку.

Інваріантність залежності $\Delta\alpha(t)$ до просторового та часового масштабу можна забезпечити її подальшою нормалізацією.

Третім динамічним параметром підпису оберемо тиск пера на графічний планшет $Z(t)$. Залежність $Z(t)$ є інваріантною до кута нахилу підпису. Інваріантність залежності $Z(t)$ до часового масштабу можна забезпечити її подальшою нормалізацією. Крім того, є гіпотеза, що можна буде забезпечити деяку інваріантність залежності $Z(t)$ до емоційного та фізичного стану людини при її подальшій нормалізації. Імовірно, що у спокійному і розслабленому стані середній тиск на перо буде менший, ніж у емоційно збудженому і напруженому стані. Але це потребує додаткових досліджень.

Таким чином, обрано три динамічних параметри: 1) $l(t)$ – відстань між сусідніми дискретними точками підпису, 2) $\Delta\alpha(t)$ – різниця кутів нахилу двох сусідніх відрізків, що з'єднують дискретні точки підпису, 3) $Z(t)$ – тиск пера на графічний планшет. Ці динамічні параметри характеризують підпис як багатопараметричний процес, який буде розпізнаватися спайкінговою нейронною мережею. Розглянемо як здійснюється нормалізація цих динамічних параметрів.

Нормалізація динамічних параметрів підпису.

Нормалізація динамічних параметрів підпису має здійснюватись як по амплітуді, так і по часу. Точніше, по часу має відбуватись приведення до єдиного часового інтервалу. Якщо конкретна реалізація підпису тривала час T , а необхідно приводити всі підписи до єдиного інтервалу T_0 , то потрібно відліки конкретного динамічного параметру подавати на вхід спайкінгової нейронної мережі не з кроком Δt дискретизації сигналів у планшеті, а з новим часовим кроком:

$$\Delta t_0 = \frac{T_0}{T} \cdot \Delta t, \quad (1/2)$$

Нормалізація двох із обраних динамічних параметрів $l(t)$ та $z(t)$ по амплітуді буде здійснюватись за формулами:

$$\bar{l}_i = (l_i - l_{min}) / (l_{max} - l_{min}). \quad (1.3)$$

$$\bar{z}_i = (z_i - z_{min}) / (z_{max} - z_{min}). \quad (1.4)$$

де \bar{l}_i та \bar{z}_i – нормалізовані значення l_i та z_i ; l_{min} та z_{min} – мінімальні значення l_i та z_i ; l_{max} та z_{max} – максимальні значення l_i та z_i відповідно.

Динамічний параметр $\Delta\alpha(t)$ не потребує нормалізації по амплітуді, тому що він вже нормалізований (є кут) і завжди міняється в діапазоні $[-\pi, +\pi]$ радіан.

Структура спайкінгової нейронної мережі.

У запропонованому методі Online верифікації підпису варто використовувати саме спайкінгові нейронні мережі [17,18], тому що вони дозволяють розпізнавати динамічні сигнали безпосередньо, тобто без їх попереднього перетворення у вектор статичних ознак. Також вони мають і інші переваги. Всі переваги спайкінгових нейронних мереж перед традиційними нейронними мережами обумовлені їхньою нейроморфністю (схожістю з мережами біологічних нейронів) і формулюються так:

- 1) розпізнавання динамічних образів (мова, рухомі зображення, кардіограми, динамічні параметри підпису та ін.) без їх попереднього перетворення у вектор статичних ознак;
- 2) багатозадачність (інформація про вхідні потоки циркулює в рекурентній нейронній мережі і на вихід одночасно можуть бути подані результати різних завдань за допомогою різних груп зчитувальних нейронів, навчених виконанню того або іншого завдання);
- 3) розпізнавання з передбаченням (будь-який динамічний процес може бути розпізнаний навіть за неповною інформацією про нього, тобто навіть раніше, ніж він завершиться);
- 4) простота процедури навчання (навчаються не всі нейрони мережі, а лише вихідні зчитувальні нейрони);
- 5) підвищена продуктивність обробки інформації і завадостійкість завдяки частотно-імпульсному представленню інформації.

Для Online верифікації підпису за основу було взято структуру спайкінгової нейронної мережі, розроблену в [17]. Модифіковану структуру спайкінгової нейронної мережі для Online верифікації та розпізнавання підписів зображено на рис. 4. Вхідні спайкінгові нейрони можна побудувати, наприклад, за моделлю LIF [19]. На вхідні нейрони подаються нормалізовані динамічні параметри підпису $\bar{l}(t)$,

$\Delta\alpha(t)$ та $\bar{p}(t)$, які перетворюються вхідними нейронами у відповідні їм імпульсні послідовності як показано на рис. 5.

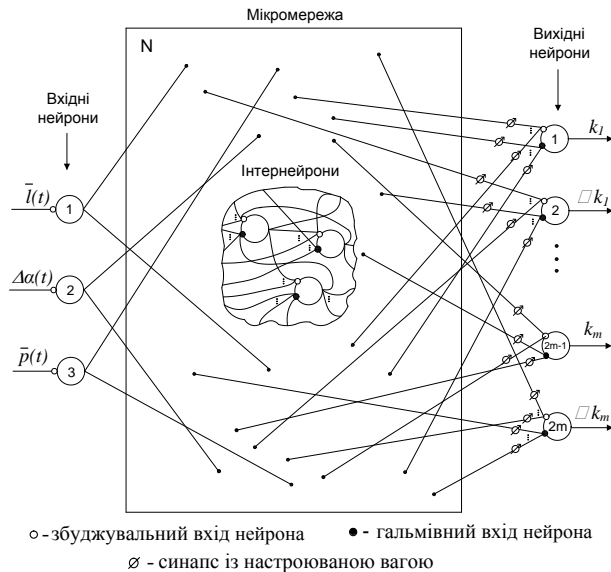


Рисунок 4 – Структура спайкінгової нейронної мережі для Online верифікації та розпізнавання підписів

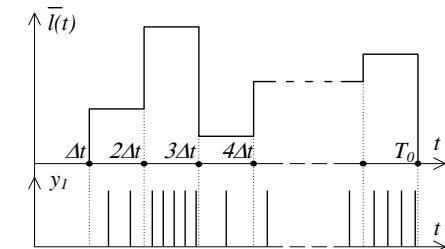


Рисунок 5 – Перетворення параметру $\bar{l}(t)$ вхідним спайкінговим нейроном у його вихідний імпульсний сигнал $y_l(t)$

Метод Online верифікації та розпізнавання підписів на основі спайкінгової нейронної мережі.

Враховуючи структуру спайкінгової нейронної мережі згідно з рис. 4, а також розроблене в [20] правило навчання вихідних нейронів спайкінгової нейронної мережі, принципи функціонування і математичні моделі спайкінгових нейронів з роздільними входами [17], можна сформулювати метод Online верифікації та розпізнавання підписів з використанням спайкінгової нейронної мережі.

Цей метод полягає в такому:

1. Створити (згенерувати) рекурентну спайкінгову нейронну мережу, складену з інтернейронів, в кількості не менше $N \geq 15m$, де m – кількість еталонних образів (в даному випадку підписів), які мережа повинна «запам'ятати». З'єднання нейронів в мережі виконати за даними нейрофізіологічних досліджень [21]. Ваги зв'язків нейронів вибрати невеликими випадковими.

2. Сформувати 3 вхідних нейрони по кількості динамічних параметрів підпису. З'єднати кожен з них випадковим чином з не менше, ніж q нейронами мікромережі ($n < q < N$). Ваги зв'язків вибрати випадковими.

3. Сформувати $2m$ вихідних нейронів (по 2 на кожен еталонний підпис, один – для індикації справжнього підпису, а другий – для індикації підробленого підпису). З'єднати кожен з них випадково з не менше, ніж s нейронами мікромережі ($m < s < N$). Ваги зв'язків вибрати випадковими.

4. Застосувати алгоритм навчання, описаний в [20]. При цьому підстроюються лише ваги зв'язків кожного з $2m$ вихідних нейронів. Як ідеальний цільовий вихід $k_i(t)$ може виступати імпульсний сигнал з постійною (максимальною) частотою імпульсів f_{max} , що дорівнює лабільності вихідного нейрона. Фактичний вихідний сигнал $f(x(t))$ буде послідовністю імпульсів з довільними часовими проміжками між ними. Вхідні сигнали мережі тим ближчі до еталонного образу, чим більша середня за період розпізнавання частота імпульсів вихідного нейрона, що відповідає цьому еталонному образу.

5. Подати на вхід мережі досліджуваний 3-вимірний сигнал (3 нормалізовані динамічні характеристики підпису) тривалістю T_0 і зафіксувати, який з $2m$ вихідних нейронів видаватиме максимальну кількість імпульсів протягом T_0 . Саме цей нейрон і визначає еталонний образ, якому максимально відповідають вхідні сигнали мережі. Як оцінка міри схожості вхідних сигналів і еталонного образу може використовуватися відношення середньої за період T_0 частоти імпульсів вихідного нейрона до f_{max} .

Переваги запропонованого методу динамічної верифікації підпису

Запропонований метод має такі переваги:

1) обрані три динамічних параметри підпису: $l(t)$, $\Delta\alpha(t)$, $z(t)$ є інваріантними до кута нахилу підпису, а після їх нормалізації – ще й до просторового та часового масштабів підпису;

2) динамічні параметри підпису подаються на спайкінгову нейронну мережу для розпізнавання одночасно у вигляді часових рядів без попереднього перетворення у вектор статичних ознак, що, з

одного боку, спрощує метод завдяки відсутності складних обчислювальних процедур перетворення, а з іншого боку, перешкоджає втраті корисної інформації, а тому – підвищує точність і достовірність верифікації та розпізнавання підписів (особливо при розпізнаванні підроблених підписів, які сильно корельовані з оригіналами);

3) результат верифікації та розпізнавання може бути оцінений ще до завершення періоду дії самих динамічних параметрів підпису по інтенсивній імпульсації на відповідному виході (розпізнавання з передбаченням), що підвищує швидкодію;

4) використовується нейронна мережа має неважку процедуру навчання, причому навчаються не всі нейрони мережі, а тільки вихідні;

5) при необхідності додавання нових підписів не потрібно перенавчати всю мережу повністю, а достатньо додати кілька вихідних нейронів і навчити тільки їх зв'язки;

6) підвищено завадостійкість за рахунок представлення інформації в частотно-імпульсній формі.

Висновки

1. У статті запропоновано метод Online верифікації та розпізнавання підписів на основі спайкінгової нейронної мережі. Структура мережі є оригінальною та використовує спайкінгові нейрони з розділними входами збудження та гальмування [17]. Особливістю структури мережі є також використання по 2 вихідних нейронів для кожного підпису, один – для індикації справжнього підпису, а другий – для індикації підробленого підпису.

2. Для представлення підпису обгрунтовано вибір таких трьох динамічних параметрів підпису: 1) $l(t)$ - відстань між сусідніми дискретними точками підпису, 2) $\Delta\alpha(t)$ – різниця кутів нахилу двох сусідніх відрізків, що з'єднують дискретні точки підпису, 3) $z(t)$ – тиск пера на графічний планшет. Ці динамічні параметри є інваріантними до кута нахилу підпису, а після їх нормалізації – ще й до просторового та часового масштабів підпису;

3. Обрані динамічні параметри підпису подаються на спайкінгову нейронну мережу для розпізнавання одночасно без попереднього перетворення у вектор статичних ознак, що спрощує метод завдяки відсутності складних обчислювальних процедур перетворення, а також перешкоджає втраті корисної інформації, а тому – підвищує точність і достовірність верифікації та розпізнавання підписів (особливо при розпізнаванні підроблених підписів, які сильно корельовані з оригіналами);

3. Запропонована спайкінгова нейронна мережа має просту процедуру навчання. Крім цього, при необхідності додавання нових підписів не потрібно перенавчати всю мережу повністю, а достатньо додати кілька вихідних нейронів і навчити тільки їхні зв'язки.

Список літератури

- [1] I. M. El-Henawy, M. Z. Rashad, O. Nomir, and K. Ahmed, «Online Signature Verification: State of the art», *International Journal of Computers & Technology*, Volume 4, No. 2, March-April, 2013.
- [2] M. Diaz, M. A. Ferrer, D. Impedovo, M. I. Malik, G. Pirlo, and R. Plamondon, «A Perspective Analysis of Handwritten Signature Technology», *ACM Comput. Surv.*, Vol. 51, No. 6, Article 117, January 2019.
- [3] Т. Ю. Дорошенко, и Е. Ю. Костюченко, «Система аутентификации на основе динамики рукописной подписи», *Доклады ТУСУР*, 2014, № 2(32), с. 219-223.
- [4] Maged M. M. Fahmy, «Online handwritten signature verification system based on DWT features extraction and neural network classification», *Ain Shams Engineering Journal*, 2010, 1, pp. 59–70.
- [5] И. А. Сорокин, «Формирование системы признаков для идентификации личности по динамике воспроизведения подписи», автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук, Пензенский гос. ун-т, Пенза, 2005.
- [6] N. Houmani, and S. Garcia-Salicetti, «On hunting animals of the biometric menagerie for online signature», *PLoS ONE*, 11, 4, 2016.
- [7] S. V. Nalwa, «Automatic On-Line Signature Verification», *Proceedings of the IEEE*, Vol. 85, № 2, 1997.
- [8] V. Iranmanesh, S. M. S. Ahmad, W. A. W. Adnan, S. Yussof, O. A. Arigbabu, and F. L. Malallah, «Online Handwritten Signature Verification Using Neural Network Classifier Based on Principal Component Analysis», *Hindawi Publishing Corporation, The Scientific World Journal*, Volume 2014, Article ID 381469.
- [9] N. Houmani, S. Garcia-Salicetti, and B. Dorizzi, «On assessing the robustness of pen coordinates, pen pressure and pen inclination to time variability with personal entropy», *In IEEE 3rd Int. Conf. on Biometrics: Theory, Applications, and Systems*, 1–6, 2009.
- [10] S. A. Farimani, and M. V. Jahan, «An HMM for online signature verification based on velocity and hand movement directions», *In 6th Iranian Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems*, 2018, pp. 205–209.

- [11] C. Gruber, T. Gruber, S. Krinninger, and B. Sick, «Online signature verification with support vector machines based on LCSS kernel functions», *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B: Cybernetics*, 40, 4, 2010, pp. 1088–1100.
- [12] A. McCabe, J. Trevathan, and W. Read, «Neural Network-based Handwritten Signature Verification», *Journal of Computers*, vol. 3, No. 8, August 2008.
- [13] Weixin Yang, Lianwen Jin, and Manfei Liu, «Chinese character-level writer identification using path signature feature, dropstroke and deep CNN», *In 2015 13th International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*, pp. 546-550, IEEE, 2015.
- [14] R. Tolosana, R. Vera-Rodriguez, J. Fierrez, and J. Ortega-Garcia, «DeepSign: Deep On-Line Signature Verification», *Preprint in IEEE Transactions on Biometrics Behavior and Identity Science*, January 2021.
- [15] M. A. Aoun, and M. Boukadoum, «Learning algorithm and neurocomputing architecture for NDS Neurons», *2014 IEEE 13th International Conference on Cognitive Informatics and Cognitive Computing*, London, UK, 2014, pp. 126-132.
- [16] M. M. Fard, M. M. Fard, and N. Mozayani, «A new on-line signature verification by Spatio-Temporal neural network», *2008 IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics*, Taipei, Taiwan, 2008, pp. 233-235, doi: 10.1109/ISI.2008.4565065.
- [17] O. K. Kolesnytskyj, I. V. Bokotsey, and S. S. Yaremchuk, «Optoelectronic Implementation of Pulsed Neurons and Neural Networks Using Bispin-Devices», *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*, 2010, Vol.19, № 2, pp. 154-165.
- [18] O. K. Kolesnytskyj, V. V. Kutsman, K. Skorupski, and M. Arshidinova, «Neurocomputer architecture based on spiking neural network and its optoelectronic implementation», *Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019*, 1117609 (6 November 2019); doi: 10.1117/12.2536607.
- [19] W. Gerstner, and W. Kistler, *Spiking Neuron Models: Single Neurons, Populations, Plasticity*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. doi:10.1017/CBO9780511815706.
- [20] O. K. Колесницкий, and Самра Муавия Хассан Хамо, «Метод распознавания многомерных временных рядов при помощи импульсных нейронных сетей», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, 2006, № 2(6), с. 86-93.
- [21] W. Maass, «Networks of spiking neurons: the third generation of neural network models», *Neural Networks*, 10:1659-1671, 1997.

Стаття надійшла: 22.02.2021.

References

- [1] I. M. El-Henawy, M. Z. Rashad, O. Nomir, and K. Ahmed, «Online Signature Verification: State of the art», *International Journal of Computers & Technology*, Volume 4, No. 2, March-April, 2013.
- [2] M. Diaz, M. A. Ferrer, D. Impedovo, M. I. Malik, G. Pirlo, and R. Plamondon, «A Perspective Analysis of Handwritten Signature Technology», *ACM Comput. Surv.*, Vol. 51, No. 6, Article 117, January 2019.
- [3] T. Ju. Doroshenko, and E. Ju. Kostjuchenko, «Sistema autentifikacii na osnove dinamiki rukopisnoj podpisi», *Doklady TUSUR*, 2014, № 2(32), pp. 219-223.
- [4] Maged M. M. Fahmy, «Online handwritten signature verification system based on DWT features extraction and neural network classification», *Ain Shams Engineering Journal*, 2010, 1, pp. 59–70.
- [5] I. A. Sorokin, «Formirovanie sistemy priznakov dlja identifikacii lichnosti po dinamike vosproizvedeniya podpisi», avtoref. dis. na soiskanie uch. stepeni kand. tehn. nauk, Penzenskij gos. un-t, Penza, 2005.
- [6] N. Houmani, and S. Garcia-Salicetti, «On hunting animals of the biometric menagerie for online signature», *PLoS ONE*, 11, 4, 2016.
- [7] S. V. Nalwa, «Automatic On-Line Signature Verification», *Proceedings of the IEEE*, Vol. 85, № 2, 1997.
- [8] V. Iranmanesh, S. M. S. Ahmad, W. A. W. Adnan, S. Yussof, O. A. Arigbabu, and F. L. Malallah, «Online Handwritten Signature Verification Using Neural Network Classifier Based on Principal Component Analysis», *Hindawi Publishing Corporation, The Scientific World Journal*, Volume 2014, Article ID 381469.
- [9] N. Houmani, S. Garcia-Salicetti, and B. Dorizzi, «On assessing the robustness of pen coordinates, pen pressure and pen inclination to time variability with personal entropy», *In IEEE 3rd Int. Conf. on Biometrics: Theory, Applications, and Systems*, 1–6, 2009.
- [10] S. A. Farimani, and M. V. Jahan, «An HMM for online signature verification based on velocity and hand movement directions», *In 6th Iranian Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems*, 2018, pp. 205–209.

- [11] C. Gruber, T. Gruber, S. Krinninger, and B. Sick, «Online signature verification with support vector machines based on LCSS kernel functions», *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B: Cybernetics*, 40, 4, 2010, pp. 1088–1100.
- [12] A. McCabe, J. Trevathan, and W. Read, «Neural Network-based Handwritten Signature Verification», *Journal of Computers*, vol. 3, № 8, August 2008.
- [13] Weixin Yang, Lianwen Jin, and Manfei Liu, «Chinese character-level writer identification using path signature feature, dropstroke and deep CNN», *In 2015 13th International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*, pp. 546-550, IEEE, 2015.
- [14] R. Tolosana, R. Vera-Rodriguez, J. Fierrez, and J. Ortega-Garcia, «DeepSign: Deep On-Line Signature Verification», *Preprint in IEEE Transactions on Biometrics Behavior and Identity Science*, January 2021.
- [15] M. A. Aoun, and M. Boukadoum, «Learning algorithm and neurocomputing architecture for NDS Neurons», *2014 IEEE 13th International Conference on Cognitive Informatics and Cognitive Computing*, London, UK, 2014, pp. 126–132.
- [16] M. M. Fard, M. M. Fard, and N. Mozayani, «A new on-line signature verification by Spatio-Temporal neural network», *2008 IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics*, Taipei, Taiwan, 2008, pp. 233–235, doi: 10.1109/ISI.2008.4565065.
- [17] O. K. Kolesnytskyj, I. V. Bokotsey, and S. S. Yaremchuk, «Optoelectronic Implementation of Pulsed Neurons and Neural Networks Using Bispin-Devices», *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*, 2010, Vol. 19, № 2, pp. 154–165.
- [18] O. K. Kolesnytskyj, V. V. Kutsman, K. Skorupski, and M. Arshidinova, «Neurocomputer architecture based on spiking neural network and its optoelectronic implementation», *Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019*, 1117609 (6 November 2019), doi: 10.1117/12.2536607.
- [19] W. Gerstner, and W. Kistler, *Spiking Neuron Models: Single Neurons, Populations, Plasticity*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002, doi:10.1017/CBO9780511815706.
- [20] O. K. Kolesnytskyj, and Samra Muavija Hassan Hamo, «Metod rozpoznaniya mnogomernyh vremennyh rjadov pri pomoshhi impul'snyh nejronnyh setej», *Informacijni tehnologii ta komp'juterna inzhenerija*, 2006, № 2(6), pp. 86–93.
- [21] W. Maass, «Networks of spiking neurons: the third generation of neural network models», *Neural Networks*, 10:1659-1671, 1997.

Відомості про авторів

Куцман Владислав Вікторович – аспірант кафедри комп'ютерних наук, інженер-програміст ТОВ «УЛФ-ФІНАНС».

Колесницький Олег Костянтинович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук.

В. В. Куцман, О. К. Колесницький

ВЕРИФИКАЦИЯ И РАСПОЗНАВАНИЕ ПОДПИСИ КАК МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ СПАЙКИНГОВОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Винницкий национальный технический университет, Винница

V. V. Kutsman, O. K. Kolesnytskyj

SIGNATURE VERIFICATION AND RECOGNITION AS A MULTIPARAMETRIC PROCESS BASED ON A SPIKING NEURAL NETWORK

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia

УДК 00462

А. М. Мельник, М. П. Дивак, Р. М. Пасічник

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ НЕАКТУАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В СЕРВІСНО-ОРІЄНТОВАНИХ КОРПОРАТИВНИХ СИСТЕМАХ НА ПРИКЛАДІ СИСТЕМ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ҐРУНТІВ

Західноукраїнський національний університет, Тернопіль

Анотація. У статті розглянуто важливу науково-прикладну задачу розробки методу виявлення неактуальної інформації, яка є актуальним напрямком розвитку та реалізації веб-орієнтованих інформаційних систем. Проведено аналіз сучасних методів та засобів оцінки неактуальної та недостовірної інформації в сервісно-орієнтованих корпоративних системах та виділено основні проблемні напрямки, які виникають в процесі їх функціонування. Розроблено метод фільтрування даних на основі метрики для оцінки актуальності інформації. Наведено приклад застосування метрики для оцінювання результатів використання різних сервісів аналізу якості ґрунтів та ґрунтових вод. Основними результатами досліджень, наведеними в статті є: метрика оцінки актуальності інформації, яка отримана з використанням сервісів в корпоративних інформаційних системах; метод фільтрування даних на основі метрики оцінки актуальності інформації в рамках досліджуваної предметної області. Особливістю розробленого методу є те, що він може бути реалізований як програмна надбудова до сервісно-орієнтованих інформаційних систем. Використання запропонованих інтелектуальних методів обробки даних, які отримують з використанням сервісів, дозволить підвищити ефективність аналізу неактуальної інформації та скоротить час визначення нерелевантних джерел її надання.

Ключові слова: веб-сервіси, API інтерфейси, неактуальна інформація, сервісно-орієнтована архітектура.

Аннотация. В статье рассмотрены важную научно-прикладную задачу разработки метода выявления неактуальной информации, является актуальным направлением развития и реализации веб-ориентированных информационных систем. Проведен анализ современных методов и средств оценки неактуальной и недостоверной информации в сервисно-ориентированных корпоративных системах и выделены основные проблемные направления, которые возникают в процессе их функционирования. Разработан метод фильтрации данных на основе метрики для оценки актуальности информации. Приведен пример применения метрики для оценки результатов использования различных сервисов анализа качества почв и грунтовых вод. Основными результатами исследований, приведенным в статье являются: метрика оценки актуальности информации, полученной с использованием сервисов в корпоративных информационных системах; метод фильтрации данных на основе метрики оценки актуальности информации в рамках исследуемой предметной области. Особенностью разработанного метода является то, что он может быть реализован как программная надстройка к сервисно-ориентированным информационным системам. Использование предложенных интеллектуальных методов обработки данных, получают с использованием сервисов, достаточно повысит эффективность анализа неактуальной информации и сократит время определения нежелательных источников ее предоставления.

Ключевые слова: веб-сервисы, API интерфейсы, неактуальная информация, сервисно-ориентированная архитектура.

Abstract. The article considers an important scientific and applied task of developing a method for detecting irrelevant information, which is an important area of development and implementation of web-based information systems. The analysis of modern methods and means of evaluation of irrelevant and unreliable information in service-oriented corporate systems is carried out and the main problem areas that arise in the process of their functioning are identified. A method of filtering data based on metrics to assess the relevance of information has been developed. An example of the application of metrics for evaluating the results of using various services for the analysis of soil and groundwater quality. The main results of research presented in the article are: metrics for assessing the relevance of information obtained using services in corporate information systems; method of data filtering based on the metrics of assessing the relevance of information within the studied subject area. The peculiarity of the developed method is that it can be implemented as a software add-on to service-oriented information systems. The use of the proposed intelligent methods of data processing, which are obtained with the use of services, will increase the efficiency of analysis of irrelevant information and reduce the time to identify irrelevant sources of its provision.

Key words: web services, API interfaces, nonrelevant information, outdated information, service-oriented architecture.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-50-1-45-54>.

Вступ

В сучасному інформаційно-комунікаційному світі дуже важливим питанням є виявлення неактуальної інформації [1-4]. Цьому питанню присвячено багаточисленні науково-прикладні дослідження, а реалізація засобів виявлення такого типу інформації – актуальний напрямок розвитку веб-орієнтованих інформаційних систем [3,5-7].

Зростання доступності інформації, зокрема через використання різноманітних сервісів, викликає необхідність агрегування інформації шляхом фільтрації та ранжування джерел з яких вона отримується, виходячи із цілей кінцевого користувача [8,9].

В останні роки багато досліджень зосереджено на оцінці якості та зручності сервісів, а саме, як вони описуються, узгоджуються та формуються, однак недостатньо уваги приділяється контекстному аналізу самих сервісів, фільтруванню джерел, які можуть надавати неактуальну або недостовірну інформацію, що дуже важливо для підвищення ефективності та коректності структури сервісів та особливостей їх використання [10-14].

Велику частину інформаційних технологій займають корпоративні інформаційні системи [12,15-18]. Розвиток таких систем пов'язаний з автоматизацією практично усіх напрямків людської діяльності. Усе це сприяло розвитку інструментальних та концептуальних засобів для реалізації та підтримки бізнес-систем [18-22].

Одним із таких концептуальних засобів є сервісно-орієнтована архітектура (COA) [13,23-25]. В корпоративних системах сервіси - це прикладне програмне забезпечення, яке забезпечує комунікаційний зв'язок між клієнтами та надавачами послуг. Бізнес процеси в такій програмній архітектурі можна представити сервісами в сервісно-орієнтованій архітектурі [26-31].

Актуальність

Видобування інформації через використання сервісів є дуже важливим завданням, яке дозволяє серед інших можливостей – агрегувати інформацію, фільтрувати та ранжування відповідно до цілей користувача засобами веб-сервісів (на основі SOAP, або REST) або з використанням API методів [4,7,21].

Велика кількість доступних послуг та простих у використанні композиційних інструментів сприяють появі неактуальної інформації на етапі формування послуги та через недосконалу організацію комунікації організованих послуг [4,5,7,32].

Проблема появи неактуальної інформації на етапі формування послуги в основному пов'язані з розробниками та користувачами, які створюють композитні послуги [4-7,23,24]. Проблема комунікації складених послуг є критичною для споживачів послуг, які страждають від небажаних результатів, які надають системи в процесі врахування часових характеристик [5,9,11].

Ці питання стають більш актуальними, коли існує багато типів та обсягів даних, що надаються службами, а в Інтернеті та хмарному середовищі такі дані та послуги мають різні обмеження контексту та якості [7-10]. Невірне опрацювання таких даних може спричинити зниження якості надання таких послуг [4-6]. Розробка методів та програмних засобів виявлення неактуальної інформації в сервісно-орієнтованих системах є актуальним напрямком наукових досліджень.

Мета

Метою статті є підвищення ефективності оцінки неактуальної інформації, отриманої на основі сервісів в сервісно-орієнтованих корпоративних системах шляхом розробки метрики оцінки актуальності інформації та відповідного методу фільтрування даних.

Для досягнення поставленої у роботі мети необхідно розв'язати такі завдання:

- провести аналіз сучасних методів та засобів оцінки неактуальної та недостовірної інформації в сервісно-орієнтованих корпоративних системах та виділити основні проблемні напрямки, які виникають в процесі їх діяльності;
- запропонувати метрику оцінки актуальності інформації, яка отримана з використанням сервісів в корпоративних інформаційних системах;
- запропонувати метод фільтрування даних на основі метрики оцінки актуальності інформації в рамках досліджуваної предметної області;
- здійснити експериментальні дослідження запропонованих в роботі методів та засобів, оцінити їх ефективність.
- сформулювати напрямок подальших наукових досліджень, виходячи із отриманих у роботі напрацювань та результатів.

Задачі

1. Аналіз проблем опрацювання неактуальної та недостовірної інформації в сервісно-орієнтованих корпоративних системах.
2. Розробка метрики оцінки актуальності інформації в сервісно-орієнтованих системах.
3. Реалізація методу фільтрування даних на основі метрики оцінки актуальності інформації.
4. Проведення експериментальних досліджень для підтвердження ефективності запропонованих методів та засобів на прикладі систем оцінювання якості ґрунтів.

Розв'язання задач

В сучасних умовах при використанні зовнішніх сервісів важливим питанням є оцінка актуальності інформації, її контекстної складової, яка пов'язана з використанням сервісів (наприклад, володіння даними), що заважає фільтрувати неактуальну інформацію, з якою розробники та прості користувачі стикаються при виборі необхідних джерел даних [22,23].

На рис. 1 представлено структуру інформаційних потоків при формуванні сервісних послуг на етапі проектування, реалізації та використання.

У всіх зазначених потоках може існувати нерелевантна інформація. З неактуальною інформацією під час складання служби стикається здебільшого розробник, який спирається на величезні джерела інформації для побудови складених сервісів. Розробник сприймає цю проблему, коли інформація про сервіси та дані, що повертаються інструментом композиції сервісів, є непорівнянними або неповними. Під час виконання сервісних запитів простий користувач стикається з нерелевантними інформаційними проблемами, коли дані повертаються інтенсивно, а сервіси не можна порівняти або адекватно оцінити [24, 25].

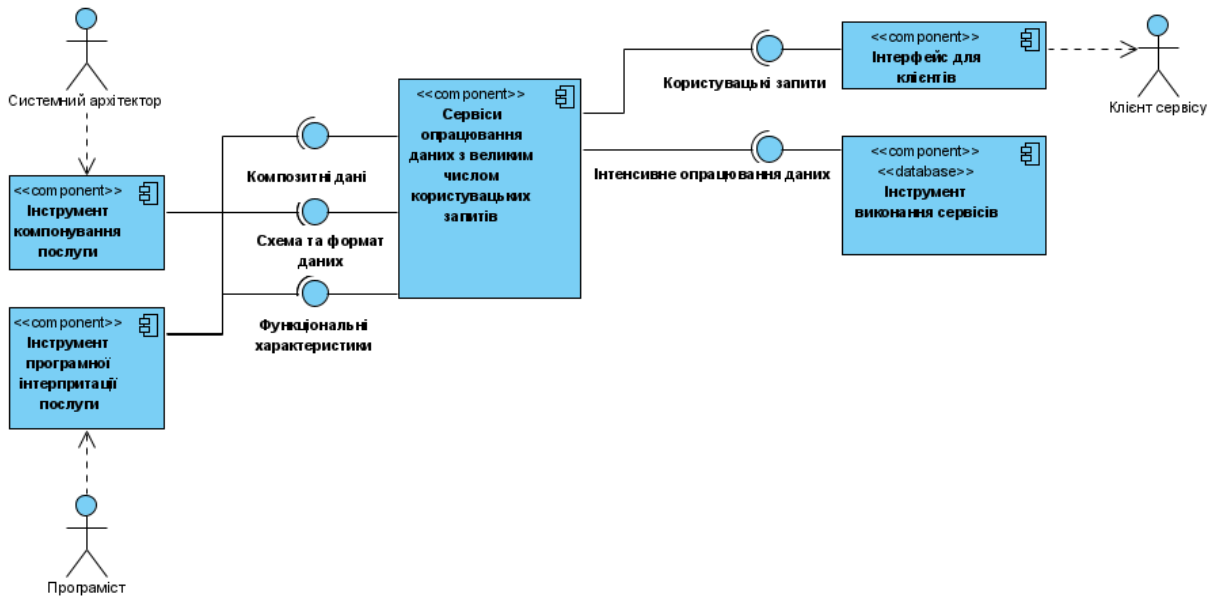


Рисунок 1 – Структура інформаційних потоків при формуванні сервісних послуг

У таблиці 1 наведено деякі приклади неактуальної інформації. Коли ми розглядаємо сценарії складання та виконання послуг у масштабі Інтернету та хмарних служб, в яких послуги надаються різними постачальниками, нерелевантна інформація, пов'язана з цими потоками зростає в багатьох аспектах завдяки різноманітності та складності сервісів та їх описів.

Таблиця 1 – Випадки неактуальної інформації

Причина	Наслідок
Деякі системи не надають опису структур даних	Неструктурований опис даних
Різні програмно-технічні специфікації	Опис різних версій специфікацій, неоднакова семантика при інтерпретації запитів
Неможливість отримати контекст безпосередньо із сервісу	Немає API для оцінки якості
Нерелевантне доменне ім'я, відсутність верифікації довіреної DNS зони	Відсутність можливості визначення достовірності джерела

Наявні нерелевантні інформаційні проблеми при складанні та виконанні сервісів можна вирішити, використовуючи декілька різних методів, наприклад, семантичний аналіз, аналіз даних та аналіз подібності [22,25]. У даній роботі основна увага приділяється питанням оцінки та обміну актуальною інформацією та контекстом інформації про сервіси. Контекстна інформація визначає ситуацію, за якої сервіси формуються та можуть використовуватися, а дані із запитів можуть бути опрацьовані, тоді як буде доведена ефективність джерела даних, яке використовується при формуванні сервісів. Розробка уніфікованого підходу, який поєднає контекстну та якісну складову інформації, отриманої із використанням сервісів дозволить підвищити як якість надання сервісних послуг, так і знизить ймовірність виникнення помилок в процесі розробки інших систем [25-28].

Метрика оцінки актуальності інформації в сервісно-орієнтованих системах

Досліджуючи якість та достовірність інформації, виділено основні характеристики, які можна застосувати для оцінки актуальності інформації про сервіси. Пропонується базову множину показників, які будуть використані для демонстрації ефективності методу оцінки неактуальної інформації в корпоративних інформаційних системах. Розглянемо детальніше ці показники.

Інтерпретованість (I_p) – визначає наявність метаданих та документації для правильної інтерпретації (функціональних та нефункціональних) властивостей сервісів. Ця метрика дозволяє побудувати систему зважених коефіцієнтів для класифікації службових документів, які використовуються при реалізації

сервісів. У таблиці 2 представлено опис властивостей, які використовуються для оцінки інтерпретованості.

Таблиця 2 – Типи показників та інформації, що використовується для оцінки інтерпретованості

Типе (Тип)	Інформація про сервіс	Приклади
P (Патерн)	Сервіси та схеми їх формування та використання	Web Services Description Language, WSDL, умови запиту та відповіді, моделі даних
D (Документація)	Документи	Опис методів API
Nh	Нефункціональні властивості	QoS, локація, локалізація, доступність, надійність, відповідь, час відгуку, актуальність відповіді ресурсу
Fd	Першоджерело	Версії патернів, нефункціональні характеристики
Rs	Достовірність джерела	Довірена доменна зона, зареєстрований програмний продукт в сертифікованому центрі

Виходячи із представлених типів інформації (таблиця 2), показник інтерпретованості I_p оцінюємо таким співвідношенням:

$$I_p = \frac{\sum estimation(type_i) \times v_i}{\sum v_i} \quad (1)$$

де $v(type_i) \in [0,1]$, $\sum v(type_i) = 1$ та $estimation(type_i) \in [0,1]$ – вагові коефіцієнти, які визначають значимість показників для оцінки інтерпретованості та коефіцієнти, які визначають ступінь доступності інформації, відповідно для кожного типу із набору $type_i \in \{P, D, Nh, Fd, Rs\}$.

Оцінка $estimation(type_i)$ може бути отримана з використанням спеціальних програмних засобів (парсерів, аналізаторів), які збирають та класифікують інформацію такого аналізованого типу.

Іншими важливими показниками, від яких залежить актуальність інформації, яку отримуємо на основі сервісів, є повнота F та своєчасність T . Показник повноти (2) визначає відношення між отриманими нефункціональними показниками Nh_p та їх мінімальним визначеним набором Nh_{min} .

Показник Nh_{min} включає всі показники Nh_p , які вважаються релевантними для вибору сервісу, який надається компанією чи організацією, яка, своєю чергою, є власником інформаційної системи. Наприклад, $Nh_{min} \{A, R, An, Tm\}$, де A – доступність, R – надійність, An – відповідь, Tm – тривалість отримання відповіді.

$$F = 1 - \frac{\|Nh_p \cap Nh_{min}\|}{Nh_{min}} \quad (2)$$

Показник своєчасності T визначає наскільки актуальним є опис нефункціональних характеристик Nh . Показник своєчасності (3) визначається як відношення перевірених часових характеристик T_{exp} та їх імплементованих значень T_{norm} :

$$T = 1 - \min\left(\frac{T_{exp}}{T_{norm}}, 1\right) \quad (3)$$

Метод фільтрування даних на основі метрики оцінки актуальності інформації

В сучасних корпоративних системах, які мають власні API для надання сервісів зовнішнім клієнтам не підтримують фільтрацію інформації про сервіси на основі показників якості, тому методи вибору надавачів сервісів повинні містити повну та відфільтровану службу інформацію.

На основі метрики оцінки актуальності інформації можна сформувавши метод фільтрування даних, який базується на двох основних типах описів: на основі всіх службових документів або на основі описів нефункціональних характеристик Nh .

Для реалізації методу фільтрування даних, за допомогою метрики необхідно встановити зважені коефіцієнти та визначити коефіцієнти для різних типів службових документів. Встановлення цих коефіцієнтів можна здійснити, наприклад, на основі службової інформації, яка надається власником сервісної системи, але зважені коефіцієнти для нефункціональних властивостей будуть залежати від сформованого запиту [15,16]. На рис. 2 представлено процедуру визначення зважених коефіцієнтів для нефункціональних властивостей.

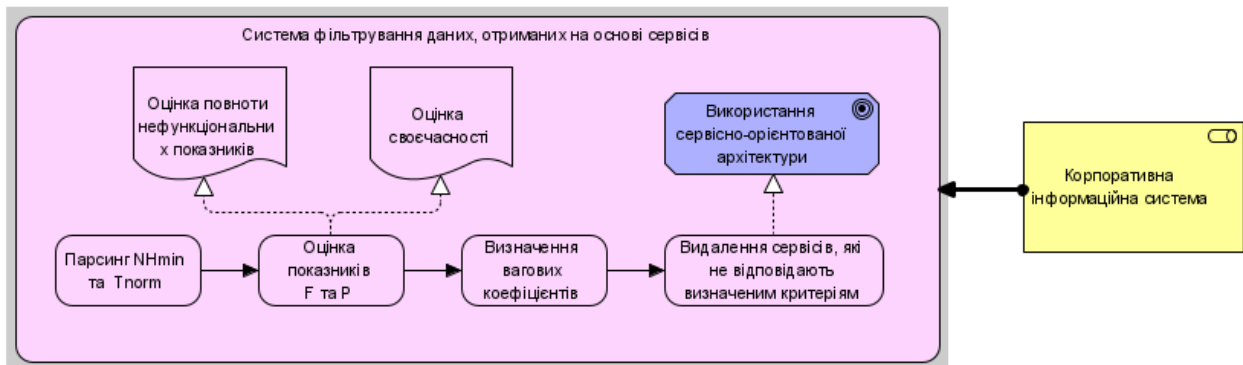


Рисунок 2 – Схема методу фільтрування даних, на основі сервісів

Як бачимо з наведеної схеми, метод фільтрування даних передбачає такі етапи:

- на основі показників оцінки актуальності інформації, які сформовані в метриці інтерпретованості I_p необхідно встановити вагові коефіцієнти та оцінити кожен тип (P, D, Nh, Fd, Rs) показників для кожного сервісу;
- встановлення залежності між інформацією, яка надана корпоративною системою, та показниками, які отримані на основі конкретних запитів;
- на наступному етапі, виходячи із сформованого набору запитів необхідно визначити показники $Nh_{min} \{A, R, An, Tm\}$ та T_{norm} ;
- проведення оцінки на основі метрики оцінки актуальності інформації (показники повноти та своєчасності);
- встановлення порогів для фільтрації нерелевантних джерел надання інформації через сервіси;
- фільтрація сервісів, інформація з яких знаходиться нижче встановленої межі.

Метод фільтрування даних доцільно використовувати перед вибором власника сервісів (корпоративної інформаційної системи) з метою якісного формування комунікаційної складової для отримання лише актуальної та достовірної інформації.

Експериментальні дослідження

Для підтвердження ефективності запропонованих методів було проведено ряд експериментальних досліджень. Суть експериментів полягала у визначенні неактуальних сервісів на основі інформації, яка може бути отримана через зовнішні API інтерфейси, які надають великі відкриті системи на ринку оцінки якості ґрунтів.

Вибір даної предметної області в якості експериментальних досліджень обумовлений використанням запропонованих напрацювань в рамках науково-дослідного проекту «Математичне та програмне забезпечення для ідентифікації та моніторингу особливо небезпечних джерел забруднення ґрунту та ґрунтових вод», № держреєстрації 0120U102040) [31].

Було проаналізовано 10 API-інтерфейсів для оцінки якості ґрунтів, які були повернуті пошуковиком Google при формуванні запиту – «API soil assessment». Для аналізу показників інтерпретованості, повноти та своєчасності із використанням програмних засобів для аналізу різного роду контенту, включаючи сервісний інтерфейс (наприклад, файл WSDL), інформацію про документацію, рейтинг або відгуки користувачів.

Для кожного сервісу покладаємо $estimation(P) = 1$, оскільки їх патерни (схеми) в основному є файлами WSDL, інформація з яких дозволяє класифікувати службову документацію на категорії - {неструктурована, частково структурована, структурована}, що еквівалентно такій оцінці:

$estimation(D) = \{0, 0.5, 1\}$. Мінімальний набір нефункціональних параметрів, які аналізувалися $Nh_{min} = \{доступність, час\ відгуку, відповідь\}$.

