МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ"

Серія: Інформатика та моделювання

№ 1 – 2 (9 – 10) 2023

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

Харків
НТУ "ХПІ", 2023

Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2023. – № 1 – 2 (9 – 10). – 151 с.

Державне видання
Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації України
КВ № 23774-13614Р від 14 лютого 2019 року

Збірник виходить українською, російською та англійською мовами.

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

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

Головний редактор
Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ "ХПІ", Україна
Заст. головного редактора
Марченко А. П., д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ", Україна
Секретар
Горбунов К. О., доц., НТУ "ХПІ", Україна

Редакційна колегія серії:
Відповідальний редактор: Дмитрієнко В. Д., д-р техн. наук, проф.
Відповідальний секретар: Леонов С. Ю., д-р техн. наук, проф.
Члени редколегії:
О.П. Арсеньева, д-р техн. наук, проф.;
О.Ю. Заковоротний, д-р техн. наук, проф.;
Г.А. Кучук, д-р техн. наук, проф.;
Р.П. Мигущенко, д-р техн. наук, проф.;
А.І. Поворознюк, д-р техн. наук, проф.;
О.А. Серков, д-р техн. наук, проф.;
Г.Є. Філатова, д-р техн. наук, проф.;
Х. Гамзаєв, д-р техн. наук, проф. (Азербайджан);
Б.А. Худаяров, д-р техн. наук, проф. (Узбекистан);
I. Zanevsky, PhD, prof. (Polska);
D. Sakara, PhD, prof. (Switzerland);
Jiri Jaromir Klemes, Dr., Prof (Czeh Republic);
Issa Shehabat, Dr., Assistant Professor (Jordan);
David J. Kukulka, PhD (USA);
Badur Tchunashvili, Dr., Prof (Georgia);
Javad Khamisabadi, Dr. (Iran);
М.К. Усаров, д-р фіз.-мат. наук, с.н.с., (Узбекистан);
Ш.У. Юлдашев, д-р техн. наук, проф. (Узбекистан).

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ "ХПІ"
Протокол № 7 від 09.07.2023 р.

ISSN 2079-0031 (Print)
ISSN 2411-0558 (Online)

© Національний технічний університет "ХПІ", 2023

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

у міжнародних наукометричних базах, репозитаріях та пошукових системах

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

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

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

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

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

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

Електронна адреса сайта Вісника НТУ "ХПІ" серії "Інформатика та моделювання" www.pim.net.ua

ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

Математичні методи та моделі

Вісник Національного технічного університету "ХПІ", 2023, № 1–2 (9–10)
ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

УДК 004.272.2:519.63 DOI: 10.20998/2411-0558.2023.01.01

О. А. ДМИТРІЄВА[1,2], д-р техн. наук, проф., [1]НТУУ "КПІ ім. І. Сікорського", Київ, Україна, [2]Інститут моделювання водно-екологічних систем університету Штутгарта, Німеччина

МЕТОДИ КОМПОЗИЦІЇ РІЗНИЦЕВИХ АПРОКСИМАЦІЙ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

У роботі досліджено методи композиції різницевих апроксимацій для формування одно- і багатокрокових паралельних різницевих схем заданого порядку, орієнтованих на чисельний розв’язок завдання Коші як для звичайних диференційних рівнянь, так і для еволюційних рівнянь з частинними похідними. Пропоновані дискретні апроксимації дозволяють варіювати порядок похибки, відходячи від максимально можливого на фіксованій множині вузлів, але забезпечуючи при цьому абсолютну або A-α стійкість чисельних розв’язань. Дослідження властивостей запропонованих матриць переходів, що пов’язують опорні і розрахункові точки, дозволяють визначити характер стійкості сформованих різницевих схем за початковими даними і за правими частинами. Автоматичне генерування стійких різницевих схем дозволяє враховувати топологію наявного процесорного поля, отже, з максимальною ефективністю використовувати наявний обчислювальний ресурс. Іл.: 10. Бібліогр.: 18 назв.

Ключові слова: різницеві апроксимації; моделювання динамічних процесів; завдання Коші; блокові методи; порядок похибки; абсолютна стійкість; A-α стійкість.

Вступ. Сучасні фізичні проблеми призводять до математичних моделей, які не мають передових методів їх вирішення [1]. Такі моделі, зазвичай, носять еволюційний характері й включають диференційні рівняння, як звичайні, так і з частинними похідними [2]. Причому досить часто динамічні процеси, за наявності у кожного з них своїх фізичних особливостей, описуються одними і тими ж рівняннями або їх системами [2, 3]. Одна й та сама математична модель може бути орієнтована на розв’язання різних фізичних завдань. З іншого боку, математична модель може багаторазово трансформуватися протягом чисельних експериментів, і ця перешкода потребує удосконалення побудованого алгоритму [2 – 4]. Тому стає надзвичайно важливо створювати обчислювальні алгоритми, використання яких дозволяє ефективно проводити чисельні експерименти. Це один із сучасних напрямів у математичному моделюванні, що сприяє розробці нових чисельних методів. Не можна не згадати ще й про такий аспект, як ефективна організація та реалізація обчислень. Основною особливістю отриманих у результаті дискретизації систем різницевих рівнянь, зазвичай, є висока розмірність. Тому, крім теоретичної

© О.А. Дмітрієва, 2023

ефективності побудованих методів, необхідно враховувати ефективність обчислювальну, пов'язану з можливістю розпаралелювання побудованих алгоритмів, кількістю задіяних процесорів, особливостями топологічних характеристик процесорних полів. Саме тому в статті розглядаються питання розробки та обґрунтування стійких різницевих схем, які забезпечують заданий порядок апроксимації і орієнтовані на ефективну реалізацію у паралельних обчислювальних середовищах.

Аналіз стану питання. Процес побудови нових чисельних алгоритмів, як правило, базується на реалізації двох найбільш поширених послідовних етапів [2], які полягають у композиції дискретних (різницевих) апроксимацій рівнянь та перевірці апріорних якісних характеристик цих апроксимацій, в основному таких, як похибки апроксимації, стійкість, збіжність, та точність отриманих різницевих схем. Проблеми, пов'язані з реалізацією першого етапу, докладно розглянуті та обґрунтовані в роботах [5 – 7], де наведені різницеві схеми одно- та багатокрокових блокових методів [5], орієнтованих на розв’язання завдання Коші для звичайних диференційних рівнянь. У роботі [6] запропоновані різницеві схеми методів типу Біккарта, які забезпечують, до того ж, можливість керування кроком інтегрування. Також у [7] розглянуто питання використання колокаційних різницевих схем при чисельному розв'язанні еволюційних рівнянь із частинними похідними.

Але слід зазначити, що перспективна різницева схема апроксимації вихідного рівняння не гарантує отримання якісних наближень. Значною проблемою може стати слабка стійкість та/або незначний порядок апроксимації композиційної схеми. Питання, пов'язані з аналізом точності і стійкості отриманої різницевої схеми, мають не тільки принципове теоретичне значення, але і є ключовими факторами в отриманні ефективних чисельних наближень, ґрунтуючись на зниженні похибки апроксимації. Аналіз стійкості вимагає дослідження апріорних оцінок розв’язання різницевого завдання у світлі наявних вхідних даних, тобто, необхідно проведення аналізу стійкості за початковими даними та за правою частиною [2, 8]. Основним результатом проведених у цьому напрямку досліджень є виділення підмножини стійких (абсолютно або A-α) різницевих схем первинного сімейства.

Також далеко не тривіальним завданням є оцінювання помилок апроксимації. Усередині знайденої підмножини стійких схем визначаються схеми із заданою точністю, обсягом обчислень та іншими бажаними властивостями та параметрами [2, 6 – 8]. До основних завдань, які виникають на цьому етапі, слід віднести визначення досяжного порядку точності різницевої схеми для різних класів завдань, розробку

схем для вирішення широкого класу завдань з певною гарантованою точністю, побудову схем підвищеної точності у вужчих класах задач, формулювання загальних принципів побудови стійких різницевих схем із мінімальними показниками трудомісткості реалізації.

Аналіз основних досягнень і літератури. В останні роки з'явилася велика кількість робіт, присвячених оцінюванню порядків похибки та дослідження стійкості таких схем [9 – 13]. Багато робіт засновані на використанні спектральних підходів і включають певні обмеження в структурах операторів різниці, пов'язані з лінійністю [9], мірністю і типами рівнянь [10 – 11], розміщенням точок коллокації [12]. Так, серед перерахованих, робота [13] обмежується оцінюванням лінійної стійкості однокрокових методів для звичайних диференційних рівнянь першого порядку, а межі області стійкості визначаються лише за допомогою тесту Далквіста, що не є вичерпним. У [14] стійкість неявних різницевих схем для нелінійного рівняння Шредінгера досліджується з використанням підходу Кранка-Ніколсона, застосованого до схем лінеаризації на основі методів Ньютона і Пікара, але при цьому розкладання Тейлора в розрахункових точках здійснюється без нелінійного члена, сприймається як стала, що справедливо лише у окремих випадках і підлягає узагальненню для інших типів рівнянь. У роботі [15] стійкість отриманої кінцево-різницевої схеми досліджується з урахуванням властивостей норми матриці і теорем Гершгоріна. Отримана при цьому система нерівностей, яка обмежує величини кроків інтегрування як за часом, так і за простором, не просто робить цю схему умовно стійкою, а й суттєво залежить від додаткових параметрів. Зважаючи на численні дослідження у зазначених напрямках можна стверджувати, що питання розробки, визначення характеру стійкості та порядків апроксимації різницевих схем залишаються актуальними та вимагають залучення нових підходів та рішень з урахуванням сучасних запитів на забезпечення об'єктивних результатів чисельного моделювання з прийнятними часовими показниками.

У роботах [5 – 7, 16, 17] розглянуті нові класи різницевих схем, орієнтованих на використання в паралельних обчислювальних системах з можливістю визначення шуканих значень відразу в декількох розрахункових точках блоку. При цьому композиції дискретних апроксимацій рівнянь можуть використовувати одну (рис. 1) або кілька (рис. 2) опорних точок з попереднього (попередніх) блоку [6, 7], в розрахункові схеми можуть вводитися похідні старших порядків та/або точки колокації [15]. Як правило, ці методи мають абсолютну або A-α стійкість зі значеннями кутів α, близькими до 90° [6]. Але основною

проблемою використання паралельних реалізацій таких методів є необхідність їх адаптації під топологію процесорного поля. Ця проблема ускладнюється, коли на етапі чисельного експерименту виникає необхідність керування кроком інтегрування з використанням схем розтягування-стиснення [5], вкладеності чи екстраполяції Річардсона. У цьому випадку кількість задіяних процесорів може значно зростати, тоді як процеси адаптації методу під наявну конфігурацію процесорного поля не задіяні. Тобто необхідно швидко генерувати (або використовувати готовий) різницевий метод (методи), щоб з максимальною ефективністю використовувати наявний обчислювальний ресурс. Але при цьому можуть виникати ситуації, коли згенерований метод виявляється нестійким або не забезпечує заданого порядку точності. У [16] було розглянуто питання розробки паралельних різницевих схем за допомогою інтегро-інтерполяційного підходу. Такі різницеві схеми забезпечують дискретизацію диференційних рівнянь чи їх систем зі сконцентрованими та розподіленими параметрами. Але при цьому формування множини розрахункових коефіцієнтів з орієнтацією на максимально досяжний порядок точності може призводити до нестійкості. Знизити порядок апроксимації на фіксованій множині опорних і розрахункових точок інтегро-інтерполяційний підхід не дозволяє, а зміна співвідношення розмірностей блоків призводить до нової різницевої схеми, яка також не дає гарантованої стійкості.