На рис. 3 представлено результати оцінки показника інтерпретованості I_p використовуючи різні набори вагових коефіцієнтів для показників:

1) $v(P) = 0.2, v(D) = 0.2, v(Nh) = 0.2, v(Fd) = 0.2, v(Rs) = 0.2$ – варіант, коли усі типи мають однакову вагу.

2) $v(P) = 0.5, v(D) = 0.25, v(Nh) = 0.25, v(Fd) = 0, v(Rs) = 0$ – варіант, коли P – найважливіший тип, D (документація) та Nh (нефункціональні характеристики) мають однакову вагу, а показники Fd та Rs не враховуються, або ступінь їх впливу оцінити складно, враховуючи специфіку предметної області.

3) $v(P) = 0, v(D) = 0.5, v(Nh) = 0.5, v(Fd) = 0, v(Rs) = 0$ варіант, коли аналізується тільки тип D (документація) та Nh (нефункціональні характеристики), які мають однакову вагу при обчисленні інтерпретованості I_p .

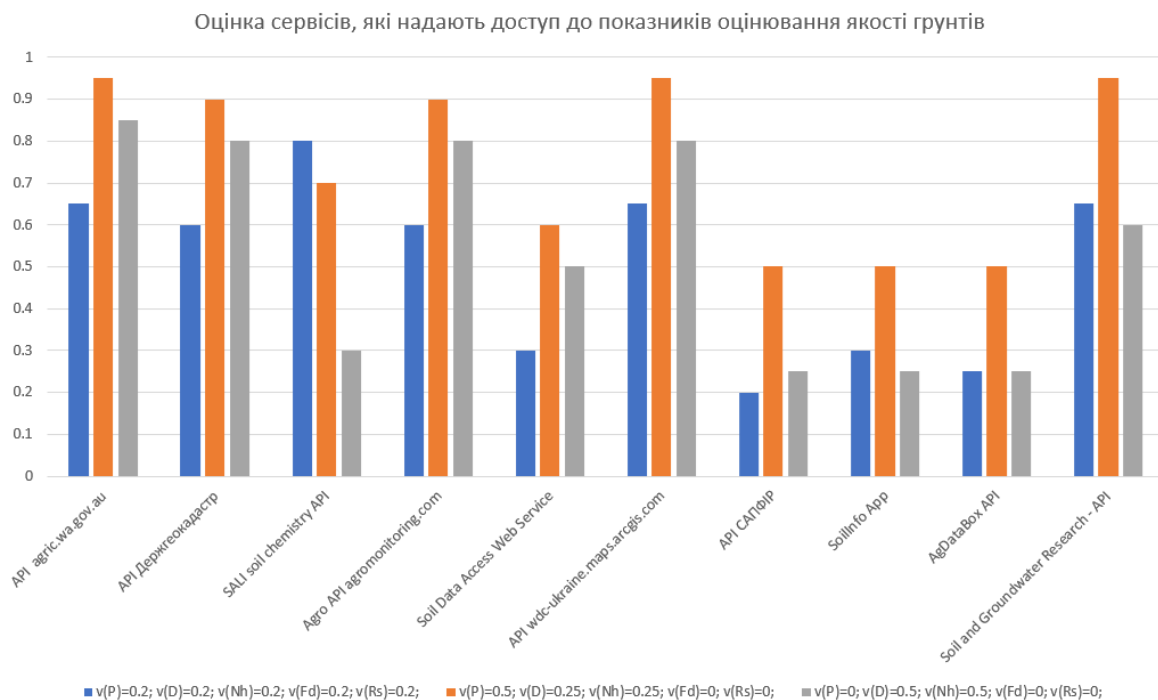


Рисунок 3 – Результати оцінки сервісів, які надають API-інтерфейси для оцінки якості та стану ґрунтів, їх можливого забруднення

Як бачимо з рисунка 3, значення показника інтерпретованості змінюються залежно від коефіцієнтів зважування факторів, які відображають різні вимоги, що можуть ставитися клієнтами в процесі отримання та використання вказаних сервісів. Проте, у всіх трьох випадках наборів вагових коефіцієнтів, які зазначено вище, більшість API-інтерфейсів мають високі значення показника інтерпретованості I_p (зокрема, $I_p \geq 0.5$). Отже, іншу частину сервісів (з меншою інтерпретованістю) можна включити із подальшого аналізу. Використання зазначеного підходу дозволить пришвидшити процес обрання комунікаційних сервісів в залежності від конкретних вимог.

Результати, які отримані під час проведених досліджень використано з метою отримання якісного допоміжного інструментарію для ідентифікації надійних (в інформаційному розумінні) сервісів, які надають інформацію щодо забруднення ґрунту та ґрунтових вод. Така інформація необхідна для розв'язування задач ідентифікації, моделювання та моніторингу особливо небезпечних джерел забруднення ґрунту та ґрунтових вод.

Майбутні дослідження

Подальші дослідження в рамках запропонованих підходів будуть зосереджуватися на розширенні набору показників якості, актуальності та достовірності інформації. Важливим напрямком також є апробація метрики оцінки актуальності та достовірності інформації на інших джерелах її надання та зберігання, наприклад, аналіз інструментів, які базуються на використанні сучасних NoSQL систем управління базами даних. Це доволить значно розширити варіативність використання, а також забезпечить повноту аналізованих інструментів аналізу інформації та засобів її зберігання.

Висновки

Актуальність інформації про сервіси в сервісно-орієнтованих архітектурах відіграє важливу роль для виявлення та зменшення недостовірної інформації та підтримки ефективних методів вибору інформаційного джерела та комунікаційних засобів формування самих сервісів. Відсутність належного способу управління якістю та контекстом у веб-сервісах спонукало до розробки метрики оцінки актуальності інформації в сервісно-орієнтованих системах, а також методу фільтрування даних на основі даної метрики. Використання запропонованих в рамках даної роботи методів дозволило зменшити ступінь отримання неактуальної інформації в процесі формування та виконання відповідних сервісів.

Створені методи програмно реалізовані як надбудова до сучасних рішень і можуть ефективно використовуватися в сервісно-орієнтованих інформаційних системах. Достовірність запропонованих метрики та методів фільтрування даних підтверджена експериментально на прикладі оцінки сервісів, які надають доступ до оцінювання якості ґрунтів та ґрунтових вод.

Список літератури

- [1] Zhou, Xinyi & Zafarani, Reza, «A Survey of Fake News: Fundamental Theories, Detection Methods, and Opportunities», 2 Dec 2018.
- [2] Ahmad, Iftikhar & Yousaf, Muhammad & Yousaf, Suhail & Ahmad, Muhammad Ovais, «Fake News Detection Using Machine Learning Ensemble Methods», *Complexity in Deep Neural Networks*, 2020.
- [3] S. A. García, G. G. García, M. S. Prieto, A. J. M. Guerrero, and C. R. Jiménez, «The impact of term fake news on the scientific community scientific performance and mapping in web of science», *Social Sciences*, vol. 9, no. 5, 2020.
- [4] S. Akhtar, F. Hussain, F. R. Raja et al., «Improving mispronunciation detection of arabic words for non-native learners using deep convolutional neural network features», *Electronics*, vol. 9, no. 6, 2020.
- [5] Ahmed, S., Hinkelmann, K., Corradini, F., «Combining machine learning with knowledge engineering to detect fake news in social networks – a survey», In: *Proceedings of the AAAI 2019 Spring Symposium*, vol. 12 (2019).
- [6] B. Marr, Coronavirus fake news: how Facebook, Twitter, and Instagram are tackling the problem. Forbes (2020). [Online]. Available: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2020/03/27/finding-the-truth-about-covid-19-how-facebook-twitter-and-instagram-are-tackling-fake-news>.
- [7] H. Sparks, H. Frishberg, Facebook gives step-by-step instructions on how to spot fake news (2020). [Online]. Available: <https://nypost.com/2020/03/26/facebook-gives-step-by-step-instructions-on-how-to-spot-fake-news/>
- [8] Zhou, X., Zafarani, R.: Fake news: a survey of research, detection methods, and opportunities (2018). arXiv preprint arXiv:1812.00315.
- [9] Ian Chadd, Emel Filiz-Ozbay, Erkut Y. Ozbay. The relevance of irrelevant information. *Experimental Economics*, 2020; DOI: 10.1007/s10683-020-09687-3.
- [10] N. A. D. L. Perera, C. Priyankara and D. W. R. S. Jayasekara, «Identifying Irrelevant Answers in Web Based Question Answering Systems», *2020 20th International Conference on Advances in ICT for Emerging Regions (ICTer)*, Colombo, Sri Lanka, 2020, pp. 11-16, doi: 10.1109/ICTer51097.2020.9325449.
- [11] Alkhodair SA, Ding SH, Fung BC, Liu J (2020) Detecting breaking news rumors of emerging topics in social media. *Inf Process Manag* 57:102018.
- [12] Braşoveanu AM, Andonie R (2019) Semantic fake news detection: a machine learning perspective. In: *International work-conference on artificial neural networks*, Springer, pp 656–667.
- [13] А. М. Мельник, О. З. Миць, «Підвищення ефективності пошуку документів в інтернет із врахуванням подібності веб-сторінок», *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології : матеріали III Всеукр. шк.-семінару молодих вчен. і студ. АСІТ'2013 [м. Тернопіль, 17-18 трав. 2013 р.]*, Тернопіль: THEU, 2013, с. 212.
- [14] Li Y, Nie X, Huang R (2018b) Web spam classification method based on deep belief networks. *Expert Syst Appl* 96:261–270.
- [15] Liu Y, Xu S (2016) Detecting rumors through modeling information propagation networks in a social media environment. *IEEE Trans Comput Soc Syst* 3:46–62.

- [16] Naseem U, Razzak I, Musial K, Imran M (2020) Transformer based deep intelligent contextual embedding for twitter sentiment analysis. *Future Gener Comput Syst* 6:91.
- [17] Shu K, Wang S, Lee D, Liu H (2020) Mining disinformation and fake news: concepts, methods, and recent advancements. *arXiv preprint arXiv:2001.00623*.
- [18] Tang D, Qin B, Liu T (2015) Document modeling with gated recurrent neural network for sentiment classification. In: *Proceedings of the 2015 conference on empirical methods in natural language processing*, pp 1422–1432.
- [19] Allen, Jennifer & Howland, Baird & Mobius, Marine & Rothschild, David & Watts, Duncan. (2020). Evaluating the fake news problem at the scale of the information ecosystem. *Science Advances*. 6. eaay3539. 10.1126/sciadv.aay3539.
- [20] М. П. Дивак, А. М. Мельник, О. А. Папа, «Математичне та програмне забезпечення інтелектуального модуля прикладних програмних систем для надання адміністративних послуг щодо проведення екологічної експертизи», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, 49(3), с. 66–76, 2020.
- [21] H. Ahmed, I. Traore, and S. Saad, «Detecting opinion spams and fake news using text classification», *Security and Privacy*, vol. 1, no. 1, 2018.
- [22] Batini, C., Scannapieco, M.: *Data Quality: Concepts, Methodologies and Techniques (Data-Centric Systems and Applications)*. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus (2006).
- [23] Dyvak, M., Papa, O., Melnyk, A., Pukas, A., Porplytsya, N., Rot, A. «Interval Model of the Efficiency of the Functioning of Information Web Resources for Services on Ecological Expertise», *Mathematics*, 8(12), 2116, 2020.
- [24] О. О. Лисенко, Р. І. Кокітко, «Модель аналізу неструктурованої інформації для побудови бази знань корпоративної інформаційної системи», *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: матеріали III Всеукр. шк.-семінару молодих вчен. і студ. АСІТ'2013 [м. Тернопіль, 17-18 трав. 2013 р.]*, Тернопіль: ТНЕУ, 2013, с. 211.
- [25] Truong HL., Comerio M., Maurino A., Dustdar S., De Paoli F., Panziera L. (2010) On Identifying and Reducing Irrelevant Information in Service Composition and Execution. In: Chen L., Triantafillou P., Suel T. (eds) *Web Information Systems Engineering – WISE 2010*. WISE 2010. Lecture Notes in Computer Science, vol 6488. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-17616-6_7.
- [26] M. Susla, R. Pasichnyk, A. Melnyk, N. Pasichnyk, O. Vasykiv and O. Androshchuk, «Formalization of Scientific Researches Results in Corporate Knowledge Bases As a Tool of Their Accumulation», *2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Deggendorf, Germany, 2020, pp. 488-491, doi: 10.1109/ACIT49673.2020.9208863.
- [27] A. Kovbasistyi, A. Melnyk, M. Dyvak, V. Brych and I. Spivak, «Method for detection of non-relevant and wrong information based on content analysis of web resources», *2017 XIIIth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*, Lviv, 2017, pp. 154–156, doi: 10.1109/MEMSTECH.2017.7937555.
- [28] A. Pukas, A. Simak, O. Syrnyk, L. Horal, V. Shyjko and O. Papa, «Software Module for Data Correctness and Completeness Control in the Academic Staff Performance Appraisal System», *2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Ceske Budejovice, Czech Republic, 2019, pp. 277-280, doi: 10.1109/ACITT.2019.8779999.
- [29] M. P. Dyvak, A. V. Kovbasistyi, A. M. Melnyk, L. Y. Turchyn, Y. O. Martsenyuk, «System for web resources content structuring and recognizing with the machine learning elements», *Радіоелектроніка, інформатика, управління*, 3 (Груд 2018). DOI:<https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-3-14>.
- [30] A. Kovbasistyi, A. Melnyk, M. Dyvak, V. Brych et al., «Method for detection of non-relevant and wrong information based on content analysis of web resources», *XIIIth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*, Lviv, 2017, pp. 154–156. DOI: 1109/MEMSTECH.2017.7937555.
- [31] М. П. Дивак, А. М. Мельник, А. В. Ковбасистий, О. А. Папа, «Підхід до математичного моделювання ефективності web-ресурсів», *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, 38, 2 (Бер 2020), 29–37. DOI:<https://doi.org/10.31649/1681-7893-2019-38-2-29-37>.

Стаття надійшла: 22.02.2021

References

- [1] Zhou, Xinyi & Zafarani, Reza, «A Survey of Fake News: Fundamental Theories, Detection Methods, and Opportunities», 2 Dec 2018.
- [2] Ahmad, Iftikhar & Yousaf, Muhammad & Yousaf, Suhail & Ahmad, Muhammad Ovais, «Fake News Detection Using Machine Learning Ensemble Methods», *Complexity in Deep Neural Networks*, 2020.

- [3] S. A. García, G. G. García, M. S. Prieto, A. J. M. Guerrero, and C. R. Jiménez, «The impact of term fake news on the scientific community scientific performance and mapping in web of science», *Social Sciences*, vol. 9, no. 5, 2020.
- [4] S. Akhtar, F. Hussain, F. R. Raja et al., «Improving mispronunciation detection of arabic words for non-native learners using deep convolutional neural network features», *Electronics*, vol. 9, no. 6, 2020.
- [5] Ahmed, S., Hinkelmann, K., Corradini, F., «Combining machine learning with knowledge engineering to detect fake news in social networks – a survey», In: *Proceedings of the AAAI 2019 Spring Symposium*, vol. 12 (2019).
- [6] B. Marr, Coronavirus fake news: how Facebook, Twitter, and Instagram are tackling the problem. Forbes (2020). [Online]. Available: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2020/03/27/finding-the-truth-about-covid-19-how-facebook-twitter-and-instagram-are-tackling-fake-news>.
- [7] H. Sparks, H. Frishberg, Facebook gives step-by-step instructions on how to spot fake news (2020). [Online]. Available: <https://nypost.com/2020/03/26/facebook-gives-step-by-step-instructions-on-how-to-spot-fake-news/>
- [8] Zhou, X., Zafarani, R.: Fake news: a survey of research, detection methods, and opportunities (2018). arXiv preprint arXiv:1812.00315.
- [9] Ian Chadd, Emel Filiz-Ozbay, Erkut Y. Ozbay. The relevance of irrelevant information. *Experimental Economics*, 2020; DOI: 10.1007/s10683-020-09687-3.
- [10] N. A. D. L. Perera, C. Priyankara and D. W. R. S. Jayasekara, «Identifying Irrelevant Answers in Web Based Question Answering Systems», *2020 20th International Conference on Advances in ICT for Emerging Regions (ICTer)*, Colombo, Sri Lanka, 2020, pp. 11-16, doi: 10.1109/ICTer51097.2020.9325449.
- [11] Alkhodair SA, Ding SH, Fung BC, Liu J (2020) Detecting breaking news rumors of emerging topics in social media. *Inf Process Manag* 57:102018.
- [12] Braşoveanu AM, Andonie R (2019) Semantic fake news detection: a machine learning perspective. In: *International work-conference on artificial neural networks*, Springer, pp 656–667.
- [13] A. M. Melnyk, O. Z., «Pidvyshchennia efektyvnosti poshuku dokumentiv v internet iz vrakhuvanniam podobnosti veb-storinok», *Suchasni kompiuterni informatsiini tekhnologii : materialy III Vseukr. shk.-seminaru molodykh vchen. i stud. ASIT2013 [m. Ternopil, 17-18 trav. 2013 r.]*, Ternopil: TNEU, 2013, s. 212.
- [14] Li Y, Nie X, Huang R (2018b) Web spam classification method based on deep belief networks. *Expert Syst Appl* 96:261–270.
- [15] Liu Y, Xu S (2016) Detecting rumors through modeling information propagation networks in a social media environment. *IEEE Trans Comput Soc Syst* 3:46–62.
- [16] Naseem U, Razzak I, Musial K, Imran M (2020) Transformer based deep intelligent contextual embedding for twitter sentiment analysis. *Future Gener Comput Syst* 6:91.
- [17] Shu K, Wang S, Lee D, Liu H (2020) Mining disinformation and fake news: concepts, methods, and recent advancements. arXiv preprint arXiv:2001.00623.
- [18] Tang D, Qin B, Liu T (2015) Document modeling with gated recurrent neural network for sentiment classification. In: *Proceedings of the 2015 conference on empirical methods in natural language processing*, pp 1422–1432.
- [19] Allen, Jennifer & Howland, Baird & Mobius, Marine & Rothschild, David & Watts, Duncan. (2020). Evaluating the fake news problem at the scale of the information ecosystem. *Science Advances*. 6. eaay3539. 10.1126/sciadv.aay3539.
- [20] M. P. Dyvak, A. M. Melnyk, O. A. Papa, «Matematychna ta prohramne zabezpechennia intelektualnoho modulua prykladnykh prohramnykh system dlia nadannia administratyvnykh posluh shchodo provedennia ekolohichnoi ekspertyzy», *Informatsiini tekhnologii ta kompiuterna inzheneriia*, 49(3), s. 66–76. 2020
- [21] H. Ahmed, I. Traore, and S. Saad, «Detecting opinion spams and fake news using text classification», *Security and Privacy*, vol. 1, no. 1, 2018.
- [22] Batini, C., Scannapieco, M.: *Data Quality: Concepts, Methodologies and Techniques (Data-Centric Systems and Applications)*. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus (2006).
- [23] Dyvak, M., Papa, O., Melnyk, A., Pukas, A., Porplytsya, N., Rot, A. «Interval Model of the Efficiency of the Functioning of Information Web Resources for Services on Ecological Expertise», *Mathematics*, 8(12), 2116, 2020.
- [24] O. O. Lysenko, R. I. Kokitko, «Model analizu nestruturovanoi informatsii dlia pobudovy bazy znan korporatyvnoi informatsiinoi systemy», *Suchasni kompiuterni informatsiini tekhnologii : materialy III Vseukr. shk.-seminaru molodykh vchen. i stud. ASIT2013 [m. Ternopil, 17-18 trav. 2013 r.]*, Ternopil: TNEU, 2013, s. 211.

- [25] Truong HL., Comerio M., Maurino A., Dustdar S., De Paoli F., Panziera L. (2010) On Identifying and Reducing Irrelevant Information in Service Composition and Execution. In: Chen L., Triantafillou P., Suel T. (eds) Web Information Systems Engineering – WISE 2010. WISE 2010. Lecture Notes in Computer Science, vol 6488. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-17616-6_7.
- [26] M. Susla, R. Pasichnyk, A. Melnyk, N. Pasichnyk, O. Vasykiv and O. Androshchuk, «Formalization of Scientific Researches Results in Corporate Knowledge Bases As a Tool of Their Accumulation», 2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Deggendorf, Germany, 2020, pp. 488-491, doi: 10.1109/ACIT49673.2020.9208863.
- [27] A. Kovbasistyi, A. Melnyk, M. Dyvak, V. Brych and I. Spivak, «Method for detection of non-relevant and wrong information based on content analysis of web resources», 2017 XIIIth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Lviv, 2017, pp. 154–156, doi: 10.1109/MEMSTECH.2017.7937555.
- [28] A. Pukas, A. Simak, O. Syrnyk, L. Horal, V. Shyjko and O. Papa, «Software Module for Data Correctness and Completeness Control in the Academic Staff Performance Appraisal System», 2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Ceske Budejovice, Czech Republic, 2019, pp. 277-280, doi: 10.1109/ACITT.2019.8779999.
- [29] M. P. Dyvak, A. V. Kovbasistyi, A. M. Melnyk, L. Y. Turchyn, Y. O. Martsenyuk, «System for web resources content structuring and recognizing with the machine learning elements», *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia*, 3 (Hrud 2018). DOI:<https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-3-14>.
- [30] A. Kovbasistyi, A. Melnyk, M. Dyvak, V. Brych et al., «Method for detection of non-relevant and wrong information based on content analysis of web resources», XIIIth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Lviv, 2017, pp. 154–156. DOI: 1109/MEMSTECH.2017.7937555.
- [31] M. P. Dyvak, A. M. Melnyk, A. V. Kovbasistyi, O. A. Papa, «Pidkhid do matematychnoho modeliuвання efektyvnosti web-resursiv», *Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii*, 38, 2 (Ber 2020), 29–37. DOI:<https://doi.org/10.31649/1681-7893-2019-38-2-29-37>.

Відомості про авторів

Мельник Андрій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук.

Дивак Микола Петрович – доктор технічних наук, професор, Заслужений діяч науки і техніки, декан факультету комп'ютерних інформаційних технологій.

Пасічник Роман Мирославович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри економічної кібернетики та інформатики.

А. Н. Мельник, Н. П. Дивак, Р. М. Пасечник

МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ НЕАКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В СЕРВИСНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ КОРПОРАТИВНОЙ СИСТЕМЫ НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ГРУНТОВ

Западноукраинский национальный университет, Тернополь

A. M. Melnyk, M. P. Dyvak, R. M. Pasichnyk

METHOD OF DETECTION OF UPDATED INFORMATION IN SERVICE-ORIENTED CORPORATE SYSTEMS ON THE EXAMPLE OF SOIL QUALITY ASSESSMENT SYSTEMS

West Ukrainian National University, Ternopil

УДК 004.93

О. Н. Романюк, О. О. Дудник, О. В. Романюк, Д. А. Озерчук

МЕТОД ПЕРСПЕКТИВНО-КОРЕКТНОГО ТЕКСТУРУВАННЯ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. Текстурювання є одним із найскладніших етапів процесу кінцевої візуалізації, оскільки для кожної точки поверхні визначаються координати в дискретному просторі та значення інтенсивності кольору з урахуванням освітлення. Існуючі методи високоточного накладання текстур характеризуються суттєвою обчислювальною складністю, що в значній мірі впливає на час формування графічних зображень. Тому актуальними є питання підвищення продуктивності методів і засобів текстурювання.

Зменшити кількість операцій ділення при текстурюванні можливо за рахунок растеризації об'єкту в світовій системі координат за умови, що рядки растеризації на кожному етапі розміщено на фіксованій відстані від спостерігача.

Неортогональний по відношенню до координатних осей напрямок растеризації призведе до артефактів – наявності «просікань» і дублювання точок із-за зміщення по абсцисі початку рядків растеризації. Цього можна уникнути за умови, що провідне ребро трикутника буде паралельним осі ординат, однак це передбачає виконання особливої триангуляції поверхні та не відповідає вимогам графічних стандартів. Запропоновано растеризувати не трикутник, а прямокутник, у який його віртуально вписано. Запропоновано структурну схему блоку растеризації.

Аналіз показав, що для трикутника, який включає T внутрішніх точок, вилучається $(T-q)$ операцій ділення, де q – кількість горизонтальних рядків растеризації трикутника.

Ключові слова: текстурювання, метод Хесберга, реалістичність, растеризація, перспективно-коректне накладання текстур.

Аннотация. Текстурирование является одним из самых сложных этапов процесса конечной визуализации, поскольку для каждой точки поверхности определяются координаты в дискретном пространстве и значения интенсивности цвета с учетом освещения. Существующие методы высокоточного наложения текстур характеризуются существенной вычислительной сложностью, что в значительной степени влияет на время формирования графических изображений. Поэтому актуальными являются вопросы повышения производительности методов и средств текстурирования.

Уменьшить количество операций деления при текстурировании возможно за счет растеризации объекта в мировой системе координат при условии, что строки растеризации на каждом этапе размещены на фиксированном расстоянии от наблюдателя.

Неортогональное по отношению к координатным осям направление растеризации приведет к артефактам - наличию «просечки» и дублирования точек из-за смещения по абсциссе начале строк растеризации. Этого можно избежать при условии, если ведущее ребро треугольника будет параллельным оси ординат, однако это предполагает выполнение особой триангуляции поверхности и не соответствует требованиям графических стандартов. Предложено растеризовать не треугольник, а прямоугольник, в который его виртуально размещено. Предложено структурную схему блока растеризации.

Анализ показал, что для треугольника, который включает T внутренних точек, исключается $(T-q)$ операций деления, где q – количество горизонтальных строк растеризации треугольника.

Ключевые слова: текстурирование, метод Хесберга, реалистичность, растеризация, перспективно-корректное наложение текстур.

Abstract. Texturing is one of the most difficult stages of the final visualization process, as for each point of the surface the coordinates in the discrete space and the values of color intensity taking into account the lighting are determined. Existing methods of high-precision texture overlay are characterized by significant computational complexity, which significantly affects the time of formation of graphic images. Therefore, the issues of increasing the productivity of texturing methods and tools are relevant.

It is possible to reduce the number of division operations during texturing by rasterizing the object in the world coordinate system, provided that the rasterization lines at each stage are placed at a fixed distance from the observer.

Non-orthogonal in relation to the coordinate axes, the direction of rasterization will lead to artefacts - the presence of "perforations" and duplication of points due to the offset on the abscissa of the beginning of the rasterization lines. This can be avoided provided that the leading edge of the triangle is parallel to the y-axis, but this involves a special triangulation of the surface and does not meet the requirements of graphic standards. It is proposed to rasterize not a triangle, but a rectangle in which it is virtually inscribed. The structural scheme of the rasterization block is offered.

The analysis showed that for a triangle that includes T inner points, the division operations $(T-q)$ are removed, where q is the number of horizontal rasterization rows of the triangle.

Keywords: testing, Hесberg method, realism, rasterization, perspective-correct texture overlay.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-50-1-55-63>.

Вступ

Найвищу реалістичність візуального відтворення об'єктів і процесів реального світу забезпечує тривимірний комп'ютерний графік [1-3].

У комп'ютерних системах [4] високу ефективність візуалізації забезпечують методи та засоби, що дають змогу оптимально використовувати обчислювальні ресурси графічної системи для забезпечення високого рівня реалістичності відтворення графічних зображень. Одним із таких засобів є текстурювання, яке дозволяє врахувати локальні особливості поверхні без надмірного ускладнення геометрії моделі. Процедури накладання текстур успішно застосовують для відтворення на поверхні об'єктів кольорів, фактури, нерівностей, імітації відбиття світла та інших візуальних властивостей.

Текстурювання є одним із найскладніших етапів процесу кінцевої візуалізації, оскільки для кожної точки поверхні визначаються координати в дискретному просторі та значення інтенсивності кольору з урахуванням освітлення. Існуючі методи високоточного накладання текстур характеризуються суттєвою обчислювальною складністю, що в значній мірі впливає на час формування графічних зображень. Тому актуальними є питання підвищення продуктивності методів і засобів текстурювання.

Мета

Мета статті – розробка методу підвищення продуктивності перспективно-коректного нанесення текстури за рахунок використання неортогонального напрямку растеризації ділянки, обмеженої полігоном.

Аналіз методів текстуровання

Процес накладання текстури на полігон виконується в три етапи: встановлення відповідності між екранними координатами точок, що належать полігону, та координатами у текстурній площині; вибірка текселів за цими координатами; обчислення кольорів пікселів на основі кольорів відібраних текселів.

Для встановлення відповідності між екранними та текстурними координатами існують методи, що враховують перспективу та методи, що її не враховують. Перші називають перспективно-коректними, а другі – афінними.

Афінні методи [5] базуються на лінійній інтерполяції [1, 6] текстурних координат вздовж рядка растеризації. Це забезпечує високий рівень продуктивності, оскільки для визначення координат текселя достатньо дві операції додавання на кожен піксел. Афінне текстуровання використовують при растеризації сцен із ортогональними проекціями. Використання афінного текстуровання при перспективній проекції можливе лише за умови, що полігон розташовано паралельно екранній площині. При растеризації сцен із перспективною проекцією, що містять довільно орієнтовані полігони, афінне текстуровання призводить до появи істотних артефактів (рис. 1). Тому використання афінних методів недоцільне при візуалізації графічних сцен, що вимагають високого ступеня реалістичності вихідного зображення.

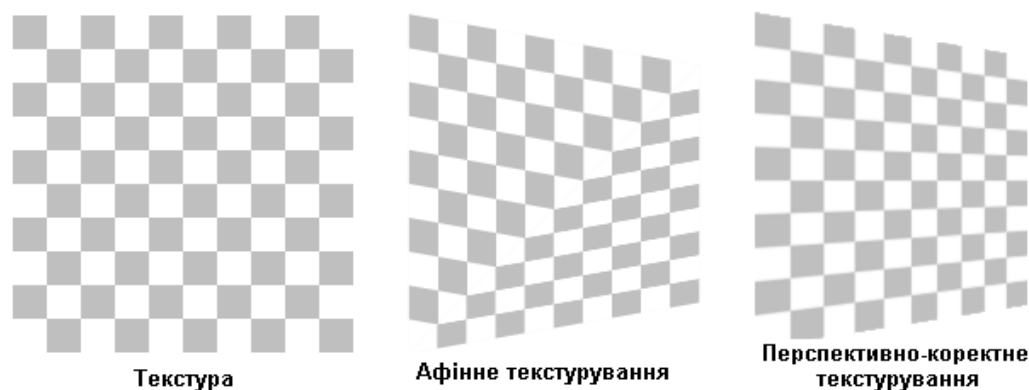


Рисунок 1 – Артефакти при афінному текстурованні

Перспективно-коректне текстуровання, як правило, виконують за методом Хекберта [5, 8], в основі якого лежить виконання зворотного перспективного перетворення U матричному вигляді зворотна проєкція обчислюється за формулою [5, 9]:

$$[uq \quad vq \quad q] = [x \quad y \quad z] \begin{bmatrix} A & D & G \\ B & E & H \\ C & F & I \end{bmatrix} = [x \quad y \quad z] \begin{bmatrix} EI - FH & FG - DI & DH - EG \\ CH - BI & AI - CG & BG - AH \\ BF - CE & CD - AF & AE - BD \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де u, v – текстурні координати; x, y – екранні координати; $A - I$ – коефіцієнти перспективної проєкції. Формулу (1) можна записати у вигляді многочленів:

$$u = \frac{Ax + By + C}{Gx + Hy + I}, \quad v = \frac{Dx + Ey + F}{Gx + Hy + I}, \quad (2)$$

З формули (2) видно що зворотне перспективне перетворення вимагає значних обчислювальних витрат, оскільки передбачає виконання «довгих» операцій. Така обчислювальна складність, часто, неприйнятна для використання у високопродуктивних графічних системах [4]. Тому на практиці використовують різні методи апроксимації для вилучення із обчислювального процесу операцій множення та ділення.

Широко поширеною є квадратична апроксимація [6-8], яка для розрахунку текстурних координат використовує рівняння

$$\begin{aligned}u(x) &= A_1 \cdot x^2 + A_2 \cdot x + A_3, \\v(x) &= B_1 \cdot x^2 + B_2 \cdot x + B_3,\end{aligned}$$

де A_1-A_3 , B_1-B_3 – коефіцієнти апроксимації, які є сталими для кожного рядка растеризації (PP);
 $x = \frac{x_i - x_1}{x_m - x_1}$, при x_1 , x_m – значення x – координати відповідно у початковій та кінцевій точках PP.

Формули для розрахунку коефіцієнтів $A_1 - A_3$ мають вигляд [5]:

$$A_1 = 2u_0 - 4u_1 + 2u_2, \quad A_2 = -3u_0 + 4u_1 - 2u_2, \quad A_3 = u_0,$$

де u_0 , u_1 і u_2 – значення текстурної координати u у початковій, середній та кінцевій точках рядка растеризації (PP) відповідно.

Аналогічний вигляд мають формули і для розрахунку коефіцієнтів $B_1 - B_3$, однак замість значень координати u використовуються відповідні значення координати v .

Застосування квадратичної апроксимації забезпечує досить реалістичне відтворення перспективи порівняно нескладних обчисленнях. Недоліком наведених формул є те, що вони можуть бути використані лише у випадку нормалізованих значень екранних координат. Процедура нормалізації вимагає операції ділення та обчислення квадратного кореня, що суттєво впливає на обчислювальну складність.

Кубічна апроксимація [6-7] використовує залежність

$$\begin{aligned}u(x) &= C_1x^3 + C_2x^2 + C_3x + C_4, \\v(x) &= D_1x^3 + D_2x^2 + D_3x + D_4,\end{aligned}$$

де C_1-C_4 , D_1-D_4 – коефіцієнти апроксимації, які розраховуються для кожного PP, значення координати x також нормалізовані.

Для розрахунку коефіцієнтів апроксимації необхідно знайти точні значення текстурних координат у чотирьох опорних точках: початковій, кінцевій та двох внутрішніх точок, які розбивають PP на три рівні відрізки. Кубічна апроксимація забезпечує більш реалістичне відтворення перспективи, ніж квадратична, але обчислювальна складність суттєво зростає, що обмежує застосування даного виду апроксимації у системах комп'ютерної графіки, які працюють у режимі реального часу.

При бі-квадратичній [6-7] апроксимації використовуються рівняння

$$\begin{aligned}u(x) &= A_1x^2 + A_2y^2 + A_3xy + A_4x + A_5y + A_6, \\v(x) &= B_1x^2 + B_2y^2 + B_3xy + B_4x + B_5y + B_6,\end{aligned}$$

де A_1-A_6 , B_1-B_6 – коефіцієнти апроксимації.

Для розрахунку дванадцяти коефіцієнтів біквадратичної апроксимації потрібно знати точні значення пари текстурних координат у шести точках: у вершинах трикутного полігона та у середніх точках його ребер.

Бікубічна апроксимація [5-7] використовує рівняння

$$\begin{aligned}u(x) &= A_1x^3 + A_2y^3 + A_3x^2y + A_4xy^2 + A_5x^2 + A_6y^2 + A_7xy + A_8x + A_9y + A_{10}, \\v(x) &= B_1x^2 + B_2y^2 + B_3x^2y + B_4xy^2 + B_5x^2 + B_6y^2 + B_7xy + B_8x + B_9y + B_{10},\end{aligned}$$

де A_1-A_{10} , B_1-B_{10} – коефіцієнти апроксимації.

Бікубічна апроксимація вимагає точних значень пари текстурних координат у 10 контрольних точках і передбачає розрахунок 20 коефіцієнтів апроксимації. Отриманий результат виглядає досить реалістично, але обчислювальні витрати дуже великі, тому цей вид апроксимації має обмежене використання.

Таким чином, існуючі методи апроксимації формул (2) не забезпечують достатньо прийняттого співвідношення між підвищенням продуктивності обчислень і збереженням точності обчислень. Тому існує потреба у розробці методів підвищення продуктивності перспективно-коректного текстурування зі збереженням точності обчислення текстурних координат.

Розглянемо реалізацію формули (2).

$$\text{Якщо } x_{i+1} = x_i + I, \text{ то } u_{i+1} = \frac{A_l \cdot (x_i + I) + B_l \cdot y_i + C_l}{D \cdot (x_i + I) + E \cdot y_i + F} = \frac{(A_l \cdot x_i + B_l \cdot y_i + C_l) + A_l \cdot I}{(D \cdot x_i + E \cdot y_i + F) + D \cdot I}.$$

Аналогічну формулу можна записати й для v_{i+1} . З наведених формул видно, що для розрахунку кожного текселя необхідно виконати 2 операції ділення та 3 операції додавання.

При реалізації текстурування [9-15] передбачає виконання «довгих» операцій, що обмежує швидкість формування графічних сцен і ускладнює апаратну реалізацію.

Зменшити кількість операцій ділення при текстуруванні можливо за рахунок растеризації об'єкту в світовій системі координат [11] за умови, що рядки растеризації на кожному етапі розміщено на фіксованій відстані від спостерігача. Знайдемо коефіцієнт нахилу прямої в екранній системі координат, якому відповідає відрізок прямої у світовій системі координат зі сталим для рядка значенням координати z (рис. 2). Нехай у світовій системі координат задано трикутник. Він однозначно визначає площину, рівняння якої має такий вигляд [5]

$$AX_w + BY_w + CZ_w = D,$$

де A , B , C – коефіцієнти, які визначаються координатами вершин трикутника.

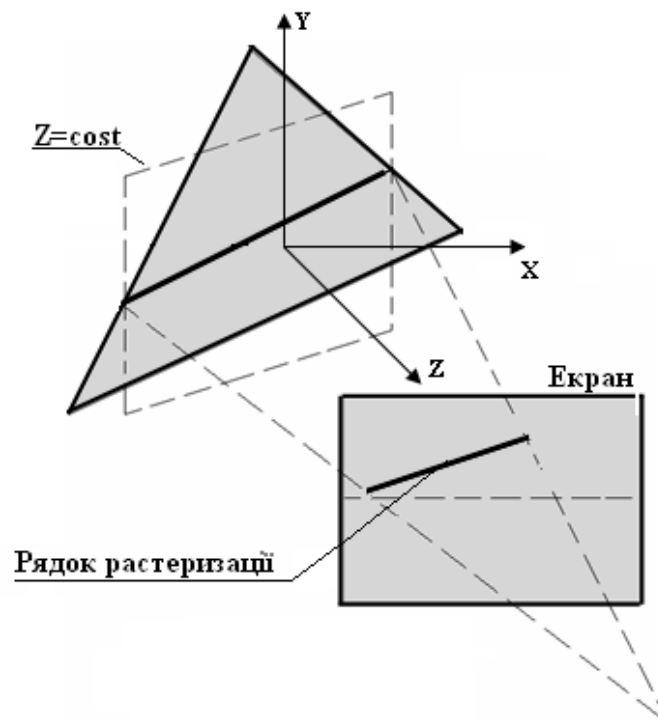


Рисунок 2– Рядки растеризації у світовій та екранній системах координат

З останнього рівняння знаходимо, що

$$Z_w = \frac{A \cdot X_w + B \cdot Y_w + D}{C}. \quad (3)$$

Між екранними та світовими координатами має місце такі співвідношення $X_v = \frac{X_w}{Z_w}$, $Y_v = \frac{Y_w}{Z_w}$.

Запишемо останні рівняння у вигляді

$$X_w = X_v \cdot Z_w, \quad Y_w = Y_v \cdot Z_w.$$

Будемо шукати кут нахилу прямої, рівняння якої має вигляд $Y_v = k \cdot X_v + h$.

З урахуванням цього запишемо, що $Y_w = Y_v \cdot Z_w = (k \cdot X_v + h) \cdot Z_w$.

Підставивши у рівняння (3) отримані значення X_w , Y_w , отримуємо

$$A \cdot X_v \cdot Z_w + B \cdot (k \cdot X_v + h) \cdot Z_w + C \cdot Z_w = D.$$

З останнього рівняння знаходимо, що

$$Z_w = \frac{D}{X_v \cdot (A + B \cdot k) + B \cdot h + C}. \quad (4)$$

За умови, що для рядка растеризації трикутника в екранній системі координат $Z_w = const$, то для любого j має місце рівняння

$$\frac{D}{X_v \cdot (A + B \cdot k) + B \cdot h + C} = \frac{D}{(X_v + j) \cdot (A + B \cdot k) + B \cdot h + C}.$$

Останнє рівняння має єдиний розв'язок $k = -A/\hat{A}$. Оскільки j і X_v було вибрано довільно, то можна констатувати, що нахил скануючого рядка растеризації не змінюється для всього трикутника, який розглядається в екранній системі координат. Значення координати Z_w для заданого рядка растеризації легко знайти, підставивши отримане значення k у рівняння (4).

$$Z_w = \frac{D}{B \cdot h + C}.$$

Між екранним та текстурним координатним простором існує така залежність [9-14]:

$$u = \frac{a \cdot X_v + b \cdot Y_v + c}{A \cdot X_v + B \cdot Y_v + C}, \quad v = \frac{d \cdot X_v + e \cdot Y_v + f}{A \cdot X_v + B \cdot Y_v + C}.$$

Позначимо знаменник наведених виразів через T , а $\frac{1}{T} = \mathfrak{R}$, тоді

$$u = (a \cdot X_v + b \cdot Y_v + c) \cdot \mathfrak{R}, \quad v = (d \cdot X_v + e \cdot Y_v + f) \cdot \mathfrak{R}.$$

Знаменник для визначення текстурних координат u , v є сталим для рядка растеризації, у той час, як при звичайному підході він обчислюється для кожної точки поверхні. У подальшому будемо розглядати тільки одну з координат, наприклад u , оскільки вирази для їх розрахунку аналогічні. Виразимо Y_v через k і підставимо його в попередній вираз. Отримаємо

$$u = (a \cdot X_v + b \cdot (k \cdot X_v + h) + c) \cdot \mathfrak{R} = [X_v \cdot (a + b \cdot k) + (b \cdot h + c)] \cdot \mathfrak{R}.$$

Для початкової точки рядка растеризації $X_v = 0$. Із урахуванням цього

$$u_0 = \mathfrak{R} \cdot (b \cdot h + c).$$

Розглянемо, як змінюються u при зміні координати X_v на одиницю.

$$u_{i+j} = [(X_v + 1) \cdot (a + b \cdot k) + (b \cdot h + c)] \cdot \mathfrak{R} = u_i + \mathfrak{R} \cdot (a + b \cdot k).$$

Отримане співвідношення легко обчислити апаратним шляхом за умови, що \mathfrak{R} – відомо.

Важливим є питання растеризації трикутника, оскільки неортогональний по відношенню до координатних осей напрямок растеризації неминуче призведе до артефактів – наявності «просікань» і дублювання точок із-за зміщення по абсцисі початку рядків растеризації. Цього можна уникнути за умови, що провідне ребро трикутника буде паралельним осі ординат, однак це передбачає виконання особливої триангуляції поверхні і не відповідає вимогам графічних стандартів. Виключити артефакти можна за рахунок адаптивного фазування послідовності крокових приростів рядка сканування, що передбачає встановлення при інтерполюванні різних початкових значень оцінювальної функції, що суттєво ускладнює лінійний інтерполятор.

Найбільш просто вирішити колізію можна за рахунок растеризації не трикутника, а прямокутника, у який його віртуально вписано (рис. 3, а). Визначити параметри такого прямокутника можна шляхом порівняння координат вершин трикутника (крайні ліва та права вершини трикутника визначають абсцису лівої та правої сторін прямокутника, а нижня – ординати нижньої сторони прямокутника). Параметр r легко знайти, підставивши у рівняння прямої, яку використано для растеризації, значення абсциси верхньої вершини трикутника. Зрозуміло, що ордината верхньої лівої вершини прямокутника дорівнює суммі r і ординати верхньої вершини трикутника.

При растеризації прямокутника за умови неортогонального напрямку растеризації такі артефакти, як «просікання» і «залипання», будуть відсутні, оскільки крокові прирости сусідніх рядків будуть ідентичні вздовж ординатних рівнів.

Растеризації прямокутника виконується з метою визначення координат лівої і правої точок ребра трикутника, які перетинають рядок растеризації, без обчислень, які при реалізації потребують «довгих» операцій. При досягненні правого ребра трикутника здійснюється перехід на новий рядок растеризації прямокутника, який розміщено на один ординатний рівень нижче (рис. 3, а), тобто ділянка прямокутника за правим поточковим ребром не растеризується (рис. 3, б). Визначення координат лівого та правого ребер трикутника досягається шляхом порівняння кольору переднього плану, яким накреслено трикутник, з еталоном. При цьому можна, наприклад, використати принцип критерію парності [4], згідно з яким кількість перетину полігону є парним числом. Для підвищення швидкодії можна запропонувати растеризацію ділянок, які мають колір фону, імпульсною послідовністю підвищеної частоти. Безпосереднє текстуровання виконують з тактовою частотою, на якій працює відеопам'ять.

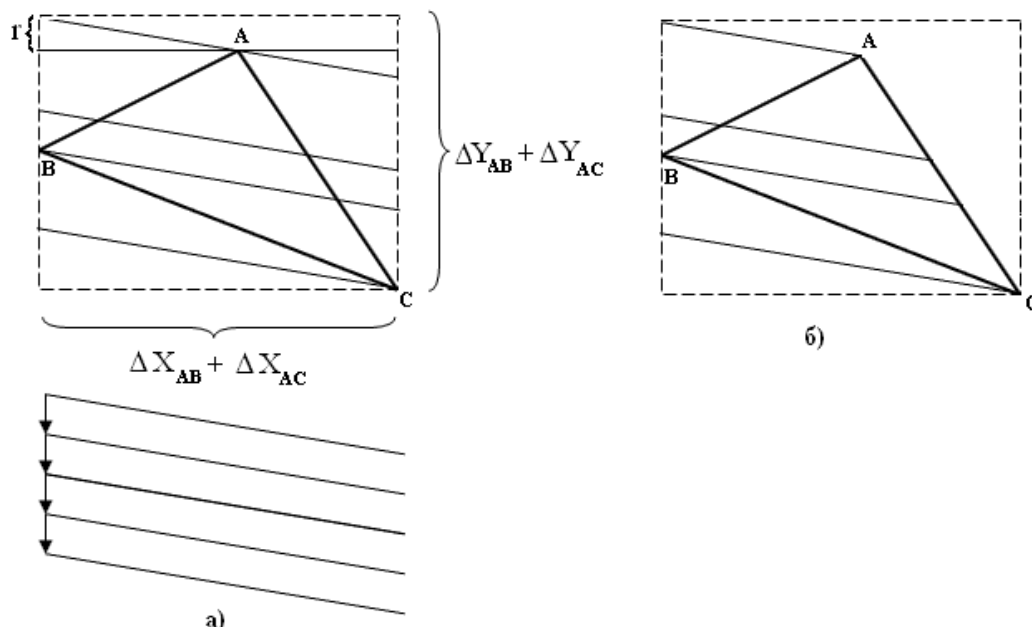


Рисунок 3 – Растрівання ділянки, обмеженої трикутником

Пристрій, який реалізує запропонований підхід до растерування (рис. 4), включає лінійний інтерполятор ЛІ, блок крокових приростів БКП, реєстр переднього плану РГп, реєстр РГХп і лічильник ЛЧ Уп початкової точки вікна, координатні лічильники ЛЧх, Лчу, блок керування текстурованням БКП.

Перед текстурованням у допоміжній пам'яті «викреслюють» кольором переднього плану вихідний трикутник. У лінійний інтерполятор записуються прирости ΔX , ΔY і знаки вектора, який визначає рядок растеризації прямокутника. У блок БКТ заносяться координати вершин трикутника. У регістр РГХп і лічильник ЛЧУп, лічильники ЛЧх і ЛЧу записуються координати лівої вершини прямокутника, з якої буде починатися растеризація прямокутника. В регістр РГпп заносяться значення інтенсивності кольору, яким накреслено трикутник. Ці дії утворюють цикл підготовки.

У подальшому лінійний інтерполятор і блок БКП генерують крокові прирости, під дією яких формуються координати точок рядка растеризації.

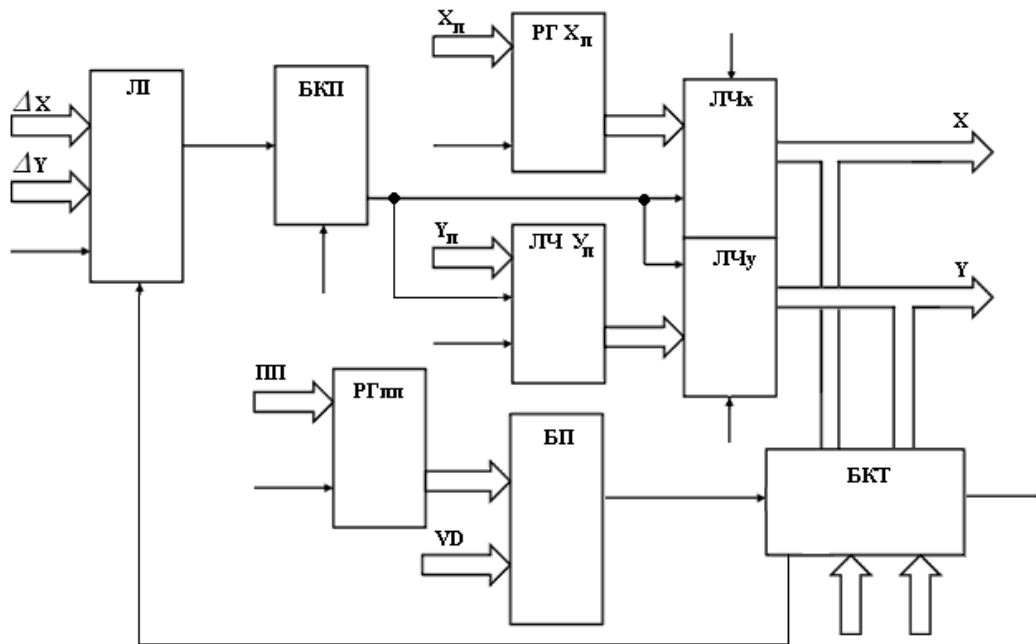


Рисунок 4 – Структурна схема блоку растеризації

Значення крокових приростів поступають на лічильники ЛЧх, ЛЧу, на виходах яких формуються координати точок вікна, які є одночасно адресами пам'яті. З виходу VD пам'яті зчитуються значення точок, які порівнюються блоком БП зі значенням регістра переднього плану. При співпадінні кольорів формується відповідний сигнал, який поступає в блок БКТ. Блок БКТ дозволяє текстуровання в проміжок часу між формуванням блоком порівняння сигналів рівності операндів із шини VD і регістра РГпп. Ці дії відповідають заповненню по критерію парності [4]. При цьому в блоці БКТ порівнюються значення адрес X і Y зі значеннями вершин трикутника, оскільки при перетині рядком растеризації тільки однієї вершини кількість перетинів ребер трикутника буде парним. У цьому випадку текстуровання не проводять. Растеризація рядка трикутника, який є частиною рядка прямокутника, завершують при перетині рядком правого ребра трикутника. При цьому блоком БКТ формується відповідний сигнал лінійному інтерполятору, який генерує разом із БКТ сигнал переходу на один ординатний рівень униз. Растеризацію трикутника завершують за умови, що потоковий рядок растеризації лежить нижче нижнього рядка трикутника. Після формування рядка растеризації трикутника стан лічильника ЛЧУп зменшують на одиницю. Після цього в лічильники ЛЧх, ЛЧу, заносять значення операндів, які зберігаються в регістрі РГХп та лічильнику ЛЧУп.

Висновки

Запропоновано метод підвищення продуктивності перспективно-коректного нанесення текстури за рахунок використання неортогонального напрямку растеризації ділянки, обмеженої полігоном. Растеризування об'єкту в світовій системі координат здійснюється за умови, що рядки растеризації розміщено на фіксованій відстані від спостерігача. Аналіз показав, що для трикутника, який включає T внутрішніх точок, вилучається (T-q) операцій ділення, де q- кількість горизонтальних рядків растеризації трикутника.

Список літератури

- [1] О. Н. Романюк, *Комп'ютерна графіка: навч. Посіб.* Вінниця, Україна: ВДТУ, 2001, 130 с.
- [2] О. Н. Романюк, та А. В. Чорний, *Високопродуктивні методи та засоби зафарбовування тривимірних графічних об'єктів. Монографія.* Вінниця, Україна: УНІВЕСУМ-Вінниця, 2006, 190 с.

- [3] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, «Підвищення реалістичності зафарбовування тривимірних графічних об'єктів», *Вісник ХНТУ*, № 3, с. 269-272, 2016.
- [4] О. Н. Романюк, М. Д. Обідник, О. В. Романюк, та Н. С. Костюкова, «Особливості архітектурної побудови систем формування тривимірних зображень», *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»*, 2010, № 12(165), с. 87-93.
- [5] Д. Херн, и М. П. Бейкер, *Компьютерная графика и стандарт OpenGL, 3-е издание*. Издательский дом «Вильямс», 2005, 1168 с.
- [6] А. М. Данилов, и И. А. Гарькина, *Интерполяция, аппроксимация, оптимизация: анализ и синтез сложных систем. Монография*. 2014.
- [7] Е. Янке, Ф. Эмде, и Ф. Леш, *Специальные функции: Формулы, графики, таблицы*. Directmedia, 2016.
- [8] Д. С. Яковлев, и М. Н. Фаворская, «Технологии фильтрации текстур», *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2011.
- [9] О. О. Дудник, та О. Н. Романюк, «Аналіз методів фільтрації текстур», *Матеріали міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи» (МТН-2015)*, Вінниця, 16-17 квітня 2015 р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://conf.inmad.vntu.edu.ua/fm/index.php?page=materials&line=11&mat=115>. Дата звернення: Лют. 10, 2021.
- [10] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, «Метод підвищення продуктивності перспективно-коректного текстурування», *Наукові праці ДонНТУ*, № 1 (22), с. 43-46, 2016.
- [11] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, «Підвищення продуктивності текстурування з виконанням процедурних операцій в об'єктному просторі», *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»*, № 2 (23), с. 45-51, 2016.
- [12] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, «Розробка методів текстурування для задач фотореалістичного рендерингу», *Матеріали сьомої міжнародної науково-технічної конференції «Моделювання і комп'ютерна графіка»*, 18-24 вересня 2017 р, с. 26-33, 2017.
- [13] О. Н. Романюк, та О. О. Дудник, «Підвищення реалістичності зафарбовування тривимірних графічних об'єктів», *Вісник ХНТУ*, № 3 (58), с. 269-272, 2016.
- [14] A. N. Romanyuk, and O. O. Dudnyk, «Ways to improve performance of anisotropic texture filtering», *Control and Communications (SIBCON), 2017 International Siberian Conference on. IEEE, 2017*, [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7998589>. Accessed on: February 01, 2021.
- [15] О. Н. Романюк та О. О. Дудник, «Підвищення продуктивності перспективно-коректного текстурування з використанням анізотропної фільтрації», *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 3, с. 192-195, 2016.

Стаття надійшла: 15.02.2021.

References

- [1] O. N. Romaniuk, *Kompiuterna hrafika: navch. Posib*. Vinnytsia Ukraina: VDTU, 2001, 130 s.
- [2] O. N. Romaniuk, та A. V. Chorny, *Vysokoproduktyvni metody ta zasoby zafarbovuvannia tryvy mirnykh hrafichnykh obiektiv. Monohrafiia*. Vinnytsia, Ukraina: UNIVESUM-Vinnytsia, 2006, 190 s.
- [3] O. N. Romaniuk, та O. O. Dudnyk, «Pidvyshchennia realistychnosti zafarbovuvannia tryvymirnykh hra-fichnykh obiektiv», *Visnyk KhNTU*, № 3, s. 269-272, 2016.
- [4] O. N. Romaniuk, M. D. Obidnyk, O. V. Romaniuk, та N. S. Kostiuкова, «Osoblyvosti arkhitekturnoi pobudovy system formuvannia tryvymirnykh zobrazen», *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalno-ho tekhnichnoho univertsytetu. Serii «Informatyka, kibernetyka ta obchysliuvalna tekhnika»*, 2010, № 12(165), с. 87-93.
- [5] D. Hern, i M. P. Bejker, *Komp'juternaja grafika i standart OpenGL, 3-e izdanie*. Izda-tel'skij dom «Vil'jams», 2005, 1168 s.
- [6] A. M. Danilov, i I. A. Gar'kina, *Interpoljacija, approksimacija, optimizacija: analiz i sintez slozhnyh sistem. Monografija*. 2014.
- [7] E. Janke, F. Jemde, i F. Lesh, *Special'nye funkcii: Formuly, grafiki, tablicy*. Directmedia, 2016.
- [8] D. S. Jakovlev, i M. N. Favorskaja, «Tehnologii fil'tracii tekstur», *Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavtiki*, 2011.
- [9] O. O. Dudnyk, та O. N. Romaniuk, «Analiz metodiv filtratsii tekstur», *Materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi Internet-konferentsii «Molod v tekhnichnykh naukakh:doslidzhennia, problemy, perspektivy» (MTN-2015)*, Vinnytsia, 16-17 kvitnia 2015 r. [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <http://conf.inmad.vntu.edu.ua/fm/index.php?page=materials&line=11&mat=115>. Data zvernennia: Liut. 10, 2021.
- [10] O. N. Romaniuk, та O. O. Dudnyk, «Metod pidvyshchennia produktyvnosti perspektyvno-korektnoho teksturuвання», *Naukovi pratsi DonNTU*, № 1 (22), s. 43-46, 2016.

- [11] O. N. Romaniuk, ta O. O. Dudnyk, «Pidvyshchennia produktyvnosti teksturuвання z vykonanniam pro-tsedurnykh operatsii v obiektnomu prostori», *Naukovi pratsi DonNTU. Seriiia «Informatyka, kiber-netyka ta obchysliuvalna tekhnika»*, № 2 (23), s. 45-51, 2016.
- [12] O. N. Romaniuk, ta O. O. Dudnyk, «Rozrobka metodiv teksturuвання dlia zadach fotorealistychnoho renderynhu», *Materialy somoi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Modeliuвання i kompiuterna hrafiika»*, 18-24 veresnia 2017 r, s. 26-33, 2017.
- [13] O. N. Romaniuk, ta O. O. Dudnyk, «Pidvyshchennia realistychnosti zafarbovuвання tryvymirnykh hra-fichnykh obiektyv», *Visnyk KhNTU*, № 3 (58), s. 269-272, 2016.
- [14] A. N. Romanyuk, and O. O. Dudnyk, «Ways to improve performance of anisotropic texture filtering», *Control and Communications (SIBCON), 2017 International Siberian Conference on. IEEE*, 2017, [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7998589>. Accessed on: February 01, 2021.
- [15] O. N. Romaniuk ta O. O. Dudnyk, «Pidvyshchennia produktyvnosti perspektyvno-korektnoho teksturuвання z vykorystanniam anizotropnoi filtratsii», *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh*, № 3, s. 192-195, 2016.

Відомості про авторів

Романюк Олександр Нікіфорович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення.

Дудник Олександр Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення.

Романюк Оксана Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення.

Озерчук Дмитро Анатолійович – магістрант кафедри програмного забезпечення.

A. N. Romanyuk, A. A. Dudnik, O. V. Romanyuk, D. A. Ozerchuk

МЕТОД ПЕРСПЕКТИВНО-КОРЕКТНОГО ТЕКСТУРИВАННЯ

Винницький національний технічний університет, Вінниця

O. N. Romanyuk, O. O. Dudnik, O. V. Romanyuk, D. A. Ozerchuk

PERSPECTIVE CORRECT TEXTURING METHOD

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia

УДК 004.89:004.032.26

Є. О. Шемет, А. А. Папа, А. А. Яровий

ЗАСТОСУВАННЯ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ COVID-19 НА ОСНОВІ РЕНТГЕНОГРАМ ЛЕГЕНЬ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. Об'єктом дослідження є процес класифікації рентгенограм легень для діагностування COVID-19. Проведені дослідження базуються на застосуванні глибоких згорткових нейронних мереж, що дають можливість зберегти просторову інформацію та аналізувати складні зображення запобігаючи затуханняу градієнту. Розглянуто принцип роботи згорткових нейронних мереж та переваги їх використання у застосуванні до складних зображень, у порівнянні зі штучними нейронними мережами на базі багатопарового перцептрона. Головне припущення дослідження полягає в гіпотезі, що використання глибокої згорткової нейромережі для класифікації рентгенограм легень дозволить отримати результат достатньо високої точності при діагностуванні COVID-19 та надасть можливість автоматизувати процес діагностування. Розглянуто актуальність проблематики автоматизованого діагностування COVID-19 на основі рентгенограм легень. Проведено тренування високопродуктивних архітектур глибоких згорткових нейронних мереж, із застосуванням додаткових методів обробки зображень, для запобігання перенавчанню. Проведено порівняння результатів роботи нейронних мереж та наведено статистичну інформацію для оцінки якості їх роботи. Здійснено аналіз результатів роботи штучної нейронної мережі, за допомогою розбиття зображення методом Лайма. Обгрунтовано доцільність та перспективність застосування глибоких згорткових нейронних мереж для автоматизації діагностування COVID-19 на основі рентгенограм легень. Проаналізовано розповсюджені помилки штучних нейронних мереж та можливі підходи до їх запобігання. Проаналізовано недоліки використання розглянутих підходів та складності, що можуть виникнути при автоматизації, за результатами запропоновано можливі варіанти покращення якості роботи глибокої згорткової нейронної мережі.

Ключові слова: згорткові нейронні мережі, класифікація, рентгенограма, COVID-19.

Аннотация. Объектом исследования является процесс классификации рентгенограм легких для диагностирования COVID-19. Проведенные исследования базируются на применении глубоких сверточных нейронных сетей, позволяющие сохранить пространственную информацию и анализировать сложные изображения предотвращая затухание градиента. Рассмотрены принцип работы сверточных нейронных сетей и преимущества их использования в применении к сложным изображениям, по сравнению с искусственными нейронными сетями на базе многослойного перцептрона. Главное предположение исследования заключается в гипотезе, что использование глубокой сверточной нейросети для классификации рентгенограм легких позволит получить результат достаточно высокой точности при диагностировании COVID-19 и позволит автоматизировать процесс диагностирования. Рассмотрены актуальность проблематики автоматизированного диагностирования COVID-19 на основе рентгенограм легких. Проведена тренировка высокопроизводительных архитектур глубоких сверточных нейронных сетей с применением дополнительных методов обработки изображений, для предотвращения переобучению. Проведено сравнение результатов работы нейронных сетей и приведены статистическую информацию для оценки качества их работы. Осуществлен анализ результатов работы искусственной нейронной сети, с помощью разбиения изображения методом Лайма. Обоснована целесообразность и перспективность применения глубоких сверточных нейронных сетей для автоматизации диагностирования COVID-19 на основе рентгенограм легких. Проанализированы распространенные ошибки искусственных нейронных сетей и возможные подходы к их предотвращению. Проанализированы недостатки использования рассмотренных подходов и сложности, которые могут возникнуть при автоматизации, по результатам предложены возможные варианты улучшения качества работы глубокой сверточных нейронной сети.

Ключевые слова: сверточные нейронные сети, классификация, рентгенограмма, COVID-19.

Abstract. The object of the study is the process of classification of lung radiographs for the diagnosis of COVID-19. The research is based on the use of deep convolutional neural networks, which make it possible to store spatial information and analyze complex images, preventing the attenuation of the gradient. The principle of operation of convolutional neural networks and the advantages of their use in application to complex images, in comparison with artificial neural networks based on a multilayer perceptron are considered. The main assumption of the study is the hypothesis that the use of a deep convolutional neural network for the classification of radiographs of the lungs will obtain a high-accuracy result in the diagnosis of COVID-19 and will automate the diagnostic process. The urgency of the problem of automated diagnosis of COVID-19 on the basis of lung radiographs is considered. Training of high-performance architectures of deep convolutional neural networks, with the use of additional methods of image processing to prevent retraining. The results of neural networks are compared and statistical information is given to assess the quality of their work. The analysis of the results of the artificial neural network, using image division by the Lyme method. The expediency and prospects of using deep convolutional artificial neural networks for automation of COVID-19 diagnosis on the basis of pulmonary radiographs are substantiated. Common errors of artificial neural networks and possible approaches to their prevention are analyzed. The disadvantages of using the considered approaches and the difficulties that may arise in automation are considered, according to the results, possible options for improving the quality of the deep convolutional neural network are proposed.

Keywords: convolutional neural networks, classification, radiograph, COVID-19.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-50-1-64-68>.

Вступ

Проведені дослідження використовують згорткові нейронні мережі на базі бібліотеки PyTorch [1], тому що це інструмент, який має переваги перед класичними методами обробки зображень та звичайними штучними нейронними мережами, такі як – можливість автоматизованого узагальнення, врахування просторової інформації та співвідношення частин зображення між собою. До недоліків згорткових нейронних мереж можна віднести складність аналізу та інтерпретації результатів. Останнім часом, використання згорткових нейронних мереж є досить актуальним та поширеним, зокрема в таких архітектурах: DenseNet201 [2], VGG19 (з нормалізацією по партіям) [3], ResNet34 та ResNet151 [4].

Головне припущення полягає в гіпотезі, що застосування згорткових нейронних мереж дозволить досягти високих результатів у розпізнаванні рентгенограм легень на предмет виявлення COVID-19 та відокремлення COVID-19 від інших хвороб.

Актуальність

Тема автоматизації діагностики COVID-19 на сьогодні є надзвичайно актуальною, через надзвичайно швидке розповсюдження хвороби та відповідно надзвичайно високу кількість захворюваних. Автоматизована діагностика допоможе розвантажити лікарів, а більш точна постановка діагноза може в певній мірі допомогти розвантажити лікарні. Обраний метод обґрунтовується вираженими особливостями COVID-19 на рентгенограмах легень [5], що створює підґрунтя для автоматизації за допомогою згорткових нейронних мереж.

Мета

Метою статті є дослідження ефективності застосування згорткових нейронних мереж для автоматизації діагностики COVID-19 на основі рентгенограм.

Задачі

1. Порівняння високопродуктивних архітектур глибоких згорткових нейронних мереж у задачі діагностування COVID-19 на основі рентгенограм легень;
2. Аналіз результатів та розгляд підходів для їх покращення.

Розв’язання задач

Згорткові нейронні мережі відрізняються від звичайних штучних нейронних мереж використанням двох додаткових шарів – згорткового та шару субдискретизації [6]. На згортковому шарі використовуються фільтри, що послідовно накладаються на зображення зі зсувом та враховують не тільки значення точки зображення, а й значення сусідніх точок. Кожен такий фільтр за допомогою тренування отримує “спеціалізацію” звертаючи увагу лише на конкретний аспект зображення. Шар субдискретизації дозволяє узагальнити частину зображення та позбутися менш значущої інформації, в результаті отримується зображення менше за розміром але з більшою щільністю корисної інформації. Ці шари використовуються послідовно, зменшуючи зображення та збільшуючи рівень абстракції. Якщо на перших рівнях аналізуються такі аспекти зображення, як наявність прямих чи кривих ліній, на наступних рівнях вони узагальнюються до аналізу наявних простих геометричних фігур, наприклад, прямокутників чи кіл, на останніх рівнях згортки кожна точка зображення, що залишилось, може відповідати за наявність авто, тварин чи облич на зображенні, або ж як у нашому випадку, наявність симптомів легеневої хвороби.

Додатково використовувався метод надглибоких нейронних мереж (Residual Neural Networks), який полягає в існуванні обхідних шляхів в нейромережі, що дозволяє уникнути затухання градієнту у нейронних мереж з великою кількістю шарів [7].

Для уникнення ефекту перенавчання (overfitting) [8], використовувалась додаткова обробка зображень методом аугментації [9], тобто невеликим змінам в зображенні по ходу навчання, щоб запобігти “запам’ятовуванню” зображень надглибокою мережею: горизонтальне віддзеркалення, зсув по горизонталі та вертикалі, повороти до 15 градусів.

За основу взято набір даних [10], що складається з рентгенограм легень 4 категорії: здорових людей (NORMAL), хворих COVID-19 (COVID), хворих вірусною пневмонією (Viral Pneumonia) та легень що мають симптоми “матового скла” (Lung_Opacity). Набір даних складається з даних що були надані великою кількістю медичних закладів та відрізняються якістю та форматом зображення.



Рисунок 1 – Приклади зображень після обробки з мітками “NORMAL”, “COVID”, “Viral Pneumonia” та “Lung_Opacity”

Всі чотири обрані архітектури згорткових нейромереж показали результати досить високої точності при діагностуванні COVID-19.

Таблиця 1 – Точність розпізнавання для різних архітектур нейромереж

	COVID	NORMAL	Viral Pneumonia	Lung_Opacity
DenseNet201	0.970	0.946	0.993	0.912
VGG19	0.952	0.947	0.989	0.916
ResNet34	0.983	0.952	0.968	0.890
ResNet151	0.981	0.962	0.968	0.920

Найкращу точність у класифікації зображень з COVID-19 отримано за допомогою архітектури ResNet34. Надалі проаналізувати частини зображення, на які глибока згортова нейронна мережа реагувала найбільш позитивно або негативно можна розбивши зображення методом Лайма, по контрастним швам, та приховуючи різні частини зображення обрахувати як вони впливають на результат. Застосувавши цей метод до натренованої моделі ResNet34 можна побачити, що глибока згортова нейронна мережа позитивно реагує на засвічення нижніх частин легень і негативно реагує на патології у верхніх частинах легень, що корелює з результатами медичних досліджень [1].

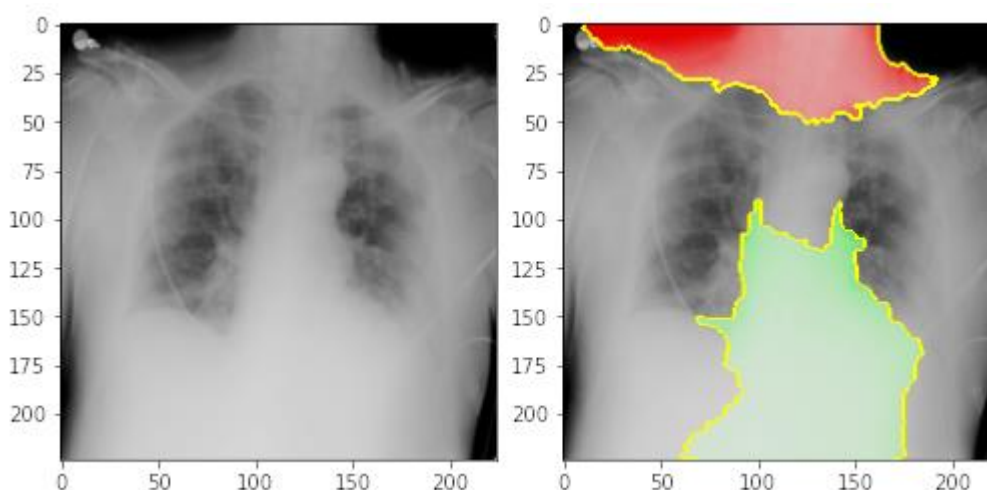


Рисунок 2 – Приклади аналізу зображень із застосуванням методу Лайма

Для ResNet34 наведемо матрицю невідповідностей по чотирьом категоріям. Серед усіх типів зображень основну складність для класифікації склали рентгенограми вірусної пневмонії та синдрому "матового скла". Це пояснюється великою кількістю збудників і варіацій протікання хвороби з активністю різних частин легень.

Таблиця 2 – Матриця невідповідностей для ResNet34

Реальне значення	Прогнозоване значення			
	COVID	NORMAL	Viral Pneumonia	Lung_Opacity
COVID	0.983	0.014	0.000	0.003
NORMAL	0.022	0.952	0.004	0.022
Viral Pneumonia	0.000	0.032	0.968	0.000
Lung_Opacity	0.019	0.091	0.000	0.890

Найбільші складності у процесі класифікації з використанням архітектури ResNet34 викликали нетипові або пошкоджені зображення. Зважаючи на цей факт, одним з додаткових інструментів підвищен-

ня точності та уникнення помилкової класифікації може стати окрема штучна нейронна мережа, для виявлення пошкоджених або неформатних зображень.

Висновки

1. В даному дослідженні найкращу точність в класифікації COVID-19 (98.3%) показала глибока згорткова нейронна мережа на базі архітектури ResNet34.

2. Отримані результати доводять доцільність і перспективність використання згорткових нейронних мереж для автоматизації діагностування COVID-19 на основі рентгенограм легенів. Достатньо висока точність класифікації дає можливість впроваджувати в перспективі застосовані підходи для використання в реальних умовах.

3. Перспективою для покращення точності розпізнавання, буде залучення експертів для подальшої деталізації і розбиття на окремі групи категорій "вірусна пневмонія" та "синдром матового скла", що дозволить зменшити помилку при класифікації зображень рентгенограм легенів із множиною варіацій протікання хвороби з активацією різних частин легень.

Список літератури

- [1] PyTorch. [Online]. Available: <https://pytorch.org>. Accessed on: February 01, 2021.
- [2] Gao Huang, Zhuang Liu, Laurens van der Maaten, Kilian Q. Weinberger, «Densely Connected Convolutional Networks», Cornell University Library, 2015. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1608.06993>. Accessed on: February 01, 2021.
- [3] Christian Szegedy, Vincent Vanhoucke, Sergey Ioffe, Jonathon Shlens, Zbigniew Wojna, «Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision», Cornell University Library, 2015. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1512.00567/>. Accessed on: February 01, 2021.
- [4] Karen Simonyan, Andrew Zisserman, «Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Visual Recognition», *International Conference on Learning Representations*, 2015. [Online]. Available: https://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/research/very_deep. Accessed on: February 01, 2021.
- [5] Tao Ai, Zhenlu Yang, Hongyan Hou, Chenao Zhan, and Liming Xia. 2020. Correlation of chest CT and RT-PCR testing in coronavirus disease 2019 (COVID-19) in China: a report of 1014 cases. *Radiology* (2020), 200642.
- [6] Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun, «Deep Residual Learning for Image Recognition», Cornell University Library, 2015. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1512.03385>. Accessed on: February 01, 2021.
- [7] Shengli Jiang, Victor M. Zavala, «Convolutional Neural Nets: Foundations, Computations, and New Applications», Cornell University Library, 2015 [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2101.04869>. Accessed on: February 01, 2021.
- [8] Shaeke Salman, Xiuwen Liu, «Overfitting Mechanism and Avoidance in Deep Neural Networks», Cornell University Library, 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1901.06566>. Accessed on: February 01, 2021.
- [9] Ilya Kostrikov, Denis Yarats, Rob Fergus, «Image Augmentation Is All You Need: Regularizing Deep Reinforcement Learning from Pixels», Cornell University Library, 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2004.13649>. Accessed on: February 01, 2021.
- [10] Tawsifur Rahman, Dr. Muhammad Chowdhury, Amith Khandakar, «COVID-19 Radiography Database», Kaggle, 2021. [Online]. Available: <https://www.kaggle.com/tawsifurrahman/covid19-radiography-database>. Accessed on: February 01, 2021.

Стаття надійшла: 20.02.2021.

References

- [1] PyTorch. [Online]. Available: <https://pytorch.org>. Accessed on: February 01, 2021.
- [2] Gao Huang, Zhuang Liu, Laurens van der Maaten, Kilian Q. Weinberger, «Densely Connected Convolutional Networks», Cornell University Library, 2015. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1608.06993>. Accessed on: February 01, 2021.
- [3] Christian Szegedy, Vincent Vanhoucke, Sergey Ioffe, Jonathon Shlens, Zbigniew Wojna, «Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision», Cornell University Library, 2015. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1512.00567/>. Accessed on: February 01, 2021.
- [4] Karen Simonyan, Andrew Zisserman, «Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Visual Recognition», *International Conference on Learning Representations*, 2015. [Online]. Available: https://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/research/very_deep. Accessed on: February 01, 2021.
- [5] Tao Ai, Zhenlu Yang, Hongyan Hou, Chenao Zhan, and Liming Xia. 2020. Correlation of chest CT and RT-PCR testing in coronavirus disease 2019 (COVID-19) in China: a report of 1014 cases. *Radiology* (2020), 200642.

- [6] Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun, «Deep Residual Learning for Image Recognition», Cornell University Library, 2015. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1512.03385>. Accessed on: February 01, 2021.
- [7] Shengli Jiang, Victor M. Zavala, «Convolutional Neural Nets: Foundations, Computations, and New Applications», Cornell University Library, 2015 [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2101.04869>. Accessed on: February 01, 2021.
- [8] Shaeke Salman, Xiuwen Liu, «Overfitting Mechanism and Avoidance in Deep Neural Networks», Cornell University Library, 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1901.06566>. Accessed on: February 01, 2021.
- [9] Илья Костриков, Денис Яратс, Роб Фергу, «Image Augmentation Is All You Need: Regularizing Deep Reinforcement Learning from Pixels», Cornell University Library, 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2004.13649>. Accessed on: February 01, 2021.
- [10] Tawsifur Rahman, Dr. Muhammad Chowdhury, Amith Khandakar, «COVID-19 Radiography Database», Kaggle, 2021. [Online]. Available: <https://www.kaggle.com/tawsifurrahman/covid19-radiography-database>. Accessed on: February 01, 2021.

Відомості про авторів

Шемер Євген Олександрович – аспірант кафедри комп'ютерних наук.

Папа Андрій Андрійович – аспірант кафедри комп'ютерних наук.

Яровий Андрій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних наук.

Е. А. Шемер, А. А. Папа, А. А. Яровой

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ COVID-19 НА ОСНОВЕ РЕНТГЕНОГРАММЫ ЛЕГКИХ

Винницкий национальный технический университет, Винница

Yevhen O. Shemet, Andrii A. Papa, Andrii A. Yarovy

APPLICATION OF ROLLED NEURAL NETWORKS FOR DIAGNOSIS OF COVID-19 ON THE BASIS OF PULMONARY X-RAYS

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia

КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА КОМПОНЕНТИ

УДК 621.316

О. Д. Азаров, С. В. Богомолов, О. Я. Стахов

БАГАТОКАНАЛЬНА ШВИДКОДЮЧА СИСТЕМА АЦП-ЦАП НА БАЗІ ВИСОКОЛІНІЙНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СТРУМ-СТРУМ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. Розглянуто метод структурно-функціональної організації багатоканальних швидкодіючих аналого-цифрових і цифро-аналогових систем на базі високолінійних перетворювачів струм-струм. Обґрунтована актуальність і практична доцільність застосування високолінійних перетворювачів струм-струм для отримання низької похибки лінійності та високої швидкодії.

Ключові слова: система, багатоканальний, швидкодіючий, високолінійний, перетворювач струм-струм, двотактний підсилювач постійного струму.

Аннотация. Рассмотрен метод структурно-функциональной организации многоканальных быстродействующих аналого-цифровых и цифро-аналоговых систем на базе высоколинейных преобразователей ток-ток. Обоснована актуальность и практическая целесообразность применения высоколинейных преобразователей ток-ток для получения низкой погрешности линейности и высокого быстродействия.

Ключевые слова: система, многоканальный, быстродействующий, высоколинейный, преобразователь ток-ток, двухтактный усилитель постоянного тока.

Abstract. The method of structural-functional organization of multichannel high-speed analog-digital and digital-analog systems on the basis of high-line current-to-current converters is considered. The relevance and practical feasibility of using high-line current-to-current converters to obtain low linearity error and high speed are substantiated.

Keywords: system, multichannel, high-speed, high-line, current-to-current converter, push-pull amplifier.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-50-1-69-79>.

Вступ

У теперішній час перетворювачі форми інформації (ПФІ) є невід'ємною складовою сучасних електронних систем [1-4]. На особливу увагу заслуговують багатоканальні швидкодіючі системи, які, у більшості випадків, будуються на основі групового використання і кожному каналі аналого-цифрових і цифро-аналогових перетворювачів (АЦП і ЦАП) на кожен канал, що забезпечує максимальну швидкодію зі збереженням високої точності перетворення [5].

Водночас, використання групи декількох АЦП чи ЦАП у вищезгаданих системах створює ряд проблемних особливостей. По-перше, кожен із них має свої індивідуальні статичні похибки і в разі потреби їх калібрування, система, що його реалізує ускладнюється. По-друге, не зважаючи на можливість забезпечення високої швидкодії групою перетворювачів, це збільшує споживану потужність і вимагає додаткового, як аналогового, так і цифрового обладнання. По-третє, надійність таких систем знижується, через наявність великої кількості вузлів [2, 3, 6, 7].

Альтернативою такого підходу є застосування одного високолінійного швидкодіючого АЦП чи ЦАП, проте, це вимагає збільшення його швидкодії порівняно зі швидкістю будь-якого із групових АЦП чи ЦАП, а також забезпечення високої швидкодії багатоканального комутаторів вхідного й вихідного сигналу. Перспективним шляхом щодо виконання вказаних вимог є струмовий принцип у побудові згаданих пристроїв. Так, АЦП повинен бути виконаний за принципом перетворювача струм-код (ПСК), ЦАП – по принципу перетворювача код-струм (ПКС), вхідний нормуючий підсилювач (НП) та вихідний буфер (ВБ) – на основі перетворювача струм-струм (ПСС), а багатоканальний комутатор струмів (БКС) – на базі швидкодіючих діодних ключів.

Актуальність

Запропоновано підхід побудови багатоканальних аналого-цифрових і цифро-аналогових систем, в яких на відміну від відомих використовується один ПКС, ПСС, а також блок комутації струмів. Це дозволяє при заданій точності зекономити на аналоговому обладнанні системи.

Показано, що запропонований принцип побудови ПСС у вигляді високолінійного двотактного підсилювача постійного струму (ДППС) на біполярних транзисторах із заземленим навантаженням має високий вихідний опір і широку смугу пропускання, що дозволяє, використовуючи комутацію струму, реалізовувати багатоканальний режим системи.

Водночас, матеріал, присвячений такому підходу побудови аналого-цифрових і цифро-аналогових систем, у науково-технічній літературі подається епізодично і є неструктурованим. Тому тема статті, присвячена побудові багатоканальних швидкодіючих аналого-цифрових та цифро-аналогових систем на базі високолінійних перетворювачів струм-струм, є актуальною.

Мета

Спрощення структури багатоканальної системи АЦП-ЦАП до одного перетворювача код-струм шляхом застосування високолінійних швидкодіючих перетворювачів струм-струм.

Постановка задач

1. Проаналізувати запропонований метод структурно-функціональної організації багатоканальних швидкодіючих аналого-цифрових і цифро-аналогових систем на базі високолінійних перетворювачів струм-струм.
2. Розглянути схему високолінійного перетворювача струм-струм.
3. Запропонувати і проаналізувати схему багатоканального комутатора струмів на базі перетворювача струм-струм.
4. Розглянути кола комутації з високою швидкодією та мінімізованими похибками лінійності.
5. Надати практичні рекомендації щодо застосування розглянутих багатоканальних швидкодіючих аналого-цифрових та цифро-аналогових системи на базі високолінійних перетворювачів струм-струм.

Розв'язання поставлених задач

Відповідно, для досягнення мети досліджень, запропоновано структурно-функціональну схему аналого-цифрової і цифро-аналогової системи, які зображено на рисунках 1 і 2, відповідно.

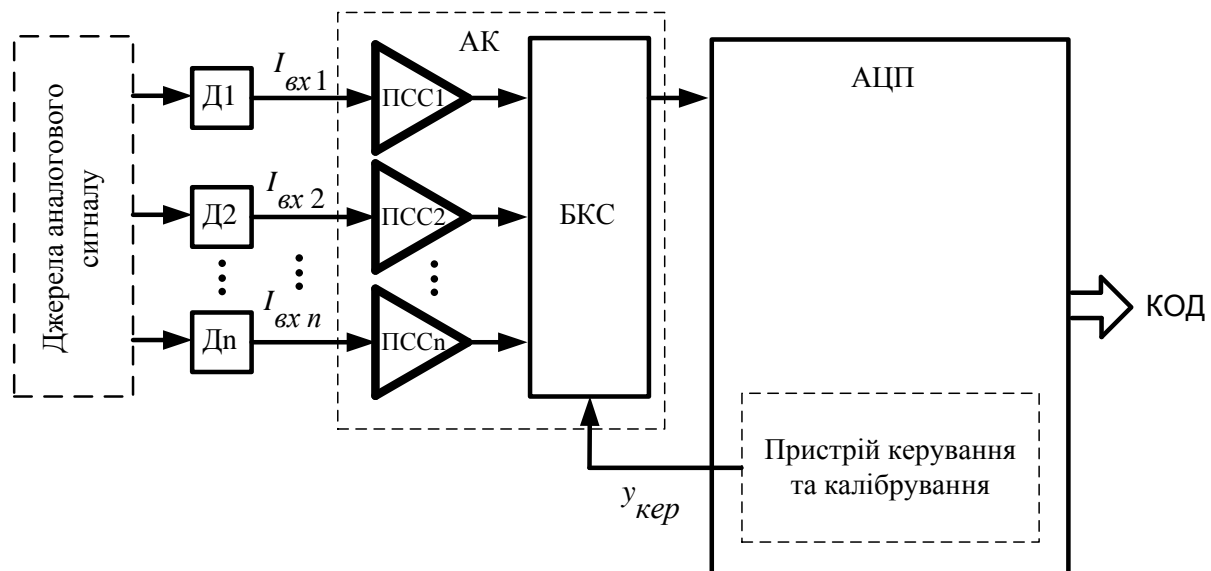


Рисунок 1 – Структурно-функціональна схема аналого-цифрової системи

Схема аналого-цифрової системи приймає на аналогові входи сигнал у вигляді струмів $I_{vx1}, I_{vx2}, \dots, I_{vxn}$, що надходять з давачів сигналу D_1, D_2, \dots, D_n . У випадку сигналів малої потужності необхідна постановка буферних каскадів, якщо ж сигнал у вигляді напруги – постановка перетворювачів напруга-струм, що забезпечить струмовий принцип роботи, який має переваги над принципом перетворення напруг. Детальний опис такого роду пристроїв описано в [2].

Система містить блок аналогового комутатора (АК), який складається з n ПСС та БКС, високолінійного швидкодіючого АЦП, що містить пристрій керування і калібрування та забезпечує режим роботи АК, а також формує вихідний цифровий код.