Метою цієї статті є розробка та обґрунтування методів генерації розрахункових коефіцієнтів стійких за початковими даними і за правою частиною різницевих схем, що забезпечують заданий порядок апроксимації без зміни розмірностей розрахункових та опорних блоків.

Композиція різницевих апроксимацій однокрокових блокових методів

Розглянемо завдання Коші для звичайного диференційного рівняння

$$x'(t) = f\big(t, x(t)\big), \qquad x(t_0) = x_0, \qquad t \in [t_0, T], \tag{1}$$

яке могло бути заданим спочатку, або до нього було зведено початкове завдання з частинними похідними, наприклад, методом прямих [7].

Позначимо $u_{n,0}$ наближене значення розв'язання завдання Коші (1) у початковій точці $t_{n,0}$ блоку, що обробляється. Передбачається, що в межах одного блоку точки сітки знаходяться на рівних відстанях τ (рис.1)

$$t_{n,i} = t_{n,0} + i\tau, \quad i = 1,2, \dots, s.$$

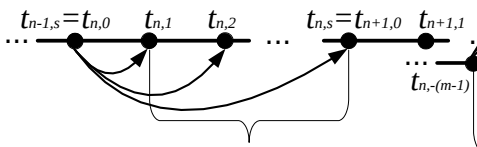


Рис. 1. Шаблон різницевої схеми однокрокового s-точкового блокового методу

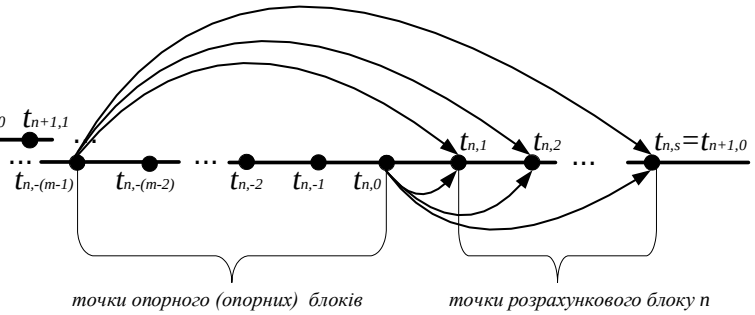


Рис. 2. Шаблон різницевої схеми m-крокового s-точкового блокового методу

Для однокрокових методів різницеві рівняння мають вигляд

$$u_{n,i} = u_{n,0} + i\tau\left(d_i F_{n,0} + \sum_{j=1}^{s} a_{i,j} F_{n,j}\right), \ i = 1,2,\dots,s, \ n = 1,2,\dots,N, \quad (2)$$

де $F_{n,j} = f\left(t_{n,0} + j\tau, u_{n,j}\right)$, N – кількість розрахункових блоків, s – розмірність блоку (кількість розрахункових точок), $d_i, a_{i,j}$ – коефіцієнти розрахункових схем, $i = 1,2,\dots,s, \quad j = 1,2,\dots,s$.

Співвідношення (2) визначають канонічне подання однокрокового $\boldsymbol{s}$-точкового різницевого методу. Отримаємо коефіцієнти рівнянь, що дозволяють представляти загальні однокрокові багатоточкові методи канонічної формі. Кожне i-е різницеве рівняння (2) містить s+1 невідомих коефіцієнтів. Для їх визначення слід скласти та розв’язати систему рівнянь відповідної розмірності, що забезпечує виконання умов апроксимації. Вирази для нев'язків на розв’язанні $x(t)$ вихідного диференційного рівняння мають вигляд

$$r_{n,i} = -\frac{x_{n,i} - x_{n,0}}{i\tau} + d_i x'_{n,0} + \sum_{j=1}^{s} a_{i,j} x'_{n,j}, i = 1,2,\dots s, \quad i = 1,2,\dots,s, \quad (3)$$

де $x_{n,j} = x\left(t_{n,0} + j\tau\right)$,

$x'_{n,j} = x'\left(t_{n,0} + j\tau\right) = f\left(t_{n,0} + j\tau\right)$,

Розкладаючи $x\left(t_{n,0} + i\tau\right)$ і $x'\left(t_{n,0} + j\tau\right)$ в ряди Тейлора в околі точки $t_{n,0}$, отримаємо

$$\frac{x_{n,i}-x_{n,0}}{i\tau}=\sum_{l=1}^{p}\frac{(i\tau)^{l-1}}{l!}x^{(l)}{}_{n,0}+O(\tau^{p}),\quad i=1,2,\dots,s,$$

$$x'{}_{n,j}=\sum_{l=1}^{p}\frac{(j\tau)^{l-1}}{(l-1)!}x^{(l)}{}_{n,0}+O(\tau^{p}),\quad j=1,2,\dots,s.$$

Повернемося тепер до виразу для нев'язка (3) і підставимо отримані співвідношення

$$r_{n,i}=-\sum_{l=1}^{p}\frac{(i\tau)^{l-1}}{l!}x^{(l)}{}_{n,0}+d_i x'_{n,0}+\sum_{j=1}^{s}a_{i,j}\sum_{l=1}^{p}\frac{(j\tau)^{l-1}}{(l-1)!}x^{(l)}{}_{n,0}+O(\tau^{p}),$$

$$i=1,2,\dots,s.$$

Після перетворень угрупування і зміни послідовності складання членів з похідними співпадаючих порядків, отримаємо

$$r_{n,i}=\left(d_i+\sum_{j=1}^{s}a_{i,j}-1\right)+$$

$$+\sum_{l=2}^{p}\frac{\tau^{l-1}}{(l-1)!}x_{n,0}^{(l)}\left(\sum_{j=1}^{s}j^{l-1}a_{i,j}-\frac{i^{l-1}}{l}\right)+O(\tau^{p}),\qquad(4)$$

$$i=1,2,\dots,s.$$

З (4) витікає, що похибка апроксимації має порядок p, якщо виконано умови

$$d_i+\sum_{j=1}^{s}a_{i,j}=1,$$

$$\sum_{j=1}^{s}j^{l-1}a_{i,j}=\frac{i^{l-1}}{l},\qquad(5)$$

$$i=1,2,\dots,s,\ \ l=2,\dots,p.$$

Система (5) для кожного фіксованого i містить p рівнянь і $s+1$ невідомих. Якщо висунути вимогу, щоб $p=s+1$, тоді з (5) можна визначити всі невідомі коефіцієнти d_i і $a_{i,j}$ $i,j=1,2,\dots,$ s, які надалі будемо вважати елементами вектору D і матриці A відповідно. Вимога співпадіння $p=s+1$ забезпечує відповідний порядок апроксимації однокрокового s-точкового блокового методу. Похибка методу у відповідності до (4) визначається як

$$r_{n,i} = \frac{\tau^{s+1}}{(s+1)!} x_{n,0}^{(s+2)} \left(\sum_{j=1}^{s} j^{s+1} a_{i,j} - \frac{i^{s+1}}{s+2} \right) + O(\tau^{s+2}), \;\; i = 1,2,\dots,s. \quad (6)$$

Отже, найвищий порядок апроксимації однокрокових багатоточкових блокових різницевих методів дорівнює $O(\tau^{s+1})$.

Композиція різницевих апроксимацій багатокрокових блокових методів

Різницеві рівняння багатокрокових багатоточкових методів на шаблоні (рис.2) з розрахунковим блоком, що містить s точок, і з опорним блоком, що містить m точок будуть мати вигляд

$$u_{n,i} = u_{n,0} + i\tau \left(\sum_{j=1}^{m} b_{i,j} F_{n,j-m} + \sum_{j=1}^{s} a_{i,j} F_{n,j} \right),$$
$$i = 1,2,\dots,s, \quad (7)$$
$$n = 1,2,\dots,N,$$

де позначення $F_{n,j}, N, s, a_{i,j}$ співпадають з описами (2),

m – розмірність опорного блоку (кількість опорних точок).

$b_{i,j}$ – коефіцієнти розрахункової схеми, $i = 1,2,\dots,s, \quad j = 1,2,\dots,m.$

Вирази для нев'язків початкової системи рівнянь (7) мають вигляд

$$r_{n,i} = -\frac{x_{n,i} - x_{n,0}}{i\tau} + \sum_{j=1}^{m} b_{i,j} x'_{n,j-m} +$$
$$+ \sum_{j=1}^{s} a_{i,j} x'_{n,j}, \quad i = 1,2,\dots s, \quad (8)$$
$$n = 1,2,\dots,N,$$

де $x_{n,j}$, $x'_{n,j}$ – співпадають з описами (3),

$$x'_{n,j-m} = x'(t_{n,0} - j\tau) = f(t_{n,0} - j\tau).$$

Розкладаючи $x(t_{n,0} + j\tau)$ і $x'(t_{n,0} \pm j\tau)$ в ряди Тейлора в околі точки $t_{n,0}$, отримаємо

$$\frac{x_{n,i} - x_{n,0}}{i\tau} = \sum_{l=1}^{p} \frac{(j\tau)^{l-1}}{l!} x^{(l)}{}_{n,0} + O(\tau^{p}), \qquad i = 1,2,\dots,s,$$

$$x'_{n,j-m} = \sum_{l=1}^{p} \frac{((j-m)\tau)^{l-1}}{(l-1)!} x^{(l)}{}_{n,0} + O(\tau^p), \qquad j = 1,2,\dots,m,$$

$$x'_{n,j} = \sum_{l=1}^{p} \frac{(j\tau)^{l-1}}{(l-1)!} x^{(l)}{}_{n,0} + O(\tau^p), \;\; j = 1,2,\dots,s.$$

Після угрупування членів із співпадаючими похідними отримаємо оцінку для похибки апроксимації різницевого методу (7), що розглядається на розв'язанні рівняння (1)

$$r_{n,i} = x'_{n,0}\left(\sum_{j=1}^{m} b_{i,j} + \sum_{j=1}^{s} a_{i,j} - 1\right) +$$

$$+ \sum_{l=2}^{p} \frac{\tau^{l-1}}{(l-1)!}\, x_{n,0}^{(l)} \left(\sum_{j=1}^{s} a_{i,j} j^{l-1} + \sum_{j=1}^{m} b_{i,j}(j-m)^{l-1} - \frac{i^{l-1}}{l}\right) + \; O(\tau^p).$$

Похибка апроксимації має порядок p, якщо виконані наступні умови

$$\sum_{j=1}^{m} b_{i,j} + \sum_{j=1}^{s} a_{i,j} = 1\,, \quad i = 1,2,\dots,s, \tag{9}$$

$$\sum_{j=1}^{s} j^{l-1} a_{i,j} \; + \; \sum_{j=1}^{m} (j-m)^{l-1} b_{i,j} = \frac{i^{l-1}}{l}, \;\; i = 1,2,\dots,s, \; l = 2,\dots,p.$$

Система рівнянь (7) для кожного фіксованого i містить p рівнянь і $m+s$ невідомих $b_{i,1}, b_{i,2}, \dots, b_{i,m}, a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,s}$. При $p = m+s$ можна визначити всі невідомі коефіцієнти з системи. Отримані коефіцієнти дозволять сформувати відповідні матриці A і B. Найвищий порядок апроксимації багатокрокового s-точкового блокового методу дорівнює $m+s$. Його похибка у відповідності до (8) визначається як

$$r_{n,i} = \frac{\tau^{s+m}}{(s+1)!} x_{n,0}^{(s+m+1)} \times$$

$$\times\left(\sum_{j=1}^{s} j^{s+m} a_{i,j} \; + \; \sum_{j=1}^{m} (j-m)^{s+m} b_{i,j} - \frac{i^{s+m}}{s+m+1}\right) + O(\tau^{s+m+1}), \tag{10}$$

$$i = 1,2,\dots,s,$$

отже, найвищий порядок апроксимації багатокрокових багатоточкових блокових різницевих методів дорівнює $O(\tau^{s+m})$.

Дослідження стійкості одно- і багатокрокових блокових методів за початковими даними

Розглянутий в [16] інтегро-інтерполяційний підхід до формування розрахункових коефіцієнтів різницевих методів дозволяє отримати шукані значення з витриманням найвищого порядку апроксимації, тобто з порядком $O(\tau^{s+1})$ для однокрокових схем і з порядком $O(\tau^{s+m})$ для багатокрокових, де s і m кількість розрахункових та опорних точок відповідно. Разом з тим доведено [17], що однокрокові схеми найвищого порядку точності є абсолютно стійкими, в той час, як багатокрокові схеми найвищого порядку апроксимації непридатні для числових розрахунків, оскільки вони нестійкі. Отже, при формуванні розрахункових коефіцієнтів необхідно штучно знижувати порядок точності методу, щоб отримати абсолютно стійкі різницеві схеми. На жаль, інтегро-інтерполяційний підхід не припускає можливості штучного зниження порядку апроксимації, якщо розмірності опорного і розрахункового блоків зафіксовано, в той час, коли цього можна досягти, формуючи системи рівнянь на фіксованій множині точок з наперед заданим порядком точності методу, що менший за максимальний. Розглянемо деякі варіанти такого формування розрахункових схем, які, з одного боку мають достатньо високий порядок точності, а, з іншого боку, залишаються абсолютно стійкими як за початковими даними, так і за правою частиною.

Введемо нові позначення і запишемо рівняння (2) в векторній формі

$$U_{n+1} = S.U_n + \tau(DF_n + AF_{n+1}), \tag{11}$$

де $U_{n+1} = \left(u_{n,i}\right),\ i = 1,2,\dots,s,\ n = 1,2,\dots,N$ – вектор шуканих значень,
$U_n = \left(0,0,\dots,0,u_{n,0}\right)$ – вектор з єдиним опорним значенням,
$D = (d_1, d_2, \dots, d_s)^T$ – вектор коефіцієнтів розрахункової схеми,
$F_n = f\left(t_n, u_{n,0}\right)$ – значення правої частини в опорній точці,
$A = (a_{i,j})$ – матриця коефіцієнтів розрахункової схеми,
$i = 1,2,\dots,s,\quad j = 1,2,\dots,s.$

$F_{n+1} = \left(F_{n,j}\right), j = 1,2,\dots,s$ – вектор значень правих частин в розрахункових точках.

Матриця S, що має вигляд

$$S = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tag{12}$$

визначає стійкість метода (11) за початковими даними. Характеристичне рівняння матриці S має вигляд

$$\lambda^{s-1}(1-\lambda)=0,$$

корені цього рівняння $\lambda_1 = 1, \lambda_i = 0, i = 2,3,\dots,s$, отже, умови Далквіста [8, 18] виконуються, і однокроковий багатоточковий метод є стійким за початковими даними.

Для багатокрокового багатоточкового методу у вигляді (7) подання (11) буде мати незначну відмінність

$$U_{n+1} = S.U_n + \tau(BF_n + AF_{n+1}), \tag{13}$$

де всі попередні позначення залишаються такими ж, як і у поданні (11) за винятком наступних:

$F_n = f(t_n, u_{n,j}),\ \ j = 1-m, 1-(m-1), \dots, 0$ – вектор значень правих частин в опорних точках,

$B = (b_{i,j})$ – матриця коефіцієнтів розрахункової схеми,

$$i = 1,2,\dots,s, \quad j = 1,2,\dots,m.$$

Дослідження стійкості одно- і багатокрокових блокових методів за правою частиною

Для дослідження стійкості різницевого методу за правою частиною використовується [8,18] модельне одновимірне рівняння виду

$$x'(t) = \lambda x(t), \qquad x(t_0) = x_0, \qquad t \in [t_0, T], \tag{14}$$

де λ - комплексне число ($\lambda < 0$). Метод вважається А-стійким, якщо границею області стійкості методу в комплексному просторі є уявна вісь, і А(α) – стійким, якщо область його стійкості містить кут $|\arg(-\mu)| < \alpha, \mu = \lambda\tau$ [8]. Однокрокові методи (11) на модельному рівнянні (14) з правими частинами $F_{n,j} = f(t_{n,j}, u_{n,j}) = \lambda u_{n,j}$ після введення заміни $\mu = \lambda\tau$, можна подати у вигляді

$$U_{n+1} = GU_n, \qquad n = 1, 2, \dots, N, \tag{15}$$

де G - матриця переходу виду

$$G = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & g_1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & g_2 \\ & & \dots & & \\ 0 & 0 & \dots & 0 & g_s \end{pmatrix},$$

з елементами, що визначаються як

$$G = (E - \mu A)^{-1}\,(S + E\mu D). \tag{16}$$

За елементами матриці переходу G (квадратна матриця розмірності $s \times s$) визначається стійкість чисельного методу (11) за правою частиною.

Що стосується однокрокових методів, то в [17] доведено, що методи (11) з будь якою розмірністю розрахункового блоку є абсолютно стійкими. Отже, завдання генерування розрахункових коефіцієнтів $d_i, a_{i,j}$ різницевих схем, що побудовано на однокрокових методах (2), можуть бути виконано як на основі інтегро-інтерполяційного методу [16], так і за допомогою побудови системи алгебраїчних рівнянь (5). Застосування обох підходів дозволяє побудувати різницеві схеми з максимально можливим порядком апроксимації, не порушуючи при цьому стійкість за правою частиною. Отримаємо, як для прикладу, розрахункові коефіцієнти однокрокових методів з розмірностями розрахункових блоків $s = 3$ (17) і $s = 4$ (18) відповідно, позначивши $D = (d_1, d_2, \dots, d_s)^T$:

$$D = \begin{pmatrix} \frac{3}{8} \\ \frac{1}{6} \\ \frac{1}{8} \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} \frac{19}{24} & -\frac{5}{24} & \frac{1}{24} \\ \frac{2}{3} & \frac{1}{6} & 0 \\ \frac{3}{8} & \frac{3}{8} & \frac{1}{8} \end{pmatrix}.$$

Система різницевих рівнянь на отриманих коефіцієнтах матиме вигляд:

$$\begin{aligned} u_{n,1} &= u_{n,0} + \frac{1}{24}\tau\left(9F_{n,0} + 19F_{n,1} - 5F_{n,2} + F_{n,3}\right), \\ u_{n,2} &= u_{n,0} + \tfrac{1}{3}\tau\left(F_{n,0} + 4F_{n,1} + F_{n,2}\right), \\ u_{n,3} &= u_{n,0} + \tfrac{3}{8}\tau\left(F_{n,0} + 3F_{n,1} + 3F_{n,2} + F_{n,3}\right). \end{aligned} \tag{17}$$

Значення нев'язків на множині розрахункових точок $s = 3$ оцінюються як

$$r_{n,1} = \frac{19}{30}x^{(5)}[t_n]\tau^4 + O[\tau]^5,$$

$$r_{n,2} = -\frac{1}{30}x^{(5)}[t_n]\tau^4 + O[\tau]^5,$$

$$r_{n,3} = \frac{1}{10}x^{(5)}[t_n]\tau^4 + O[\tau]^5,$$

що підтверджує обґрунтований порядок точності розрахункової схеми $O(\tau^{s+1}) = O(\tau^4)$.

Оцінимо стійкість однокрокового триточкового методу (17), для чого сформуємо матрицю переходу

$$G = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dfrac{-12+6\mu+\mu^2-\mu^3}{-12+18\mu-11\mu^2+3\mu^3} \\ 0 & 0 & \dfrac{-12-6\mu+\mu^2+\mu^3}{-12+18\mu-11\mu^2+3\mu^3} \\ 0 & 0 & -\dfrac{12+18\mu+11\mu^2+3\mu^3}{-12+18\mu-11\mu^2+3\mu^3} \end{pmatrix},$$

і побудуємо області, які обмежуються елементами матриці G і відповідають кожній точці розрахункового блоку (рис. 3). Всі точки розрахункового блоку в якості області стійкості мають всю ліву напівплощину, що свідчить про абсолютну стійкість схеми (17).

Розрахункові коефіцієнти для однокрокової схеми з $s = 4$ мають вигляд (18), при цьому слід зауважити, що і інтегро-інтерполяційний підход [16], і підхід, що базується на співвіднесеннях розкладань в ряди Тейлора (5) для заданої розмірності блоку надали співпадаючі результати.

$$D = \begin{pmatrix} \dfrac{251}{720} \\ \dfrac{29}{180} \\ \dfrac{9}{80} \\ \dfrac{7}{90} \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} \dfrac{323}{360} & -\dfrac{11}{30} & \dfrac{53}{360} & -\dfrac{19}{720} \\ \dfrac{31}{45} & \dfrac{2}{15} & \dfrac{1}{45} & -\dfrac{1}{180} \\ \dfrac{17}{40} & \dfrac{3}{10} & \dfrac{7}{40} & -\dfrac{1}{80} \\ \dfrac{16}{45} & \dfrac{2}{15} & \dfrac{16}{45} & \dfrac{7}{90} \end{pmatrix}. \qquad (18)$$

Збільшення кількості розрахункових точок ($s = 4$) дозволило підвищити порядок апроксимації $O(\tau^{s+1}) = O(\tau^5)$, нев'язки схеми з коефіцієнтами (18) для кожної точки блоку дорівнюють:

$$r_{n,1} = -\frac{27}{2} x^{(6)}[t_n]\tau^5 + O[\tau]^6,$$

$$r_{n,2} = -x^{(6)}[t_n]\tau^5 + O[\tau]^6,$$

$$r_{n,3} = -\frac{1}{2} x^{(6)}[t_n]\tau^5 + O[\tau]^6,$$

$$r_{n,4} = O[\tau]^6.$$

Матриця переходу для розрахункової схеми (18) має вигляд

$$G = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dfrac{60 - 60\mu + 15\mu^2 + 5\mu^3 - 3\mu^4}{60 - 120\mu + 105\mu^2 - 50\mu^3 + 12\mu^4} \\ 0 & 0 & 0 & \dfrac{60 - 15\mu^2 + 2\mu^4}{60 - 120\mu + 105\mu^2 - 50\mu^3 + 12\mu^4} \\ 0 & 0 & 0 & \dfrac{60 + 60\mu + 15\mu^2 - 5\mu^3 - 3\mu^4}{60 - 120\mu + 105\mu^2 - 50\mu^3 + 12\mu^4} \\ 0 & 0 & 0 & \dfrac{60 + 120\mu + 105\mu^2 + 50\mu^3 + 12\mu^4}{60 - 120\mu + 105\mu^2 - 50\mu^3 + 12\mu^4} \end{pmatrix},$$

а границі областей стійкості (рис. 4), які визначаються елементами матриці G і відповідають кожній точці розрахункового блоку в (18), також в якості області стійкості мають всю ліву напівплощину. Отже, годографи (рис. 3, 4), які визначають границі стійкості однокрокових методів максимального порядку точності для кожної розрахункової точки у блоці відповідної розмірності демонструють абсолютну стійкість (А-стійкість) однокрокових методів. Ця властивість методів зберігається для будь-якої розмірності блоку.