Запропонована система може працювати у двох режимах. Перший режим – калібрування – визначення похибок зсуву нуля пристроїв каналу перетворення. Для цього на входи, в обхід давачів сигналу, подається $I_{vx1}, I_{vx2}, \dots, I_{vxn} = 0$. Далі, по чергово здійснюється комутація кожного з n каналів і визначення кодового еквіваленту похибки, що записується в пам'ять системи у вигляді таблиці поправок, та враховується в режимі основного перетворення. На цьому перший режим завершено і система готова до виконання основної функції.

Другий режим – основне перетворення. За командою пристрою керування вибирається n -й номер потрібного каналу, який підключається на вхід високолінійного швидкодіючого багаторозрядного АЦП, де й відбувається основне перетворення аналог-код. Процес повторюється для кожного з каналів багатоканальної системи.

Схема цифро-аналогової системи приймає на вхідну шину цифровий код. Вона також працює у двох режимах. Перший режим – калібрування – визначення похибок зсуву нуля пристроїв каналу перетворення. Для цього на вхід подається нульовий код та по чергово здійснюється комутація кожного з k каналів, що дозволяє визначити значення струму зсуву нуля на кожному з виходів $I_{вих1}, I_{вих2}, \dots, I_{вихk}$. Для системи ЦАП визначаються кодові еквіваленти зсувів нуля із врахуванням похибок лінійності тракту перетворення так, щоб $I_{вих1}, I_{вих2}, \dots, I_{вихk} = 0$. Кодові поправки кожного з каналів враховуються в режимі основного перетворення. На цьому перший режим завершено і система готова до виконання основної функції.

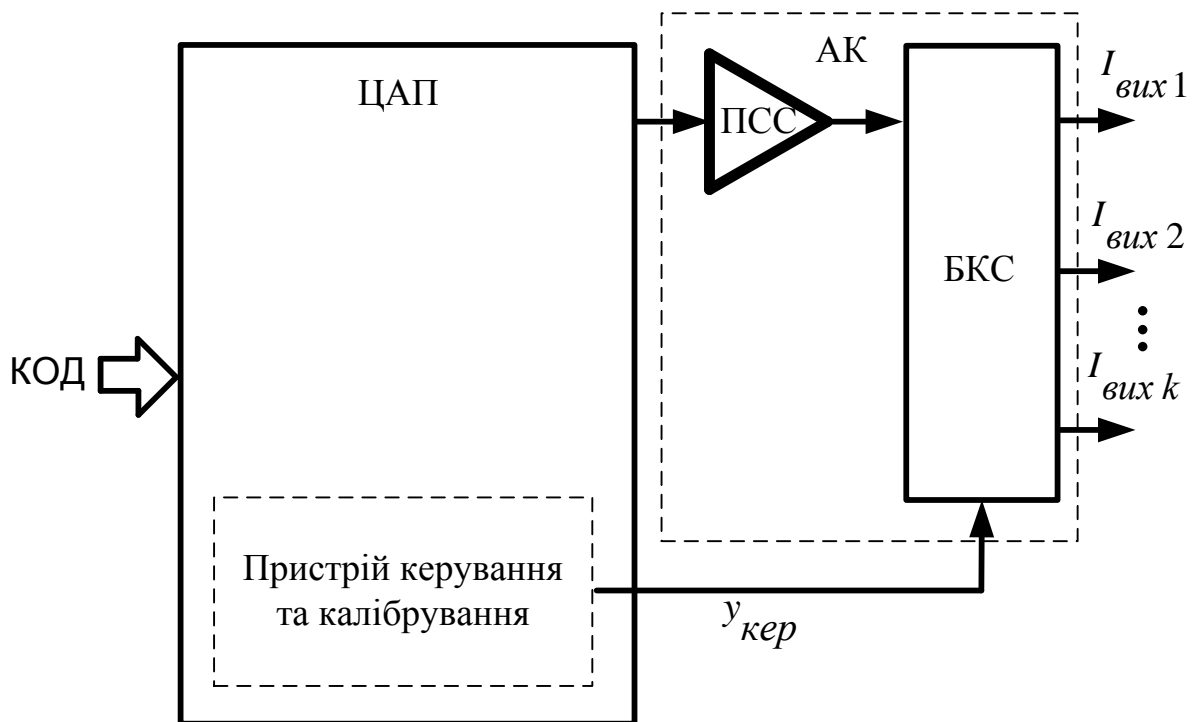


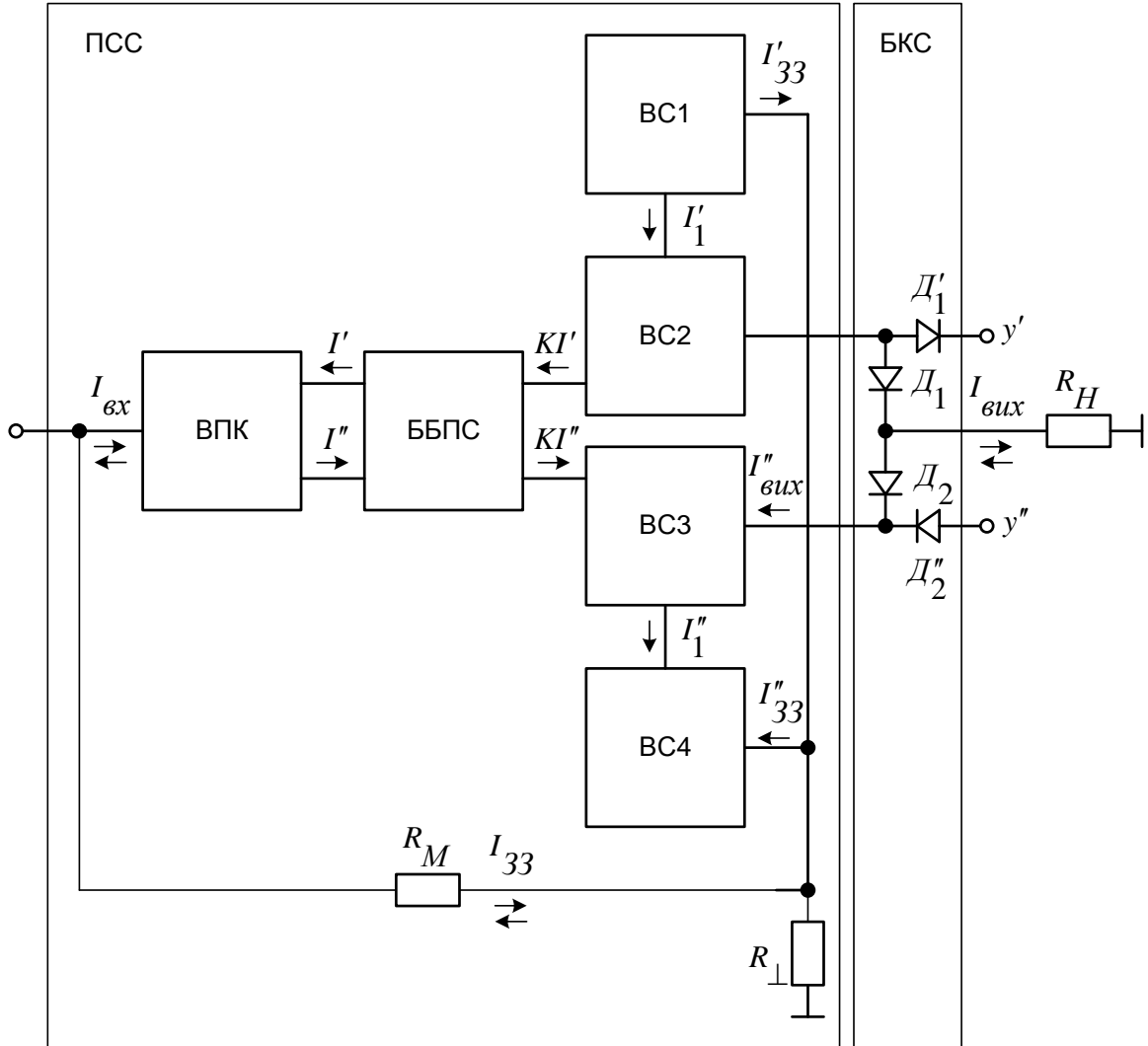
Рисунок 2 – Структурно-функціональна схема цифро-аналогової системи

Другий режим – основне перетворення. За командою пристрою керування вибирається потрібний канал, а на входи внутрішнього суматора високолінійного швидкодіючого ЦАП подається перетворюваний код з вхідної шини і код поправки зсуву нуля, який отримано в режимі калібрування. З виходу ЦАП сумарний код надходить на вхід ПСС і перетворюється у відповідну аналогову величину – струм, який, залежно від обраного каналу пристроєм керування, подається на необхідний вихід $I_{вих1}, I_{вих2}, \dots, I_{вихk}$.

До ПСС висуваються такі вимоги, як: високі лінійність, швидкодія та значний вихідний опір, а також широка смуга пропускання. Це обумовлено специфікою роботи струмових ключових елементів. На рисунку 3 наведено структурну схему АК, що містить ПСС і БКС. Причому ПСС доцільно реалізовувати у вигляді високолінійного двотактного підсилювача постійного струму (ДППС), наприклад, який наведено на рисунку 4 [8].

Для забезпечення високого вихідного опору $R_{вих}$ у ДППС використано від'ємний зворотний зв'язок із способом знімання за струмом. У процесі функціонування вхідний струм $I_{вх}$ подається на вхідний двотактний каскад (ВДК) на виходах якого маємо розгалужені складові I' і I'' , які у свою чергу подаються на блок балансування і підсилення струмів (ББПС), де вони підсилюються і додатково розгалужуються на парафазні складові KI' , KI'' , відповідно. Ці складові надходять на входи відбивачів струму (ВС) ВС2 і ВС3. Причому перші виходи ВС2 і ВС3 із сигналами $I'_{вих}$ і $I''_{вих}$ об'єднуються через

діоди Д1 і Д2 у сигнал $I_{вих}$, що подається на вихідну шину схеми. Водночас другі виходи ВС2 і ВС3 із сигналами I_1' і I_1'' підключено до входів відбивачів ВС1 і ВС4, виходи яких також об'єднуються та утворюють шину зворотного зв'язку (33) із сигналом I_{33} .



Ри-

сунок 3 – Структурна схема АК на базі ППС і БКС

Малосигнальний коефіцієнт підсилення струму K_i при розірванні петлі 33 має значення:

$$K_i = \frac{I_{вих}}{I_{вх}}$$

Якщо, наприклад, що вхідний підсилювальний каскад (ВПК) побудовано за схемою із підсиленням [2], тоді нескладно показати, що:

$$K'_{ВПК} \approx K''_{ВПК} = \frac{\beta' \cdot \beta''}{\beta' + \beta''},$$

де: β' і β'' – малосигнальні коефіцієнти підсилення струму n-n-n і p-n-n транзисторів ВПК відповідно, K', K'' – коефіцієнти підсилення по верхньому і нижньому каналах ВПК відповідно.

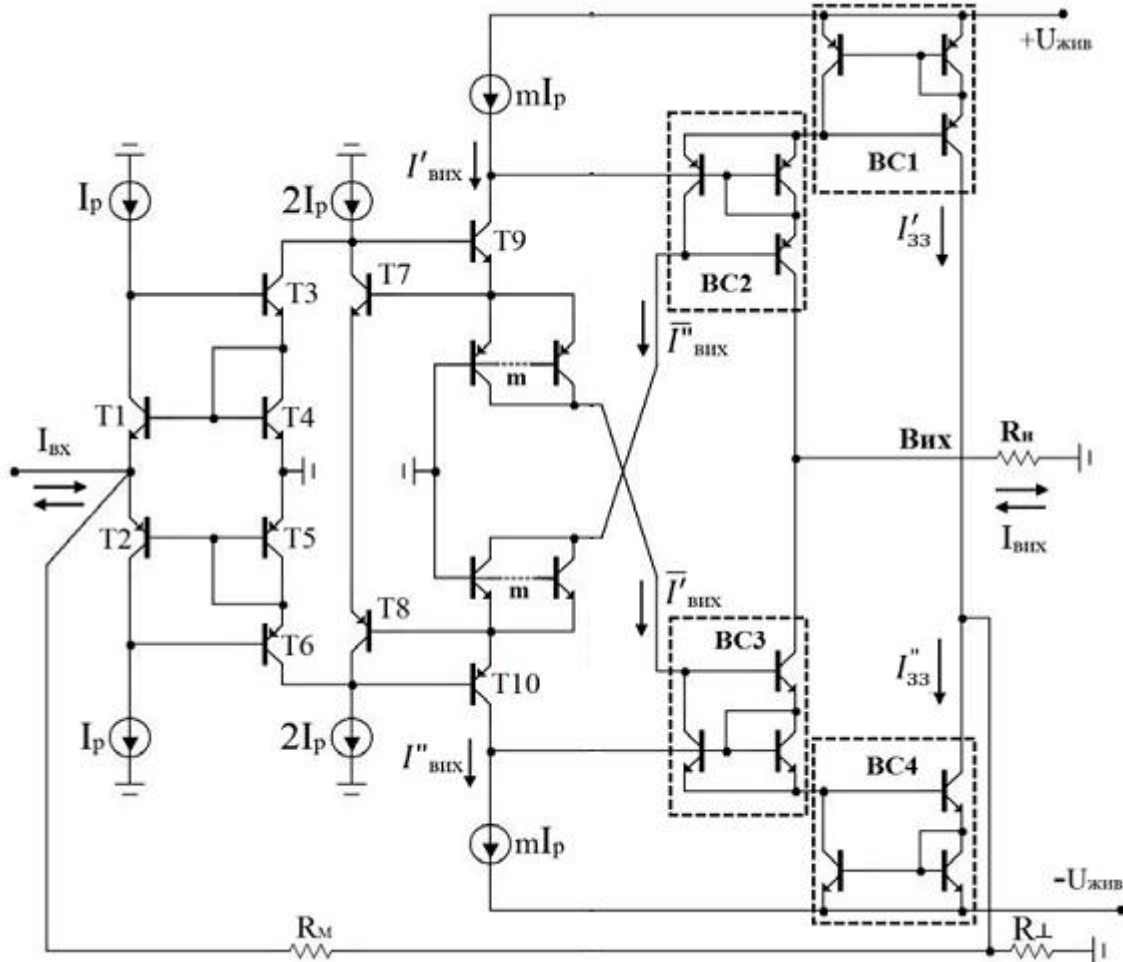


Рисунок 4 – Спрощена принципова схема ДППС для реалізації ПСС

Сумарний коефіцієнт підсилення ВПК визначимо, як:

$$K_{ВПК} = K'_{ВПК} + K''_{ВПК} = 2 \cdot \frac{\beta' \cdot \beta''}{\beta' + \beta''}.$$

Аналогічно, для ББПС, маємо:

$$K'_{ББПС} \approx K''_{ББПС} \approx K_{ББПС} = \frac{\beta' \cdot \beta''}{\beta' + \beta''}.$$

Враховуючи наведене, остаточно отримаємо:

$$K_i = 2 \cdot \left(\frac{\beta' \cdot \beta''}{\beta' + \beta''} \right)^2. \quad (1)$$

Значення струму зворотного зв'язку I_{33} формується як сума струмів I'_{33} і I''_{33} , яка дорівнює значенню $I_{вих}$ із похибкою, зокрема, похибкою лінійності ΔI_L . Тому, нескладно показати, що при розірванні петлі 33 коефіцієнт передачі струму:

$$K_{i33} \approx 2 \cdot K_i.$$

Замикаючи контур 33 за допомогою резисторів масштабу R_M і R_{\perp} , отримаємо ППС з можливістю керування значенням струму. З теорії електричних схем [9] відомо, що коефіцієнт передачі буде рівний:

$$K_{iПСС} = \frac{K_{i33}}{1 + \chi \cdot K_{i33}},$$

де: χ – глибина зворотного зв'язку.

У свою чергу χ задається такими параметрами, як опори резисторів масштабу R_M і R_{\perp} та опору $R_{ex\ 33}$. $R_{ex\ 33}$ – вхідний опір ДППС з урахуванням дії зворотного зв'язку. Оскільки за способом введення зворотний зв'язок є паралельним, то це призведе до того, що $R_{ex\ 33} \ll R_{ex}$, де R_{ex} – максимальний вхідний опір ДППС, який у свою чергу $R_{ex} \ll R_M$, а тому впливом $R_{ex\ 33}$ можна знехтувати і в розрахунках не використовувати.

У цьому випадку, глибина зворотного зв'язку визначається, як:

$$\chi = \frac{R_M \parallel R_{\perp}}{R_M} = \frac{\frac{R_M \cdot R_{\perp}}{R_M + R_{\perp}}}{R_M} = \frac{R_{\perp}}{R_M + R_{\perp}}$$

Отже, враховуючи, що $\chi \cdot K_{i33} \gg 1$, остаточно можемо записати:

$$K_{iПСС}(R_{ex} \ll R_M) = \frac{R_M + R_{\perp}}{R_{\perp}}. \quad (2)$$

У випадку ж, коли умова $R_{ex} \ll R_M$ не виконується, а значення R_M не достатньо високе, тобто $R_{ex} \leq R_M$, то варто враховувати значення опору R_{ex} , а коефіцієнт передачі ППС набуває вигляду:

$$K_{iПСС}(R_{ex} \leq R_M) = \frac{R_M + R_{\perp}}{R_{ex} + R_M + R_{\perp}}. \quad (3)$$

Малосигнальне значення вхідного опору R_{ex}^* ВПК дорівнює паралельному з'єднанню вхідних опорів ВПК із боку ядра на транзисторах Т1 і Т2 [2]:

$$R_{ex}^* = r'_e \parallel r''_e = \frac{r'_e \cdot r''_e}{r'_e + r''_e},$$

де: r'_e, r''_e – вхідні опори верхнього і нижнього каналів ВПК відповідно.

Також, враховуючи те, що вхідний каскад функціонує під дією локального від'ємного зв'язку за струмом, то завдяки транзисторам Т3 і Т6 з відповідними коефіцієнтами передачі β' і β'' , загальний вхідний опір R_{ex} збільшиться і матиме значення:

$$R_{\text{вх}} = \frac{r'_e \cdot r''_e}{r'_e + r''_e} \cdot 2 \cdot \frac{\beta' \cdot \beta''}{\beta' + \beta''}.$$

Вихідний малосигнальний опір $R_{\text{вих}}$ ППС залежить, як від вихідних опорів $R_{\text{вих1}}$ і $R_{\text{вих2}}$ вивачів ВС2 і ВС3 відповідно, так і від глибини ЗЗ, зокрема, від значення $K_{i\text{ПСС}}$ і K_i .

Із теорії транзисторних підсилювальних схем у випадку застосування від'ємного зв'язку із зніманням струму [9] відомо, що це призведе до збільшення вихідного опору. Для нашого випадку маємо:

$$R_{\text{вих}} = (r'_{\text{вих}} \parallel r''_{\text{вих}}) \cdot (1 + \chi \cdot K_i \text{ ЗЗ}),$$

де: $r'_{\text{вих}} \approx \frac{1}{2} \cdot r'_c$, $r''_{\text{вих}} \approx \frac{1}{2} \cdot r''_c$ – малосигнальні опори колекторних переходів n-p-n і p-n-p транзисторів ВС2 і ВС3 відповідно.

Враховуючи, що:

$$r'_{\text{вих}} \parallel r''_{\text{вих}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{r'_c \cdot r''_c}{r'_c + r''_c},$$

маємо:

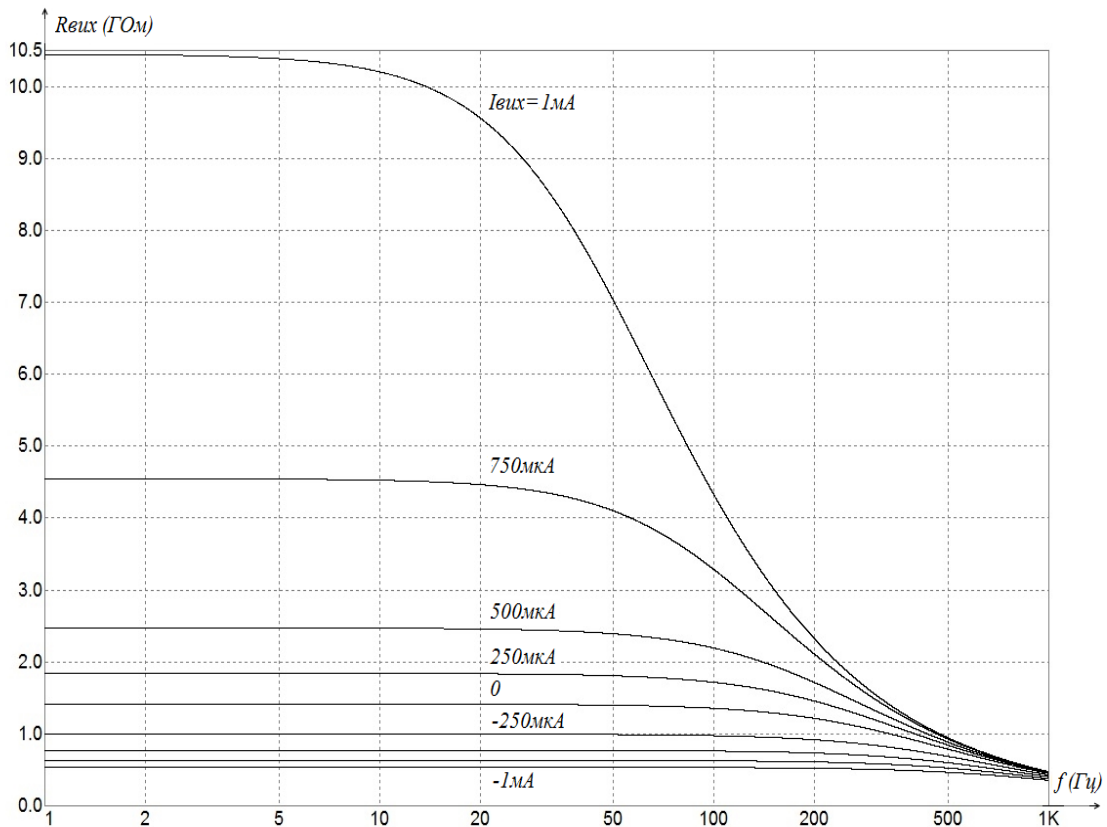
$$R_{\text{вих}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{r'_c \cdot r''_c}{r'_c + r''_c} \cdot \left(1 + \frac{1}{K_{i\text{ПСС}}(R_{\text{вх}} \ll R_M)} \cdot K_i \text{ ЗЗ}\right) \quad (4)$$

Формула (4) є справедливою, якщо виконується умова $R_{\text{вх}} \ll R_M$. Як що $R_{\text{вх}} \leq R_M$, то у (4) треба підставити коефіцієнт з формули (3):

$$R_{\text{вих}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{r'_c \cdot r''_c}{r'_c + r''_c} \cdot \left(1 + \frac{1}{K_{i\text{ПСС}}(R_{\text{вх}} \leq R_M)} \cdot K_i \text{ ЗЗ}\right).$$

Результати досліджень доцільно отримувати шляхом комп'ютерного моделювання із застосуванням моделей інтегральних транзисторів pnp – NUHFARRY, npn – PUHFARRY [10]. У випадку побудови ПСС на вищевказаних транзисторах і заданих режимах роботи, коли робочий струм каскадів схеми ДППС $I_p = 1\text{mA}$, а $R_{\text{вх}} = 0$, маємо 1.4Гом, що є досить великим значенням. Якщо $R_{\text{вх}}$ змінюється у певному діапазоні, то і $R_{\text{вих}}$ змінюється у зв'язку із залежністю від колекторних струмів ВС2 і ВС3.

Комп'ютерне моделювання залежності $R_{\text{вих}} = f(I_{\text{вих}})$ дозволило отримати сім'ю вихідних характеристик у діапазоні $I_{\text{вх}} = \pm 100\text{mA}$, зокрема при $K_{i\text{ПСС}} = 10$ ($R_M = 4,5\text{кОм}$, $R_{\perp} = 500\text{Ом}$), зображених на рисунку 5.

Рисунок 5 – Графіки залежності $R_{вих} = f(I_{вих})$ у частотній зоні при $K_{iПСС} = 10$

Зведена таблиця залежностей вихідного опору $R_{вих}$, а також абсолютних та відносних похибок лінійності ΔI_L , $\delta \Delta I_L$ від коефіцієнту підсилення $K_{iПСС}$ наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Зведена таблиця залежностей параметрів ППС

$K_{iПСС}$	2	5	10	20	50	100
$R_{вих}$, (МОм)	406	688	1200	401	100	40
ΔI_L (нА)	0.98	1.4	2.2	42	916	2100
$\delta \Delta I_L$, (%)	$0.46 \cdot 10^{-4}$	$0.7 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$21 \cdot 10^{-4}$	$408 \cdot 10^{-4}$	$105 \cdot 10^{-3}$

Вихід ПСС підключено до блоку комутації струмів, який побудовано на діодних ключах (ДК) $D1, D'1, D2, D'2$, верхнього і нижнього каналів відповідно. При реалізації інтегральних схем доцільним є використання транзисторних структур у діодному вмиканні [9].

Відповідно, як показано на рисунку 3, керування ДК здійснюється цифровими сигналами y', y'' відповідно. Слід зазначити що для забезпечення функціонування ДК потрібно, щоб значення їх робочих струмів були би дещо більше, ніж $I_{вих}$. Якщо рівні робочих струмів будуть на рівні одиниць міліампер, то опори ДК – десятки Омів. За цих умов відносна методична похибка комутації струмів дорівнює:

$$\delta I_{кс} = \frac{R_{ДК}}{R_{ДК} + R_{вих}},$$

де: $R_{вих}$ – вихідний опір ПСС. Якщо $R_{вих}$ має значення сотні МОм – одиниці ГОм то $\delta I_{КС}$ має порядок $\sim 10^{-5} \div 10^{-4}\%$. Безумовно, що використовуючи запропонований принцип комутації струмів, цією похибкою у більшості випадках можна знехтувати.

Водночас, необхідно враховувати фундаментальні обмеження точності припасування пар ДК, які можна врахувати у вигляді поправок, занесених у вигляді кодів самокалібрування та самокоригування в системи ПКС і ПСК. Доцільно також враховувати похибку зсуву нуля, що виникає на вході ПСС.

Схеми реалізації багатоканального комутатора у багатоканальних АЦП і ЦАП показано на рис. 6.

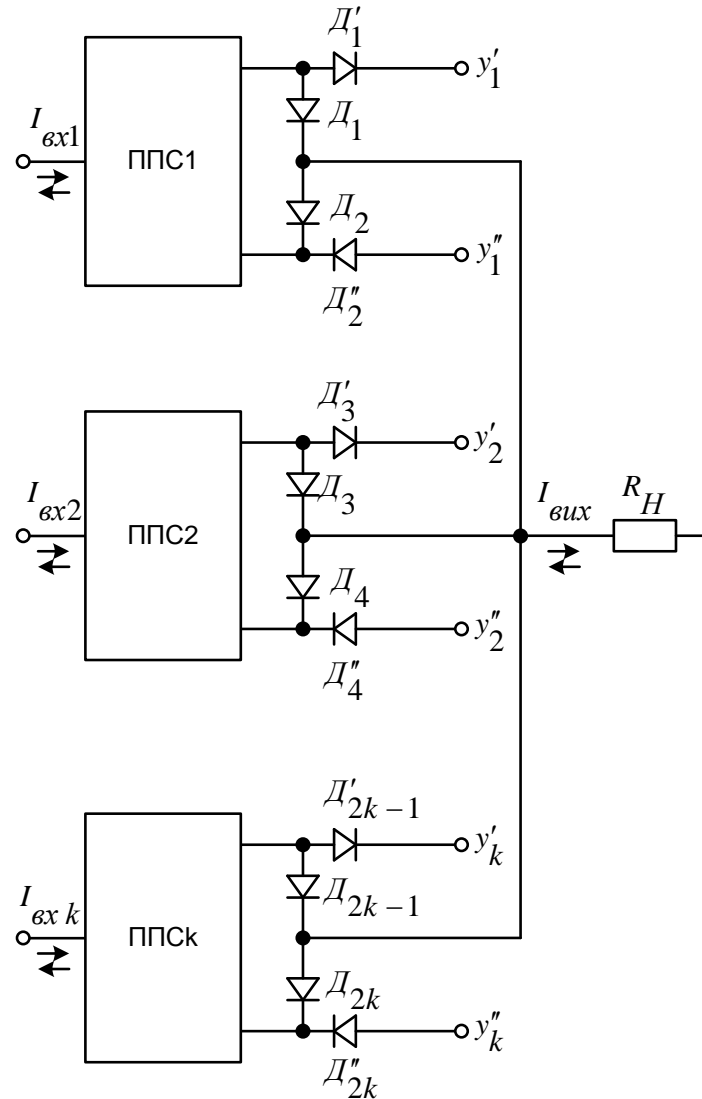


Рисунок 6 – Схема багатоканального комутатора на базі ПСС

Тут керування здійснюється цифровими сигналами $y'_1, y''_1; y'_2, y''_2; \dots; y'_k, y''_k$ відповідно, де k – кількість каналів комутатора. У такому випадку необхідно враховувати відхилення та похибки ППС і ДК, підсумувати їх і формувати у вигляді кодів поправок для відповідного каналу перетворення.

Варто також зазначити, що застосування принципу підсилення струмів дозволяє досягати максимальної швидкодії комутатора, що визначається граничними частотами підсилення біполярних транзисторів. Так ширина смуги одиничного підсилення ДППС при $R_H = 100 \text{ Ом}$ досягає $\sim 1.6 \text{ ГГц}$.

Враховувати необхідно також і різновид та тип джерела вхідного сигналу і навантаження ППС і ДК. Для збереження високої швидкодії і мінімальних похибок лінійності бажано, щоб вихідні опори джерел сигналу були високими, а вхідні опори навантаження були б низькими. Цього легко досягти шляхом за-

стосування перетворювачів напруга-струм, буферних каскадів та перетворювачів струм-напруга, побудованих на ДППС [2, 4].

Висновки

1. Запропоновано метод структурно-функціональної організації багатоканальних швидкодіючих аналого-цифрових і цифро-аналогових систем, у яких, на відміну від відомих, використовується лише один перетворювач код-струм із застосуванням одного перетворювача струм-струм. Це дозволяє при заданій точності зекономити на аналоговому обладнанні системи.

2. Проаналізовано запропонований принцип побудови перетворювача струм-струм у вигляді високолінійного двотактного підсилювача постійного струму. Показано, що цей пристрій має високий вхідний опір і широку смугу пропускання.

3. Запропоновано і проаналізовано схему швидкодіючого багатоканального комутатора струмів на базі високолінійного перетворювача струм-струм, що дозволяє реалізовувати багатоканальний режим аналого-цифрових і цифро-аналогових систем всього з одним комутатором.

4. Запропоновано перетворення інформації виконувати з сигналами у вигляді струму, що має переваги по швидкодії і точності над перетворенням сигналів у вигляді напруги, а комутуючі кола реалізувати на основі діодних ключів, оскільки струм витікання, а водночас, і похибка лінійності, для діодів, є найменшою із всіх можливих.

5. Надано практичні рекомендації й умови практичного застосування розглянутих багатоканальних швидкодіючих аналого-цифрових та цифро-аналогових системи на базі високолінійних перетворювачів струм-струм для різного типу вхідних і вихідних пристроїв, що виконують роль генераторів вхідного сигналу та навантаження.

Список використаних джерел

- [1] О. Д. Азаров, *Основи теорії аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення: монографія*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2004, 257 с.
- [2] О. Д. Азаров, С. В. Богомолів, *Основи теорії високолінійних аналогових пристроїв на базі двотактних підсилювальних схем: монографія*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2013, 142 с.
- [3] Л. В. Крупельницький, О. Д. Азаров, *Аналого-цифрові пристрої систем, що самокоригуються, для вимірювань і оброблення низькочастотних сигналів: монографія*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2005, 167 с.
- [4] О. Д. Азаров, В. А. Гарнага, *Двотактні підсилювачі постійного струму для багаторозрядних перетворювачів форми інформації, що самокалібруються: монографія*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2011, 156 с.
- [5] Walt Kesler, «ANALOG-DIGITAL CONVERSION», *ADI Central Application Department*, March, 1127 p, 2004.
- [6] У. Титце, К. Шенк, *Полупроводниковая схемотехника*. М., Россия: ДМК Пресс, 2008, т. 1, 832 с.
- [7] V. Grebene, *Bipolar and MOS Analog Integrated Circuit Design*. New York, USA: WileyInterscience, 2003, 912 p.
- [8] О. Д. Азаров, Є. С. Генеральницький, «Високолінійний двотактний підсилювач-масштабатор струму на біполярних транзисторах із заземленим навантаженням», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 55-61, Жов 2019.
- [9] И. П. Степаненко, *Основы микроэлектроники: учебное пособие для вузов*. М. Россия: Лаборатория Базовых Знаний, 2003, 488 с.
- [10] HFA3046 / 3096/3127/3128 Transistor Array SPICE Models [Online]. Available: <https://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/mm30/mm3046.pdf>. Accessed on January 20, 2021.

Стаття надійшла: 20.02.2021.

References

- [1] O. D. Azarov, *Osnovy teorii analoho-tsyfrovoho peretvorennia na osnovi nadlyshkovykh pozytsiinykh system chyslennia: monohrafiia*. Vinnytsia, Ukraina: UNIVERSUM – Vinnytsia, 2004, 257 s.
- [2] O. D. Azarov, S. V. Bohomolov, *Osnovy teorii vysokoliniinykh analohovykh prystroiv na bazi dvotaktnykh pidsyliuvalnykh skhem: monohrafiia*. Vinnytsia, Ukraina: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2013, 142 s.
- [3] L. V. Krupelnytskyi, O. D. Azarov, *Analoho-tsyfrovi prystroi system, shcho samokoryhuiutsia, dlia vymiriuvan i obrobliannia nyzkochastotnykh syhnaliv: monohrafiia*. Vinnytsia, Ukraina: UNIVERSUM – Vinnytsia, 2005, 167 s.
- [4] O. D. Azarov, V. A. Harnaha, *Dvotaktni pidsyliuvachi postiinoho strumu dlia bahatorozriadnykh peretvoriuvachiv formy informatsii, shcho samokalibruiutsia: monohrafiia*. Vinnytsia, Ukraina: VNTU, 2011, 156 s.
- [5] Walt Kesler, «ANALOG-DIGITAL CONVERSION», *ADI Central Application Department*, March,

1127 p, 2004.

- [6] U. Titce, K. Shenk, *Poluprovodnikovaja shemotehnika*. M., Rossija: DMK Press, 2008, t. 1, 832 s.
- [7] A. B. Grebene, *Bipolar and MOS Analog Integrated Circuit Design*. New York, USA: WileyInterscience, 2003, 912 p.
- [8] O. D. Azarov, Ye. S. Heneralnytskyi, «Vysokoliniinyi dvotaktnyi pidsylyuvach-masshtabator strumu na bipoliarnykh tranzystorakh iz zazemlenym navantazhenniam», *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, № 5, s. 55-61, Zhov 2019.
- [9] I. P. Stepanenko, *Osnovy mikroelektroniki: uchebnoe posobie dlja vuzov*. M. Rossija: Laboratorija Bazovyh Znanij, 2003, 488 s.
- [10] HFA3046 / 3096/3127/3128 Transistor Array SPICE Models [Online]. Available: <https://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/mm30/mm3046.pdf>. Accessed on January 20, 2021.

Відомості про авторів

Азаров Олексій Дмитрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри обчислювальної техніки.

Богомолів Сергій Віталійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки.

Стахов Олексій Ярославович – аспірант кафедри обчислювальної техніки.

А. Д. Азаров, С. В. Богомолів, А. Я. Стахов

МНОГОКАНАЛЬНАЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ СИСТЕМА АЦП-ЦАП НА БАЗЕ ВЫСОКОЛИНЕЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТОК-ТОК

Винницкий национальный технический университет, Винница

O. D. Azarov, S. V. Bohomolov, O. Y. Stahov

MULTICHANNEL SPEED ADC-DAC SYSTEM BASED ON HIGH-LINE CURRENT-CURRENT CONVERTERS

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia

УДК 004.93

Т. Б. Мартинюк, М. О. Зайцев, М. В. Микитюк

ОСОБЛИВОСТІ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ В ЛОГІКО-ЧАСОВОМУ БАЗИСІ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. Перехід від вхідної аналогової інформації, зокрема, у вигляді візуальної картини, до її цифрового подання для подальшої обробки неможливий без застосування аналого-цифрового перетворення. На теперішній час існує багато ефективних методів та засобів перетворення. Разом з тим, знаходять застосування альтернативні до класичних способи аналого-цифрового перетворення. Серед них слід відмітити способи, що базуються на принципі «золотого перерізу» з формуванням цифрових даних у вигляді кодів Фібоначчі, а також спосіб перетворення у логіко-часовому базисі з формуванням цифрових даних у вигляді одиничних кодів. Особливістю аналого-цифрового перетворення у логіко-часовому базисі є використання способу часо – імпульсного перетворення. Цей спосіб перетворення базується на квантуванні за одиничною тривалістю τ вхідної часової тривалості оптичного сигналу. В даній роботі розглянуто особливості аналого-цифрового перетворення в логіко-часовому базисі, а також властивості одиничних кодів, у вигляді яких формуються результуючі цифрові сигнали. Проаналізовано два різновиди одиничних кодів, нормального та позиційного, їх завадостійкість. Ця властивість одиничних кодів дозволяє використовувати їх для передачі даних, кодування станів у пристроях керування, адресації вмісту у запам'ятовуваних пристроях.

Ключові слова: аналого – цифрове перетворення, логіко – часовий базис, одиничний код.

Анотация. Переход от входной аналоговой информации, в частности, в виде визуальной картины, к ее цифровому представлению для дальнейшей обработки невозможен без применения аналого-цифрового преобразования. В настоящее время существует много эффективных методов и средств аналого - цифрового преобразования. Вместе с тем, находят применение альтернативные по отношению к классическим способы аналого - цифрового преобразования. Среди них следует отметить способы, основанные на принципе «золотого сечения» с формированием цифровых данных в виде кодов Фибоначчи, а также способ преобразования в логико-временном базисе с формированием цифровых данных в виде единичных кодов. Особенностью аналого - цифрового преобразования в логико - временном базисе является использование способа время - импульсного преобразования. Этот способ преобразования базируется на квантовании с единичной длительностью τ входной временной длительности оптического сигнала. В данной работе рассмотрены особенности аналого - цифрового преобразования в логико - временном базисе, а также свойства единичных кодов, посредством которых формируются результирующие цифровые сигналы. Проанализированы две разновидности единичных кодов, нормального и позиционного, их помехоустойчивость. Это свойство единичных кодов позволяет использовать их для передачи данных, кодирования состояний в устройствах управления, адресации содержимого в запоминающих устройствах.

Ключевые слова: аналого - цифровое преобразование, логико - временной базис, единичный код.

Abstract. The transition from analog information, in particular, in the form of visual picture, to its digital representation for the further processing is impossible without the use of analog-digital conversion. There are many effective methods and tools for analog-digital conversion nowadays. It is needed to admit the methods based on the principle of «golden ratio» with the formation of digital data in the Fibonacci codes form among them, as well as the method of transformation in the logic-time basis with the digital data formation in the form of unit codes. A feature of analog-digital conversion in the logic-time basis is the use of the method of time-pulse conversion. This conversion method is based on quantization by the unit duration τ of the input time duration of the optical signal. This paper reviews the features of analog-digital conversion in the logic-time basis, as well as the properties of unit codes, in the form of which the resulting digital signals are formed. Two types of unit codes, normal and positional, of their noise stability are analyzed. This property of unit codes allows them to be used for data transmission, state coding in control devices, content addressing in storage devices.

Key words: analog-digital conversion, logic-time basis, unit code.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-50-1-80-85>.

Вступ

В процесі попередньої обробки, аналізу та розпізнавання візуальної інформації важливе місце займає аналого-цифрове (АЦ) перетворення вхідної інформації у її цифрове подання. На теперішній час розроблено і впроваджено багато різноманітних засобів – аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), а сам процес АЦ перетворення досліджено достатньо докладно з точки зору його швидкодії, завадостійкості, апаратних витрат, споживаної потужності [1-4].

Актуальність

Для АЦ перетворення важливим є форма і спосіб надходження як вхідної інформації, зокрема, зображення, так і цифрового представлення вихідних даних. Найбільш розповсюдженим є подання вихідних даних АЦП у вигляді двійкових кодів [3,4]. Разом з тим, знаходять своє ефективне застосування АЦП, які використовують в процесі АЦ перетворення альтернативні методи, наприклад, правило “золотого перерізу” із застосуванням кодів Фібоначчі [5,6]. Ще одним варіантом альтернативного АЦ перетворення є застосування логіко – часового (ЛЧ) базису з результуючим поданням інформації у вигляді одиничних кодів [7,8].

Мета

Метою роботи є аналіз особливостей аналого – цифрового перетворення в логіко – часовому базисі, враховуючи формування результату перетворення у вигляді одиничних кодів.

Постановка задачі

Професором Кожем'якою В.П. в його роботах [7,8] дано визначення базових положень ЛЧ підходу до перетворення візуальної інформації, а також подання та обробки числової інформації у специфічному

одиночному коді. В теоретичному плані в основі ЛЧ базису використовується принцип "квантування часу світловим променем, що несе у своїй тривалості інформацію" [7]. Отже, основним інформаційним параметром є час (його тривалість), а обробка інформації виконується за принципами картинної логіки, тобто з максимально припустимим паралелізмом по двовимірному полю зображення [8]. Тому такий підхід до перетворення та обробки інформації отримав назву логіко-часового [7,8].

На рис.1 показано графічне подання процесу АЦ перетворення в ЛЧ базисі. Фактично цей процес представляє різновид імпульсно – кодової модуляції (ІКМ) [9]. Відмінність полягає в тому, що вхідною є тривалість оптичного, а не електричного сигналу, а вихідні імпульси формують одиничний код на виході. Отже, такий варіант АЦ перетворення можна розглядати також як часово – імпульсне перетворення.