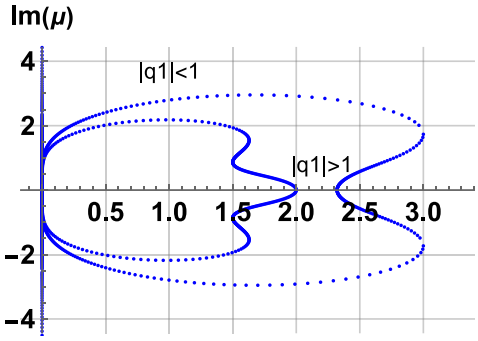


Рис. 3. Годографи стійкості однокрокового методу, $s = 3$

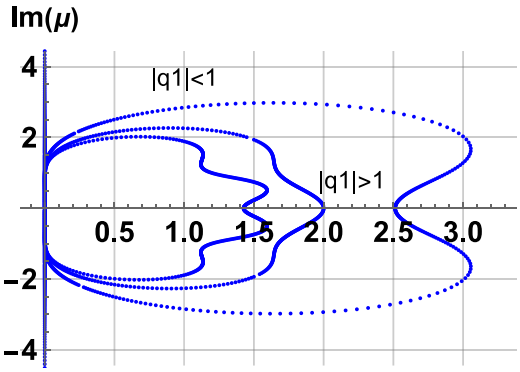


Рис. 4. Годографи стійкості однокрокового методу, $s = 4$

А-стійкий метод є абсолютно стійким при будь-яких значеннях кроку інтегрування τ, за умови стійкості розв'язання початкового диференційного рівняння (системи рівнянь) [8, 18]. На жаль, такої особливості позбавлені багатокрокові методи максимального порядку апроксимації. Для перевірки стійкості багатокрокового методу за правою частиною слід побудувати матрицю переходу, вигляд якої суттєво залежить від співвідношення кількості опорних і розрахункових точок у блоках. Модельне рівняння, застосоване для багатокрокового методу (13), можна

привести до вигляду (15), але елементи матриці переходу будуть визначатися як

$$G = (E - \mu A)^{-1}\,(S + \mu B). \tag{19}$$

Матриця переходу формується у вигляді (20), якщо розмірності блоків співпадають ($s = m$)

$$G = \begin{pmatrix} g_{1,1} & \cdots & g_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{s,1} & \cdots & g_{s,m} \end{pmatrix}. \tag{20}$$

У разі, коли кількість розрахункових точок перевищує кількість опорних ($m < s$), перші $s - m$ стовбчиків у матриці переходу G будуть містити лише нульові елементи

$$G = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & g_{1,1} & g_{1,2} & \cdots & g_{1,m} \\ 0 & \dots & 0 & g_{2,1} & g_{2,2} & \cdots & g_{2,m} \\ & & & \dots & & & \\ 0 & \dots & 0 & g_{s,1} & g_{s,2} & \cdots & g_{s,m} \end{pmatrix}. \tag{21}$$

У разі, коли кількість розрахункових точок менша за кількість опорних ($m > s$), матрицю переходу G слід привести до вигляду

$$G = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ & & \dots & & & & & \ddots & \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ q_{1,1} & q_{1,2} & & & & \cdots & & & q_{1,m} \\ & \vdots & & & & & & & \vdots \\ q_{s,1} & q_{s,2} & & & & \cdots & & & q_{s,m} \end{pmatrix}. \tag{22}$$

Для забезпечення абсолютної стійкості (А) або стійкості $\mathrm{A} - \alpha$ багатокрокових методів (7) необхідно знизити порядок точності зі збереженням всієї множини опорних і розрахункових точок. Але такої можливості інтегро-інтерполяційний підхід до формування різницевих схем позбавлений, отже, для штучного зниження порядку у програмний код генерування розрахункових коефіцієнтів слід внести деякі зміни, пов'язані з довизначенням множини коефіцієнтів. Розглянемо множину багатокрокових методів $s = 3, m = 3$ (23 – 24), $s = 3, m = 2$ (25), $s = 2, m = 3$ (26), з тим, щоб врахувати всі можливі випадки співвідношення кількості розрахункових і опорних точок (співпадіння розмірності опорного і розрахункового блоків, опорних точок менше, опорних точок більше). Для кожного випадку сформуємо різницеві схеми, визначимо порядки апроксимації, перевіримо виконання умови стійкості і,

в разі її порушення, скоригуємо розрахункову схему, знизивши порядок апроксимації і залишаючи незмінними розмірності блоків.

Для випадку $s = 3, m = 3$ коефіцієнти розрахункової схеми, що забезпечують найвищий порядок апроксимації, набудуть вигляду

$$B = \begin{pmatrix} \frac{11}{1440} & -\frac{31}{480} & \frac{401}{720} \\ \square\ 0 & -\frac{1}{90} & \frac{17}{45} \\ \frac{3}{160} & -\frac{21}{160} & \frac{57}{80} \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} \frac{401}{720} & -\frac{31}{480} & \frac{11}{1440} \\ \frac{19}{15} & \frac{17}{45} & -\frac{1}{90} \\ \frac{57}{80} & \frac{219}{160} & \frac{51}{160} \end{pmatrix}. \qquad (23)$$

Ці коефіцієнти повністю співпадають з тими, що було отримано для таких же розмірностей блоків за допомогою інтегро-інтерполяційного підходу.

Максимальний нев'язок схеми з коефіцієнтами (23) на множині розрахункових точок у блоці складає

$$r_{n,1} = \frac{191}{42} x^{(7)}[t_n]\tau^6 + O[\tau]^7,$$

$$r_{n,2} = \frac{5}{42} x^{(7)}[t_n]\tau^6 + O[\tau]^7,$$

$$r_{n,3} = \frac{29}{42} x^{(7)}[t_n]\tau^6 + O[\tau]^7.$$

Разом з тим матриця переходу (дод. А, А.1) та годограф різницевої схеми (23) (рис. 5) характеризують побудований метод як такий, що не забезпечує А або $\mathrm{A} - \alpha$-стійкість. Спробуємо поступитися порядком апроксимації, знизивши його на одиницю, але при цьому залишивши незмінними розмірності розрахункового і опорного блоків. Для цього слід обрати і штучно довизначити шукану множину коефіцієнтів, наприклад $a_{1,0} = 0, a_{2,0} = 0, a_{3,0} = 0$. З урахуванням штучного довизначення для випадку $s = 3, m = 3$ коефіцієнти розрахункової схеми набудуть вигляду

$$B = \begin{pmatrix} -\frac{173}{3600} & \frac{77}{360} & 0 \\ \square\ -\frac{17}{900} & \frac{4}{45} & 0 \\ -\frac{7}{400} & \frac{3}{40} & 0 \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} \frac{401}{360} & -\frac{247}{720} & \frac{19}{300} \\ \frac{37}{45} & \frac{17}{180} & \frac{1}{75} \\ \frac{19}{40} & \frac{27}{80} & \frac{13}{100} \end{pmatrix}. \qquad (24)$$

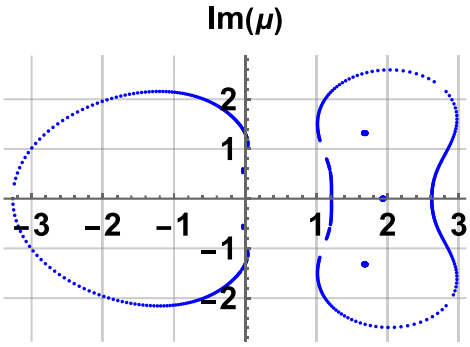


Рис. 5. Годографи стійкості багатокрокового методу, $s = 3, m = 3$ з найвищим порядком апроксимації $O(\tau^{s+m}) = O(\tau^6)$

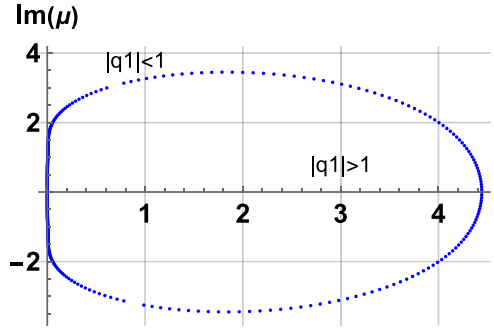


Рис. 6. Годографи стійкості багатокрокового методу, $s = 3, m = 3$ з порядком апроксимації $O(\tau^{s+m-1}) = O(\tau^5)$

У такий спосіб змінюючи розмірності опорного та/або розрахункового блоків можна побудувати A або $A-\alpha$-стійкі різницеві схеми заданого порядку апроксимації. Різницева схема з коефіцієнтами (24) на множині розрахункових точок у блоці забезпечує порядок апроксимації $O(\tau^{s+m-1}) = O(\tau^5)$

$$r_{n,1} = \frac{401x^{(6)}[t_n]\tau^5}{7200} + O[\tau]^6,$$

$$r_{n,2} = \frac{17}{900}x^{(6)}[t_n]\tau^5 + O[\tau]^6,$$

$$r_{n,3} = \frac{19}{800}x^{(6)}[t_n]\tau^5 + O[\tau]^6,$$

що на одиницю менший максимально можливого. Разом з тим метод з коефіцієнтами (24) є абсолютно стійким (див. рис. 6). Для випадку $(m < s, m = 2, s = 3)$ сформовано різницеві схеми найвищого порядку апроксимації $s + m = 5$ і зі зменшенням порядку апроксимації на одиницю $s + m - 1 = 4$ (25). Годографи, що відповідають таким схемам, наведено на рис. 7 – 10 і відповідні матриці переходів (А.3 – А.6) ілюструють твердження про вплив зменшення порядку апроксимації на стійкість різницевої схеми.

$$u_{n,1} = u_{n,0} + \tau\left(\frac{3}{32}F_{n,-1} + \frac{65}{48}F_{n,1} - \frac{7}{12}F_{n,2} + \frac{13}{96}F_{n,3}\right), \qquad (25)$$

$$u_{n,2} = u_{n,0} + 2\tau\left(\frac{1}{24}F_{n,-1} + \frac{11}{12}F_{n,1} + \frac{1}{24}F_{n,3}\right),$$

$$u_{n,3} = u_{n,0} + 3\tau\left(\frac{1}{32}F_{n,-1} + \frac{9}{16}F_{n,1} + \frac{1}{4}F_{n,2} + \frac{5}{32}F_{n,3}\right).$$

Порядок апроксимації різницевих схем (25-26) на множині розрахункових точок у блоці забезпечується на рівні $O(\tau^{s+m-1}) = O(\tau^4)$, в той час, коли максимальне значення порядку для таких співвідношень опорних і розрахункових блоків могло б складати $O(\tau^5)$, але схеми з максимальним порядком, на жаль, унеможливлюють стійкість розрахунків.

$$u_{n,1} = u_{n,0} + \tau\times$$
$$\times\left(-\frac{13}{144}F_{n,-2} + \frac{23}{72}F_{n,-1} + \frac{65}{72}F_{n,1} - \frac{19}{144}F_{n,2}\right) \qquad (26)$$
$$u_{n,2} = u_{n,0} + 2\tau\left(-\frac{1}{36}F_{n,-2} + \frac{1}{9}F_{n,-1} + \frac{7}{9}F_{n,1} + \frac{5}{36}F_{n,2}\right).$$

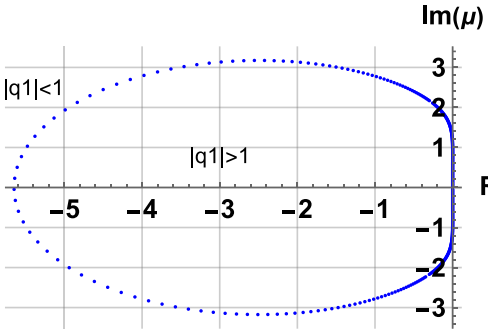


Рис. 7. Годографи стійкості багатокрокового методу, $s = 3, m = 2$ з найвищим порядком апроксимації $O(\tau^{s+m}) = O(\tau^5)$

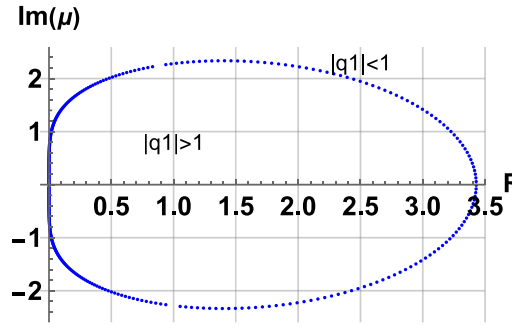


Рис. 8. Годографи стійкості багатокрокового методу, $s = 3, m = 2$ з порядком апроксимації $O(\tau^{s+m-1}) = O(\tau^4)$

На рис. 9 – 10 наведено годографи багатокрокових методів із різними співвідношеннями розмірностей опорних і розрахункових блоків, а у додатку А – матриці переходів, що відповідають різницевим схемам (23) – (26) з максимальним і скороченим порядками апроксимації. Показано, що скорочення максимально можливого порядку точності приводить до отримання стійких різницевих схем.

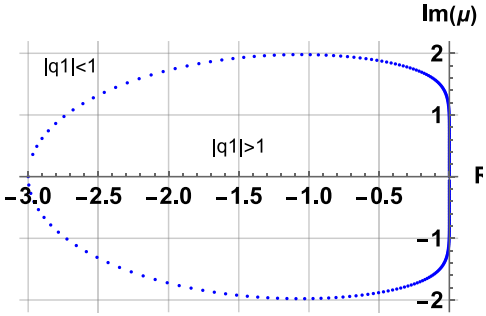


Рис. 9. Годографи стійкості багатокрокового методу, $s = 2, m = 3$ з найвищим порядком апроксимації $O(\tau^{s+m}) = O(\tau^5)$

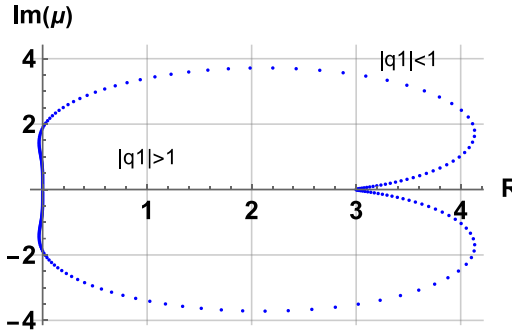


Рис. 10. Годографи стійкості багатокрокового методу, $s = 2, m = 3$ з порядком апроксимації $O(\tau^{s+m-1}) = O(\tau^4)$

Визначення коефіцієнтів розрахункових схем, оцінювання порядків апроксимації та дослідження стійкості дозволяє провести розроблена програмна система.

Висновки. У роботі досліджено питання формування одно- і багатокрокових різницевих схем заданого порядку точності чисельного розв’язання завдання Коші як для звичайних диференційних рівнянь, так і для рівнянь з частинними похідними, які було зведено до розв’язання ЗДР, наприклад, методом прямих. Різницеві схеми, що пропонуються, орієнтовані на застосування, в тому числі, в паралельних обчислювальних системах і забезпечують можливість одночасного визначення значень у множині розрахункових точок блоку за умови наявності достатньої кількості процесорів. Побудова дискретних апроксимацій здійснюється через обмеження оцінки для похибки апроксимації різницевого методу з урахуванням розмірностей розрахункового та/або опорного блоків. Застосований підхід, що базується на співвіднесенні розкладань у ряди Тейлора точних та наближених розв’язань, дозволяє варіювати порядок похибки, відходячи від максимально можливого на фіксованій множині вузлів, але забезпечуючи при цьому абсолютну або А-α стійкість чисельних розв’язань. Показано, що однокрокові схеми максимального порядку апроксимації залишаються абсолютно стійкими при збільшенні розмірності розрахункових блоків. Виконання умови абсолютної або А-α стійкості для багатокрокових методів забезпечується шляхом скорочення максимально можливого порядку апроксимації.

В якості **наукової новизни** цієї роботи слід визначити запропоновані підходи до побудови методів композиції різницевих апроксимацій, що

забезпечують заданий порядок апроксимації при чисельному розв'язанні завдання Коші як для звичайних диференційних рівнянь, так і для еволюційних рівнянь з частинними похідними. Дослідження властивостей запропонованих матриць переходів, що пов'язують опорні і розрахункові точки, дозволяють визначити характер стійкості сформованих різницевих схем за початковими даними і за правими частинами.

Практична цінність роботи полягає у створенні програмної системи, яка дозволяє формувати різницеві співвідношення для заданих розмірностей блоків, визначати порядки апроксимації у розрахункових точках, оцінювати стійкість отриманих схем. Автоматичне генерування стійких різницевих схем дозволяє враховувати топологію наявного процесорного поля, отже, з максимальною ефективністю використовувати наявний обчислювальний ресурс.

Список літератури:

1. *Zhu Q.* Complex Dynamic System Modelling, Identification and Control / *Zhu Q., G. Fusco, J. Na* // Entropy. – 2022, Vol. 24(3). – P. 380-389.

2. *Samarskii A.A.* The Theory of Difference Schemes/ A.A. Samarskii. – 2001, Boca Raton: CRC Press, 786 p. https:doi.org/10.1201/9780203908518

3. *Butcher J. C.* Numerical Methods for Ordinary Differential Equations / *J.C. Butcher*. – 2016, John Wiley & Sons. – 544 p. https://doi.org/10.1002/9781119121534.fmatter

4. *Dongarra J.* The Design and Performance of Batched BLAS on Modern High-Performance Computing Systems / *J. Dongarra, S. Hammarling, N. Higham* // International Conference on Computational Science. – 2017. – P. 495–504

5. *Дмитрієва О.А.* Моделювання жорстких систем на основі колокаційних схем розтягування – стиснення / *О.А. Дмитрієва, Н.Г. Гуськова* // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – 2017, № 1(24). – С. 76-84.

6 *Bashkov Y.* Parallel multiple blocked methods of Bickart type / *Y. Bashkov, O. Dmitrieva, N. Huskova* // Proceedings of SPIE. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments. – 2019, Vol. 11176 (1), https://doi.org/10.1117/12.2536798

7. *Bashkov Y.* Parallel implementation of evolutionary partial differential equations by collocation optical-electronic schemes / *Y. Bashkov, O. Dmitrieva, N. Huskova* // Proceedings of SPIE. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments. – 2022, Vol. 12476 (1), https://doi.org/10.1117/12.2664488

8. *Самарский А.А.* Чисельні методи / *А.А. Самарский, А.В. Гулін*. – Наука. Гол. ред. фіз-мат. літ. – 1989. – 432 с.

9. *Mohammad T.* The stability and convergence of time-stepping/spectral methods with asymptotic behaviour for the Rosenau–Burgers equation / *T. Mohammad, X. Chuanju* // Applicable Analysis. – 2022, Vol. 99 (12), P. 2013-2025, https://doi.org/ 10.1080/00036811.2018.1553034

10. *Zlotnik A.* Spectral Stability Conditions for an Explicit Three-Level Finite-Difference Scheme for a Multidimensional Transport Equation with Perturbations / *A. Zlotnik, B. Chetverushkin* // Differential Equations. – 2021, Vol. 57, P. 891-900, https://doi.org/10.1134/S0012266121070065

11. *Ma Y.* Spectral Method for the Generalized Time Fractional Cable Equation / *Y. Ma, L. Chen* // Fractal Fractional. – 2022, Vol. 6(439), https://doi.org/10.3390/fractalfract6080439
12. *Jameson A.* A Proof of the Stability of the Spectral Difference Method for All Orders of Accuracy/ *A. Jameson* // Journal of Scientific Computing. – 2010, Vol. 5 (1–3). – P. 348-358 https://doi.org/10.1007/s10915-009-9339-4
13. *Fadugba S.* Stability analysis of a proposed scheme of order five for first order ordinary differential equations / *S. Fadugba, B. Ogunrinde, R. Ogunrinde* // Malaysian journal of computing. – 2021, Vol. 6(2), https://doi.org/10.24191/mjoc.v6i2.9756
14. *Lee E.* Stability analysis of the implicit finite difference schemes for nonlinear Schrödinger equation / *E. Lee, D. Kim*/ AIMS Mathematics. – 2022, Vol. 7(9). – P. 16349-16365, https://doi.org/10.3934/math.2022893
15. *Fakharany M.* Numerical analysis of finite dierence schemes arising from time-memory partial integro-dierential equations / *M. Fakharany, M. El-Borai, I. Abu* // Frontiers in Applied Mathematics and Statistics. – 2022, Vol. 8 (1055071), https://doi.org/10.3389/ fams.2022.1055071.
16. *Дмитрієва О.А.* Генерування паралельних колокаційних різницевих схем з використанням інтегро-інтерполяційного підходу / *О.А. Дмитрієва, В.Г. Гуськова* // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2022. – Том 1, № 1-2 (7-8). – С. 95 –108, https://doi.org/10.20998/2411-0558.2022.02.09
17. *Фельдман Л.* Розробка і дослідження паралельних колокаційних блокових методів / *Л. Фельдман, О. Дмитрієва* // Наукові праці ДонНТУ. Серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка". – 2012, № 16 (204). – С. 28-35.
18. *Hairer E.* Gerhard Wanner Solving Ordinary Differential Equations II. Stiff and Differential-Algebraic Problems/ *E. Hairer, G. Wanner*. – Berlin: Springer Verlag, 2004. – 614 p.

References:

1. Zhu, Q., Fusco, G. and Na, J., (2022). "Complex Dynamic System Modelling, Identification and Control", *Entropy*, Vol. 24(3), pp. 380-389.
2. Samarskii, A., (2001). "The Theory of Difference Schemes", available at: https://doi.org/10.1201/9780203908518
3. Butcher, J., (2016). *Numerical Methods for Ordinary Differential Equations*, John Wiley & Sons, 544 p.
4. Dongarra, J., Hammarling, S. and Higham, N., (2017). "The Design and Performance of Batched BLAS on Modern High-Performance Computing Systems", *International Conference on Computational Science*, pp. 495–504.
5. Dmitrieva, O. and Huskova, N., (2017). "Simulation of stiff systems based on collocation schemes of tension – compression", *Science practices of Donetsk National Technical University*, Vol. 1(24), pp. 76-84.
6. Bashkov, Y., Dmitrieva, O. and Huskova, N., (2019). "Parallel multiple blocked methods of Bickart type", *Proceedings of SPI. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, Vol. 11176(1), available at: https://doi.org/10.1117/12.2536798
7. Bashkov, Y., Dmitrieva, O. and Huskova, N., (2022). "Parallel implementation of evolutionary partial differential equations by collocation optical-electronic schemes", *Proceedings of SPI. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, Vol. , 12476(1), available at: https://doi.org/10.1117/12.2664488
8. Samarskii, A. and Gulin, A., (1989). *Numerical method*, Nauka, 432 p.