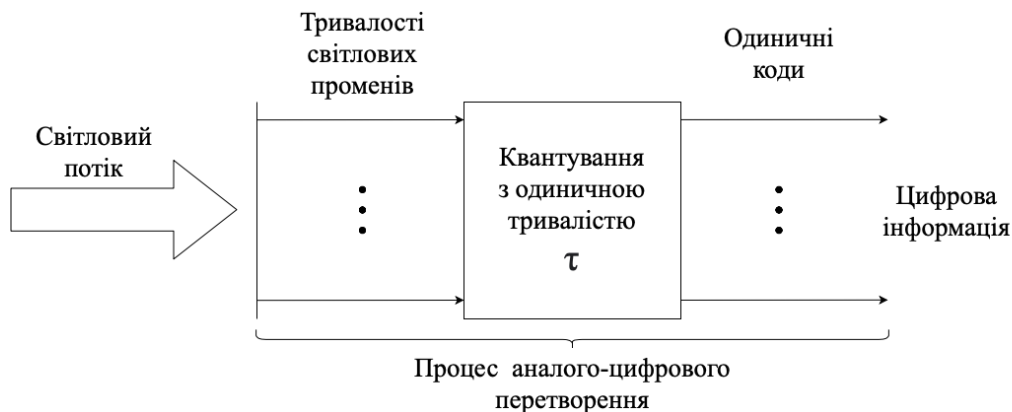


Рисунок 1 – Аналого – цифрове перетворення у логіко – часовому базисі

Основи логіко-часового базису

В основі такого АЦ перетворення (рис. 1), яке базується на квантування за одиничною тривалістю τ вхідної часової тривалості оптичної інформації, використовуються прості операції лічби, затримки і зсуву. В роботах [10,11] докладно досліджено ЛЧ функції (ЛЧФ): їх матмоделі, властивості та області математичного застосування, наприклад, для реверсивної лічби, реверсивного зсуву, паралельного порівняння та підсумовування групи часових тривалостей. Ці виділені основні операції фактично формують функціонально – повний набір операцій для арифметично – логічної обробки над операндами, що подаються часовими тривалостями.

Особливий інтерес серед визначених операцій представляє ЛЧ реверсивний зсув, оскільки реалізація цієї операції має просторово – розподілений вигляд [12] і не потребує додаткового апаратного перетворення. Крім того, реалізація цієї операції забезпечує природний паралелізм при виконанні таких масових асоціативно – логічних операцій, як визначення співвідношень ($=$, $>$, $<$), виявлення найменшого операнда серед інших, сортування операндів з формуванням їх рангів [11].

Стосовно ЛЧ функцій необхідно також відмітити, що вони представляють собою багатозначні (k - значні) функції, для яких визначено їх функціональну повноту. Відомо, що надлишкова базисна система, яка містить всі константи та логічні функції вигляду:

$$\begin{aligned}x_1 \vee x_2 &= \max(x_1, x_2) \\x_1 \wedge x_2 &= \min(x_1, x_2)\end{aligned}\quad (1)$$

$$J_s(x) = \begin{cases} k-1, & \text{якщо } x = s, \quad s = \overline{0, k-1}, \\ 0, & \text{якщо } x \neq s, \end{cases}$$

а також такі операції:

$$\begin{aligned}x^i &= x + i(\text{mod } k) \\ \tilde{x} &= (k-1) - x(\text{mod } k)\end{aligned}\quad (2)$$

$$J(x_1, x_2) = \begin{cases} k-1, & \text{якщо } x_1 = x_2, \\ 0, & \text{якщо } x_1 \neq x_2, \end{cases}$$

є повною системою, оскільки містить повну систему Россера-Т'юкетта і Поста [13].

В роботі [14] доведено, що, використовуючи ЛЧ функції, можна реалізувати всі складові повної системи Россера-Т'юкетта і Поста, оскільки існує пряма залежність між кількістю n встановлених в одиничний стан двійкових елементів багатозначного запам'ятовуючого елемента та тривалістю θ вхідного сигналу, тобто:

$$\theta = n \cdot \tau, \quad (3)$$

де τ – час спрацювання бістабільного елемента.

Фактично, формула (3) пояснює процес АЦ перетворення в ЛЧ базисі [7,8], а також дозволяє ототожнювати логічні функції (1) відповідно з операціями диз'юнкції, кон'юнкції та інверсії, оскільки основна інформація про ЛЧ функцію міститься в тривалості часових відрізків (інтервалів) її існування [14].

Властивості одиничних кодів

Особливості ЛЧ зображення числової інформації детально розглянуто у роботі [15], де досліджено два варіанти ЛЧ кодів (ЛЧК), а саме, одиничний нормальний та одиничний позиційний коди. Для наочності представлення двійкових кодових комбінацій цифр у системі числення з основою r доцільно використати матрицю кодування розмірністю $r \times n$ вигляду [16]:

$$D_r^n = \begin{pmatrix} \alpha_{0,0} & \alpha_{0,j} & \alpha_{0,n-1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{r-1,0} & \alpha_{r-1,j} & \alpha_{r-1,n-1} \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} \rightarrow j \\ \downarrow i \end{matrix} \quad (4)$$

де r – основа числення; n – кількість двійкових розрядів; $\alpha_{i,j}$ – біт представлення розряду, $\alpha_{i,j} \in \{0,1\}$.

Отже, матриця кодування (4) формується шляхом співставлення кожному можливому значенню цифри $a_i \in \{0, \dots, r-1\}$ відповідних наборів двійкових кодів фіксованої розрядності n . В цьому випадку одиничне кодування десяткових цифр при максимальній кількості розрядів $n_{max} = 10$ можна подати у вигляді матриці кодування (4) таким чином:

$$D_{10}^{10} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} \rightarrow j \\ \downarrow i \end{matrix} \quad (5)$$

де рядки матриці представляють коди десяткових цифр $a_i \in \{0, \dots, 9\}$, а стовпці відповідають двійковим розрядам $j \in \{0, \dots, 9\}$ кожного коду цифри a_i [15].

Таким чином, для даного одиничного кодування виконується умова для ваг φ_j кожного розряду:

$$\varphi_j = \begin{cases} 1, & \text{якщо } j > 0, \\ 0, & \text{якщо } j = 0, \end{cases} \quad (6)$$

тобто ваги всіх n розрядів одиничного коду представляють собою такий числовий ряд:

$$\underbrace{0, 1, 1, \dots, 1}_n \quad (7)$$

Отже, представлений у вигляді матриці кодування (5) одиничний код, який є надлишковим кодом з постійними (одиничними) вагами розрядів, крім нульового розряду, названо одиничним нормальним кодом [8]. Особливістю цього коду є те, що будь-яка цифра a_i , навіть нуль, відображається послідовністю одиниць, починаючи з 0-го і до n -го розрядів ($n = 0, \dots, r-1$), зважена сума яких формує значення відповідної цифри.

Другий варіант одиничного коду, а саме, одиничний позиційний код, можна подати у вигляді такої матриці кодування:

$$D_{i0}^{10}(n) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

де ваги φ_n розрядів мають вигляд:

$$\varphi_n = \sum_{j=0}^n \varphi_j. \quad (9)$$

Для цього випадку кодування ваги всіх n розрядів одиничного коду представляють собою нуль і натуральний ряд чисел:

$$\underbrace{0, 1, 2, \dots, 9}_n, \quad (10)$$

оскільки в результаті виконання умови (9) в одиничних комбінаціях (8) послідовність з n одиниць замінюється одиничним маркером в i -й позиції кодової комбінації відповідної цифри a_i . Таким чином, при одиничному позиційному кодуванні використовується позиційний принцип подання цифр [8,15,16].

Крім того, одиничний нормальний код можна вважати окремим випадком узагальнених p -кодів Фібоначчі, якщо $p = \infty$ [17]. Крім того, у роботі [14] доведено, що ЛЧ коди мають властивість адаптивності, доповняльності й впорядкованості, що дозволяє реалізувати функціонально – повну базисну систему для виконання арифметично – логічних операцій.

У класифікаційній системі кодів за базовими ознаками одиничні коди виділяють за кількістю імпульсних ознак [18] поряд з двійковими та багатопозиційними (багатозначними) кодами [19]. В результаті аналізу одиничних кодів з позицій класичної теорії кодування їх можна класифікувати як окрему групу кодів зі специфічними властивостями [18].

У роботах [20,21] детально досліджено обидва одиничних кода за такими ознаками, як теоретична контролездатність, контролездатність за модифікованою перевіркою матрицею, еквідистантність, надлишковість, систематичність, лінійність, циклічність, рівномірність, рівнозваженість. Для цього було використано такі поняття алгебраїчної теорії кодування, як матриця кодування, блокова довжина, перевірна матриця, синдром, кодова попарна відстань, вага слова, суміжний клас, лідер. Все це дозволяє не тільки класифікувати код, але й визначити його завадостійкість та контролездатність. Результати дослідження показали, що обидва одиничних кода належать до нелінійних кодів і мають надлишковість інформаційних позицій (розрядів), що приводить до підвищення рівня їх реальної контролездатності у порівнянні з теоретичною [20]. Крім того, одиничні коди мають просте синдромне декодування за аналогією з кодом Хеммінга, оскільки відхилення у позиціях (розрядах) сформованого синдрому у порівнянні з правильним синдромом для кожного з двох одиничних кодів вказує на конкретну помилкову позицію у прийнятому слові [20].

Відомо, що найбільш поширеними областями застосування завадостійких кодів, до яких належать одиничні коди, є не тільки виявлення та виправлення помилок при передачі даних, але й кодування станів керуючих автоматів у пристроях керування та адресація інформації у запам'ятовуючих пристроях обчислювальної техніки [20,22]. Так доведено доцільність використання одиничного кодування станів мікропрограмних R – автоматів (RA) для граф – схем алгоритмів зі значною розгалуженою структурою [23]. Одиничне кодування в цьому випадку дозволяє не тільки зменшити складність логічного перетворювача, але й спростити процес синтезу RA, який реалізується на паралельно – послідовних (зсувних) регістрах. Збільшення складності запам'ятовуючої частини RA, яке виникає при цьому, легко реалізується при використанні ПЛІС.

Разом з тим, необхідно відмітити, що одиничні коди не можуть замінити такі універсальні коди, як двійкові та десятковий.

Висновки

1. Аналого – цифрове перетворення, що використовується в логіко – часовому базисі, фактично представляє собою часово – імпульсне перетворення тривалості вхідного оптичного сигналу в цифровий

одиночний код. При цьому виконується квантування за одиночною тривалістю τ вхідної часової тривалості оптичного сигналу.

2. Використовуючи логіко – часові функції, що формують логіко – часовий базис, можна реалізувати всі складові повної системи Россера – Т'юкетта і Поста як надлишкової базисної системи, що забезпечує їх функціональну повноту.

3. Аналіз одиночних кодів, нормального і позиційного, показав їх властивості як завадостійких кодів, що складають окрему групу за класифікаційною системою кодів, враховуючи кількість імпульсних ознак. Одиночні коди як альтернатива двійковим кодам можуть використовуватись як завадостійкі коди при передачі даних, у пристроях керування при кодуванні їх станів, а також у запам'ятовуючих пристроях при адресації їх вмісту.

Список літератури

- [1] Э. И. Гитис, Е. А. Пискунов, *Аналого–цифровые преобразователи*. М., Россия: Энергоатомиздат, 1981.
- [2] Ю. Р. Гнатек, *Справочник по цифро-аналоговым и аналого-цифровым преобразователям*. М., Россия: Радио и связь, 1982.
- [3] У. Титце, К. Шенк, *Полупроводниковая схемотехника. Справочное руководство*. пер. с нем. М., Россия: Мир, 1983.
- [4] П. Хоровиц, У. Хилл, *Искусство схемотехники*: пер. с англ. Т.2. М., Россия: Мир, 1983.
- [5] О. Д. Азаров, *Основы теории аналого-цифрового перетворення на основі надлишкових позиційних систем числення*. Монографія. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ, 2004.
- [6] О. Д. Азаров, *Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі систем числення з ваговою надлишковістю*. Монографія. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ, 2010.
- [7] В. П. Кожемяко, *Оптоэлектронные логико-временные информационно-вычислительные среды*. Тбилиси, Грузия: Изд-во Мецниереба, 1984.
- [8] С. В. Свечников, В. П. Кожемяко, Л. И. Тимченко, *Квазиимпульсно-потенциальные оптоэлектронные элементы и устройства логико-временного типа*. Киев, Украина: Наук. думка, 1987.
- [9] В. А. Погрибной, *Бортовые системы обработки сигналов*. Киев, Украина: Наук. думка, 1984.
- [10] В. П. Кожемяко, Л. И. Тимченко, Г. Л. Лысенко, Ю. Ф. Кутаев, *Функциональные элементы и устройства оптоэлектроники*. Киев, Украина: УМК ВО, 1990.
- [11] В. П. Кожемяко, Т. Б. Мартинюк, О. І. Суприган, Д. І. Клімкіна, *Квантові перетворювачі на оптоелектронних логіко-часових середовищах для око-процесорної обробки зображень*. Монографія. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007.
- [12] V. Kozhemiako, T. Martyniuk, O. Kozhemiako, «Vector-matrix conversions for parallel information processing in logic-time base», *Proceedings of SPIE*, Vol. 4425. pp. 106-108. 2001.
- [13] К. Г. Самофалов, В. И. Корнейчук, А. М. Романкевич, В. П. Тарасенко, *Цифровые многозначные элементы и структуры*. Киев, Украина: Вища школа, 1974.
- [14] Т. Б. Мартинюк, М. М. Аль-Хіярі, С. А. Василецький, «Функційна повнота логічно-часового принципу зображення інформації», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №2, с.48-52, 2000.
- [15] Т. Б. Мартинюк, О. М. Тарасова, М. М. Аль-Хіярі, «Особливості логіко-часового зображення числової інформації», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №1, с.72-76. 2000.
- [16] З. Л. Рабінович, В. А. Раманаускас, *Типовые операции в вычислительных машинах*. Киев, Украина: Техніка, 1980.
- [17] А. П. Стахов, *Введение в алгоритмическую теорию измерения*. М., Россия: Сов. радио, 1977.
- [18] В. П. Кожемяко, Т. Б. Мартинюк, В. В. Дмитрук, В. В. Власійчук, «Класифікація одиночних кодів», *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, №1(11), с. 36-42, 2006.
- [19] Э. Берлекэмп, *Алгебраическая теория кодирования*: пер. с англ. М., Россия: Мир, 1971.
- [20] Т. Б. Мартинюк, Мохамед Салем Нассер, В. В. Власійчук, О. М. Наконечний, «Аналіз можливостей одиночного кодування числової інформації», *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, №2(10), с. 39-44, 2005.
- [21] Т. Б. Мартинюк, О. М. Тарасова, М. А. Очуров, П. М. Павлов, «Особливості одиночного кодування інформації», *Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації*: 6-а міжнар. наук.-практ. конф., 24-25 жовтня 2017 р.: праці. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2017, с.10-12.
- [22] М. А. Гаврилов, В. В. Девятков, Э. И. Пупырев, *Логическое проектирование дискретных автоматов: Языки, методы, алгоритмы*. М., Россия: Наука, 1977.
- [23] Т. Б. Мартинюк, К. В. Кожемяко, А. В. Кожемяко, «До оцінки складності комбінаційних схем R-автоматів», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №1, с. 31-34, 1997.

Стаття надійшла: 21.02.2021.

References

- [1] E. I. Gitis, E. A. Piskunov, *Analogo–tsifrovye preobrazovateli*. М., Rossiya: Energoatomizdat, 1981.
- [2] Yu. R. Gnatek, *Spravochnik po tsifro-analogovym i analogo-tsifrovym preobrazovatelyam*. М., Rossiya: Radio i svyaz, 1982.
- [3] U. Tittse, K. Shenk, *Poluprovodnikovaya skhemotekhnika. Spravochnoe rukovodstvo. per. s nem.* М., Rossiya: Mir, 1983.

- [4] P. Khorovits, U. Khill, *Iskusstvo skhemotekhniki: per. s angl.* T.2. M., Rossiya: Mir, 1983.
- [5] O. D. Azarov, *Osnovy teorii analoho-tsyfrovoho peretvorennia na osnovi nadlyshkovykh pozytsiinykh system chyslennia. Monohrafiia.* Vinnytsia, Ukraina: UNIVERSUM, 2004.
- [6] O. D. Azarov, *Analoho-tsyfrove porozriadne peretvorennia na osnovi system chyslennia z vahovoiu nadlyshkovistiu. Monohrafiia.* Vinnytsia, Ukraina: UNIVERSUM, 2010.
- [7] V. P. Kozhemyako, *Optoelektronnye logiko-vremennyye informatsionno-vychislitelnye sredy.* Tbilisi, Gruzija: Izd-vo Metsniereba, 1984.
- [8] S. V. Svechnikov, V. P. Kozhemyako, L. I. Timchenko, *Kvaziimpulsno-potentsialnye optoelektronnye elementy i ustroystva logiko-vremennogo tipa.* Kiev, Ukraina: Nauk. dumka, 1987.
- [9] V. A. Pogribnoi, *Bortovye sistemy obrabotki signalov.* Kiev, Ukraina: Nauk. dumka, 1984.
- [10] V. P. Kozhemyako, L. I. Timchenko., G. L. Lysenko, Yu. F. Kutaev, *Funktsionalnye elementy i ustroystva optoelektroniki.* Kiev, Ukraina: UMK VO, 1990.
- [11] V. P. Kozhemiako, T. B. Martyniuk, O. I. Supryhan, D. I. Klimkina, *Kvantovi peretvoriuvachi na optoelektronnykh lohiko-chasovykh seredovyschakh dlia oko-protsesornoj obrobky zobrazen.* Monohrafiia. Vinnytsia, Ukraina: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2007.
- [12] V. Kozhemiako, T. Martyniuk, O. Kozhemiako, «Vector-matrix conversions for parallel information processing in logic-time base», *Proceedings of SPIE*, Vol. 4425. pp. 106-108, 2001.
- [13] K. G. Samofalov, V. I. Korneichuk, A. M. Romankevich, V. P. Tarasenko, *Tsifrovye mnogoznachnye elementy i struktury.* Kiev, Ukraina: Vishcha shkola, 1974.
- [14] T. B. Martyniuk, M. M. Al-Khiiari, S. A. Vasyletskyi, «Funktsiina povnota lohichno-chasovoho pryntsyphu zobrazhennia informatsii», *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, №2, s.48-52, 2000.
- [15] T. B. Martyniuk, O. M. Tarasova, M. M. Al-Khiiari, «Osoblyvosti lohiko-chasovoho zobrazhennia chyslovoi informatsii», *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, №1, c.72-76, 2000.
- [16] Z. L. Rabinovich, V. A. Ramanauskas, *Tipovye operatsii v vychislitelnykh mashinakh.* Kiev, Ukraina: Tekhnika, 1980.
- [17] A. P. Stakhov, *Vvedenie v algoritmicheskuyu teoriyu izmereniya.* M., Rossiya: Sov. radio, 1977.
- [18] V. P. Kozhemiako, T. B. Martyniuk, V. V. Dmytruk, V. V. Vlasichuk, «Klasyfikatsiia odynychnykh kodiv», *Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnologii*, №1(11), s. 36-42, 2006.
- [19] E. Berlekemp, *Algebraicheskaia teoriya kodirovaniya: per. s angl.* M., Rossiya: Mir, 1971.
- [20] T. B. Martyniuk, Mokhamed Salem Nasser, V. V. Vlasichuk, O. M. Nakonechnyi, «Analiz mozhyvostei odynychnoho koduvannia chyslovoi informatsii», *Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnologii*, №2(10), s. 39-44, 2005.
- [21] T. B. Martyniuk, O. M. Tarasova, M. A. Ochukurov, P. M. Pavlov, «Osoblyvosti odynychnoho koduvannia informatsii», *Metody ta zasoby koduvannia, zakhystu i ushchilnennia informatsii: 6-a mizhnar. nauk.-prakt. konf., 24-25 zhovtnia 2017 r.: pratsi.* Vinnytsia, Ukraina: VNTU, 2017, s. 10-12.
- [22] M. A. Gavrillov, V. V. Devyatkov, E. I. Pupyrev, *Logicheskoe proektirovanie diskretnykh avtomatov: Yazyki, metody, algoritmy.* M., Rossiya: Nauka, 1977.
- [23] T. B. Martyniuk, K. V. Kozhemiako, A. V. Kozhemiako, «Do otsinky skladnosti kombinatsiinykh skhem R-avtomativ», *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, №1, s. 31-34, 1997.

Відомості про авторів

Мартинюк Тетяна Борисівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри обчислювальної техніки.

Зайцев Микола Олександрович – аспірант факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії.

Микитюк Максим Васильович – аспірант факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії.

T. B. Martyniuk, N. O. Zaitsev, M. V. Mykytiuk

ОСОБЕННОСТИ АНАЛОГО – ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ЛОГИКО – ВРЕМЕННОМ БАЗИСЕ

Винницький національний технічний університет, Вінниця

T. B. Martyniuk, N. O. Zaitsev, M. V. Mykytiuk

FEATURES OF ANALOG-DIGITAL CONVERSION IN A LOGIC-TIME BASIS

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ

УДК 612.741.9

Р. Н. Кветний¹, Я. В. Іванчук¹, К. В. Добровольська²

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗІОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ М'ЯЗОВОГО СКОРОЧЕННЯ

1 – Вінницький національний технічний університет, Вінниця

2 – Вінницький національний медичний університет ім. М. І. Пирогова, Вінниця

Анотація. У статті розглянуто удосконалені математичні моделі фізіологічного процесу м'язового скорочення на основі відомих гіпотез процесу функціонування опорно-рухомої системи організму людини. Зокрема, за першою феноменологічною гіпотезою А. Хілла, на основі реологічних моделей складових м'язової тканини, була розроблена математична модель зміни силового навантаження м'язової тканини для режимів ізометричного тетанусу і скорочення (видовження) м'яза з постійною швидкістю. Встановлено, що загальним недоліком підходу А. Хілла є припущення про те, що співвідношення «сила–швидкість» має виконуватися миттєво після зміни силового навантаження, що не відповідає експериментальним даним з відновлення силового напруження після ступінчастої зміни довжини м'язу. Для подолання зазначених недоліків було обрано гіпотезу А. Хакслі, яка ґрунтується на принципах кінетики розподілу місць зв'язування актину (мономера) із білковим філоментом (поперечних місточків). Введено припущення, що місця зв'язування на актині знаходяться досить далеко один від одного, так що кожному місточку доступне тільки одне таке місце зв'язування. На основі гіпотези А. Хакслі була розроблена математична модель силового навантаження м'язової тканини, яка залежить від функції розподілу кількості поперечних місточків. Результати порівняння теоретичного і експериментального досліджень силового навантаження на м'яз, на основі розроблених математичних моделей у вигляді диференціальних рівнянь, підтвердили адекватність використання відомих теоретичних положень для опису протікання біологічних процесів у м'язових тканинах.

Ключові слова: м'язове скорочення, режим навантаження, математична модель, реологічна модель, ізометричний тетанус.

Аннотация. В статье рассмотрены усовершенствованные математические модели физиологического процесса мышечного сокращения на основе известных гипотез процесса функционирования опорно-двигательной системы организма человека. В частности, по первой феноменологической гипотезе А. Хилла, на основе реологических моделей составляющих мышечной ткани, была разработана математическая модель изменения силовой нагрузки мышечной ткани для режимов изометрической тетануса и сокращения (удлинение) мышцы с постоянной скоростью. Установлено, что общим недостатком подхода А. Хилла является предположение о том, что соотношение «сила-скорость» должно выполняться мгновенно после изменения силовой нагрузки, что не соответствует экспериментальным данным по восстановлению силового напряжения после ступенчатой изменения длины мышцы. Для преодоления указанных недостатков была избрана гипотеза А. Хаксли, основанная на принципах кинетики распределения мест связывания актина (мономера) с белковым филоментом (поперечных мостиков). Введено предположение, что места связывания на актине находятся достаточно далеко друг от друга, так что каждому мостику доступно только одно такое место связывания. На основе гипотезы А. Хаксли была разработана математическая модель силовой нагрузки мышечной ткани, которая зависит от функции распределения количества поперечных мостиков. Результаты сравнения теоретического и экспериментального исследований силовой нагрузки на мышцу, на основе разработанных математических моделей в виде дифференциальных уравнений, подтвердили адекватность использования известных теоретических положений для описания протекания биологических процессов в мышечных тканях.

Ключевые слова: мышечное сокращение, режим нагрузки, математическая модель, реологическая модель, изометрический тетанус.

Abstract. The article discusses improved mathematical models for the physiological process of muscle contraction based on the well-known hypotheses of the functioning of the musculoskeletal system of the human body. In particular, according to the first phenomenological hypothesis of A. Hill, on the basis of rheological models of the components of muscle tissue, a mathematical model was developed for changing the power load of muscle tissue for isometric tetanus and muscle contraction (lengthening) at a constant rate. It has been established that a common drawback of A. Hill's approach is the assumption that the force-speed ratio must be fulfilled instantly after changing the power load. This is inconsistent with the experimental data on the recovery of strength tension after a stepwise change in muscle length. To overcome these disadvantages, A. Huxley's hypothesis was chosen. It is based on the principles of kinetics of the distribution of the binding sites of actin (monomer) with the protein filament (cross bridges). It is assumed that the binding sites on actin are far enough from each other so that only one such binding site is available to each bridge. On the basis of A. Huxley's hypothesis, a mathematical model of muscle tissue strength load was developed, which depends on the distribution function of the number of cross bridges. The results of the comparison of theoretical and experimental studies of the power load on the muscle, based on the developed mathematical models in the form of differential equations, confirmed the adequacy of the use of known theoretical provisions to describe the course of biological processes in muscle tissues.

Key words: muscle contraction, load mode, mathematical model, rheological model, isometric tetanus.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-50-1-86-98>.

Вступ

Методи та інструменти математичного моделювання відіграють вирішальну роль в розвитку не тільки сучасних областей прикладної математики, але й теоретичної біофізики, біомедичної інженерії, фізіології і фундаментальної медицини [1, 2].

У даний час особливо стрімко розвиваються спеціалізовані області застосування математичного моделювання функціонування складових систем живих організмів. Однією із таких складових є система м'язової тканини, яка забезпечує механічну функцію усіх внутрішніх органів людини. Однією із актуальних проблем є встановлення адекватних закономірностей механізму функціонування м'язової тканини при різних режимах її навантаження (ізометричний, ізотонічний).

Авторами [3, 4] була запропонована методика, що дозволяє за результатами динамічного індентування м'язів, отриманим на експериментальному приладі, визначити такі механічні характеристики м'язової тканини, як початковий миттєвий модуль Юнга і параметри простого експоненціального ядра релаксації. Дана методика базується на рішенні задачі про впровадження абсолютно жорсткого індентора у в'язкопружне органічне середовище (м'язова тканина). Більше того, в роботі [3, 4] механічні характеристики були визначені тільки для однієї групи м'язів (двоголового м'яза плеча) у заданому стані без дослідження динаміки показників при різних навантаженнях на м'яз. Недоліком даної методики є необхідність розв'язання системи нелінійних диференціальних рівнянь, що значно ускладнює автоматизацію методики ідентифікації та обробку значного об'єму експериментальних даних, що вносить суттєву розбіжність між результатами теоретичного і експериментального досліджень.

При втраті 50% силових можливостей усіх м'язів, при статичному утриманні таза в рівновазі, всі м'язові зусилля знаходяться в межах їх фізіологічних можливостей, маючи при цьому приблизно 50 % запасу регулювальних можливостей [5, 6]. В умовах збільшеного навантаження (1000 Н) м'язи не в змозі впоратися із завданням підтримки горизонтальної рівноваги таза, так як максимальних зусиль, що розвиваються м'язами, менше необхідних. При 75% зниженні сили всіх груп м'язів, що беруть участь в підтримці рівноваги таза, система не буде здатна зберігати горизонтальну рівновагу таза при одноопорному стоянні, так як максимальні значення, що розвиваються м'язами, менше зусиль, необхідних для збереження рівноваги таза. В умовах динамічних навантажень (5...10 % від статичного навантаження) утримання рівноваги таза в даному випадку неможливо, так як величина необхідних м'язових зусиль значно перевищує гранично допустимі [5, 6]. Тому підвищення точності ідентифікації фізіологічного процесу скорочення м'язів дозволить оптимізувати методики лікування, реабілітації та спортивних тренувань, дозволяючи виключити пошкодження, підвищити тонус м'язів, знизити стомлюваність і поліпшити координацію рухів [7].

Актуальність

Актуальним є визначення структурної адаптивності і пластичності скелетних м'язів при застосуванні процедури видовження кінцівки. Встановлено [8], що перенавантаження м'язів і фасцій (дистракція з добовим темпом 2-3 мм) викликає порушення мікроциркуляції і тканинну гіпоксію. При дистракції з добовим темпом 0,5 мм спостерігаються менш виражені зміни міонів, сполучнотканинних структур і судинної мережі м'язи. Тому визначення більш точних параметрів функціонування скелетного м'яза під час процедури дистракційного остеогенеза неінвазивним і найменш травматичним способом дозволить створити умови для адаптаційного зростання збережених м'язових волокон на етапі дистракції і фіксації.

Також особливо актуальним у теперішній час моделювання скорочуваної активності м'язової тканини обумовлена спробами створення штучних м'язів на основі активних і адаптивних матеріалів [9] з використанням різних фізичних принципів генерації зусиль.

Мета

Метою роботи є підвищення точності ідентифікації фізіологічного процесу м'язового скорочення шляхом розроблення ефективних методів математичного моделювання на основі диференціальних рівнянь функціонування даного типу органів, що дозволить підвищити достовірність прогнозування кінематичних і силових параметрів опорно-рухової системи.

Задачі

1. Обґрунтувати використання відомих гіпотез фізіологічного процесу м'язового скорочення і на їх основі проаналізувати можливість побудови ефективних математичних моделей для ідентифікації фізіологічних процесів опорно-рухової системи.
2. Розробити математичні моделі фізіологічного процесу м'язового скорочення на основі відомих гіпотез функціонування даних типів органів, що дозволить з високою точністю визначати фізіологічні характеристики м'язової тканини на різних режимах її навантаження.
3. З метою визначення достовірності розроблених математичних моделей виконати порівняльний аналіз результатів теоретичного дослідження фізіологічного процесу м'язового скорочення на основі розроблених математичних моделей із результатами експериментального дослідження функціонування даних типів органів.

Розв'язання задач

Адекватна математична модель реальної м'язової тканини повинна забезпечувати можливість опису анізотропії властивостей [10], нелінійності її деформування, зміни механічних характеристик при активації скорочувальної функції і вплив цих факторів на процес активації. Одним із базових підходів до математичного моделювання фізіологічного процесу м'язового скорочення є стаціонарна залежність між постійною швидкістю скорочення v і навантаження p (ізотонічний процес скорочення м'яза) [11]:

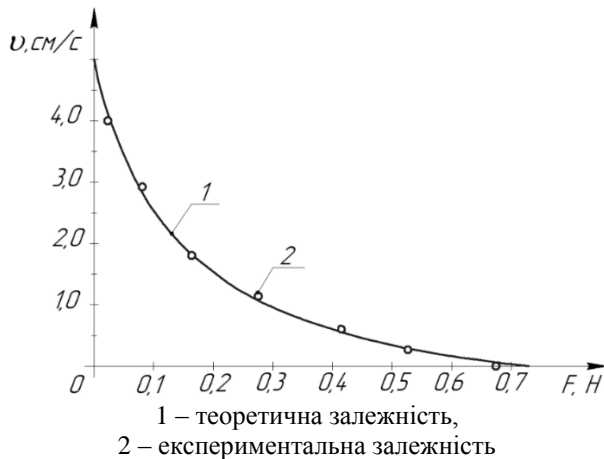
$$(p + a)v = b(p_0 - p), \quad (1.1)$$

де a і b – параметри рівняння Хілла [11], які залежать від типу м'язу і від умов експерименту, зокрема від температури.

Із рівняння (1.1) отримуємо функцію залежності значення сили від швидкості скорочення $p = \frac{bp_0 - av}{v + b}$, яка показана на рисунку 1, при значеннях параметрів $a=0,14$ Н і $b=1,03$ см/с і максималь-

ному навантаженні $p_0=0,031$ Н. Результат порівняння отриманої функціональної залежності (див. рис. 1) за рівнянням (1.1) із експериментальними даними [8, 11] дозволив отримати показник адекватності математичної моделі у вигляді середньої похибки апроксимації, яка склала 4%.

При $v=0$, сила p дорівнює значенню p_0 і являє собою ізометричну силу – максимально можливу силу, що розвиває м'яз при фіксованій довжині. Напруження, що генерується скелетним м'язом в ізометричному тетанусі, майже не залежить від довжини.



1 – теоретична залежність,
2 – експериментальна залежність
Рисунок 1 – Діаграма залежності між навантаженням на м'яз і швидкістю його скорочення

При значенні навантаження $p=0$ швидкість скорочення м'язу є максимальною і дорівнює $v=(bp_0)/a$. При даній швидкості м'яз має можливість скорочуватись зі швидкістю при нульовому навантаженні. М'язова тканина, як суцільне середовище, може проявляти реологічні властивості [12, 13], які заключаються в наявності як пружних так і в'язкісних властивостей (в'язкопружність). Будь-який матеріал може бути представлений у вигляді реологічної моделі – комбінації в'язких і пружних елементів [12, 13].

Відповідно м'яз може бути представлений у вигляді реологічної моделі, яка складається із комбінації різних силових елементів (рис. 2). У реологічну схему м'язу також включаються пасивні в'язкі і (або) пружні елементи. Вони описують пасивні властивості м'язової тканини, наприклад, в'язкість і пружність скорочувальних білків, з'єднувально-тканинного каркасу та інших, тобто властивостями тканини як матеріалу

[9]. Паралельна пружність (див. рис. 2 а) відноситься головним чином до білка тайтину і частково до сполучнотканинного каркасу. Послідовна пружність (див. рис. 2 б) описує пружні властивості міофіламентів та структурних й регуляторних білків, а також кінцеві ефекти або більш податливі кардіоміоцити (коли вони ще не активовані або активовані, але не встигли розвинути достатнє напруження) [14]. При паралельному з'єднанні реологічних елементів (див. рис. 2 а) загальне силове навантаження дорівнює сумі складових силових навантажень – $P=P_{n1}+P_{n2}$, а загальна деформація рівна складовим деформаціям реологічних елементів – $x=x_1=x_2$. При послідовному з'єднанні реологічних елементів (див. рис. 2 б) загальне силове навантаження рівне складовим силових навантажень – $P=P_{n1}=P_{n2}$, а загальна деформація рівна сумі складових деформацій реологічних елементів – $x=x_1+x_2$. Для імітації перехідного процесу зміни силового навантаження на м'яз, що виникає при зміні його довжини, була побудована реологічна модель м'язового волокна, що складається з скорочувального білка (демпфувального елемента), сполученого з послідовним пружним елементом (див. рис. 2 в).

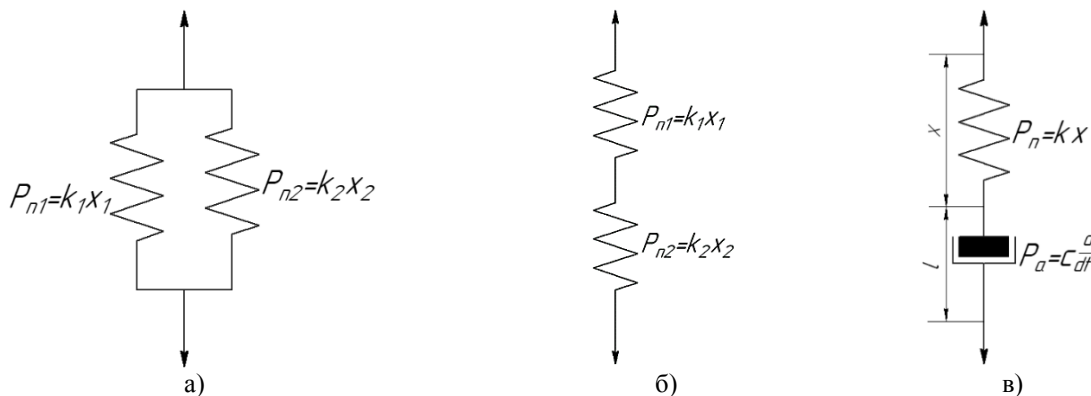


Рисунок 2 – Реологічні моделі складових м'язової тканини:
а) – білок тайтин й сполучнотканинний каркас; б) – міофіламенти, структурні й регуляторні білки;
в) – скелетний м'яз Хілла

Позначимо l довжину скорочувального елемента, за x – довжину пружного елемента, тоді $L=l+x$ – загальна довжина м'яза. Позначивши за v швидкість скорочення скорочувального елемента, тоді: $v = -dl/dt$.

Для визначення функції зміни силового навантаження на м'яз p , скористаємося тим, що при послідовному з'єднанні елементів складові їхніх сил рівні між собою, тобто сила скорочувального елемента P_a дорівнює силі пружного елемента P_x . Припустимо, що сила, яка генерується пружним елементом є функцією його довжини $p=P(x)$. Використаємо правило диференціювання складної функції, тоді:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{dP}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dP}{dx} \left(\frac{dL}{dt} - \frac{dl}{dt} \right) = \frac{dP}{dx} \left(\frac{dL}{dt} + v \right) = \frac{dP}{dx} \left(\frac{dL}{dt} + \frac{b(p_0 - p)}{p + a} \right) \quad (1.2)$$

Для визначення dP/dx зробимо припущення, що пружний елемент є лінійною функцією, а це у свою чергу дозволило представити силу у вигляді $P(x)=\alpha(x-x_0)$, де x_0 – задана довжина м'язевого волокна у стані спокою. Тоді $dP/dx=\alpha$, і відповідно диференціальне рівняння (1.2) матиме вигляд:

$$\frac{dp}{dt} = \alpha \left(\frac{dL}{dt} + \frac{b(p_0 - p)}{p + a} \right) \quad (1.3)$$

Для моделювання м'язового скорочення за моделлю (1.3) необхідно розглянути два режими: ізометричний тетанус і скорочення (видовження) м'яза з постійною швидкістю.

Якщо скелетний м'яз привести в стан тетанусу за допомогою періодичної стимуляції, тоді через певний період часу м'яз розвине ізометричне напруження. В ізометричних умовах при скороченні м'язу його довжина не зміниться, тому $dL/dt=0$ і рівняння (1.3) набуде вигляду:

$$\frac{dp}{dt} = \alpha b \left(\frac{p_0 - p}{a + p} \right) \quad (1.4)$$

Так як права частина рівняння (1.4) має єдиний нуль при $p=p_0$, тоді усі розв'язки повинні прагнути до p_0 при $t \rightarrow \infty$. Розв'язок диференціального рівняння (1.4) знаходиться в явному вигляді, так як це рівняння із розділними змінними, тоді:

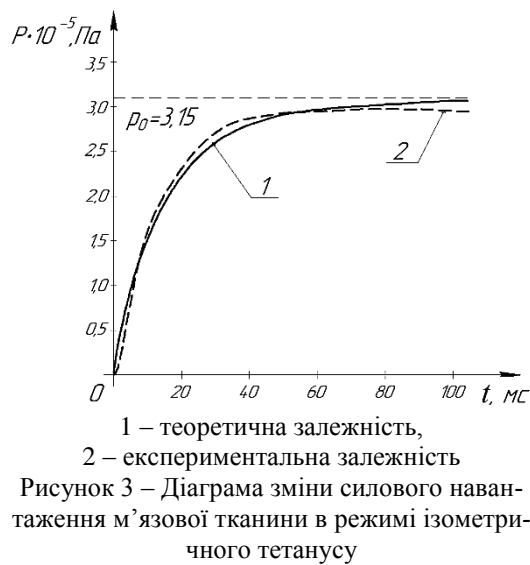
$$\begin{aligned} \frac{p+a}{p_0-p} dp &= \alpha b dt ; \\ \frac{p+a}{p_0-p} dp &= -\frac{-p-a}{p_0-p} dp = -\frac{p_0-p-p_0-a}{p_0-p} dp = -\left(1 - \frac{p_0+a}{p_0-p} \right) dp ; \\ \int \left(1 - \frac{p_0+a}{p_0-p} \right) dp &= -p + (p_0+a) \int \frac{-d(p_0-p)}{p_0-p} = -p - (p_0+a) \ln(p_0-p) + C ; \\ -p - (p_0+a) \ln(p_0-p) + C &= \alpha b t \end{aligned} \quad (1.5)$$

Для визначення не відомого постійного коефіцієнта C із рівняння (1.5), використаємо початкову умову $p(0)=0$, тоді:

$$\begin{aligned} -(p_0+a) \ln p_0 + C &= 0, \text{ де } C = (p_0+a) \ln p_0, \\ -p - (p_0+a) \ln(p_0-p) + (p_0+a) \ln p_0 &= \alpha b t - p - (p_0+a) (\ln(p_0-p) - \ln p_0) = \alpha b t, \\ -p - (p_0+a) \ln \left(\frac{p_0-p}{p_0} \right) &= \alpha b t \end{aligned} \quad (1.6)$$

Функція (1.6) в неявній формі описує зміну силового навантаження м'язової тканини в залежності від часу (рис. 3) і при значеннях параметрів $a=0,14$ Па і $b=1,03$ см/с і максимальному навантаженні $p_0=0,031 \cdot 10^{-5}$ Па (при $t \rightarrow \infty$, $p \rightarrow p_0$). Результат порівняння отриманої функціональної залежності (див.

рис. 3) за рівнянням (1.6) із експериментальними даними [11, 14] дозволив отримати показник адекватності математичної моделі у вигляді середньої похибки апроксимації, яка склала 5,6 %.



Для режиму відпускання м'яза з постійною швидкістю необхідно припустити, що м'яз, який спочатку утримувався в ізометричному напруженні відпускається після чого скорочується з постійною швидкістю u . Тоді із диференціального рівняння (1.2) отримуємо:

$$\frac{dp}{dt} = \alpha \left(-u + \frac{b(p_0 - p)}{p + a} \right) \quad (1.7)$$

з початковою умовою $p(0) = p_0$, при чому вважається, що p_0 не змінюється в ході скорочення. Для розв'язку диференціального рівняння (1.7) розділимо змінні:

$$\frac{dp}{dt} = \alpha \frac{-u(p+a) + b(p_0 - p)}{p+a} = \alpha \frac{(bp_0 - ua) - (b+u)p}{p+a},$$

$$\frac{p+a}{(bp_0 - ua) - (b+u)p} dp = \alpha dt \frac{p+a}{\frac{bp_0 - ua}{b+u} - p} dp = \alpha(b+u)dt,$$

$$\frac{p+a}{p_u - p} dp = \alpha(b+u)dt \quad (1.8)$$

Перетворимо ліву частину рівняння (1.8) і отримаємо:

$$-\frac{p+a}{p-p_u} = -\frac{p-p_u+p_u+a}{p-p_u} = -\left(1 + \frac{p_u+a}{p-p_u}\right),$$

$$\int -\left(1 + \frac{p_u+a}{p-p_u}\right) dp = \int \alpha(b+u)dt,$$

$$-p - (p_u + a) \ln(p - p_u) + C = \alpha(b+u)t \quad (1.9)$$

Для визначення невідомого постійного коефіцієнта C із рівняння (1.9), використаємо початкову умову $p(0) = p_0$, тоді:

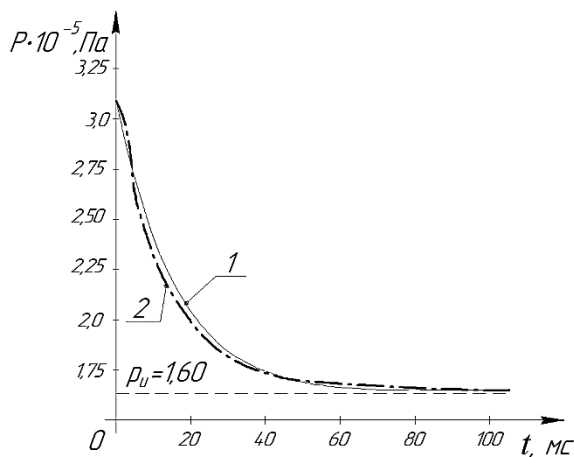
$$-p_0 - (p_u + a) \ln(p_0 - p_u) + c = 0,$$

де $C = p_0 + (p_u + a) \ln(p_0 - p_u)$.

$$p_0 - p + (p_u + a) \ln \frac{p_0 - p_u}{p - p_u} = \alpha(b+u)t \quad (1.10)$$

Функція (1.10) в неявній формі описує зміну силового навантаження м'язової тканини в залежності від часу (рис. 4) і при значеннях параметрів $a=0,14$ Па і $b=1,03$ см/с і максимальному навантаженні $p_u=1,6 \cdot 10^{-5}$ Па (при $t \rightarrow \infty$, $p \rightarrow p_u$). Результат порівняння отриманої функціональної залежності (див. рис. 4) за рівнянням (1.10) із експериментальними даними [11, 14] дозволив отримати показник адекватності математичної моделі у вигляді середньої похибки апроксимації, яка склала 4,8 %.