9. Mohammad, T. and Chuanju, X., (2020). "The stability and convergence of time-stepping / spectral methods with asymptotic behaviour for the Rosenau–Burgers equation", *Applicable Analysis*, Vol. 99(12), pp. 2013-2025, available at: https://doi.org/10.1080/00036811.2018.1553034
10. Zlotnik, A. and Chetverushkin, B., (2021). "Spectral Stability Conditions for an Explicit Three-Level Finite-Difference Scheme for a Multidimensional Transport Equation with Perturbations", *Diff. Equat.*, Vol. 57, pp. 891–900, available at: https://doi.org/10.1134/S0012266121070065
11. Ma, Y. and Chen, L., (2022). "Spectral Method for the Generalized Time Fractional Cable Equation", *Fractal Fractional*, Vol. 6(439). available at: https://doi.org/10.3390/fractalfract6080439
12. Jameson, A., (2010). "A Proof of the Stability of the Spectral Difference Method for All Orders of Accuracy", *Journal of Scientific Computing*, Vol. 45, pp. 348-358, available at: https://doi.org/10.1007/s10915-009-9339-4
13. Fadugba, S., Ogunrinde, B. and Ogunrinde, R., (2021). "Stability analysis of a proposed scheme of order five for first order ordinary differential equations", *Malaysian journal of computing*, Vol. 6(2), available at: https://doi.org/10.24191/mjoc.v6i2.9756
14. Lee, E. and Kim, D., (2022). "Stability analysis of the implicit finite difference schemes for nonlinear Schrödinger equation", *AIMS Mathematics*, Vol. 7 (9), pp. 16349-16365, available at: https://doi.org/10.3934/math.2022893
15. Fakharany, M., El-Borai, M. and Abu I., (2022). "Numerical analysis of finite dierence schemes arising from time-memory partial integro-dierential equations", *Front. Appl. Math. Stat.*, Vol. 8, available at: https://doi.org/10.3389/fams.2022.1055071
16. Dmitrieva, O. and Huskova, V., (2022). "Generation of parallel colocation difference schemes using the integro-interpolation approach", *Information Science and Modelling*, Vol. 1, pp. 95 –108, available at: https://doi.org/10.20998/2411-0558.2022.02.09
17. Feldman, L., Dmitrieva, O. (2012). "Development and research of parallel collocation block methods", *Science practices of Donetsk National Technical University*, Vol. 16(204), P. 28-35.
18. Hairer, E. and Wanner, G., (2004). *Solving Ordinary Differential Equations II. Stiff and Differential-Algebraic Problems*, Springer Verlag, Berlin, 614 p.

Статтю представив доктор технічних наук, професор Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Сергій Леонов

Надійшла (received) 09.08.2023

Dmytriyeva Olga[1,2], Dr.Sci.Tech, Professor
[1]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
av. Beresteyska, 37, Kyiv, Ukraine, 03056
[2]Institute for modelling hydraulic and environmental systems, University of Stuttgart,
Pfaffenwaldring 5a, Stuttgart, Germany, 70569
Tel.: +49 (160) 598-72-88, e-mail: olga.dmytriyeva@iws.uni-stuttgart.de
ORCID ID: 0000-0001-8921-8433

УДК 004.272.2:519.63

Методи композиції різницевих апроксимацій при моделюванні динамічних процесів / Дмитрієва О.А. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2023. – № 1–2 (9–10). – С. 5 – 26.

У роботі досліджено методи композиції різницевих апроксимацій для формування одно- і багатокрокових паралельних різницевих схем заданого порядку, орієнтованих на чисельний розв’язок завдання Коші як для звичайних диференційних рівнянь, так і для еволюційних рівнянь з частинними похідними. Пропоновані дискретні апроксимації дозволяють варіювати порядок похибки, відходячи від максимально можливого на фіксованій множині вузлів, але забезпечуючи при цьому абсолютну або A-α стійкість чисельних розв’язань. Дослідження властивостей запропонованих матриць переходів, що пов’язують опорні і розрахункові точки, дозволяють визначити характер стійкості сформованих різницевих схем за початковими даними і за правими частинами. Автоматичне генерування стійких різницевих схем дозволяє враховувати топологію процесорного поля, отже, з максимальною ефективністю використовувати наявний обчислювальний ресурс. Іл.: 10. Бібліогр.: 18 назв.

Ключові слова: різницеві апроксимації; моделювання динамічних процесів; завдання Коші; блокові методи; порядок похибки; абсолютна стійкість; A-α стійкість.

UDC 004.272.2:519.63

Methods of composition of different approximations in the simulation of dynamic processes / Dmytriyeva O. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2023. – № 1 – 2 (9 – 10). – P. 5 – 26.

The paper investigates methods of composing difference approximations for forming single- and multi-step parallel difference schemes of a given order, oriented to the numerical solution of the Cauchy problem for both ordinary differential equations and evolutionary partial differential equations. The proposed discrete approximations allow us to vary the order of the error, departing from the maximum possible on a fixed set of nodes, but ensuring absolute or A-α stability of numerical solutions. The study of the properties of the proposed transition matrices connecting the reference and design points allows us to determine the nature of the stability of the generated difference schemes according to the initial data and the right-hand sides. Automatic generation of stable difference schemes allows taking into account the topology of the processor field, and thus, using the available computing resource with maximum efficiency. Figs.: 10. Refs.: 18 titles.

Keywords: difference approximations; modeling of dynamic processes; Cauchy problem; block methods; error order; absolute stability; A-α stability.

Вісник Національного технічного університету "ХПІ", 2023, № 1–2 (9–10)
ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

УДК 539.3 **DOI: 10.20998/2411-0558.2023.01.02**

Б. А. ХУДАЯРОВ**,** д-р физ-мат. наук, проф., Национальный исследовательский университет "ТИИИМСХ", г. Ташкент, Узбекистан,
А. А. ТУХТАБОЕВ**,** Наманганский инженерно-строительный институт, г. Наманган, Узбекистан,
О. Р. КУЧАРОВ**,** Национальный исследовательский университет "ТИИИМСХ", г. Ташкент, Узбекистан,
Ф. Ж. ТУРАЕВ**,** Национальный исследовательский университет "ТИИИМСХ", г. Ташкент, Узбекистан,
Н. Н. ЮЛДАШЕВ**,** Национальный исследовательский университет "ТИИИМСХ", г. Ташкент, Узбекистан

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЯ ПЛОТИНЫ-ПЛАСТИНКИ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

Наследственная теория вязкоупругости предоставила широкие возможности для описания динамических процессов деформирования разнообразных материалов. Однако, реализация этих возможностей во многих случаях затруднена из-за отсутствия адекватного математического аппарата, в особенности при исследовании динамических процессов в вязкоупругих системах. Имеются принципиальные основания считать, что весьма перспективным в этом смысле является аппарат интегральных уравнений. Использование при этом современных возможностей вычислительной техники позволяет создавать эффективные технологии математического моделирования для задач большой сложности, к которым относятся задачи динамики и динамической устойчивости вязкоупругих элементов тонкостенных конструкций с переменной жесткостью. В работе построены математические модели задач динамики, разработаны эффективные вычислительные алгоритмы, исследованы вынужденные колебания плотины-пластины с перерменной жесткостью. Приведены результаты исследований задач о колебаниях плотины-пластины переменной толщины с учетом вязкоупругих свойств материала, гидродинамического давления воды, грунта и сейсмической нагрузки. Ил.: 8. Библиогр.: 22 назв.

Ключевые слова: вязкоупругие системы; интегральные уравнения; математическое моделирование; вынужденные колебания плотины-пластины.

1. Введение. В строительстве гидротехнических сооружений часто встречаются элементы плотин типа пластинки конечной длины: плоские затворы, контрфорсные плотины с плоскими напорными перекрытиями, стенки шлюзов, различные ограждающие конструкции и т. п. При этом, естественно, возникает необходимость рассматривать пластины не только постоянной, но и переменной толщины, пластины и пластинчатые

© Б.А. Худаяров, А.А. Тухтабоев, О.Р. Кучаров, Ф.Ж. Тураев, Н.Н. Юлдашев, 2023

системы, что приводит к существенному усложнению динамических расчетов конструкций.

Особенности расчета гидросооружений на сейсмостойкость связаны с необходимостью учета влияния водной среды, наличие которой приводит к дополнительному гидродинамическому давлению воды на напорные грани, изменению частот и форм собственных колебаний конструкции, что в итоге может существенно сказаться на напряженно-деформированном состоянии сооружений. Многие исследователи [1 –7] изучали свободные и вынужденные колебания упругих и вязкоупругих пластин с переменной толщиной в течение многих лет.

В работе приведены результаты исследований задач о колебаниях плотины-пластины с учетом вязкоупругих свойств материала, гидродинамического давления воды, грунта и сейсмической нагрузки. В связи с этим в статье были поставлены следующие задачи: построение математических моделей задач динамики вязкоупругих систем с учетом переменной жесткости; разработка эффективной методики решения интегро-дифференциальных уравнений типа Вольтерра; осуществление строгой математической постановки соответствующих граничных и начально-краевых задач и разработка аналитических и численных методов их решения с последующей их апробацией и реализацией; исследование вынужденных колебаний плотины-пластины с переменной жесткостью с учетом вязкоупругих свойств материала, силы инерции и гидродинамического давления воды.

2. Постановка задачи и уравнения движения. Выведем уравнения колебания изотропной плотины-пластинки переменной толщины с учетом вязкоупругих свойств материала, основанной на модели Кирхгофа-Лява. Физическая зависимость между напряжениями в серединной поверхности σ_x, σ_y, τ_{xy} и деформациями ε_x, ε_y, γ_{xy} в плоскости $x0y$ выражаются следующими уравнениями

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}\left(1-R^*\right)\left(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y\right),$$
$$\sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2}\left(1-R^*\right)\left(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x\right), \qquad (1)$$
$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\mu)}\left(1-R^*\right)\gamma_{xy},$$

где E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; R^* – интегральный оператор с ядром релаксации $R(t)$:

$$R^*\varphi = \int_0^t R(t-\tau)\varphi(\tau)d\tau.$$

Геометрическую зависимость зададим уравнением в виде

$$\varepsilon_x = -z\frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2};\ \varepsilon_y = -z\frac{\partial^2 w_1}{\partial y^2};\ \gamma_{xy} = -2z\frac{\partial^2 w_1}{\partial x \partial y}. \qquad (2)$$

Подставляя соотношения (1), (2) в известное уравнение

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + 2\frac{\partial^2 H}{\partial x \partial y} + q - \rho h\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0, \qquad (3)$$

здесь M_x, M_y, H – изгибающие и крутящие моменты:

$$M_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x z dz, \quad M_y = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y z dz, \ H = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{xy} z dz,$$

$$M_x = -D(1-R^*)\left(\frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} + \mu\frac{\partial^2 w_1}{\partial y^2}\right),$$

$$M_y = -D(1-R^*)\left(\frac{\partial^2 w_1}{\partial y^2} + \mu\frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2}\right),$$

$$H_{xy} = -D(1-R^*)(1-\mu)\frac{\partial^2 w_1}{\partial x \partial y},$$

где $D = \dfrac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ – цилиндрическая жесткость плотины-пластинки.

Подставляя соотношения (1), (2) в известное уравнение (3), получим следующее интегро-дифференциальное уравнение с переменными коэффициентами относительно функции прогиба $w_1 = w_1(y,z,t)$:

$$\frac{1}{h}(1-R^*)\Big[D\nabla^4 w_1 + 2\frac{\partial D}{\partial y}\frac{\partial}{\partial y}\nabla^2 w_1 + 2\frac{\partial D}{\partial z}\frac{\partial}{\partial z}\nabla^2 w_1 + \nabla^2 D\nabla^2 w_1 -$$
$$-(1-\mu)\left(\frac{\partial^2 D}{\partial z^2}\frac{\partial^2 w_1}{\partial y^2} - 2\frac{\partial^2 D}{\partial z \partial y}\frac{\partial^2 w_1}{\partial z \partial y} + \frac{\partial^2 D}{\partial y^2}\frac{\partial^2 w_1}{\partial z^2}\right)\Big] +$$
$$+\rho_1\frac{\partial^2(w_1+w_0)}{\partial t^2} - \frac{\rho}{h}\cos\alpha\frac{\partial \phi_1}{\partial t}\Big|_{x=ytg\alpha} - \qquad (4)$$
$$-\frac{\rho}{h}\left\{\frac{\partial \phi_0}{\partial t} + \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial \phi_0}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_0}{\partial y}\right)^2\right]\right\}_{x=ytg\alpha+w_0(t)} \cos\alpha = 0.$$

Уравнение (4) является достаточно общим. Из него в частном случае можно получить уравнения колебаний плотины-пластинки переменной толщины с учетом вязкоупругих свойств материала.

Допустим, что толщина пластины изменяется по координате y, т.е. $h(z,y)=h(y)$. Тогда получим следующее уравнение:

$$\frac{1}{h}\left(1-R^*\right)\left[D\nabla^4 w_1-2\frac{\partial D}{\partial y}\frac{\partial}{\partial y}\nabla^2 w_1+\frac{\partial^2 D}{\partial y^2}\nabla^2 w_1-(1-\mu)\frac{\partial^2 D}{\partial y^2}\frac{\partial^2 w_1}{\partial z^2}\right]+$$

$$+\rho_1\frac{\partial^2(w_1+w_0)}{\partial t}-\frac{\rho}{h}\cos\alpha\frac{\partial\Phi_1}{\partial t}\Big|_{x=y\,tg\alpha}-$$

$$-\frac{\rho}{h}\left\{\frac{\partial\Phi}{\partial t}+\frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial\Phi_0}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial\Phi_0}{\partial x}\right)^2\right]\right\}_{x=y\,tg\alpha+w_0(t)}\Bigg|\cos\alpha=0. \qquad (5)$$

Рассмотрим пластинку со следующими граничными условиями:

1. Края $z=\pm a$ свободно оперты,

$$w_1=0,\ \frac{\partial w_1}{\partial y^2}+\mu\frac{\partial w_1}{\partial z^2}=0.$$

2. Край $y=0$ жестко защемлен,

$$w_1=0,\ \frac{\partial w_1}{\partial x}=0.$$

3. Край $y=b$ свободен.

$$\frac{\partial w_1}{\partial y^2}+\mu\frac{\partial w_1}{\partial z^2}=0,\ \frac{\partial^3 w_1}{\partial y^3}+(2-\mu)\frac{\partial^3 w_1}{\partial z\partial y^2}.$$

Функции $w_k(y,z)$, удовлетворяющие этим граничным условиям на краях $y=0,\ b;\ z=\pm a$, можно принять в виде

$$w_k(y,z)=\cos\frac{k\pi z}{2a}\left[\frac{1}{k}\sin\frac{k\pi(b-y)}{2b}-\frac{1}{k+2}\sin\frac{(k+2)\pi(b-y)}{2b}+\right.$$

$$\left.+E_k\left(\cos\frac{k\pi(b-y)}{b}-\cos\frac{(k+2)\pi(b-y)}{b}\right)\right], \qquad (6)$$

где $E_k = -\frac{(-1)^{\frac{k-1}{2}}}{8}\left(1+\frac{\mu\lambda^2 k}{k+2}\right)$, $\lambda = \frac{a}{b}k = 1, 3, 5, \ldots$.

3. Методы решения. Решение интегро-дифференциальных уравнений (4), (5), удовлетворяющее граничным условиям задачи, задаем в виде

$$w_1(y,z,t) = \sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty} C_k(t) w_k(y,z), \tag{7}$$

где $C_k = C_k(t)$ – искомые функции времени; координатные функции $w_k(y,z)$ удовлетворяют граничным условиям закрепления краев плотины - пластинки.

Подставляя (7) в уравнение (5) и выполняя процедуру Бубнова-Галеркина для определения безразмерных $C_k(t)$, получим следующую систему интегродифференциальных уравнений:

$$\sum_{k=1,3,\ldots}^{\infty}\left[L_{mk}\ddot{C}_k(t) + \omega^2\left(1-R^*\right)M_{mk}C_k(t)\right] + a_0\omega^2 N_m(t) = 0. \tag{8}$$

Здесь

$$L_{mk} = \frac{1}{ab}\left\{\int_{0-a}^{b}\int^{a}\left(1-\alpha^*\frac{y}{b}\right)w_k(y,z)w_m(y,z)dydz + \frac{\rho}{\rho_1}\left(\frac{1}{h_0}\right)\times\right.$$

$$\left.\times\int_{0-a}^{b}\int^{a} A_k\cos\alpha\cos[\gamma_k(b-y)]\exp[-\gamma_k y tg\alpha](z-a)w_m(y,z)dydz\right\},$$

$$M_{mk} = \frac{b^3}{a\pi^4}\int_{0-\alpha}^{b}\int^{\alpha} D\left(1-R^*\right)\left[\frac{\partial^4 w_k}{\partial y^4} + 2\frac{\partial^4 w_k}{\partial y^2\partial z^2} + \frac{\partial^4 w_k}{\partial z^4} - \right.$$

$$-\frac{6\alpha^*\left(1-\alpha^*\frac{y}{b}\right)}{\left(1-2\alpha^*\frac{y}{b}\right)}\left(\frac{\partial^3 w_k}{\partial y^3}+\lambda^2\frac{\partial^3 w_k}{\partial y\partial z^2}\right)+\frac{6\left(\alpha^*\right)^2}{\left(1-2\alpha^*\frac{y}{b}\right)}\times$$

$$\times\left(\frac{\partial^2 w_k}{\partial y^2}+\mu\lambda^2\frac{\partial^2 w_k}{\partial z^2}\right)\Bigg]w_m(y,z)dydz,$$

$$N_m(t)=\frac{1}{aba_0\omega^2}\int_{0-a}^{b}\int^{a}\Bigg\{\left(1-\alpha^*\frac{y}{b}\right)\ddot{w}_0(t)-\frac{\rho}{\rho_1}\frac{1}{h_0}\Bigg[\frac{\partial\varphi_0}{\partial t}+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial\varphi_0}{\partial x}\right)^2+$$

$$+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial\varphi_0}{\partial y}\right)^2\Bigg]_{x=ytg\alpha+w_0(t)}\cos\alpha\Bigg\}w_m(y,z)dydz.$$

В расчетах было использовано ядро Колтунова – Ржаницына:

$$R(t)=At^{\alpha-1}\exp(-\beta t),\ \ A,\ \beta>0,\ \ 0<\alpha<1.$$

4. Численные результаты и обсуждение. Интегрирование системы уравнений (8), полученное на основе многочисленной аппроксимации прогибов, выполнено с помощью численного метода, основанного на использовании квадратурных формул [8 – 11].

Результаты вычислений отражены на графиках, приведенных на рис. 1 – 3.

На рис.1 представлена форма колебаний срединной точки упругой плотины-пластины (A = 0 – кривая 1) и плотины-пластины с учетом вязкоупругих свойств материала (A = 0.05, 0.1 – кривые 2, 3).

Из этих результатов видно влияние вязкоупругих свойств материала плотины-пластины. Решения упругой и вязкоупругой задачи в начальный период времени мало отличаются друг от друга. С течением времени вязкоупругие свойства оказывают существенное влияние, что приводит к заметному отличию решений. Заметим также, что с увеличением параметра A амплитуда колебаний уменьшается. Наблюдения показывают, что с увеличением коэффициента A частота колебаний также уменьшается [12 – 17].

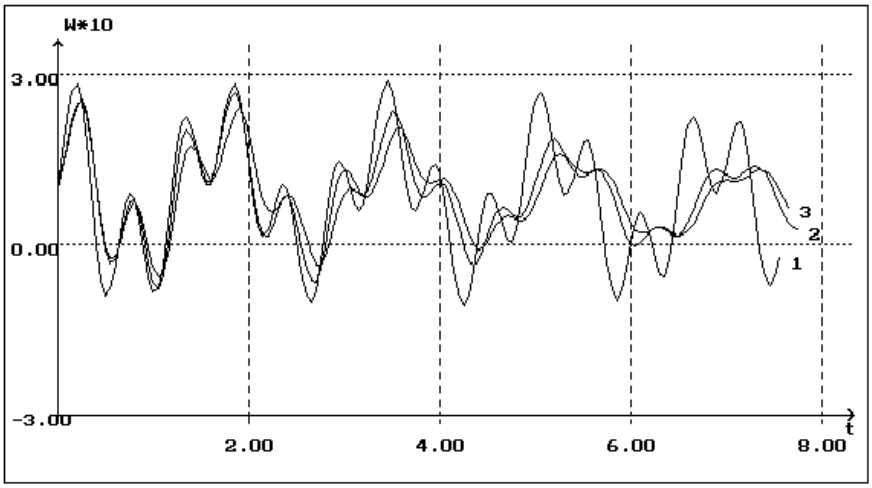


Рис. 1. Форма колебаний серединной точки упругой плотины-пластины (A = 0,05, кривая 1)

Исследовалось влияние гидродинамического давления воды на поведение плотины-пластины. На рис. 2 приведены графики кривых при различных значениях параметра ρ/ρ_1. Анализ результатов показывает, что с увеличением значения параметра ρ/ρ_1, амплитуда колебаний плотины-пластины уменьшается. Таким образом, учет гидродинамического давления воды приводит к уменьшению амплитуды колебаний. Благодаря влиянию воды на собственные частоты замедляются колебания плотины-пластины.