Модель Хілла є чисто феноменологічною моделлю, яка відтворює не механізм поведінки, а феноменологію, тобто явища. У ній не закладено внутрішні закони м'язового скорочення.



1 – теоретична залежність,
2 – експериментальна залежність
Рисунок 4 – Діаграма зміни силового навантаження м'язової тканини в режимі відпускання м'яза з постійною швидкістю

з центром зв'язування на актині в положенні x , має зміщення x від ненапруженого стану, що визначає його силу. У підході Хакслі було припущено, що місця зв'язування на актині знаходяться досить далеко один від одного, так що кожному місточку доступне тільки одне таке місце. З урахуванням даного припущення кожен місточок (зв'язаний чи незв'язаний) може бути асоційований з єдиним значенням x . Оскільки місточки на протилежних сторонах саркомера по відношенню до середньої лінії (H -зони) орієнтовані протилежно один одному, при вкороченні саркомера половинки саркомера рухаються назустріч один одному, і тому зміна довжини саркомера дорівнює подвоєній величині зміщення кожної з його половинок. Тому буде розглядатись динаміка місточків в одній із половинок саркомера, а саме правої для визначеності (див. рис. 6).

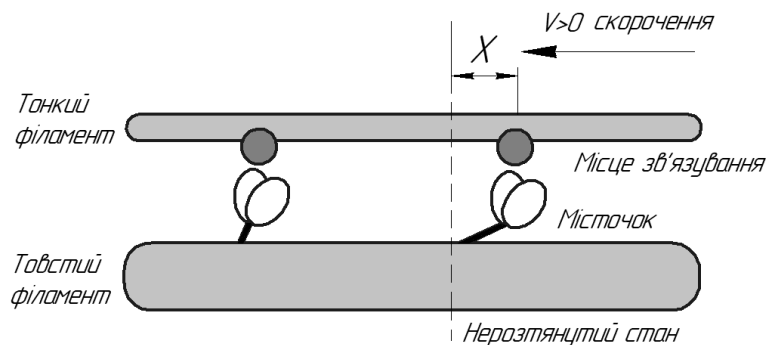


Рисунок 5 – Схема місткової моделі Хакслі

За допомогою параметра p буде позначатись число поперечних (зв'язаних і незв'язаних) місточків зі зміщенням x . Передбачається, що можливість зв'язування обмежена певним інтервалом $-x_0 < x < x_0$. Для спрощення приймається, що p не залежить ні від x на даному інтервалі, ні від часу t . Тобто для кожного зміщення x число місточків (зв'язаних і незв'язаних), що опинилися в положенні з таким зміщенням, однаково і не змінюється в часі, тобто розподіл загального числа місточків не змінюється в часі, але при цьому частка приєднаних місточків буде змінюватись. Дане спрощення моделі приймається для ізометричного режиму, коли м'яз має фіксовану довжину, але воно не обов'язково повинно виконуватись в умовах, коли м'яз швидко розтягується зовнішньою силою.

Параметром $n(x, t)$ позначається частка місточків зі зміщенням x , що знаходиться у зв'язаному стані. Сильно спростивши механізм реакції циклування (прикріплення-відкріплення) місточка, водиться припущення, що місточок може перебувати тільки в двох станах – незв'язаному або сильновз'язаному, тобто в стані, коли він генерує силу.

Переходи між станами описуються наступною схемою:

Загальним недоліком моделі Хілла є припущення про те, що співвідношення «сила–швидкість» має виконуватись миттєво після зміни силового навантаження, що не відповідає експериментальним даним з відновлення силового напруження після ступінчастої зміни довжини м'яза. Це призвело до створення більш досконалої моделі м'язового скорочення, на основі кінетики поперечних місточків в основі якої лежить теорія місткового м'язового скорочення А. Хакслі [15] по принципу храповика (теорія ковзних ниток) [16].

Припустимо, що поперечний місток може зв'язатись з центром зв'язування на актині в положенні x , де x – відстань уздовж тонкої нитки від позиції, при якій місток не розвиває сили ($x=0$), до центру зв'язування (рис. 5).

Поперечні місточка можуть бути зв'язані з центром зв'язування при $x > 0$, в цьому випадку вони розвивають активну скорочуючу силу, яка залежить від $x > 0$, або вони можуть бути зв'язані з актином при $x < 0$, в цьому випадку вони розвивають силу, яка перешкоджає скороченню.

Приймаємо, що поперечний місток, зв'язаний з центром зв'язування на актині в положенні x , має зміщення x від ненапруженого стану, що визначає його силу. У підході Хакслі було припущено, що місця зв'язування на актині знаходяться досить далеко один від одного, так що кожному місточку доступне тільки одне таке місце. З урахуванням даного припущення кожен місточок (зв'язаний чи незв'язаний) може бути асоційований з єдиним значенням x . Оскільки місточки на протилежних сторонах саркомера по відношенню до середньої лінії (H -зони) орієнтовані протилежно один одному, при вкороченні саркомера половинки саркомера рухаються назустріч один одному, і тому зміна довжини саркомера дорівнює подвоєній величині зміщення кожної з його половинок. Тому буде розглядатись динаміка місточків в одній із половинок саркомера, а саме правої для визначеності (див. рис. 6).



де U, B – константи швидкості прямої $f(x)$ і $g(x)$ зворотної реакції – функції зміщення x .

Закон збереження для частки зв'язаних поперечних місточків отримують розглянувши усі зв'язані місточки зі зміщенням x в інтервалі $[a, b]$. Їх загальна кількість дорівнює:

$$\rho \int_a^b n(x, t) dx \quad (1.12)$$

Частка зв'язаних поперечних місточків на інтервалі $[a, b]$:

$$N = \int_a^b n(x, t) dx \quad (1.13)$$

Для обраного напрямку швидкості руху (див. рис. 6) швидкість ковзання ниток актину відносно міозину при заданій постійній швидкості укорочення саркомера приймається $v > 0$. Тоді швидкість скорочення саркомера буде в два рази більше швидкості ковзання ниток.

Якщо рух міофіламентів буде відсутнім ($v=0$), тоді кінетичне рівняння для частки прикріплених місточків має вигляд:

$$\frac{dn}{dt} = f(x) \cdot (1-n) - g(x) \cdot n. \quad (1.14)$$

Так як саркомер скорочується із ненульовою швидкістю тому приймається швидкість ковзання міофіламентів v . Під час процесу укорочення м'язу, рух ниток відбувається справа наліво, що у свою чергу аналогічно спрямовує «потік» місточків через межі відрізка $[a, b]$.

Потік (кількість в одиницю часу) через межі $x=a$ за межею інтервалу дорівнює $J(a, t) = \rho \cdot v \cdot n(a, t)$, а притік всередину інтервалу через границю $x=b$ дорівнює $J(b, t) = \rho \cdot v \cdot n(b, t)$ (рис. 6).

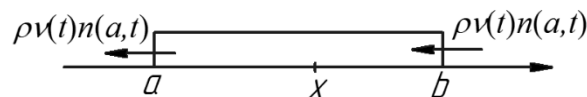


Рисунок 6 – Розрахункова схема зміни частки зв'язаних поперечних місточків в інтервалі $[a, b]$ із-за руху ниточок

Загальна кількість місточків, що виходять за малий інтервал часу Δt за межі a , рухаючись справа наліво, визначається кількістю місточків, які в момент часу t мали зміщення x , що не перевищує максимальний зсув $x_m = v \cdot \Delta t$, який можна пройти, рухаючись зі швидкістю v за час Δt . Тому середній потік через межі a за час Δt виражається співвідношенням:

$$J(a, t) \sim \rho \frac{\int_0^{x_m} n(a + \xi, t) d\xi}{\Delta t} \quad (1.15)$$

За теоремою про середнє значення [1] отримуємо:

$$J(a, t) \sim \rho \frac{n(a + \bar{\xi}, t) \cdot x_m}{\Delta t} = \rho \frac{n(a + \bar{\xi}, t) \cdot v \cdot \Delta t}{\Delta t} = \rho \cdot n(a + \bar{\xi}, t) \cdot v, \quad (1.16)$$

де $\bar{\xi}$ – деяка середня точка на інтервалі $[0, x_m]$.

Переходячи до межі при $t \rightarrow \infty$ отримуємо:

$$\begin{cases} J(a, t) = \rho \cdot n(a, t) \cdot v; \\ J(b, t) = \rho \cdot n(b, t) \cdot v. \end{cases} \quad (1.17)$$

З урахуванням реакції прикріплення-відкріплення місточків й руху ниток отримаємо наступне рівняння для зміни швидкості загальної кількості приєднаних місточків в часі:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial}{\partial t} \int_a^b n(x, t) dx &= \rho \int_a^b (f(x)(1 - n(x, t)) - g(x)n(x, t)) dx + J(b, t) - J(a, t) = \\ &= \rho \int_a^b (f(x)(1 - n(x, t)) - g(x)n(x, t)) dx + \rho \cdot v \cdot (n(b, t) - n(a, t)). \end{aligned} \quad (1.18)$$

За формулою Ньютона – Лейбніца [1, 2] виконується заміна:

$$n(b, t) - n(a, t) = \int_a^b \frac{\partial n(x, t)}{\partial x} dx \quad (1.19)$$

Підставляючи вираз (1.19) у праву частину рівняння збереження (1.18), і виносячи похідну за часом під знак інтеграла в ліву частину рівності (1.18) усі складові діляться на ρ . Наступним виконується перехід від рівності інтегралів до рівності підінтегральних виразів, що дозволяє отримати рівняння Хакслі для динаміки поперечних місточків:

$$\frac{\partial n}{\partial t} - v \frac{\partial n}{\partial x} = f(x)(1 - n) - g(x)n \quad (1.20)$$

Аналіз перетворень (1.18) і (1.19) показує, що диференціальне рівняння в частинних похідних (1.20) справедливо й для випадку заданої швидкості ковзання ниток як функції часу $v(t)$.

Так як $\rho \int_{-\infty}^{+\infty} n(x, t) dx$ є загальним числом зв'язаних місточків тому можна припустити, що кожен місточок являє собою пружний елемент, який розвиває силу пружності $r(x)$, яка залежить від його зміщення x . Тобто будь-який місточок, розтягнутий на величину x , по відношенню до нейтральної позиції, розвиває однакову силу $r(x)$.

Тоді сила, що розвивається половиною саркомера дорівнює:

$$p = \rho \int_{-\infty}^{+\infty} r(x)n(x, t) dx \quad (1.21)$$

Приймаємо, що м'язове волокно рухається з постійною швидкістю $n(x, t)$, що у випадку стаціонарного процесу $-\frac{\partial n}{\partial t} = 0$.

Стаціонарний розподіл місточків $n(x)$ із диференціального рівняння (1.20):

$$-v \frac{\partial n}{\partial x} = f(x)(1 - n) - g(x)n \quad (1.22)$$

Якщо значення швидкості ковзання міофіламентів v достатньо мале, тоді $n(x)$ апроксимується квазістаціонарним рішенням: $n(x) = n_{\infty}(x) = \frac{f(x)}{f(x) + g(x)}$. При великих значеннях швидкості ковзання міофіламентів v зміна швидкості загальної кількості приєднаних місточків $n(x)$ змінюється повільно, як і функція x .

У загальному випадку залежність демпфувальної сили має вигляд:

$$p = \rho \int_{-\infty}^{+\infty} r(x)n(x)dx, \quad (1.23)$$

де $n(x)$ – розв'язок рівняння (1.22).

Більша сила досягається при менших швидкостях. При нульовій швидкості ізометрична сила дорівнює:

$$p_0 = \rho \int_{-\infty}^{+\infty} r(x) \frac{f(x)}{f(x) + g(x)} dx. \quad (1.24)$$

При великих швидкостях сила зменшується, тому що місточок знаходиться близько від центру зв'язування протягом дуже короткого часу, тому зв'язок малоімовірний, і в результаті менша частка поперечних місточків генерує силу. Інший фактор зменшення сили при великих швидкостях – це те, що більша кількість місточків встигає потрапляти в область $x < 0$ до того, як вони відкріпились, таким чином, генерується сила, яка чинить опір скороченню. При деякій максимальній швидкості сила, яка генерується місточками з $x < 0$, врівноважує силу, що генерується місточками з $x > 0$, і м'яз перестає генерувати силу, при цьому досягається максимум швидкості скорочення.

З метою отримання функціональних залежностей демпфувальної сили, необхідно підібрати відповідні функції $f(x)$ і $g(x)$.

Приймаємо наступні кусково-безперервні функції:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ \frac{f_1 x}{h}, & 0 \leq x \leq h; \\ 0, & x > h, \end{cases} \quad (1.25)$$

$$g(x) = \begin{cases} g_2, & x \leq 0; \\ \frac{g_1 x}{h}, & x > 0. \end{cases} \quad (1.26)$$

У цій моделі швидкість від'єднання місточка $g(x)$ невелика, коли місточок генерує силу скорочення. Коли x від'ємне значення і поперечний місточок опирається скороченню, тоді $g(x)$ зростає. З тих же самих причин місточки не приєднуються при від'ємних значеннях x ($f=0$ при $x < 0$) і швидкість прикріплення зростає з ростом x . Починаючи з деякого значення $x=h$ швидкість прикріплення поперечних місточків дорівнює нулю, так як передбачається, що місточки не можуть приєднуватися до місця зв'язування, яке знаходиться на великій відстані.

Розв'язок стаціонарного рівняння $-\nu \frac{\partial n}{\partial x} = f(x)(1-n) - g(x)n$ для $n(x)$ можна отримати за допомогою кускового розв'язання диференціального рівняння.

Позначаючи n_1, n_2, n_3 у вигляді розв'язку на інтервалах $x \leq 0$, $0 < x \leq h$, $h < x$. Тоді n_1 – розв'язок диференціального рівняння $-\nu \frac{\partial n_1}{\partial x} = -g_2 n_1$, а саме:

$$\frac{dn_1}{n_1} = \frac{g_2}{\nu} dx; \quad n_1 = A e^{\frac{g_2 x}{\nu}}, \quad (1.27)$$

де A – константа інтегрування. Даний розв'язок (1.27) обмежений при $x \rightarrow \infty$.

Розв'язок для n_2 , яке задовольняє диференціальне рівняння:

$$\begin{aligned}
-\nu \frac{dn_2}{dx} &= \frac{f_1 x}{h} (1 - n_2) - \frac{g_1 x}{h} n_2 - \nu \frac{dn_2}{dx} + n_2 \left(\frac{g_1 x}{h} + \frac{f_1 x}{h} \right) = \frac{f_1 x}{h}; \\
-\nu \frac{1}{x dx} + \frac{n_2}{dn_2} \left(\frac{g_1}{h} + \frac{f_1}{h} \right) &= \frac{f_1}{h dn_2} - \frac{f_1}{h dn_2} + \frac{n_2}{dn_2} \frac{g_1 + f_1}{h} = \frac{\nu}{x dx}; \\
\frac{n_2 (g_1 + f_1) - f_1}{h dn_2} &= \frac{\nu}{x dx} \frac{h dn_2}{n_2 (g_1 + f_1) - f_1} = x \frac{dx}{\nu};
\end{aligned}$$

$$\frac{1}{g_1 + f_1} \ln(n_2 (g_1 + f_1) - f_1) = \frac{x^2}{2\nu h} + B n_2 = \frac{f_1}{g_1 + f_1} + B \exp\left(\frac{x^2 (g_1 + f_1)}{2\nu h}\right), \quad (1.28)$$

де B – константа інтегрування.

Диференціальне рівняння для n_3 має вигляд:

$$-\nu \frac{dn_3}{dx} = -g_1 \frac{x}{h} n_3 \frac{dn_3}{n_3} = g_1 \frac{x}{\nu h} dx \ln n_3 = g_1 \frac{x^2}{2\nu h} + C, \quad (1.29)$$

де $n_3 = C \exp\left(\frac{g_1 x^2}{2\nu h}\right)$ – розв'язок необмежений при $x \rightarrow \infty$ і $\nu > 0$.

Єдиний обмежений розв'язок даного рівняння – $n_3=0$, тому що з фізичних міркувань, оскільки місточок не може прикріпитися при $x>h$, коли $\nu>0$. Щоб визначити невідомі константи A та B , необхідно врахувати, що розв'язок має бути неперервним при $x=0$ та $x=h$, тоді $n_1(0) = n_2(0), n_2(h) = n_3(h) = 0$,

$$n_1(0) = A e^{\frac{g_2 x}{\nu}} = A, \quad n_2(0) = \frac{f_1}{g_1 + f_1} + B \exp\left(\frac{0^2 (g_1 + f_1)}{2\nu h}\right) = \frac{f_1}{g_1 + f_1} + B, \quad B = -\frac{f_1}{g_1 + f_1} \exp\left(-\frac{h(g_1 + f_1)}{2\nu}\right),$$

$$A = \frac{f_1}{g_1 + f_1} + B, \quad n_2(h) = \frac{f_1}{g_1 + f_1} + B \exp\left(\frac{h^2 (g_1 + f_1)}{2\nu h}\right) = \frac{f_1}{g_1 + f_1} + B \exp\left(\frac{h(g_1 + f_1)}{2\nu}\right) = 0.$$

Тоді частка місточків зі зміщенням x , що знаходиться у зв'язаному стані:

$$n(x) = \begin{cases} A e^{\frac{g_2 x}{\nu}}, & x \leq 0; \\ \frac{f_1}{g_1 + f_1} + B \exp\left(\frac{x^2 (g_1 + f_1)}{2\nu h}\right), & 0 < x \leq h; \\ 0, & x > h. \end{cases} \quad (1.30)$$

$$\text{де } A = \frac{f_1}{g_1 + f_1} - \frac{f_1}{g_1 + f_1} \exp\left(-\frac{h(g_1 + f_1)}{2\nu}\right), \quad B = -\frac{f_1}{g_1 + f_1} \exp\left(-\frac{h(g_1 + f_1)}{2\nu}\right).$$

На рисунку 8 наведені діаграми зміни частки місточків n для чотирьох значень швидкості ковзання міофіламентів ν в залежності від безрозмірної просторової змінної x/h .

Дані діаграми побудовані для наступних параметрів: максимальна відстань між місточками $h=10^{-6}$ см; середня швидкість прямої і зворотної реакції прикріплення місточків, відповідно – $f_1=50$ с $^{-1}$; $g_1=230$ с $^{-1}$; максимальна швидкість скорочення м'яза – $\nu_{max}=1,0$ см/с.

Якщо припустити, що місточок являє собою лінійний пружний елемент, тобто сила пружності, яка ним розвивається $r(x) = kx$, тоді сила, яку розвиває м'яз визначається за формулою $p = \rho k \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot n(x) dx$ і може бути обчислена як функція швидкості скорочення, тоді результат можна порівняти з рівнянням (1.10) за гіпотезою Хілла.

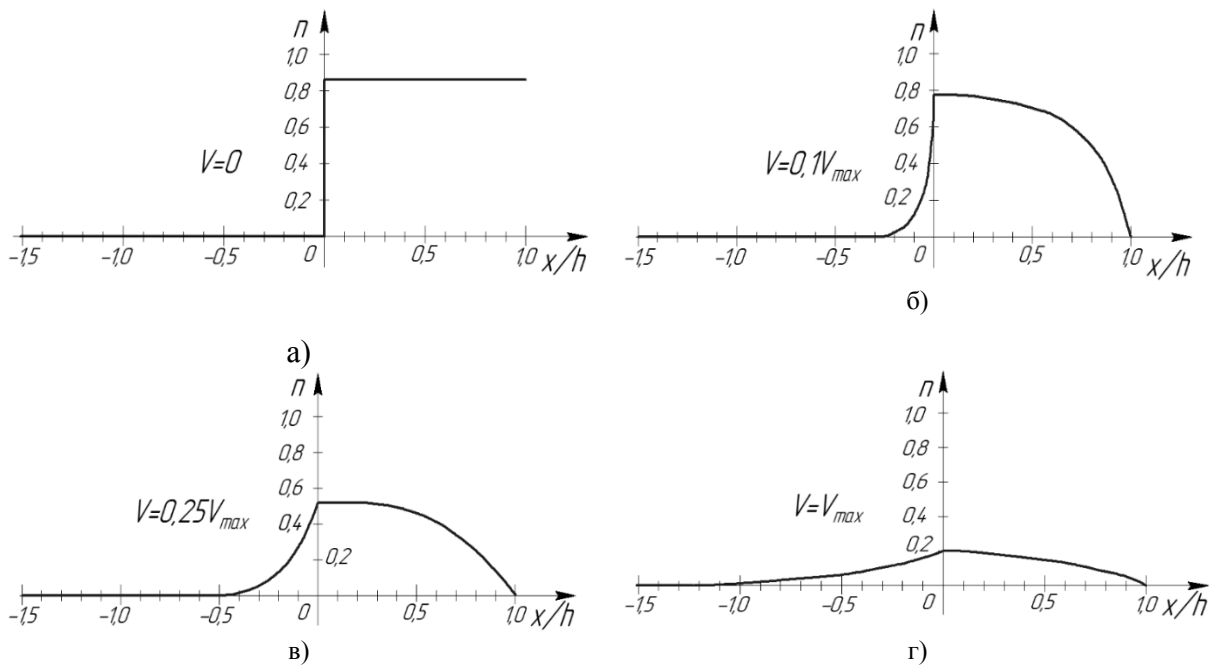
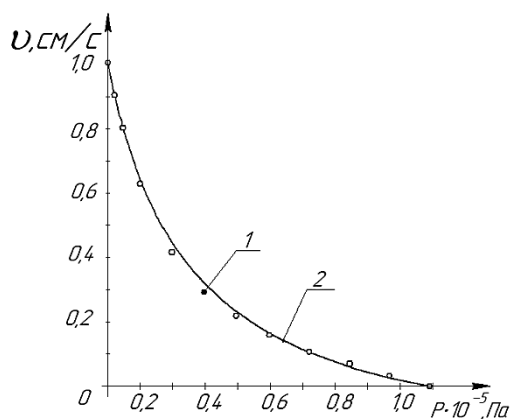


Рисунок 7 – Розподіл частки місточків в моделі Хакслі



1 – модель Хілла; 2 – модель Хакслі

Рисунок 8 – Порівняльна діаграма залежності силового навантаження на м'яз в залежності від швидкості скорочення

Порівняння результатів теоретичного дослідження силового навантаження на м'яз за гіпотезою Хакслі (рис. 8) демонструє збіг з теоретичними даними за моделлю Хілла із точністю 4,2 %. Отримані результати теоретичного та експериментального [18] дослідження фізіологічного процесу скорочення м'яза доводять раціональність використання теорії ковзаючих ниток і циклування поперечних місточків, як основи силогенерації і скорочення м'яза.

Висновки

З метою ідентифікації фізіологічних процесів опорно-рухової системи за основу було обрано гіпотези А. Хілла і А. Хакслі, які з високою ступенем адекватності на рівні 4 % описують фізіологічний процес скорочення м'язової тканини на режимах ізометричного тетанусу і скорочення (видовження) м'яза з постійною швидкістю.

За відомою гіпотезою А. Хілла на основі реологічних моделей комбінації в'язких і пружних елементів, які описують внутрішні закони м'язового скорочення, за

допомогою диференціальних рівнянь було розроблено математичні моделі зміни силового навантаження м'язової тканини із ступенем адекватності на рівні 5 %. Встановлено, що загальним недоліком моделі А. Хілла є припущення про те, що співвідношення «сила–швидкість» має виконуватися миттєво після зміни силового навантаження, що не відповідає експериментальним даним з відновлення силового напруження після ступінчастої зміни довжини м'язу. Для подолання зазначених недоліків було обрано гіпотезу А. Хакслі, яка ґрунтується на принципах кінетики розподілу місць зв'язування актину (мономеру) із білковим філоментом (поперечних місточків). За відомою гіпотезою А. Хакслі, на основі положень теорії місточкового м'язового скорочення, за допомогою диференціальних рівнянь було визначено функції розподілу частки місточків зі зміщенням, як складової математичної моделі зміни силового навантаження м'язової тканини, яка дозволяє адекватно описувати даний фізіологічний процес в перехідному режимі (ступінчата зміна довжини м'язу) із ступенем адекватності на рівні 4%.

Результатом порівняння теоретичного дослідження на основі розроблених математичних моделей силового навантаження на м'яз за гіпотезою А. Хакслі демонструє збіг з теоретичними даними за моделлю А. Хілла із точністю 4,2 %.

Список літератури

- [1] В. М. Дубовой, Р. Н. Кветний, О. І. Михалбов, А. В. Усов, *Моделювання та оптимізація систем: підручник*. Вінниця, Україна: ПП «ГД «Едельвейс», 201, 804 с.

- [2] О. Э. Соловьева, А. Д. Васильева, Л. Б. Кацнельсон, А. Г. Курсанов, Т. Б. Сульман, В. С. Мархасин, *Математическое моделирование живых систем*. Екатеринбург, Россия, 2012, 320 с.
- [3] С. В. Шилько, С. В. Шилько, Д. А. Черноус, К. К. Бондаренко, «Метод определения in vivo вязкоупругих характеристик скелетных мышц», *Российский журнал биомеханики*, т. 11, № 1, с. 45–54, 2007.
- [4] A. Philippou, A. Halapas, M. Maridaki, M. Koutsilieris, «Type I insulin like growth factor receptor signaling in skeletal muscle regeneration and hypertrophy», *J Musculoskelet Neuronal Interact*, v. 7, № 3, pp. 208–218, 2007.
- [5] А. А. Тяжелов, М. Ю. Карпинский, Л. Д. Гончарова, Г. В. Лобанов, И. С. Боровой, «Моделирование работы мышц, обеспечивающих горизонтальное равновесие таза при одноопорном стоянии», *Травма*, т. 15, № 2, с. 136–141, 2014.
- [6] E. M. H. Bosboom, M. K. C. Hesselink, C. W. J. Oomens, C. V. C. Bouten, M. R. Drost, F. P. T. Baaijens, «Passive transverse mechanical properties of skeletal muscle under in vivo compression», *Journal of Biomechanics*, vol. 34, pp. 1365–1368, 2001.
- [7] А. К. Гайтон, Дж. Э. Холл, *Медицинская физиология*: пер. с англ. / Под ред. В. И. Кобрина. М., Россия: Логосфера, 2008, 1296 с.
- [8] H. Mizuta, E. Nakamura, Y. Mizumoto, S. Kudo, K. Takagi, «Effect of distraction frequency on bone formation during bone lengthening», *Acta Orthop. Scand.*, v. 74, № 6, p. 709–713, 2003.
- [9] С. В. Шилько, Ю. М. Плескачевский, «Механика адаптивных композитов и биоматериалов», *Материалы, технологии, инструменты*, т. 8, № 4, с. 5–16, 2003.
- [10] О. В. Руденко, А. П. Сарвазян, «Волновая биомеханика скелетной мышцы», *Акустический журнал*, т. 52, № 6, с. 833–846, 2006.
- [11] Э. Э. Лавендел, Л. И. Мачабели, И. О. Типанс, «Моделирование процесса сокращения сердечной мышцы», *Механика композитных материалов*, № 6, с. 1088–1092, 1981.
- [12] Р. Д. Искович–Лотоцький, Я. В. Иванчук, Я. П. Веселовський, «Моделювання робочих процесів гідроімпульсного привода з однокаскадним клапаном пульсатором», *Вібрації в техніці та технологіях*, № 3 (86), с. 10–19, 2017.
- [13] В. И. Дещеревский, *Математические модели мышечного сокращения*. М., Россия: Наука, 1977.
- [14] S. V. P. Chargé, M. A. Rudnicki, «Cellular and Molecular Regulation of Muscle Regeneration», *Physiol. Rev.*, v. 84, pp. 209–238, 2004.
- [15] A. V. Borisov, E. I. Dedkov, V. M. Carlson, «Abortive myogenesis in denervated skeletal muscle: differentiative properties of satellite cells, their migration, and block of terminal differentiation», *Anat. Embryol (Berl.)*, v.209, № 4, pp. 269–279, 2005.
- [16] Р. Д. Искович–Лотоцький, В. П. Міськов, Я. В. Иванчук, «Математичне моделювання робочих процесів інерційного вібропрес–молота з електрогідравлічною системою керування гідроімпульсного привода для формоутворення заготовок з порошкових матеріалів», *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, №3(237), с. 176–180, 2016.
- [17] Р. Д. Искович–Лотоцький, Я. В. Иванчук, Я. П. Веселовський, «Моделювання робочих процесів в піролізній установці для утилізації відходів», *Східно–європейський журнал передових технологій*, т. 1, № 8(79), с. 11–20, 2016. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59419.
- [18] А. В. Самсонова, *Гипертрофия скелетных мышц человека: учеб. пособие. 3-е изд.* СПб., Россия: Политехника, 2015, 159 с.

Стаття надійшла: 22.02.2021.

References

- [1] V. M. Dubovoi, R. N. Kvietyi, O. I. Mykhalov, A. V. Usov, *Modeliuvannia ta optymizatsiia system: pidruchnyk*. Vinnytsia, Ukraina: PP «TD «Edelweis», 201, 804 s.
- [2] О. Е. Соловьева, А. Д. Васильева, Л. В. Кацнельсон, А. Г. Курсанов, Т. В. Сульман, В. С. Мархасин, *Математическое моделирование живых систем*. Екатеринбург, Россия, 2012, 320 с.
- [3] S. V. Shil'ko, S. V. Shil'ko, D. A. Chernous, K. K. Bondarenko, «Metod opredelenija in vivo vjzkouprugih harakteristik skeletnyh myshc», *Rossijskij zhurnal biomehaniki*, t. 11, № 1, s. 45–54, 2007.
- [4] A. Philippou, A. Halapas, M. Maridaki, M. Koutsilieris, «Type I insulin like growth factor receptor signaling in skeletal muscle regeneration and hypertrophy», *J Musculoskelet Neuronal Interact*, v. 7, № 3, pp. 208–218, 2007.
- [5] А. А. Тязжелов, М. Ю. Карпинский, Л. Д. Гончарова, Г. В. Лобанов, И. С. Боровой, «Моделирование работы мышц, обеспечивающих горизонтальное равновесие таза при одноопорном стоянии», *Травма*, т. 15, № 2, с. 136–141, 2014.
- [6] E. M. H. Bosboom, M. K. C. Hesselink, C. W. J. Oomens, C. V. C. Bouten, M. R. Drost, F. P. T. Baaijens, «Passive transverse mechanical properties of skeletal muscle under in vivo compression», *Journal of Biomechanics*, vol. 34, pp. 1365–1368, 2001.

- [7] A. K. Gajton, Dzh. Je. Holl, *Medicinskaja fiziologija: per. s angl. / Pod red. V. I. Kobrina. M., Rossiya: Logosfera, 2008, 1296 s.*
- [8] H. Mizuta, E. Nakamura, Y. Mizumoto, S. Kudo, K. Takagi, «Effect of distraction frequency on bone formation during bone lengthening», *Acta Orthop. Scand.*, v. 74, № 6, p. 709–713, 2003.
- [9] S. V. Shil'ko, Ju. M. Pleskachevskij, «Mehanika adaptivnyh kompozitov i biomaterialov», *Materialy, tehnologii, instrumenty*, t. 8, № 4, c. 5–16, 2003.
- [10] O. V. Rudenko, A. P. Sarvazjan, «Volnovaja biomehanika skeletnoj myshcy», *Akusticheskij zhurnal*, t. 52, № 6, s. 833–846, 2006.
- [11] Je. Je. Lavendel, L. I. Machabeli, I. O. Tipans, «Modelirovanie processa sokrashhenija serdechnoj myshcy», *Mehanika kompozitnyh materialov*, № 6, s. 1088–1092, 1981.
- [12] R. D. Iskovych–Lototskiy, Ya. V. Ivanchuk, Ya. P. Veselovskiy, «Modeliuvannia robochykh protsesiv hidroimpulsnoho pryvoda z odnokaskadnym klapanom pulsatorom», *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, № 3 (86), s. 10–19, 2017.
- [13] V. I. Desherevskij, *Matematicheskie modeli myshechnogo sokrashhenija. M., Rossiya: Nauka, 1977.*
- [14] S. B. P. Chargé, M. A. Rudnicki, «Cellular and Molecular Regulation of Muscle Regeneration», *Physiol. Rev.*, v. 84, pp. 209–238, 2004.
- [15] A. B. Borisov, E. I. Dedkov, B. M. Carlson, «Abortive myogenesis in denervated skeletal muscle: differentiative properties of satellite cells, their migration, and block of terminal differentiation», *Anat. Embryol (Berl.)*, v.209, № 4, pp. 269–279, 2005.
- [16] R. D. Iskovych–Lototskiy, V. P. Miskov, Ya. V. Ivanchuk, «Matematychno modeliuvannia robochykh protsesiv inertsiinoho vibropres–molota z elektrohidravlichnoiu systemoiu keruvannia hidroimpulsnoho pryvoda dlia formoutvorennia zahotovok z poroshkovykh materialiv», *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky*, №3(237), s. 176–180, 2016.
- [17] R. D. Iskovych–Lototskiy, Ya. V. Ivanchuk, Ya. P. Veselovskiy, «Modeliuvannia robochykh protsesiv v piroliznii ustanovtsi dlia utylizatsii vidkhodiv», *Skhidnoievropeyskiy zhurnalпередovykh tekhnolohii*, t. 1, № 8(79), s. 11–20, 2016. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59419.
- [18] A. V. Samsonova, *Gipertrofija skeletnyh myshc cheloveka: ucheb. posobie. 3-e izd. SPb., Rossiya: Politehnika, 2015, 159 s.*

Відомості про авторів

Кветний Роман Наумович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій.

Иванчук Ярослав Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерних наук.

Добровольська Катерина В'ячеславівна – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри біологічної фізики, медичної апаратури та інформатики.

Р. Н. Кветный¹, Я. В. Иванчук¹, Е. В. Добровольская²

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЫШЕЧНОГО СОКРАЩЕНИЯ

1 – Винницкий национальный технический университет, Винница

2 – Винницкий национальный медицинский университет им. Н. И. Пирогова, Винница

R. N. Kvyetnyy¹, Y. V. Ivanchuk¹, K. V. Dobrovolska²

MATHEMATICAL MODELING OF THE PHYSIOLOGICAL PROCESS OF MUSCLE CONTRACTION

1 – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

2 – National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia

УДК 510.589-047.44(045)

С. А. Кирилашук, І. В. Хом'юк, З. В. Бондаренко, Т. Г. Кирилашук

ПОБУДОВА ФОРМАЛІЗОВАНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗРАХУНКУ РЕЙТИНГОВОЇ ОЦІНКИ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. В статті визначено, що теорія і методи розв'язання задач визначають зміст математичного програмування. Базуючись на цьому, пропонується розглянути принцип моделювання системи підтримки прийняття рішень (СППР) для визначення рейтингу, враховуючи фактори, що впливають на нього. Важливою складовою більшої частини СППР є математичні моделі, аналітичні засоби, які точно орієнтовані на модель. Розглядається форма взаємозв'язку між ключовими змінними, що беруть участь у прийнятті рішення. Авторами формалізовано відповідну математичну модель, яка є основою системи підтримки прийняття рішень оптимального вибору із урахуванням критеріїв, що впливають на цей вибір. Для прикладу розглянуто моделювання системи підтримки прийняття рішення процесу формування рейтингу фільму за означеними критеріями. Охарактеризовано фактори, що впливають на рейтинг вибору фільму. Запропоновано у якості технологій для реалізації додатку обрати СУБД MS ACCESS (Microsoft Access), яка є однією з найпопулярніших систем для IBM PC та сумісних з нею комп'ютерами. З'ясовано, що отриманий програмний продукт системи підтримки прийняття рішень вибору фільмів для перегляду, надає можливість шляхом запропонованої моделі забезпечити вибір фільму з урахуванням індивідуальних вимог глядача (перегляд фільмів з максимальним рейтингом).

Ключові слова: критерії, математична модель, моделювання системи підтримки прийняття рішень, рейтингова оцінка, рейтинг фільму.

Аннотация. В статье определено, что теория и методы решения задач представляют собой суть математического программирования. Исходя из этого, предлагается рассмотреть принцип моделирования системы поддержки принятия решений для определения рейтинга, учитывая факторы, влияющие на него. Важной составляющей большинства СППР являются математические модели, аналитические средства, которые точно ориентированы на модель. Рассматривается форма взаимосвязи между ключевыми переменными, которые влияют на принятие решения. Авторами формализовано соответствующую математическую модель, которая является основой системы поддержки принятия решений оптимального выбора с учетом критериев, влияющих на этот выбор. Например, рассмотрено моделирование системы поддержки принятия решения процесса формирования рейтинга фильма по указанным критериям. Охарактеризованы факторы, влияющие на рейтинг выбора фильма. Предложено в качестве технологий для реализации приложения выбрать СУБД MS ACCESS (Microsoft Access), которая является одной из самых популярных систем для IBM PC и совместимых с ней компьютерами. Выяснено, что полученный программный продукт системы поддержки принятия решений выбора фильмов для просмотра, позволяет путем предложенной модели обеспечить выбор фильма с учетом индивидуальных требований зрителя (просмотр фильмов с максимальным рейтингом).

Ключевые слова: критерии, математическая модель, моделирование системы поддержки принятия решений, рейтинговая оценка, рейтинг фильма.

Abstract. The article defines that the theory and methods of solving problems are the content of mathematical programming. Based on this, it is proposed to consider the principle of modeling a decision support system to determine the rating, taking into account the factors influencing it. An important component of most DSS are mathematical models, analytical tools that are precisely model-oriented. The form of the relationship between the key variables involved in decision-making is considered. The authors formalize the relevant mathematical model, which is the basis of the decision support system of the optimal choice, taking into account the criteria influencing this choice. For example, the modeling of the decision support system of the film rating process according to the specified criteria is considered. The factors influencing the rating of the film selection are described. It is suggested to choose MS ACCESS (Microsoft Access) as one of the most popular systems for IBM PC and compatible computers as technologies for the application implementation. It was found that the obtained software product of the decision support system for the selection of films for viewing, provides an opportunity through the proposed model to ensure the selection of the film taking into account the individual requirements of the viewer (viewing movies with the highest rating).

Key words: criteria, mathematical model, modeling of decision support system, rating, film rating.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-50-1-99-104>.

Вступ

На теперішній час важливість математичного програмування є безперечно, це найбільш актуальна частина прикладної математики. Необхідність застосування математичних методів у професійній діяльності людства, вимагає створення та використання засобів математичного моделювання для розв'язання професійно спрямованих задач. Видатний математик 20 століття Л. Д. Кудрявцев вказує, що «навчання умінню складати математичні моделі реальних явищ є однією з першочергових задач в процесі освіти спеціалістів відповідного профілю, а тому цій задачі має надаватися набагато більше часу й уваги, ніж це часто робиться» [1, 10]. Концепцію структурного моделювання запропонував у 1987 році Артур Джеофрїон. Архітектура системи підтримки прийняття рішень (СППР) представлена різними авторами по-різному. Наприклад, Г. Маракас у 1999 р. запропонував узагальнену архітектуру, що складається з таких частин: система управління даними (the Data Management System); система управління моделями (the Model Management system); машина знань (the Knowledge Engine); інтерфейс користувача (the User Interface). У 1980 р. була опублікована дисертація Альтера (S. Alter) [2], у якій він запропонував основи класифікації СППР. У 1993 р. Е. Коддом введено термін – OLAP (On-Line Analytical+Processing) – оперативний аналіз даних, аналітична обробка даних в реальному часі для систем підтримки прийняття важливих рішень [2].

Актуальність

Важливою складовою більшості СППР є математичні моделі, аналітичні засоби, які точно орієнтовані на модель. В. Штофф під моделлю розуміє подумки подану або матеріально реалізовану систему, яка, відображаючи або відтворюючи об'єкт дослідження, здатна замінити його так, що її вивчення дає нам нову інформацію про об'єкт [3]. Модель побудови вимагає детального вивчення та аналізу проблеми. Цей процес структурує мислення, формулює припущення заздалегідь задуманої ідеї. Побудова математичної моделі може висвітлити рішення, не використовуючи фактичну модель, тобто розглядається форма взаємозв'язку між ключовими змінними, що беруть участь у прийнятті рішення. Розглянемо формалізовано відповідну математичну модель, яка є основою системи підтримки прийняття рішень оптимального вибору із урахуванням критеріїв, що впливають на цей вибір. Для прикладу, розглянемо моделювання системи підтримки прийняття рішення процесу формування рейтингу фільму за означеними критеріями.

Мета

Мета даної статті є: 1) огляд принципу моделювання системи підтримки прийняття рішень для визначення рейтингу, враховуючи означені фактори, що впливають на формування рейтингу; 2) формалізувати відповідну математичну модель, яка буде основою системи підтримки прийняття рішень оптимального вибору із урахуванням критеріїв, що впливають на цей вибір.

Розв'язання задач

Використання математики надає можливість аналізувати на початкових етапах ефективність алгоритмів та час їх виконання, дозволяє краще описувати об'єкти реального світу, надавати оцінку до створення коду для розуміння того, чи потрібно такий алгоритм використовувати або взяти інший, більш ефективний [4].

Якщо об'єкт дослідження є проаналізованим, а його властивості й характеристики можна виявити на основі теоретичних уявлень і наявних у літературі даних, доцільно як метод дослідження обрати побудову математичної моделі. У цьому випадку процеси функціонування елементів системи подають як певні функціональні співвідношення (алгебраїчні, диференціальні, скінченно-різницеві тощо) або за допомогою логічних мов. Під математичною моделлю реальної системи (процесу) розуміють сукупність співвідношень (формул, рівнянь, нерівностей, логічних умов, операторів тощо), які визначають характеристики станів системи залежно від її параметрів, зовнішніх умов (вхідних сигналів, впливів), початкових умов та часу [1]. Математична модель дає можливість проаналізувати процеси, їх покращити, удосконалити та оптимізувати [5].

Загалом за визначенням В. Глушкова математична модель – це множина символічних математичних об'єктів і співвідношень між ними. За М. Амосовим, математична модель – це система, що відображає іншу систему [1, 15].

Математичні моделі можна досліджувати такими методами:

а) аналітичними, що дають змогу отримати у загальному вигляді явні залежності для досліджуваних характеристик;

б) чисельними, що дають можливість одержати числові значення шуканих параметрів при конкретних початкових і межових умовах;

в) якісними, за допомогою яких можна визначити певні властивості розв'язку (стійкість, монотонність, характер змінювання, асимптотика тощо) без отримання його в явному вигляді;

г) аналоговими, що дають змогу вивчати властивості досліджуваної системи за допомогою певного реального об'єкта, наприклад електричної схеми, яку можна подавати за допомогою тієї самої математичної моделі.

Під час аналізу розділів вищої математики та чисельних методів щодо потреб програмістів, то все залежить від цілей програміста. Для вирішення деяких завдань потрібні глибокі математичні знання, а для інших вони є важливі меншою мірою. Якщо мова йде про інфраструктурні та інженерні завдання, то потрібні зовсім інші уміння. В системному програмуванні математика затребувана меншою мірою, в криптографії вимагається достатньо глибокий рівень знань математичних понять. В машинному навчанні (штучний інтелект), під час аналізу великої кількості даних – все побудовано на математичних та статистичних поняттях [4].

Теорія і методи розв'язання задач представляють зміст математичного програмування. В математичному програмуванні можна виділити два напрямки. До першого відносяться детерміновані задачі, у яких вся вихідна інформація повністю визначена. До другого напрямку (так званого стохастичного програмування) – відносяться задачі, у яких вихідна інформація містить елементи невизначеності, або деякі параметри таких задач мають випадковий характер з відомими ймовірнісними характеристиками.

Під поняттям «система підтримки прийняття рішень (СППР)», мають на увазі автоматизовану систему, що формує умови, за яких користувач мав би можливість збільшити кількість задач для

розв'язання та знайти оптимальне рішення разом із можливостями комп'ютера, та з урахуванням різних економічних, часових та інших лімітів [6].

Процес прийняття рішень в СППР полягає у трьох фазах. Перша фаза дослідницька. На цій фазі досліджуються знання та інформація з внутрішніх та зовнішніх джерел. В процесі дослідження розуміння проблеми стає більш ясними і обгрутованим, альтернативи і їх наслідки більш зрозумілими. Друга фаза-проекування. На цьому етапі користувач формулює знання про результати альтернативних дій оцінює їх наслідки для функціонування системи, а також може виробляти додаткові знання. Третя фаза-вибір рішення. На цьому етапі користувач виконує вибір між альтернативами з урахуванням їх наслідків, які були проаналізовані і досліджені на першій і другій фазах [7].

Під базами даних систем підтримки прийняття рішень (БД СППР) розуміють сукупність даних, для яких існує доступ до наявних даних і звітів, та можливість аналізувати їх. Сховище даних – це є великі бази інформації. Неструктуровані дані зберігаються в іншому вигляді, ніж та інформація, яка є структурованою. Мета Web-серверів забезпечити сприятливу платформу для усіх даних та документів.

Структурована БД СППР як правило містить не один, а декілька серверів, спеціальні засоби апаратного користування та багатовимірні реляційні БД. Існує декілька методів для того щоб виділити, перетворити, завантажити та індексувати структуровані дані СППР [8]. Схема функціонування баз даних для СППР представлена на рис. 1.

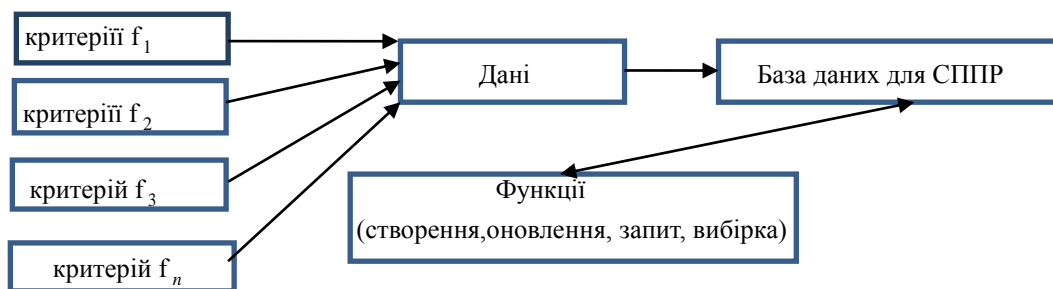


Рисунок 1 – Схема функціонування баз даних для СППР

Побудова математичної моделі задачі, що досліджується включає побудову цільової функції змінних, тобто такої числової характеристики, найбільшому чи найменшому значенню якої відповідає найраціональніша ситуація з точки зору прийнятого рішення. Часто з'являється потреба побудувати таку модель, в якій би враховувалась значна кількість вхідних даних. Також є можливість розміщення програмного забезпечення на сервері разом з даними та їх базою.

Розглянемо моделювання системи підтримки прийняття рішень у вигляді математичної моделі визначення параметру з урахування складових компонент $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$. У свою чергу, кожний компонент може мати свої характеристики, які можуть визначатись як середнє арифметичне або ін. Значення відповідних характеристик визначаються експертним шляхом. Після нормування приведемо всі значення до єдиної шкали змін, тобто для кожного параметру θ для її компонент $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ виконується.

$$f_i \in [0;1], \quad i = \overline{1, n}$$

Для формалізації моделі рейтингування R використаємо метод лінійної згортки розв'язання задач:

$$R = e_1 \cdot f_1 + e_2 \cdot f_2 + e_3 \cdot f_3 + \dots + e_n \cdot f_n$$

де e_i – експертна оцінка важливості i -го фактору, $f_i \in [0;1], i = \overline{1, n}$.

При обмеженнях

$$\sum_{i=1}^n e_i = 1, e_i \in [0;1], i = \overline{1, n}$$

Для прикладу, розглянемо моделювання системи підтримки прийняття рішення процесу формування рейтингу фільму за означеними критеріями.

Визначимо наступні фактори, що впливають на рейтинг вибору фільму:

$$f_1 = \frac{\sum_{i=1}^k f_{1i}}{k}$$

де k – відповідає кількості жанрам фільму;

f_1 – жанр

f_2 – рік виходу фільму;

f_3 – режисер фільму;

f_4 – акторський склад фільму, визначається, як

$$f_1 = \frac{\sum_{i=1}^n f_{4i}}{n}$$

де n – кількість акторів, а f_{4i} – значення фактора для i -го актора.

f_5 – телекомпанія;

f_6 – рейтинг IMDB=[0;10], визначається:

$$e_6 = \frac{f_6}{10} \in [0;1]$$

f_7 – країна.

Рейтинг фільму визначається, як

$$R = e_1 \cdot f_1 + e_2 \cdot f_2 + e_3 \cdot f_3 + \dots + e_7 \cdot f_7$$

У якості технологій для реалізації додатку може бути обрано СУБД MS ACCESS. СУБД MS Access (Microsoft Access) – одна з найпопулярніших систем для IBM PC та сумісних з нею комп'ютерами. У MS Access представлений потужний інструментарій для розробників, що забезпечує можливості програмування на рівні Microsoft VisualBasic. СУБД MS Access зберігає дані в одному файлі, при цьому розподіляє дані по різних таблицях.

При завантаженні продукту з'являється вікно яке зображено на рис. 2.

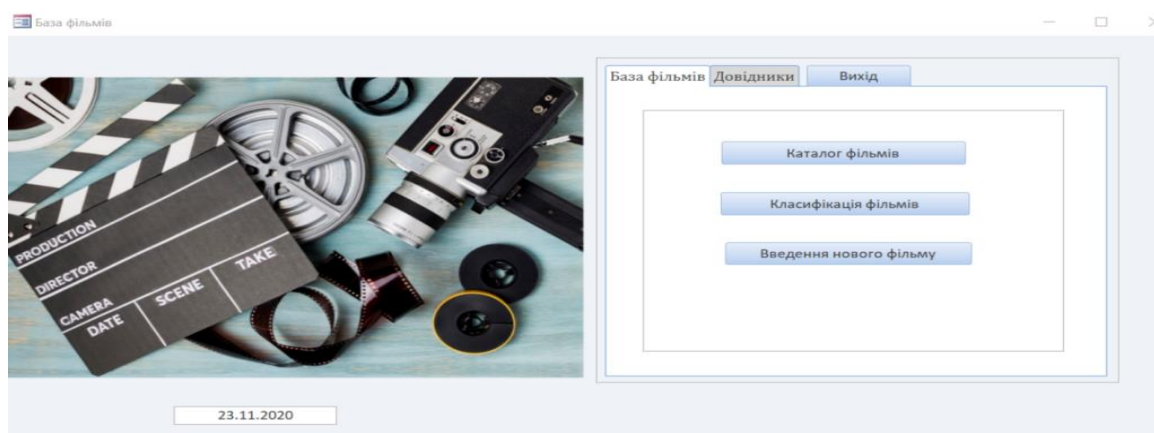


Рисунок 2 – Вхід у систему

При натисканні кнопки «Введення нового фільму», відкривається вікно в яке можна додати нові фільми у базу даних. Є можливість заповнити такі фактори: найменування, жанр, дата, телекомпанія, держава, тривалість, актори, інформація про фільм, зміст, фото фільму (рис. 3).

Рисунок 3 – Вікно для реєстрації фільму в систему

Система дає можливість додатково переглянути каталог фільмів та їх класифікацію. Отриманий програмний продукт системи підтримки прийняття рішень вибору фільмів для перегляду, надає можливість оптимального вибору з урахуванням індивідуальних вимог глядача (перегляд фільмів з максимальним рейтингом).

Отже, за допомогою реляційної системи управління базами даних корпорації Microsoft Access реалізовано додаток системи підтримки прийняття рішень вибору фільмів для перегляду, що надає можливість шляхом запропонованої моделі забезпечити вибір фільму з урахуванням індивідуальних вимог глядача. Однак, під час детального аналізу моделі виявляється, що існування факторів із невисокою точністю вхідних даних впливає на результат. Отже, цілий ряд умов у математичних моделях вимагає їх аналізу ще в стадії її побудови (визначення рівнянь та нерівностей, що визначають змінні величини).

Висновки

1. Висновок перший. Сучасний IT-ринок вимагає математичних знань для побудови математичних моделей та їх розв'язків, дослідження статистичних залежностей, реалізації задач розпізнавання образів, побудови нейронних мереж, аналізу великих даних тощо. Проаналізований принцип моделювання системи підтримки прийняття рішень для визначення рейтингу, враховуючи означені фактори, що впливають на його формування.

2. Висновок другий. Нами розглянута формалізована математична модель рейтингування фільмів з урахуванням індивідуальних вимог глядача. Реалізація запропонованої моделі забезпечує розрахунок рейтингової оцінки R фільму, де враховуються критерії глядача (визначаються персональні коефіцієнти важливості відповідних факторів та змінюються їх значення за потреби). Модель є основою системи підтримки прийняття рішень вибору фільмів для перегляду та надає можливість зробити оптимальний вибір.

Список літератури

- [1] І. Ю. Семенова, *Математичні моделі МСС: навчальний посібник*. К., Україна: Київський нац. ун-т ім. Т. Г. Шевченка, 2014, 82 с.
- [2] В. Ф. Ситник, *Системи підтримки прийняття рішень: навчальний посібник*. К., Україна: КНЕУ, 2009, 614 с.
- [3] В. В. Хом'юк, І. В. Хом'юк, «Математичне моделювання в контексті здійснення між предметних зв'язків курсу вищої математики у ВНЗ», *Збірник наукових праць «Актуальні питання природничо-математичної освіти»*, Суми: Сумський держ. педагогічний університет ім. А. С. Макаренка, вип. 2(10), с. 43–50, 2017.
- [4] Г. В. Славко, *Математика програмістам: навчальний підручник*. Кременчук, Україна: ПП Щербатих О.В., 2018, 184 с.
- [5] Alexey D Azarov, Svitlana A Kyrylashchuk, Sergey V Bogomolov, Oleksiy Y Stakhov, Andrzej Kotyra, Orken Mamyrbaev, «Selection of the calculus system base for ADC and DAC with weight redundancy», *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019. International Society for Optics and Photonics*, p. 1117662, 2019.
- [6] С. М. Братушка, С. М. Новак, С. О. Хайлук, *Системи підтримки прийняття рішень: навчальний посібник для самостійного вивчення дисципліни*. Суми, Україна: ДВНЗ «УАБС НБУ», 2010, 265 с.

- [7] М. А. Демиденко, *Системи підтримки прийняття рішень: навч. посіб.* Д., Україна: Нац. гірн. ун-т, 2016, 104 с.
- [8] В. К. Галіцин, Ф. А. Левченко, *Багатокористувацькі обчислювальні системи та мережі: навч. посібник.* К., Україна: КНЕУ, 2017.

Стаття надійшла: 20.02.2021.

References

- [1] I. Yu. Semenova, *Matematychni modeli MSS: navchalnyi posibnyk.* K., Ukraina: Kyivskiy nats. un-t im. T. H. Shevchenka, 2014, 82 s.
- [2] V. F. Sytnyk, *Systemy pidtrymky pryiniattia rishen: navchalnyi posibnyk.* K., Ukraina: KNEU, 2009, 614 s.
- [3] V. V. Khomiuk, I. V. Khomiuk, «Matematyчне modeliuвання v konteksti zdiisnennia mizh predmetnykh zviazkiv kursu vyshchoi matematyky u VNZ», *Zbirnyk naukovykh prats «Aktualni pytannia pryrodnycho-matematychnoi osvity»*, Sumy: Sumskiy derzh. pedahohichnyi universytet im. A. S. Makarenka, vyp. 2(10), s. 43–50, 2017.
- [4] H. V Slavko, *Matematyka proqramistam: navchalnyi pidruchnyk.* Kremenchuk, Ukraina: PP Shcherbatykh O.V., 2018, 184 s.
- [5] Alexey D Azarov, Svitlana A Kyrylashchuk, Sergey V Bogomolov, Oleksiy Y Stakhov, Andrzej Kotyra, Orken Mamyrbayev, «Selection of the calculus system base for ADC and DAC with weight redundancy», *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019. International Society for Optics and Photonics*, p. 1117662, 2019.
- [6] S. M. Bratushka, S. M. Novak, S. O. Khailuk, *Systemy pidtrymky pryiniattia rishen: navchalnyi posibnyk dlia samostiinoho vyvchennia dystsypliny.* Sumy, Ukraina: DVNZ «UABS NBU», 2010, 265 s.
- [7] М. А. Демиденко, *Systemy pidtrymky pryiniattia rishen: navch. posib.* D., Ukraina: Nats. hirn. un-t, 2016, 104 s.
- [8] V. K. Halitsyn, F. A. Levchenko, *Bahatokopystuvatski obchysliuvalni systemy ta mepezhi: navch. posibnyk.* K., Ukraina: KNEU, 2017.

Відомості про авторів

Кирилашук Світлана Анатоліївна – кандидат педагогічних наук, доцент, декан факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії.

Хом'юк Ірина Володимирівна – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри вищої математики.

Бондаренко Злата Василіївна – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри вищої математики.

Кирилашук Тетяна Геннадіївна – асистент кафедри вищої математики.

С. А. Кирилашук, И. В. Хом'юк, З. В. Бондаренко, Т. Г. Кирилашук

ПОСТРОЕНИЕ ФОРМАЛИЗОВАННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАСЧЕТОВ РЕЙТИНГОВОЙ ОЦЕНКИ

Винницкий национальный технический университет, Винница

S. A. Kyrylashchuk, I. V. Khomyuk, Z. V. Bondarenko, T. G. Kyrylashchuk

CONSTRUCTION OF A FORMALIZED MATHEMATICAL MODEL TO ENSURE THE CALCULATION OF RATING ASSESSMENT

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia

УДК 53.088.3; 53.088.7

О. Ю. Олійник¹, Ю. К. Тараненко²

ПОБУДОВА І АНАЛІЗ КОМП'ЮТЕРНИХ МОДЕЛЕЙ РЕЗОНАТОРІВ ЄМНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АПАРАТІВ ВІЗУАЛЬНИМИ ЗАСОБАМИ PYTHON

1 – Коледж радіоелектроніки, Дніпро

2 – Приватне підприємство «Лікопак», Дніпро

Анотація. Дослідження нелінійних коливань і процесів в апаратах, що відбуваються під впливом складних коливань, викликають значні математичні труднощі. Сильні нелінійні коливання можуть істотно інтенсифікувати технологічні процеси або ж обумовлювати руйнування елементів конструкцій. Тому проблема використання коливальної енергії, що виникає в технологічних апаратах природним шляхом, назрівала тривалий час і у конструкторів обладнання, і у технологів виробництва.

Запропоновано комп'ютерну модель на основі диференціального рівняння для визначення частот і форм згинальних коливань трубчастого резонатора. Застосування моделі дозволяє візуалізувати форми і частоту коливань для резонатора у вигляді циліндричної частини технологічного апарату будь-якого розміру. При цьому враховується товщина стінок, зовнішній і внутрішній діаметр ємності апарату, його довжина. Модель враховує тип кріплення ємності з варіацією жорсткості опори.

Відмінною особливістю отриманої моделі є те, що вперше використаний підхід до розв'язування диференціального рівняння ємності не шляхом отримання чисельного рішення, а отримання аналітичного виразу для кожної форми коливання з наступною візуалізацією засобами Python.

Ключові слова: резонатор, коливання, амплітуда, частота, ємність.

Аннотация. Исследование нелинейных колебаний и процессов в аппаратах, которые происходят под влиянием возмущающих воздействий, представляет значительные математические трудности. Возникающие сильные нелинейные колебания могут существенно интенсифицировать технологические процессы или же обуславливать разрушения элементов конструкций. Поэтому задача использование колебательной энергии, которая возникает в технологических аппаратах естественным методом назревала длительное время и у проектировщиков оборудования, и технологов производства.

Предложено компьютерная модель на основе дифференциальных уравнений для определения частот и форм выгибных колебаний трубчатого резонатора. Применение модели позволяет визуализировать формы и частоту колебания для резонатора в виде цилиндрической части технологического аппарата любого размера. При этом учитывается толщина стенок, внешний и внутренний диаметр емкости аппарата, его длина. Модель учитывает тип крепления емкости с вариацией жесткости опоры.

Отличительной особенностью полученной модели является впервые использование подхода к решению дифференциального уравнения емкости не путем получения численного решения, а использование подхода, что включает получение аналитического выражения для каждой формы колебания с последующей визуализацией средствами Python.

Ключевые слова: резонатор, колебания, амплитуда, частота, емкость.

Abstract. The study of nonlinear oscillations and processes in apparatuses that occur under the influence of complex oscillations presents significant mathematical difficulties. The arising strong nonlinear oscillations can significantly intensify technological processes or cause the destruction of structural elements. Therefore, the problem of using the vibrational energy arising in technological devices naturally matured for a long time both for equipment designers and production technologists.

A computer model based on a differential equation for determining the frequencies and forms of bending vibrations of a tubular resonator is proposed. The use of the model makes it possible to visualize the modes and frequency of oscillations for a resonator in the form of a cylindrical part of a technological apparatus of any size. This takes into account the thickness of the walls, the outer and inner diameter of the vessel of the apparatus, and its length. The model takes into account the type of tank fastening with variation in the support stiffness.

A distinctive feature of the resulting model is that for the first time an approach was used to solve the differential equation of capacity not by obtaining a numerical solution, but an approach was used that includes obtaining an analytical expression for each waveform with subsequent visualization using Python.

Keywords: resonator, oscillations, amplitude, frequency, capacitance.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-50-1-105-114>.

Вступ

У технологічному обладнанні (барботажні колони, апарати зануреного горіння, скрубера і т.д.) можуть виникати сильні нелінійні коливання, обумовлені турбулізацією потоків, природними барботажними процесами в середині резервуарів апаратів. Проведені дослідження свідчать, що такі об'єкти мають складну структуру і не можуть бути адекватно описані лінійними моделями [1].

Разом з тим, дані [2,3] дозволяють говорити про те, що цю коливальну енергію можна було б використовувати для інтенсифікації технологічних процесів (наприклад, підвищувати теплонапруженість топкових камер (як це відбувається в камерах вібраційного горіння), покращувати тепло- і масообмін, знижувати гідравлічний опір) [4].

Однак, дослідження таких нелінійних коливань і процесів в апаратах, що відбуваються під впливом таких складних коливань, представляє значні математичні труднощі. Дані, отримані в роботах [3, 5] свідчать про наявність зворотного зв'язку між коливаннями параметрів газу і тепломасопідводом, що призводить до того, що коливання середовища в апараті самозбуджуються [3].

У ряді робіт [6-9] були отримані залежності амплітуди коливань середовища в технологічних апаратах від параметрів середовища (тиску або густини), але дослідження носять вузько направлений характер, отримані моделі для конкретних апаратів з урахуванням їх індивідуальних розмірів конструкцій,

типу кріплення опори, характеристик середовища всередині. Універсальні алгоритми для розрахунку коливальних характеристик різних апаратів не наводилися.

Тому сьогодні найбільш поширеним підходом до контролю коливань технологічних апаратів є вимір вібрацій обладнання з подальшим застосуванням демпфуючих пристроїв [10]. Інтенсифікують впливу при цьому здійснюються різними способами (механічний, акустичний, електромагнітний і т. д.) за рахунок підведення додаткової енергії [11-12].

Таким чином, розробка математичного апарату і отримання математичних моделей, що дозволяють чисельно оцінити коливальні характеристики апаратів з урахуванням різних конструктивних рішень по їх кріпленню, є актуальним напрямком досліджень, а розробка комп'ютерної моделі для вирішення поставленого завдання дозволить враховувати можливі коливальні процеси і використовувати цю енергію для інтенсифікації технологічних процесів.

Аналіз літературних даних

Питання використання коливальної енергії, яка виникає в технологічних апаратах природним шляхом неодноразово досліджувалось розробниками обладнання і технологами виробництв [4, 5, 6]. Разом з тим, основні напрямки досліджень були спрямовані на мінімізацію цих впливів шляхом застосування різних демпфуючих пристроїв [7, 8].

У ряді робіт була досліджена віброакустичне навантаження трубопроводів, показані різні типи компоновки залежно від довжини трубопроводів [8]. Відсутність обліку в отриманих моделях впливу конструкційних характеристик трубопроводів (товщини стінки, діаметра перетину) і параметрів технологічного середовища всередині унеможливило застосування результатів досліджень для технологічних апаратів. Крім того, більшість моделей розрахунку віброакустичного навантаження трубопроводів засновані на диференціальному рівнянні коливання балки, що робить результати розрахунків занадто приближними.

У роботах [8,9] розроблені теоретичні основи віброчастотного методу контролю ефективності роботи технологічного апарату і устрій автоколивальної системи. У дослідженнях використовували роторно-імпульсний апарат, тому отриманих математичні моделі неможливо використовувати при контролі коливальних процесів, які обумовлені турбулізацією потоків, природними барботажними процесами в середині резервуарів апаратів. Крім того не враховувалися типи кріплення апаратів і різні варіанти жорсткості опор кріплення. Основні типи кріплення розглянуті в численних джерелах [10-14].

Вплив типу компоновок кріплень на віброакустичне навантаження вивчалось в ряді робіт з використанням коливань балки [4, 15]. Однак роботи так само присвячені побудові моделей віброакустичного навантаження без урахування геометричних розмірів труб, товщини стінок і щільності матеріалу.

Авторами були проведені дослідження, які підтверджують наявність взаємозв'язку взаємодії вібраційного поля резонатора, в якості якого була використана частина технологічного апарату (труби) з контрольованим середовищем різної густини. Встановлена наявність залежності зміни частоти або амплітуди власних коливань ємності апарату від параметрів середовища всередині в апараті. Конструктивні параметри ємностей, матеріал підбиралися експериментальним шляхом.

Відсутність розробленого математичного апарату, комп'ютерної моделі для розрахунку і аналізу форм і частот коливань ємностей апаратів з урахуванням типу кріплення ускладнює розрахунок та облік природних коливальних процесів на стадії проектування обладнання. Для ефективного контролю необхідний точний розрахунок частот і форми коливань ділянок трубопроводу між кріпленнями з урахуванням їх розташування і жорсткості опор, що дозволить контролювати місця максимальних напружень і відповідно здійснювати ліквідацію аварійних ситуацій, що особливо важливо при перекачуванні легкозаймистих і сильно токсичних рідин. Отримання таких моделей і їх програмна реалізація стане затребуваним продуктом у конструкторів технологічного обладнання, дозволить вирішити проблему достовірного контролю технологічних параметрів всередині обладнання шляхом визначення параметрів частот і форм коливань середовища.

Мета

Метою даної роботи є розробка комп'ютерної моделі аналізу форм і частот коливань резонаторів в якості яких використовуються ємності технологічних апаратів з різними типами кріплення апаратів з використанням візуальних засобів Python.

Розробка комп'ютерної моделі резонаторів з використанням візуального програмування Python

В основу моделі покладено диференціальне рівняння, яке було застосоване в роботах для визначення частот і форм згинних коливань трубчатого резонатора густиноміру [11-12]. Застосуємо це рівняння для визначення частот і форм згинальних коливань резонуючої ємності технологічного апарату:

$$EL \frac{d^4 y}{dx^4} + (m_m + m_p) \frac{d^2 y}{dt^2} = 0, \quad (1)$$

де EI – жорсткість при згинанні в площині коливань; E – модуль пружності матеріалу резонуючої ємності; I – статичний момент інерції поперечного перерізу ємності щодо осі коливань; m_m, m_p – маса одиниці довжини ємності і рідинної суміші всередині апарату відповідно; y – відхилення осі ємності як функція часу t і координати x вздовж осі трубки.

Розв'язок рівняння (1) будемо шукати у вигляді виразу, що визначає форму коливань резонуючої ємності:

$$y = A \sin(kx) + B \cos(kx) + C \operatorname{sh}(kx) + D \operatorname{ch}(kx), \quad (2)$$

де y – форма коливань, відхилення точок вісі резонуючої ємності від вертикальної вісі; A, B, C, D – коефіцієнти, які визначаються умовами закріплення кінців резонуючої ємності технологічного апарату;

$$k = \sqrt[4]{\frac{m p^2}{EI}} \quad \text{чи} \quad f = \frac{k^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{m}}.$$

Розв'язання диференціального рівняння (1) знайдемо не з використанням класичного чисельного рішення, а застосуємо підхід, що включає отримання аналітичного виразу для кожної форми коливання.

При виборі крайових умов, які визначаються способом закріплення торців ємності, використовуємо загальноприйнятий підхід, відомий з [13]:

$$l \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{(ah_0)^2}} > 3. \quad (3)$$

де ν – коефіцієнт Пуасона, l – довжина ємності апарату, h_0 – товщина стінки, a – радіус перетину ємності.

Якщо відношення (3) виконується, то циліндр вважається довгим і вплив крайових умов має тільки місцевий характер, мало впливає на частоту коливань основної форми. Помилка, обумовлена таким припущенням в результаті розрахунку частоти коливань ємності, не має впливу, оскільки завжди для побудови градуовальної характеристики слід з високою точністю експериментально визначати початкову частоту коливань резонатора [13].

Крайові умови закріплення апаратів вибираються відповідно до існуючих умов закріплення, згідно [11]. На рис. 1 представлені розрахункові схеми компонування кріплень з урахуванням типу опор. Жорсткість опор задається при виборі компоновки.

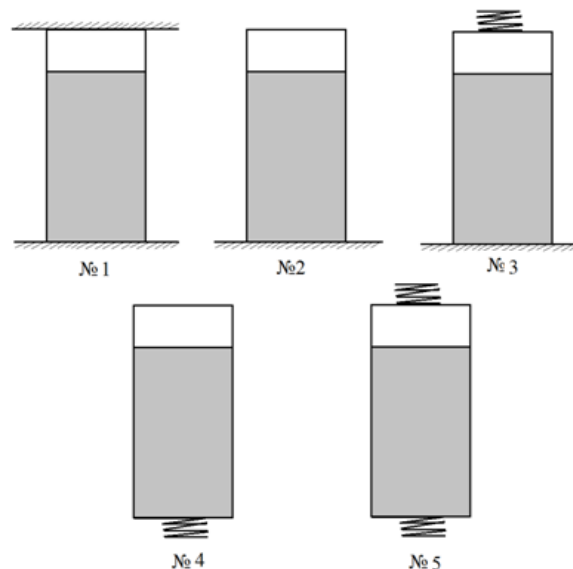


Рисунок 1 – Розрахункові схеми кріплення технологічних апаратів одним кінцем (кріплення 1, 4) і двома кінцями (кріплення 2, 3, 5)

При вільному кінці резонуючої ємності (тип кріплення №1, №4) сила і згинальний момент дорівнюють нулю: $y'' = y''' = 0$; при жорсткому закладанні решт резонуючій ємності (тип кріплення №1, №2,

№ 3) – прогин і кут повороту дорівнюють нулю: $y = y' = 0$; при пружно закріпленому кінці резонатора, вигинає момент дорівнює нулю, а поперечна сила дорівнює реакції пружного закріплення: $y = y' = 0$ [12].

Лістинг підпрограм розрахунку коефіцієнтів A, B, C, D по крайовим умовам закріплення кінців резонуючій ємності наведено в табл. 1.

Розраховуються значення коефіцієнта k для перших трьох форм коливань (розрахунки форм коливань вище третьої не мають практичного застосування, оскільки в цьому випадку сильно ускладнюється система збудження коливань резонатора). Для демонстрації можливостей комп'ютерної моделі для обраної розрахункової схеми (рис. 1) визначені коефіцієнти трьох форм коливань (табл. 1).

Таблиця 1– Розрахунок коефіцієнтів k для перших трьох форм коливань

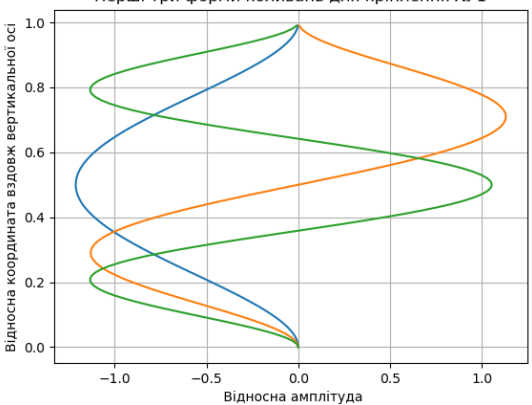
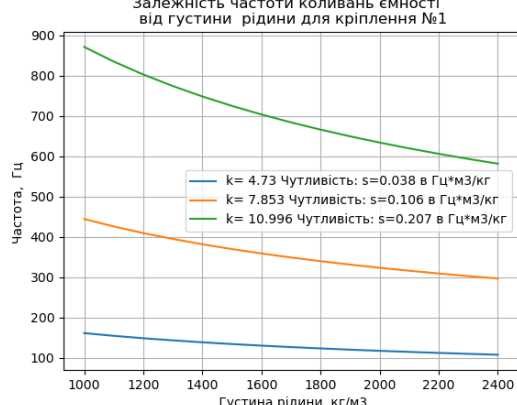
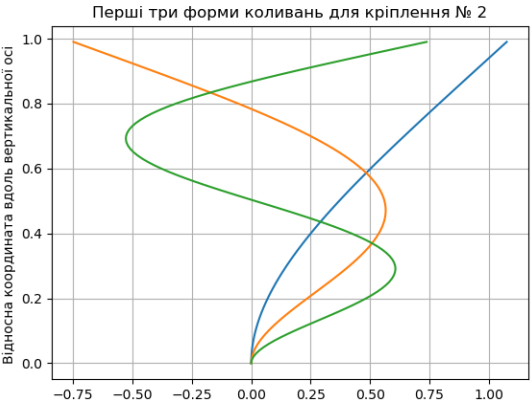
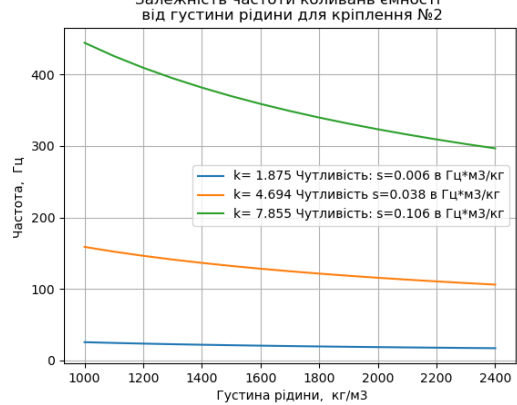
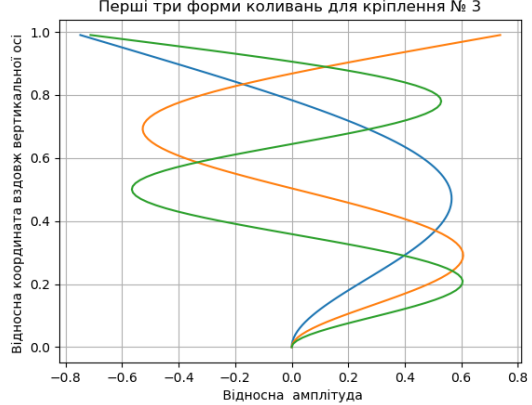
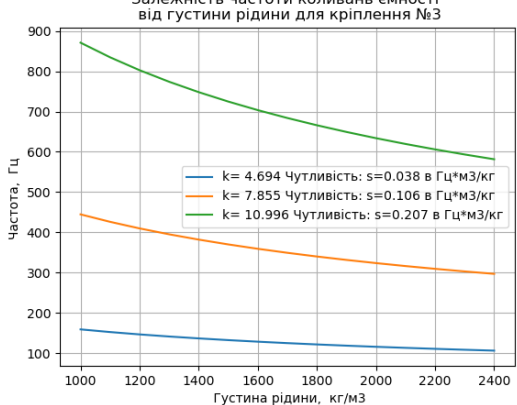
Тип кріплення №	Підпрограма розрахунку коефіцієнтів A, B, C, D по крайовим умовам кріплення кінців резонуючої ємності	Значення коефіцієнтів k		
		Перша форма	Друга форма	Третя форма
1	<pre> var(k x A B C D) def S(k,x): return (cosh(k*x)+cos(k*x))/2 def T(k,x): return (sinh(k*x)+sin(k*x))/2 def U(k,x): return (cosh(k*x)-cos(k*x))/2 def V(k,x): return (sinh(k*x)-sin(k*x))/2 def y(x): return A*S(k,x)+B*T(k,x)+C*U(k,x)+D*V(k,x) #Крайова умова y(0)=0 p1=y(x).subs(x,0) res= solve([p1],A) A=res[A] #Крайова умова y(l)=0 p2=y(x).subs(x,l) res= solve([p2],C) C=factor(res[C],B,D) #Крайова умова dy(0)/dx=0 p3=y(x).diff(x,1).subs(x,0) p3=factor(p3,B,D) # Коефіцієнти при невідомих B,D перша система a1=p3.diff(B,1) b1=p3.diff(D,1) #Крайова умова dy(l)/dx=0 p4=y(x).diff(x,1).subs(x,l) p4=factor(p4,B,D) # Коефіцієнти при невідомих B,D друга система a2=p4.diff(B,1) b2=p4.diff(D,1) def f(kk):#Визначник системи return (a1*b2-b1*a2).subs(k,kk) </pre>	4.73	7.853	10.996

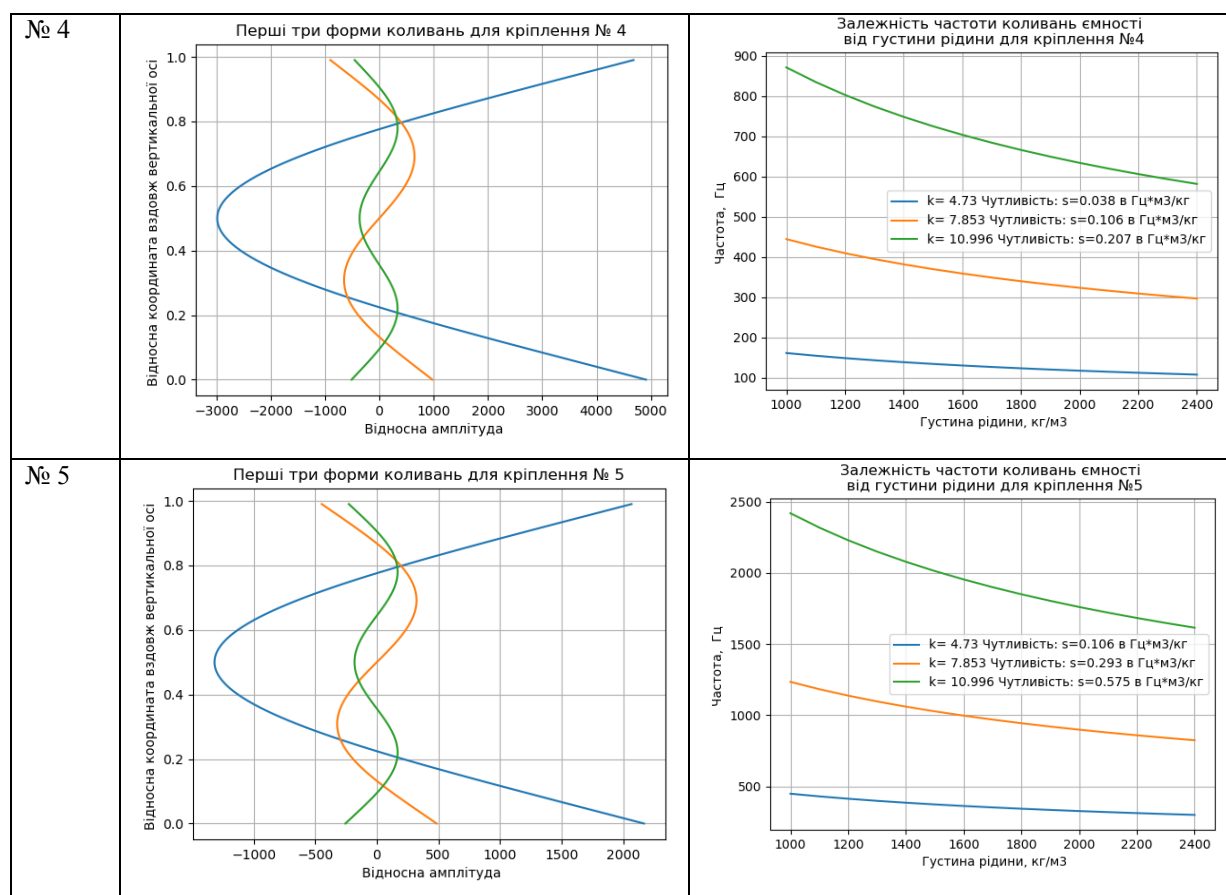
2	<pre> var('k x A B C D') def S(k,x): return (cosh(k*x)+cos(k*x))/2 def T(k,x): return (sinh(k*x)+sin(k*x))/2 def U(k,x): return (cosh(k*x)-cos(k*x))/2 def V(k,x): return (sinh(k*x)-sin(k*x))/2 def y(x): return A*S(k,x)+B*T(k,x)+C*U(k,x)+D*V(k,x) #Крайова умова y(0)=0 p1=y(x).subs(x,0) res= solve([p1],A) A=res[A] #Крайова умова dy2(l)/dx2=0 p2=y(x).diff(x,2).subs(x,l) res= solve([p2],C) C=factor(res[C],B,D) #Крайова умова dy(0)/dx=0 p3=y(x).diff(x,1).subs(x,0) p3=factor(p3,B,D) # Коефіцієнти при невідомих B,D перша система a1=p3.diff(B,1) b1=p3.diff(D,1) #Крайова умова dy3(l)/dx3=0 p4=y(x).diff(x,3).subs(x,l) p4=factor(p4,B,D) # Коефіцієнти при невідомих B,D друга система a2=p4.diff(B,1) b2=p4.diff(D,1) def f(kk):#Визначник системи </pre>	1.875	4.694	7.855
3	<pre> var('k x A B C D') def S(k,x): return (cosh(k*x)+cos(k*x))/2 def T(k,x): return (sinh(k*x)+sin(k*x))/2 def U(k,x): return (cosh(k*x)-cos(k*x))/2 def V(k,x): return (sinh(k*x)-sin(k*x))/2 def y(x): return A*S(k,x)+B*T(k,x)+C*U(k,x)+D*V(k,x) #Крайова умова y(0)=0 p1=y(x).subs(x,0) res= solve([p1],A) A=res[A] #Крайова умова dy2(l)/dx2=0 p2=y(x).diff(x,2).subs(x,l) res= solve([p2],C) C=factor(res[C],B,D) #Крайова умова dy(0)/dx=0 p3=y(x).diff(x,1).subs(x,0) p3=factor(p3,B,D) # Коефіцієнти при невідомих B,D перша система a1=p3.diff(B,1) b1=p3.diff(D,1) #Крайова умова dy3(l)/dx3-(c/EJ)*y(l) p4=y(x).diff(x,3).subs(x,l)-c*y(x).subs(x,l)/EJ p4=factor(p4,B,D) # Коефіцієнти при невідомих B,D друга система a2=p4.diff(B,1) b2=p4.diff(D,1) def f(kk):#Визначник системи </pre>	4.694	7.855	10.996

4	<pre> var('k x A B C D') def S(k,x): return (cosh(k*x)+cos(k*x))/2 def T(k,x): return (sinh(k*x)+sin(k*x))/2 def U(k,x): return (cosh(k*x)-cos(k*x))/2 def V(k,x): return (sinh(k*x)-sin(k*x))/2 def y(x): return A*S(k,x)+B*T(k,x)+C*U(k,x)+D*V(k,x) #Крайова умова dy2(0)/dx2=0 p1=y(x).diff(x,2).subs(x,0) res= solve([p1],C) C=res[C] #Крайова умова y(l)=0 p2=y(x).diff(x,2).subs(x,l) res= solve([p2],A) A=factor(res[A],B,D) #Крайова умова dy3(0)/dx3-(c/EJ)*y(0)=0dy(0)/dx=0 p3=y(x).diff(x,3).subs(x,0)-c*y(x).subs(x,0)/EJ p3=factor(p3,B,D) # Коефіцієнти при невідомих B,D перша система a1=p3.diff(B,1) b1=p3.diff(D,1) #Крайова умова dy(l)/dx= p4=y(x).diff(x,3).subs(x,l) p4=factor(p4,B,D) # Коефіцієнти при невідомих B,D друга система a2=p4.diff(B,1) b2=p4.diff(D,1) def f(kk):#Визначник системи </pre>	4.73	7.853	10.996
5	<pre> var('k x A B C D') def S(k,x): return (cosh(k*x)+cos(k*x))/2 def T(k,x): return (sinh(k*x)+sin(k*x))/2 def U(k,x): return (cosh(k*x)-cos(k*x))/2 def V(k,x): return (sinh(k*x)-sin(k*x))/2 def y(x): return A*S(k,x)+B*T(k,x)+C*U(k,x)+D*V(k,x) #Крайова умова dy2(0)/dx2=0 p1=(y(x).diff(x,2).subs(x,0)) res= solve([p1],C) C=res[C] #Крайова умова dy2(l)/dx2=0 p2=y(x).diff(x,2).subs(x,l) p2=factor(p2,A,B,D) res= solve([p2],A) A=factor(res[A],B,D) # Крайова умова dy3(0)/dx3-c1*y(0)/EJ=0 p3=(y(x).diff(x,3).subs(x,0))-c1*y(x).subs(x,0)/EJ p3=factor(p3,B,D) # Коефіцієнти при невідомих B, D перша система a1=p3.diff(B,1) b1=p3.diff(D,1) # Граничное условие dy3(l)/dx3-c2*y(l)/EJ=0 p4=(y(x).diff(x,3).subs(x,l))-c2*y(l).subs(x,0)/EJ p4=factor(p4,B,D) # Коефіцієнти при невідомих B, D перша система a2=p4.diff(B,1) b2=p4.diff(D,1) def f(kk):#Визначник системи </pre>	4.73	7.853	10.996

Після визначення коефіцієнтів для перших трьох форм коливань формується візуалізація отриманого аналітичного виразу форми коливань з побудовою графіка перших трьох форм згинальних коливань осевої лінії резонатора для обраної схеми кріплення (табл.2). Програмно визначається так само час розрахунку, однак оскільки він залежить від технічних характеристик ПК, дані не представлені.

Таблиця 2 – Візуалізація форм і частоти коливань резонатора для обраної розрахункової схеми кріплення

Тип кріплення	Графік розрахунку форм коливань резонатора	Вид залежності частоти коливань ємності від густини рідини
№ 1	<p>Перші три форми коливань для кріплення № 1</p> 	<p>Залежність частоти коливань ємності від густини рідини для кріплення № 1</p>  <p>— $k = 4.73$ Чутливість: $s = 0.038$ в $\text{Гц} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$ — $k = 7.853$ Чутливість: $s = 0.106$ в $\text{Гц} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$ — $k = 10.996$ Чутливість: $s = 0.207$ в $\text{Гц} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$</p>
№ 2	<p>Перші три форми коливань для кріплення № 2</p> 	<p>Залежність частоти коливань ємності від густини рідини для кріплення № 2</p>  <p>— $k = 1.875$ Чутливість: $s = 0.006$ в $\text{Гц} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$ — $k = 4.694$ Чутливість: $s = 0.038$ в $\text{Гц} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$ — $k = 7.855$ Чутливість: $s = 0.106$ в $\text{Гц} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$</p>
№ 3	<p>Перші три форми коливань для кріплення № 3</p> 	<p>Залежність частоти коливань ємності від густини рідини для кріплення № 3</p>  <p>— $k = 4.694$ Чутливість: $s = 0.038$ в $\text{Гц} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$ — $k = 7.855$ Чутливість: $s = 0.106$ в $\text{Гц} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$ — $k = 10.996$ Чутливість: $s = 0.207$ в $\text{Гц} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$</p>



Розроблена комп'ютерна модель дозволяє візуалізувати форми і частоту коливань для резонатора у вигляді циліндричної частини технологічного апарату будь-якого розміру з урахуванням товщини стінок, зовнішнього і внутрішнього діаметра ємності, її довжини. Розрахунок виконаний для кожного типу кріплення розрахункової схеми із зазначенням конкретної жорсткості опори.

Відмінною особливістю отриманої моделі є те, що вперше використаний підхід до вирішення диференціального рівняння ємності не шляхом отримання чисельного рішення, а використаний підхід, що включає отримання аналітичного виразу для кожної форми коливання з подальшою візуалізацією засобами Python.

Висновки

1. Розроблено комп'ютерну модель аналізу форм і частот коливань резонаторів в якості яких використовуються ємності технологічних апаратів з різними типами кріплення апаратів з використанням візуальних засобів Python. Модель застосовується з метою вибору оптимальної системи кріплення технологічних апаратів

2. Аналіз форм і частот коливань резонаторів з метою вибору оптимальної системи кріплення показав, що максимальна частота коливань у резонуючій ємності буде при типі кріплення №5 (два кінця закріплені пружно). Максимальна амплітуда при типі кріплення №4 (один кінець закріплений пружно). Для підвищення ефективності та інтенсифікації технологічних процесів в рідинній середовищі всередині апарату доцільно використовувати тип кріплення №5. У той же час, на практиці частіше за все використовують другий тип кріплення, який характеризується найменшою частотою коливання резонуючій рідини, що помітно може зменшити ефективність процесу.

3. Точний розрахунок частот і форми коливань резервуарів технологічних апаратів з урахуванням жорсткості (піддатливості) опор кріплення дозволить контролювати місця максимальних напружень і відповідно здійснювати ліквідацію аварійних ситуацій, що особливо важливо при перекачуванні легкозаймистих і сильно токсичних рідин в хімічній промисловості.

Список літератури

- [1] T. Ikeda, T. Hirayama, N. Nakagawa, «Nonlinear Vibrations of a Structure Caused by Water Sloshing in a Cylindrical Tank (Special Issue on Nonlinear Dynamics)», *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, vol. 41, no. 3, pp. 639-651, 1998.

- [2] T. Ikeda, S. Murakami, «Nonlinear vibrations of elastic structures containing a cylindrical liquid tank under vertical excitation», *Journal of System Design and Dynamics*, vol. 2, no. 3, pp. 822-836, 2008.
- [3] A. Maekawa, M. Suzuki, K. Fujita, «Nonlinear Vibration Response of a Cylindrical Water Storage Tank Caused by Coupling Effect Between Beam-Type Vibration and Oval-Type Vibration: Part 1—Vibration Experiment», in *ASME 2006 Pressure Vessels and Piping/ICPVT-11 Conference*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, pp. 329–338, 2006.
- [4] Д. Н. Самойленко, «Обзор аппаратов и технологических методов для интенсификации массопереноса антоцианов при производстве красных сухих вин», *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств*, № 1, с. 191–199, 2011.
- [5] В. Н. Хмелев, Д. Ю. Матыцин, Р. В. Барсуков, «Оптимизация энергообеспечения ультразвуковых технологических аппаратов», *Технологическая системотехника-2003: Материалы Второй международной электронной научно-технической конференции*, Тульский государственный университет, 2003.
- [6] П. П. Иванов, М. А. Халтурин, «Использование аппарата с вибрационной насадкой непрерывного действия для получения экстракта из замороженных плодов рябины красной», *Пищевая промышленность*, № 5, с. 38–41, 2015.
- [7] О. Ю. Олійник, «Віброчастотний метод контролю густини в умовах вібрації», *Метрологія та прилади контролю якості*, № 2 (43), с. 41–46, 2020.
- [8] A. Prokofiev, G. Makariyants, E. Shakhmatov, «Modeling of pipeline vibration under the pressure ripples in the working fluid», *17th International Congress on Sound and Vibration, ICSV*, pp. 1142-1149, 2010.
- [9] О. Ю. Олейник, Ю. К. Тараненко, «Математическая модель вибрационного сенсора динамической вязкости», *Український метрологічний журнал*, № 4, с. 34–39, 2017.
- [10] И. Е. Ишемгузин, «Демпфирование параметрических колебаний трубопровода», *Сетевое издание «Нефтегазовое дело»*, № 3, с. 84–93, 2011.
- [11] Д. Ф. Баляков, «Модели демпфирования механических колебаний», *Решетневские чтения*, т. 2, № 20, 2016.
- [12] Y. K. Taranenko, O.Y. Oliynyk, «Multifunctional vibration frequency transducer with cylindrical resonator», *Measurement Techniques*, vol. 61, no. 7, pp. 41–46, 2018.
- [13] А. Б. Прокофьев, «Расчет собственных частот и форм колебаний трубопроводов с помощью программного комплекса», *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, т. 1, №2, 1999.
- [14] В. А. Рукавишников, О. П. Ткаченко, «Численное и асимптотическое решение уравнений распространения гидроупругих колебаний в изогнутом трубопроводе», *Прикладная механика и техническая физика*, т. 41, № 6, с. 161–169, 2000.
- [15] O. Oliynyk, Yu. Taranenko, A. Shvachka, O. Chorna, «Development of auto-oscillating system of vibration frequency sensors with mechanical resonator», *Eastern-European journal of enterprise technologies*, vol. 85, pp. 56–60, 2017.
- [16] В. Л. Бидерман, *Теория механических колебаний*. Москва, Россия: Высшая школа, 1980.
- [17] И. М. Бабаков, *Теория колебаний*. Москва, Россия: Наука, 1968.
- [18] Ю. П. Жуков. *Вибрационные плотномеры*. Россия: Энергоатомиздат, 1991.
- Стаття надійшла: 20.02.2021.

References

- [1] T. Ikeda, T. Hirayama, N. Nakagawa, «Nonlinear Vibrations of a Structure Caused by Water Sloshing in a Cylindrical Tank (Special Issue on Nonlinear Dynamics)», *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, vol. 41, no. 3, pp. 639–651, 1998.
- [2] T. Ikeda, S. Murakami, «Nonlinear vibrations of elastic structures containing a cylindrical liquid tank under vertical excitation», *Journal of System Design and Dynamics*, vol. 2, no. 3, pp. 822-836, 2008.
- [3] A. Maekawa, M. Suzuki, K. Fujita, «Nonlinear Vibration Response of a Cylindrical Water Storage Tank Caused by Coupling Effect Between Beam-Type Vibration and Oval-Type Vibration: Part 1 – Vibration Experiment», in *ASME 2006 Pressure Vessels and Piping/ICPVT-11 Conference*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, pp. 329–338, 2006.
- [4] D. N. Samoylenko, «Obzor apparatov i tekhnologicheskikh metodov dlya intensifikatsii massopere-nosa antotsianov pri proizvodstve krasnykh sukhikh vin», *Nauchnyy zhurnal NIUITMO. Seriya: Protessy i apparaty pishchevykh proizvodstv*, № 1, s. 191–199, 2011.
- [5] V. N. Khmelev, D. YU. Matytsin, R. V. Barsukov, «Optimizatsiya energoobespecheniya ul'trazvukovykh tekhnologicheskikh apparatov», *Tekhnologicheskaya sistemotekhnika-2003: materialy Vtoroy mezhdunarodnoy elektronnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, Tul'skiy gosudarstvennyy universitet, 2003.

- [6] P. P. Ivanov, M. A. Khalturin, «Ispol'zovaniye apparata s vibratsionnoy nasadkoy nepreryvnogo deystviya dlya polucheniya ekstrakta iz zamorozhennykh plodov ryabiny krasnoy», *Pishchevaya promyshlennost'*, № 5, s. 38–41, 2015.
- [7] O. YU. Oliyuk, «Vibrochastotnyy metod kontrolyu gustini v umovakh vibratsii», *Metrologiya ta pri-ladi kontrolyu yakosti*, № 2 (43), s. 41–46, 2020.
- [8] A. Prokofiev, G. Makariyants, E. Shakhmatov, «Modeling of pipeline vibration under the pressure ripples in the working fluid», *17th International Congress on Sound and Vibration, ICSV*, pp. 1142–1149, 2010.
- [9] O. YU. Oleynik, YU. K. Taranenko, «Matematicheskaya model' vibratsionnogo sensora dinamich-eskoy vyazkosti», *Ukrain'skiy metrologichnyi zhurnal*, № 4, s. 34–39, 2017.
- [10] Ye. Ishemguzhin, «Dempfirovaniye parametricheskikh kolebaniy truboprovoda», *Setevoye izdaniye «Neftegazovoye delo»*, № 3, s. 84–93, 2011.
- [11] D. F. Balyakov, «Modeli dempfirovaniya mekhanicheskikh kolebaniy», *Reshetnevskiy chteniya*, t. 2, № 20, 2016.
- [12] Y. K. Taranenko, O.Y. Oliyuk, «Multifunctional vibration frequency transducer with cylindrical res-onator», *Measurement Techniques*, vol. 61, no. 7, pp. 41–46, 2018.
- [13] A. B. Prokof'yev, «Raschet sobstvennykh chastot i form kolebaniy truboprovodov s pomoshch'yu programmnoy kompleksa», *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, t. 1, № 2, 1999.
- [14] V. A. Rukavishnikov, O. P. Tkachenko, «Chislennoye i asimptotiche-skoye resheniye uravneniy rasprostraneniya gidrouprugikh kolebaniy v izognutom truboprovode», *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, t. 41, № 6, s. 161–169, 2000.
- [15] O. Oliyuk, Yu. Taranenko, A. Shvachka, O. Chorna, «Development of auto-oscillating system of vi-bration frequency sensors with mechanical resonator», *Eastern-European journal of enterprise tech-nologies*, vol. 85, pp. 56–60, 2017.
- [16] V. L. Biderman, *Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy*. Moskva, Rossija: Vysshaya shkola, 1980.
- [17] M. Babakov, *Teoriya kolebaniy*. Moskva, Rossija: Nauka, 1968.
- [18] YU. P. Zhukov, *Vibratsionnyye plotnomery*. Rossija: Energoatomizdat, 1991.

Відомості про авторів

Олійник Ольга Юрївна – кандидат технічних наук, доцент.

Тараненко Юрій Карлович – доктор технічних наук, професор.

О. Ю. Олейник¹, Ю. К. Тараненко²

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЗОНАТОРОВ ЕМКОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ВИЗУАЛЬНЫМИ СРЕДСТВАМИ PYTHON

1 – Колледж радиоэлектроники, Днепр

2 – Часное предприятие «Ликопак», Днепр

O. Yu. Oleinik¹, Yu. K. Taranenko²

CONSTRUCTION AND ANALYSIS OF COMPUTER MODELS OF RESONATORS OF CAPACITIES OF TECHNOLOGICAL DEVICES BY VISUAL MEANS OF PYTHON

1 – College of Radio Electronics, Dnipro

2 – Private Enterprise «Likopak», Dnipro

УДК 004.412:519.237.5

С. Б. Приходько, Н. В. Приходько, М. В. Ворона, І. О. Беловол

НЕЛІНІЙНА РЕГРЕСІЙНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РОЗМІРУ WEB-ЗАСТОСУНКІВ, ЩО СТВОРЮЮТЬСЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ФРЕЙМВОРКУ LARAVEL

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв

Анотація. Трьохфакторна нелінійна регресійна модель для оцінювання розміру Web-застосунків, що створюються з використанням фреймворку Laravel, побудована на основі нормалізації чотиризмірної негаусівської набору даних (фактичний розмір у тисячах строк коду; кількість класів; сума середньої кількості класів, на які впливає даний клас, і середньої кількості класів, з яких даний клас отримує ефекти; середня кількість методів) за допомогою багатозмірного перетворення Джонсона для сімейства S_B . Виконано порівняння побудованої моделі з лінійною регресійною моделлю і нелінійними регресійними моделями на основі десятичного логарифму і однозмірною перетворення Джонсона. Модель, що побудована, в порівнянні з іншими регресійними моделями, має менше значення середньої величини відносної похибки та менші ширини інтервалу передбачення нелінійної регресії.

Ключові слова: нелінійна регресійна модель, інтервал передбачення, оцінювання розміру, web-застосунок, нормалізуюче перетворення, негаусівські дані.

Аннотация. Трёхфакторная нелинейная регрессионная модель для оценки размера Web-приложений, создаваемых с использованием фреймворка Laravel, построена на основе нормализации четырехмерного негауссовского набора данных (фактический размер в тысячах строк кода; количество классов; сумма среднего количества классов, на которые влияет данный класс, и среднего количества классов, из которых данный класс получает эффекты; среднее количество методов) с помощью многомерного преобразования Джонсона для семейства S_B . Выполнено сравнение построенной модели с линейной регрессионной моделью и нелинейными регрессионными моделями на основе десятичного логарифма и одномерного преобразования Джонсона. Построенная модель, по сравнению с другими регрессионными моделями, имеет меньшее значение средней величины относительной ошибки и меньшие ширины интервала предсказания нелинейной регрессии.

Ключевые слова: нелинейная регрессионная модель, интервал предсказания, оценка размера, web-приложение, нормализующее преобразование, негауссовские данные.

Abstract. The three-factor nonlinear regression model to estimate the size of development of web applications created using the Laravel framework, is constructed on the basis of normalization of the four-dimensional non-Gaussian data set (actual size in KLOC; number of classes, sum of average afferent coupling and average efferent coupling; average number of methods) by the Johnson multivariate transformation for S_B family. Comparison of the constructed model with the linear regression model and nonlinear regression models based on the decimal logarithm and the Johnson univariate transformation is performed. The constructed model, in comparison with other regression models, has a smaller value of the mean magnitude of the relative error and smaller widths of the prediction intervals of nonlinear regression.

Key words: nonlinear regression model, prediction interval, size estimation, web application, normalizing transformation, non-Gaussian data.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2021-50-1-115-121>.

Вступ

Задача оцінювання розміру Web-застосунків як і іншого програмного забезпечення (ПЗ) на ранній стадії розробки є важливою, оскільки ця інформація використовується для прогнозування трудомісткості створення ПЗ за допомогою такої відомої моделі як СОСОМО II [1]. У свою чергу зараз для створення Web-застосунків широко використовують фреймворки, серед яких широкою популярністю користується Laravel (<https://laravel.com/>), – безкоштовний PHP фреймворк з відкритим вихідним кодом, створений Тейлором Отвеллом (Taylor Otwell) для розробки Web-застосунків за проектним шаблоном MVC (Model-View-Controller), що зазвичай використовується для розробки користувальницького інтерфейсу, який розділяє відповідну логіку програми на три взаємопов'язані елементи. Це потребує побудови відповідних моделей для оцінювання розміру Web-застосунків, що створюються за допомогою фреймворку Laravel.

Актуальність

Хоча розробка Web-застосунків має свої корені в більш традиційній розробці ПЗ [2], однак, однією з критичних різниць є те, що відповідні програмні застосунки часто створюються із використанням певних фреймворків. А існуючі моделі для оцінювання розміру PHP застосунків це не враховують.

На теперішній час відомо лінійне регресійне рівняння для оцінювання кількості строк коду інформаційних PHP-систем з відкритим кодом в залежності від трьох метрик концептуальної моделі даних у вигляді діаграми класів [3, 4]. Але, як відомо, при побудові лінійних регресійних моделей необхідно виконання певних умов, зокрема, похибка повинна бути розподілена за нормальним законом, що має місце лише в поодиноких випадках. А це веде до необхідності побудови нелінійних регресійних моделей для оцінювання кількості строк ПЗ та застосування відповідних методів множинного нелінійного регресійного аналізу [5]. Тому для оцінювання розміру інформаційних PHP-систем з відкритим кодом в [5] була запропонована нелінійна регресійна модель, яка побудована за допомогою множинного нелінійного регресійного аналізу із застосуванням чотиризмірною перетворення Джонсона сім'ї S_B на основі трьох метрик діаграми класів, що і в [3, 4]: загальна кількість класів, загальна кількість зв'язків та середня кількість атрибутів на клас. Натомість, як було зазначено в [6], для PHP-застосунків з відкритим кодом, що не є інформаційними системами, наприклад, таких як різноманітні фреймворки та конвертори, регресійні

моделі можуть залежати в тому числі від інших метрик. В [5, 6] показано, що необхідно використовувати багатовимірні нормалізуючі перетворення для побудови нелінійних регресійних моделей для оцінювання розміру PHP-застосунків тому, що застосування одновимірних нормалізуючих перетворень для побудови відповідних моделей нелінійної регресії приводить до гірших результатів. Тому побудова нелінійної регресійної моделі для оцінювання розміру Web-застосунків, що створюються з використанням фреймворку Laravel, із застосуванням багатовимірних перетворень є актуальним завданням, що дозволить підвищити достовірність відповідного оцінювання.

Мета

Мета статті – побудова трьохфакторної нелінійної регресійної моделі для оцінювання розміру Web-застосунків, що створюються з використанням фреймворку Laravel, в залежності від кількості класів; суми середньої кількості класів, на які впливає даний клас (Average Afferent Coupling), і середньої кількості класів, з яких даний клас отримує ефекти (Average Efferent Coupling), та середньої кількості методів на основі чотирьохвимірною нормалізуючого перетворення Джонсона, що дозволить підвищити достовірність оцінювання залежної змінної нелінійної регресії у порівнянні з іншими моделями, зокрема, з тими, що створені із використанням одновимірних нормалізуючих перетворень.

Задачі

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі.

1. Зібрати та нормалізувати дані Web-застосунків, що створюються на основі фреймворку Laravel.
2. Побудувати лінійну регресійну модель для нормалізованих даних.
3. Побудувати нелінійну регресійну модель та границі інтервалу передбачення нелінійної регресії для оцінювання розміру Web-застосунків, що створюються з використанням фреймворку Laravel.

Розв'язання задач

Враховуючи те, що Laravel є PHP фреймворком, дані з метрик Web-застосунків, які розміщені на сайті GitHub (<https://github.com>), були отримані за допомогою інструменту PhpMetrics (<https://phpmetrics.org/>). Як і в [6], ми брали такі метрики: розмір Web-застосунку Y у тисячах рядків коду; кількість класів X_1 ; середню кількість методів X_2 та суму середньої кількості класів, на які впливає даний клас, і середньої кількості класів, з яких даний клас отримує ефекти, X_3 . Значення зазначених метрик для 30 Web-застосунків надані в табл. 1. Також в табл. 1 наведені квадрати відстані Махаланобіса MD^2 .

Таблиця 1 – Вибірка даних та значення квадрату відстані Махаланобіса MD^2

№	Y	X_1	X_2	X_3	MD^2	№	Y	X_1	X_2	X_3	MD^2
1	20,816	171	9,053	2,485	3,76	16	4,069	107	1,879	2,607	1,05
2	9,482	180	3,100	4,644	3,54	17	7,241	194	3,108	3,010	1,71
3	57,454	1000	4,039	4,612	24,18	18	0,515	21	1,238	1,714	3,56
4	19,481	148	9,939	2,466	4,69	19	1,771	57	2,175	2,877	0,70
5	3,532	75	2,773	3,173	0,50	20	16,817	185	11,000	5,119	11,79
6	17,888	98	13,847	1,500	15,52	21	1,072	40	1,925	2,500	1,14
7	3,825	81	2,728	2,926	0,42	22	10,774	184	3,065	4,038	1,21
8	22,438	308	5,948	4,127	1,13	23	17,743	313	3,994	4,550	2,33
9	1,881	44	3,000	2,773	0,56	24	1,044	42	1,905	2,952	0,93
10	2,364	44	3,114	3,091	0,62	25	0,805	29	1,552	2,000	2,41
11	67,055	727	4,455	4,344	21,63	26	8,618	215	3,019	3,563	1,40
12	9,305	146	3,466	3,158	0,08	27	33,591	365	6,312	4,014	3,13
13	3,364	97	2,299	3,124	0,57	28	28,361	303	6,535	3,743	1,97
14	0,47	23	0,913	1,478	4,78	29	5,732	88	3,500	4,068	2,35
15	3,391	76	2,250	3,500	1,11	30	8,615	210	3,043	3,490	1,23

Відповідно з [7] розподіл даних з табл. 2 є негаусівським тому, що для трьох застосунків (3, 6 та 11) значення MD^2 , які відповідно дорівнюють 24,18, 15,52 та 21,63, є більшими ніж величина квантіля розподілу χ^2 , що становить 14,86 для рівня значущості 0,005 та чотирьох ступенів свободи. Про негаусівський розподіл даних з табл. 2 також свідчить оцінка багатовимірною ексцесу, що дорівнює 52,09. Це значення більш ніж вдвічі перевищує теоретичне, що у нашому випадку дорівнює 24 згідно [8].

Метрики (майбутні фактори) X_1 , X_2 , та X_3 були перевірені на наявність мультиколінеарності, яку ми визначали за коефіцієнтами впливу дисперсії (VIFs) серед майбутніх факторів в моделі множинної лінійної регресії. VIFs – це діагональні елементи оберненої коваріаційної матриці k -факторів [9]. Значення VIFs більше за 10 часто сприймаються як сигнал, що дані мають проблеми з мультиколінеарністю. У ра-

зі, якщо значення VIFs знаходяться у межах від 1 до 5, то мультиколінеарності немає. Значення VIFs для X_1 , X_2 , та X_3 дорівнюють 1,56, 1,03 та 1,52 відповідно, що вказує на відсутність мультиколінеарності.

Спочатку за даними табл. 1 було побудовано лінійну регресійну модель у вигляді

$$Y = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 X_1 + \hat{b}_2 X_2 + \hat{b}_3 X_3 + \varepsilon, \quad (1)$$

де оцінки параметрів $\hat{b}_0 = -1,73631$, $\hat{b}_1 = 0,07090$, $\hat{b}_2 = 1,27302$, $\hat{b}_3 = -1,15451$ визначалися за методом найменших квадратів. Сума квадратів відхилень SSR для моделі (1) склала 572,4. Причому в (1) ε повинна бути випадковою величиною з розподілом Гаусу, $\varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$, з оцінкою дисперсії $\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = 19,74$. Нульова гіпотеза про нормальність розподілу ε моделі (1) була перевірена за критерієм Пірсона. Ця гіпотеза була відкинута для рівня значимості 0,05. Те, що в (1) розподіл ε не є гаусівським вказує на відсутність теоретичного обґрунтування застосування лінійної моделі (1) для даних з табл. 1 та на необхідність побудови нелінійної регресійної моделі.

Першу трьохфакторну нелінійну регресійну модель ми побудували із використанням одновимірною нормалізуючого перетворення у вигляді десяткового логарифму. Для цього негаусівські дані з табл. 1 ми нормалізуємо за перетворенням у формі десяткового логарифму. Далі за нормалізованими даними будемо лінійну регресійну модель [5]

$$Z_Y = \hat{Z}_Y + \varepsilon = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 Z_1 + \hat{b}_2 Z_2 + \hat{b}_3 Z_3 + \varepsilon, \quad (2)$$

де параметри моделі (2) оцінювалися за методом найменших квадратів та їх оцінки є такими: $\hat{b}_0 = -1,74968$, $\hat{b}_1 = 1,07738$, $\hat{b}_2 = 0,76106$, $\hat{b}_3 = -0,19497$.

Далі за (2) та перетворенням у вигляді десяткового логарифму будемо нелінійну регресійну модель

$$Y = 10^{\varepsilon + \hat{b}_0} X_1^{\hat{b}_1} X_2^{\hat{b}_2} X_3^{\hat{b}_3}. \quad (3)$$

Моделю (3) була перевірена за множинним коефіцієнтом детермінації R^2 , середньою величиною відносною помилки MMRE і відсотком прогнозованих результатів, для яких величини відносною помилки MRE менші за 0,25, PRED(0,25). Ці показники використовуються і в інженерії програмного забезпечення [10]. Допустимі значення R^2 , MMRE і PRED(0,25) складають не менше 0,7, не більше 0,25 і не менше 0,75 відповідно. Для моделі (3) значення R^2 , MMRE і PRED(0,25), які дорівнюють відповідно 0,946, 0,135 і 0,900, є задовільними і кращими за значення цих показників для моделі (1), які дорівнюють відповідно 0,926, 0,382 і 0,600. Сума квадратів відхилень SSR для моделі (3) складає 404,9, що на 41 % менше у порівнянні з відповідною сумою для моделі (1). Як і в [5, 6], для нормалізації даних з табл. 1 ми використовуємо чотирьохвимірне перетворення Джонсона для сімейства S_B . Параметри одновимірного та чотирьохвимірного перетворень Джонсона для сімейства S_B оцінювалися методом максимальної правдоподібності. Їх оцінки для даних з табл. 1 наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Оцінки параметрів чотирьохвимірного перетворення Джонсона

Індекс j	чотиревимірне перетворення				одновимірне перетворення			
	$\hat{\gamma}_j$	$\hat{\eta}_j$	$\hat{\phi}_j$	$\hat{\lambda}_j$	$\hat{\gamma}_j$	$\hat{\eta}_j$	$\hat{\phi}_j$	$\hat{\lambda}_j$
Y	1,1888	0,5039	0,3700	71,3404	0,546537	0,576204	13,72079	97,44376
1	1,9527	0,7537	13,7682	1465,8093	0,206176	0,729702	4,43521	40,16744
2	9,5183	1,2578	0,5806	5120,9035	0,311707	0,447028	5,90000	39,27868
3	0,1155	1,4820	0,3204	6,0752	0,815336	0,533939	5,38100	28,74404

Для виявлення викидів у даних з табл. 1, як і в [6], використовувався метод, оснований на багатовимірних нормалізуючих перетвореннях і MD^2 . Було визначено, що є один викид в цих даних для застосування 11 для рівня значимості 0,005 та чотирьохвимірного перетворення Джонсона для сімейства S_B . Рівень значимості 0,005 обирався за рекомендаціями [11]. Також на те, що дані з рядка 11 є багатовимірним викидом вказує вихід значення Y за інтервали передбачення нелінійних регресій, які побудовані на основі перетворень Джонсона (одновимірного та чотирьохвимірного) та наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Межі інтервалів передбачення нелінійних регресій

№	Y	одновимірні				чотирьохвимірне Джонсона					
		Log10		Джонсона		ітерація 1		ітерація 2		ітерація 3	
		LB	UB	LB	UB	LB	UB	LB	UB	LB	UB
1	20,816	13,878	29,650	9,529	38,841	9,780	37,389	14,748	27,358	15,498	27,077
2	9,482	5,807	12,137	3,917	20,693	4,076	19,805	5,754	12,294	5,957	11,864
3	57,454	43,791	97,155	45,421	67,406	48,504	67,715	53,217	59,295	54,032	59,539
4	19,481	12,728	27,383	8,432	36,591	8,527	34,743	13,624	25,874	14,283	25,511
5	3,532	2,256	4,637	1,590	8,151	1,562	7,276	2,308	4,834	2,411	4,714
6	17,888	10,991	26,230	6,642	36,296	6,391	32,778	11,954	25,043	12,703	24,761
7	3,825	2,465	5,044	1,769	9,149	1,753	8,245	2,523	5,297	2,649	5,194
8	22,438	17,485	36,210	12,975	43,733	13,895	43,307	18,099	31,083	18,839	30,723
9	1,881	1,374	2,866	0,918	4,175	0,904	3,718	1,399	2,821	1,450	2,740
10	2,364	1,376	2,904	0,907	4,160	0,887	3,685	1,403	2,850	1,449	2,754
11	67,055	34,345	74,066	31,402	61,741	34,816	62,450	-	-	-	-
12	9,305	5,501	11,241	4,121	20,398	4,246	19,290	5,818	12,029	6,149	11,876
13	3,364	2,591	5,316	1,906	9,998	1,909	9,093	2,583	5,444	2,717	5,348
14	0,47	0,302	0,674	0,403	0,658	0,409	0,675	0,431	0,533	0,434	0,527
15	3,391	1,907	3,952	1,367	6,936	1,339	6,163	1,898	3,948	1,975	3,838
16	4,069	2,534	5,297	1,923	10,549	1,955	9,745	2,437	5,220	2,590	5,177
17	7,241	6,896	14,280	5,454	25,874	5,805	25,217	7,285	14,890	-	-
18	0,515	0,342	0,735	0,397	0,588	0,414	0,681	0,451	0,577	0,457	0,574
19	1,771	1,420	2,928	1,037	4,851	1,019	4,302	1,430	2,868	1,489	2,802
20	16,817	14,810	33,409	6,973	37,376	7,670	35,622	14,164	27,910	14,119	26,491
21	1,072	0,905	1,878	0,696	2,664	0,692	2,407	0,930	1,715	0,962	1,679
22	10,774	6,099	12,576	4,510	22,174	4,689	21,210	6,263	12,968	6,572	12,706
23	17,743	12,866	26,745	9,646	37,762	10,518	37,658	13,403	24,985	13,962	24,550
24	1,044	0,913	1,907	0,703	2,731	0,695	2,441	0,941	1,747	0,970	1,700
25	0,805	0,563	1,186	0,501	1,346	0,510	1,304	0,620	0,986	0,636	0,972
26	8,618	7,304	15,069	5,734	26,634	6,111	25,953	7,645	15,485	8,100	15,347
27	33,591	22,052	45,809	16,696	49,113	18,077	49,023	22,414	36,098	23,335	35,869
28	28,361	18,804	38,962	14,032	45,461	15,018	45,008	19,400	32,662	20,248	32,407
29	5,732	3,010	6,346	1,979	10,766	1,917	9,623	3,093	6,686	3,195	6,423
30	8,615	7,195	14,836	5,647	26,330	6,011	25,629	7,542	15,295	7,996	15,166

В подальшому, як і в [5, 6], для побудови нелінійної регресійної моделі було застосовано метод покращення нелінійних регресійних моделей на основі нормалізуючих перетворень із застосуванням MD^2 та інтервалів передбачення. Границі інтервалів передбачення нелінійних регресій ми визначали за [5].

Другу трьохфакторну нелінійну регресійну модель ми побудували із використанням чотирьохвимірного нормалізуючого перетворення Джонсона для сімейства S_B . Для цього негаусівські дані з табл. 1 ми нормалізували за зазначеним перетворенням з оцінками параметрів, що наведені в табл. 2. Далі за нормалізованими даними ми побудували лінійну регресійну модель (2), оцінки параметрів якої за методом найменших квадратів є такими: $\hat{b}_0 = 0$, $\hat{b}_1 = 0,84567$, $\hat{b}_2 = 0,254028$, $\hat{b}_3 = -0,079221$. Далі за (2) і чотирьохвимірним перетворенням Джонсона для сімейства S_B ми побудували нелінійну регресійну модель

$$Y = \hat{\varphi}_Y + \hat{\lambda}_Y / \left[1 + e^{-(\hat{Z}_Y + \varepsilon - \hat{\gamma}_Y) / \hat{\eta}_Y} \right], \quad (4)$$

де $Z_j = \gamma_j + \eta_j \ln \frac{X_j - \varphi_j}{\varphi_j + \lambda_j - X_j}$, $\varphi_j < X_j < \varphi_j + \lambda_j$, $j = 1, 2, 3$.

Як ми вказували раніше, для моделі (4) із зазначеними оцінками параметрів дані з рядка 11 табл. 1 є багатовимірним викидом. Тому ми зробили другу ітерацію для побудови моделі (4) за 29 точками даних табл. 1 без рядка 11. І знову ми отримали один багатовимірний викид – це рядок 17 (табл. 3). Далі ми зробили третю ітерацію для побудови моделі (4) за 28 точками даних табл. 1 без рядків 11 і 17, після якої викиди відсутні. Остаточоно ми побудували трьохфакторну нелінійну регресійну модель (4) з такими оці-

нками параметрів: $\hat{\gamma}_Y = 1,25260$, $\hat{\gamma}_1 = 1,69294$, $\hat{\gamma}_2 = 9,18601$, $\hat{\gamma}_3 = 0,03118$, $\hat{\eta}_Y = 0,52852$, $\hat{\eta}_1 = 0,710667$, $\hat{\eta}_2 = 1,19171$, $\hat{\eta}_3 = 1,09429$, $\hat{\phi}_Y = 0,370$, $\hat{\phi}_1 = 14,2224$, $\hat{\phi}_2 = 0,619882$, $\hat{\phi}_3 = 0,822804$, $\hat{\lambda}_Y = 63,0799$, $\hat{\lambda}_1 = 1121,647$, $\hat{\lambda}_2 = 5699,439$, $\hat{\lambda}_3 = 4,85872$, $\hat{b}_0 = 0$, $\hat{b}_1 = 0,772545$, $\hat{b}_2 = 0,360155$, $\hat{b}_3 = -0,063656$. В (2) ε є гаусівською випадковою величиною з нульовим математичним сподіванням і оцінкою дисперсії $\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = 0,00881$. Для моделі (4), що була побудована за 28 точками даних з табл. 1 на основі чотирьохвимірного нормалізуючого перетворення Джонсона для сімейства S_B , значення R^2 , MMRE і PRED(0,25), які дорівнюють відповідно 0,993, 0,107 і 0,929, є кращими за значення цих показників для моделі (3) відповідно на 5, 26 і 3 %. Сума SSR для моделі (4) складає 55,7, що понад 7 разів менше у порівнянні з сумою SSR для моделі (3).

Ще одну трьохфакторну нелінійну регресійну модель (4) ми побудували із використанням одновимірного нормалізуючого перетворення Джонсона для сімейства S_B . Для цього негаусівські дані з табл. 1 ми нормалізували за цим перетворенням з оцінками параметрів, що наведені в табл. 2. Для моделі (4), що була побудована на основі одновимірного перетворення Джонсона для сімейства S_B , значення R^2 , MMRE, PRED(0,25) і SSR, які дорівнюють відповідно 0,966, 0,150, 0,833 і 426,0 є гіршими за значення цих показників для нелінійної регресійної моделі (4), що була побудована на основі чотирьохвимірного перетворення Джонсона для сімейства S_B , відповідно на 3, 28, 11 і 87 %.

Перевага моделі (4) з параметрами для чотирьохвимірного перетворення Джонсона для сімейства S_B також полягає в меншій ширині інтервалу передбачення. Це підтверджують визначені нижні (LB) і верхні (UB) межі інтервалів передбачення нелінійних регресій для рівня значимості 0,05 (табл. 3).

Висновки

1. Удосконалено трьохфакторну нелінійну регресійну модель для оцінювання розміру Web-застосунків, що створюються з використанням фреймворку Laravel, на основі чотирьохвимірного перетворення Джонсона для сімейства S_B . Ця модель в порівнянні з іншими регресійними моделями має більший множинний коефіцієнт детермінації, більший відсоток прогнозованих результатів, менше значення середньої величини відносної похибки та менші ширини інтервалу передбачення.

2. При побудові моделей і інтервалів передбачення нелінійних регресій для багатовимірних негаусівських даних з метрик Web-застосунків, що створюються з використанням фреймворку Laravel, слід використовувати багатовимірні нормалізуючі перетворення та враховувати наявність викидів.

3. В подальшому планується побудова нелінійних регресійних моделей для оцінювання розміру Web застосунків, що розробляються з використанням інших PHP фреймворків, наприклад, CakePHP.

Список літератури

- [1] B. W. Boehm, C. Abts, A. W. Brown, S. Chulani, B. K. Clark, E. Horowitz, R. Madachy, D. J. Reifer, and B. Steece, *Software Cost Estimation with COCOMO II*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2000.
- [2] H. Zhu, *Software Design Methodology: From Principles to Architectural Styles*. 1st Edition. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2005.
- [3] H. B. K. Tan, Y. Zhao, and H. Zhang, «Estimating LOC for information systems from their conceptual data models», in *Proc. of the 28th International Conference on Software Engineering (ICSE '06)*, Shanghai, China, pp. 321-330, 2006. DOI: doi.org/10.1145/1134285.1134331.
- [4] H. B. K. Tan, Y. Zhao, and H. Zhang, «Conceptual data model-based software size estimation for information systems», *Transactions on Software Engineering and Methodology*, vol. 19, issue 2, article No. 4, October, 2009. DOI: https://doi.org/10.1145/1571629.1571630.
- [5] N. V. Prykhodko, and S. B. Prykhodko, «Constructing the non-linear regression models on the basis of multivariate normalizing transformations», *Electronic modeling*, vol. 40, No. 6, pp. 101-110, 2018.
- [6] С. Б. Приходько, Н. В. Приходько, Т. А. Фаріонова, М. В. Ворона, «Трьохфакторна нелінійна регресійна модель для оцінювання розміру Php-застосунків з відкритим кодом», *Науковий журнал «Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки»*, Том 31 (70), № 1, с. 124-131, 2020. DOI: doi.org/10.32838/2663-5941/2020.1-1/23.
- [7] Olkin, and A. R. Sampson, «Multivariate Analysis: Overview», in *International encyclopedia of social & behavioral sciences* / N. J. Smelser, P. B. Baltes (eds.) 1st edn. Elsevier, Pergamon, 2001, p. 10240-10247.
- [8] K. V. Mardia, «Measures of multivariate skewness and kurtosis with applications», *Biometrika*, Vol. 57, 1970, p. 519-530. doi.org/10.1093/biomet/57.3.519.
- [9] S. Chatterjee, and B. Price, *Regression analysis by example*. New York USA: John Wiley & Son, 2012.

- [10] T. Foss, E. Stensrud, B. Kitchenham, and I. Myrtveit, «A simulation study of the model evaluation criterion MMRE», *IEEE Transactions on software engineering*, 11(29), pp. 985–995, 2003.
- [11] R. A. Johnson, and D. W. Wichern, *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Pearson Prentice Hall, 2007.

Стаття надійшла: 02.01.2021.

References

- [1] B. W. Boehm, C. Abts, A. W. Brown, S. Chulani, B. K. Clark, E. Horowitz, R. Madachy, D. J. Reifer, and B. Steece, *Software Cost Estimation with COCOMO II*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2000.
- [2] H. Zhu, *Software Design Methodology: From Principles to Architectural Styles*. 1st Edition. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2005.
- [3] H. B. K. Tan, Y. Zhao, and H. Zhang, «Estimating LOC for information systems from their conceptual data models», in *Proc. of the 28th International Conference on Software Engineering (ICSE '06)*, Shanghai, China, pp. 321-330, 2006. DOI: doi.org/10.1145/1134285.1134331.
- [4] H. B. K. Tan, Y. Zhao, and H. Zhang, «Conceptual data model-based software size estimation for information systems», *Transactions on Software Engineering and Methodology*, vol. 19, issue 2, article No. 4, October, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1145/1571629.1571630>.
- [5] N. V. Prykhodko, and S. B. Prykhodko, «Constructing the non-linear regression models on the basis of multivariate normalizing transformations», *Electronic modeling*, vol. 40, No. 6, pp. 101–110, 2018.
- [6] S. B. Prykhodko, N. V. Prykhodko, T. A. Farionova, M. V. Vorona, «Trokhfaktorna neliniina rehresiina model dlia otsiniuvannia rozmiru Php-zastosunkiv z vidkrytim kodom», *Naukovyi zhurnal «Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Seriia: Tekhnichni nauky»*, Tom 31 (70), № 1, s. 124–131, 2020. DOI: doi.org/10.32838/2663-5941/2020.1-1/23.
- [7] Olkin, and A. R. Sampson, «Multivariate Analysis: Overview», in *International encyclopedia of social & behavioral sciences / N. J. Smelser, P. B. Baltes (eds.) 1st edn*. Elsevier, Pergamon, 2001, p. 10240–10247.
- [8] K. V. Mardia, «Measures of multivariate skewness and kurtosis with applications», *Biometrika*, Vol. 57, 1970, p. 519–530. doi.org/10.1093/biomet/57.3.519.
- [9] S. Chatterjee, and B. Price, *Regression analysis by example*. New York USA: John Wiley & Son, 2012.
- [10] T. Foss, E. Stensrud, B. Kitchenham, and I. Myrtveit, «A simulation study of the model evaluation criterion MMRE», *IEEE Transactions on software engineering*, 11(29), pp. 985–995, 2003.
- [11] R. A. Johnson, and D. W. Wichern, *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Pearson Prentice Hall, 2007.

Відомості про авторів

Приходько Сергій Борисович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем.

Приходько Наталія Василівна – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри фінансів.

Ворона Михайло Владиславович – аспірант кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем.

Беловол Ігор Олександрович – студент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем

С. Б. Приходько, Н. В. Приходько, М. В. Ворона, И. А. Беловол

МОДЕЛЬ НЕЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАЗМЕРА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ, СОЗДАВАЕМЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФРЭЙМВОРКА LARAVEL

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев

S. B. Prykhodko, N. V. Prykhodko, M. V. Vorona, I. A. Belovol

**NONLINEAR REGRESSION MODEL FOR ESTIMATING
THE SIZE OF WEB-APPLICATIONS CREATED USING THE
LARAVEL FRAMEWORK**

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolayiv

ДО ВІДОМА АВТОРІВ

Найновіші правила оформлення і подання статей знаходяться на сайті журналу
<http://itce.vntu.edu.ua/>