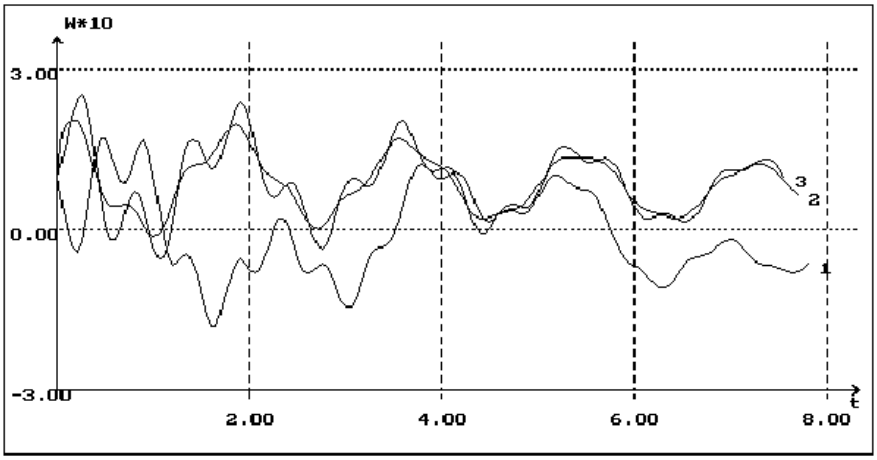


Рис. 2. Форма колебаний серединной точки упругой плотины-пластины с учетом вязкоупругих свойств материала
(A = 0,05, 0,1, кривые 2 и 3)

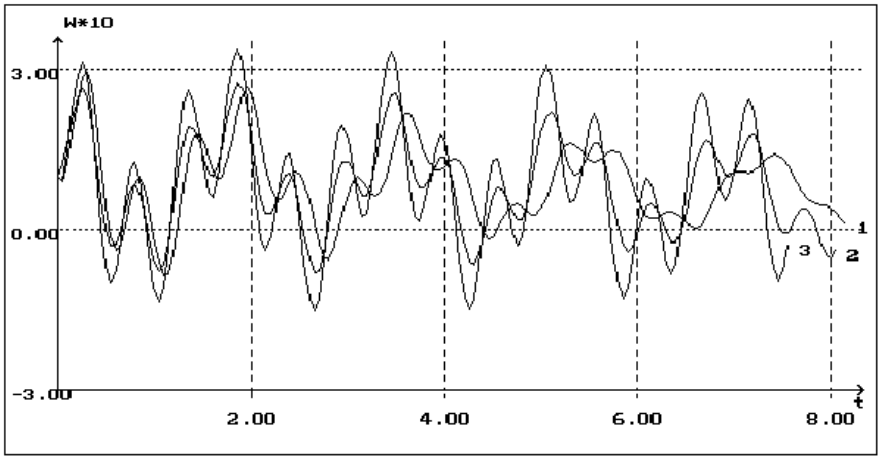


Рис. 3. Графики w функции прогиба в срединной точке плотины-пластины при различных значениях α: α = 0, 25 (1); α = 0, 5 (2); α = 0, 75 (3)

Изучено влияние параметра α. На рис. 3 представлены графики w функции прогиба в срединной точке плотины-пластины при различных значениях α. Заметим, что с увеличением значения α амплитуда колебаний увеличивается, а частота колебаний уменьшается [18 – 23].

Выводы. Построены математические модели задач динамики плотины-пластины переменной толщины с учетом:

– вязкоупругих свойств материала;

– сил инерции, возникающих от движения плотины-пластины как твердого тела и от деформации ее. На основе метода Бубнова-Галеркина в сочетании с численным методом, основанном на использовании квадратурных формул:

– разработана методика решения взаимосвязанных интегро-дифференциальных уравнений типа Вольтерра;

– разработан вычислительный алгоритм, позволяющий исследовать задачи колебаний плотины-пластины постоянной толщины с учетом вязкоупругих свойств материала.

– установлено, что учет вязкоупругих свойств материала плотины-пластины приводит к уменьшению амплитуд и частот колебаний.

References:

1. Elia Efraim, and Moshe Eisenberger (2007), Exact vibration analysis of variable thickness thick annular isotropic and FGM plates, *Journal of Sound and Vibration*, 299 (4 – 5), 720–738.

2. Gupta A.K., and Kumar Lalit (2008), Thermal effects on vibration of non-homogeneous visco-elastic rectangular plate of linearly varying thickness in two directions, *Meccanica*, Vol. 43, pp. 47–54.

3. Gupta A.K., and Khanna Anupam (2010), Thermal Effect On Vibrations Of Parallelogram Plate Of Linearly Varying Thickness, *Advanced Studies Of Theoretical Physics*, Vol. 4, No.17, pp: 817-826.

4. Pradeep V., and Ganesan N. (2007), Buckling and vibration of rectangular composite viscoelastic sandwich plates under thermal loads, *Composite Structure*, Vol. 77 (4), pp. 419–429.

5. Tomar J.S., and Gupta A.K. (1983), Thermal effect on frequencies of an orthotrophic rectangular plate of linearly varying thickness, *Journal Sound and Vibration*, Vol. 90 (3), pp. 325–331.

6. Khudoynazarov Kh., and Khudoyberdiyev Z.B. (2020), Unsteady vibrations of a three-layer plate with an asymmetric structure. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 614 012061.

7. Filippov I.G., and Kudainazarov K. (1998), Boundary-value problems of longitudinal vibrations of circular cylindrical shells. *International Applied Mechanics* 34 (12), pp. 1204–1210.

8. Badalov F.B., Khudayarov B.A., and Abdukarimov A. (2007), Effect of the heredity kernel on the solution of linear and nonlinear dynamic problems of heredity deformable systems, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 36, pp. 328–335. https://doi.org/10.3103/S1052618807040048

9. Badalov F.B. (1987), *Methods for Solving Integral and Integro-differential Equations of the Heredity Theory of Viscoelasticity* (Tashkent: Mechnat).

10. Badalov F.B., Eshmatov Kh., and Yusupov M. (1987), Some Methods of Solution of the Systems of Integro-differential Equations in Problems of Viscoelasticity *Applied Mathematics and Mechanics*, 51 (5), pp. 867-871.

11. Khudayarov B.A., and Turaev F.Zh. (2019), Mathematical Simulation of Nonlinear Oscillations of Viscoelastic Pipelines Conveying Fluid, *Applied Mathematical Modelling*, 66, pp. 662–679, https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.10.008.

12. Khudayarov B.A., Komilova Kh. M., and Turaev F.Zh. (2020), Dynamic analysis of the suspended composite pipelines conveying pulsating fluid, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 75, pp. 103-148. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103148.

13. Khudayarov B.A., Komilova Kh.M., and Turaev F.Zh. (2019) The effect of two-parameter Pasternak foundations on the oscillations of composite pipelines conveying gas-containing fluids, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 176, 103946 https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.103946.

14. Khudayarov B.A., and Turaev F.Zh. (2019) *Nonlinear vibrations of fluid transporting pipelines on a viscoelastic foundation Magazine of Civil Engineering*, 86 (2), pp. 30–45, doi: 10.18720/MCE.86.4.

15. Khudayarov B.A., Komilova Kh.M., and Turaev F.Zh. (2019), The effect of two-parameter Pasternak foundations on the oscillations of composite pipelines conveying gas-containing fluids, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 176, 103946, https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.103946.

16. Khudayarov B.A., and Turaev F.Zh. (2019), Nonlinear supersonic flutter for the viscoelastic orthotropic cylindrical shells in supersonic flow**,** *Aerospace Science and Technology*, 84, pp. 120-130, doi: 10.1016/j.ast.2018.08.044

17. Khudayarov B.A. (2019), Modeling of supersonic nonlinear flutter of plates on a visco-elastic foundation, *Advances in aircraft and spacecraft science*, 6 (3), pp. 257–272, https://doi.org/10.12989/aas.2019.6.3.257

18. Khudayarov B., Turaev F. and Kucharov O. (2019), Computer simulation of oscillatory processes of viscoelastic elements of thin-walled structures in a gas flow, *E3S Web of Conferences*, 97, pp. 60–80, https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199706008

19. Khudayarov B.A., Ruzmetov K., Turaev F., Vakhobov V., Khidoyatova M., Mirzaev S.S. and Abdikarimov R. (2020), Numerical modeling of nonlinear vibrations of viscoelastic shallow shells, *Engineering Solid Mechanics*, 8 (3), pp. 199–204.

20. Khudayarov B.A. (2005), Numerical Analysis of the Nonlinear Oscillation of Viscoelastic Plates, *International Applied Mechanics*, 41, pp. 538–542.

21. Khudayarov B.A., and Bandurin N.G. (2007), Numerical Investigation of Nonlinear Vibrations of Viscoelastic Plates and Cylindrical Panels in a Gas Flow, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 48, pp. 279–284.

22. Khudayarov B.A., and Bandurin N.G. (2005), Nonlinear Oscillation of Viscoelastic Orthotropic Cylindrical Panels, *Mathematical Models and Computer Simulations*, 17, pp. 79–86.

Статью представил доктор технических наук, профессор Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" Сергей Леонов

Поступила (received) 06.03.2023

Khudayarov Bakhtiyar, Dr.Tech.Sci., Professor
Tashkent institute of irrigation and agricultural mechanization engineers
Str. Kari-Niyazova, 39, Tashkent, Uzbekistan, 100000
Tel.:(99871)2370986, bakht-flpo@yandex.ru
ORCID ID: 0000-0002-2876-8447

Turaev Fozilzhon, Assistent
Tashkent institute of irrigation and agricultural mechanization engineers
Str. Kari-Niyazova, 39, Tashkent, Uzbekistan, 100000
Tel.:(99871)2370986, t.fozil86@mail.ru

Yuldashev Nurilla, PhD
Tashkent institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers Higher mathematics,
Str. Kari Niyaziy, 39, Tashkent, Uzbekistan, 100000,
Tel: +998911658674, email:
ORCID ID: 0000-0002-4542-1229

УДК 004.02

Моделювання коливань греблі-пластинки змінної товщини / Б.А. Худаяров, А.А. Тухтабоєв, О.Р. Кучаров, Ф.Ж. Тураєв, Н.М. Юлдашев // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2023. – № 1–2 (9–10). – С. 27 – 39.

Спадкова теорія в'язкопружності надала широкі можливості для опису динамічних процесів деформування різноманітних матеріалів. Однак, реалізація цих можливостей у багатьох випадках утруднена через відсутність адекватного математичного апарату, особливо при дослідженні динамічних процесів у в'язкопружних системах. Є принципові підстави вважати, що дуже перспективним у сенсі є апарат інтегральних рівнянь. Використання при цьому сучасних можливостей обчислювальної техніки дозволяє створювати ефективні технології математичного моделювання для завдань великої складності, до яких відносяться задачі динаміки та динамічної стійкості в'язкопружних елементів тонкостінних конструкцій зі змінною жорсткістю. У роботі побудовано математичні моделі завдань динаміки, розроблено ефективні обчислювальні алгоритми, досліджено вимушені коливання греблі-пластини з перемінною жорсткістю. Наведено результати досліджень завдань про коливання греблі-пластини змінної товщини з урахуванням в'язкопружних властивостей матеріалу, гідродинамічного тиску води, ґрунту та сейсмічного навантаження. Іл.: 3, Бібліогр.: 22 назв.

Ключові слова: в'язкопружні системи; інтегральні рівняння; математичне моделювання; вимушені коливання греблі-пластини

УДК 004.02

Моделирование колебаний плотины-пластинки переменной толщины / Б.А. Худаяров, А.А. Тухтабоев, О.Р. Кучаров, Ф.Ж. Тураев, Н.Н. Юлдашев // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2023. – № 1–2 (9–10). – С. 27 – 39.

Наследственная теория вязкоупругости предоставила широкие возможности для описания динамических процессов деформирования разнообразных материалов. Однако, реализация этих возможностей во многих случаях затруднена из-за отсутствия адекватного математического аппарата, в особенности при исследовании динамических процессов в вязкоупругих системах. Имеются принципиальные основания считать, что весьма перспективным в этом смысле является аппарат интегральных уравнений. Использование при этом современных возможностей вычислительной техники позволяет создавать эффективные технологии математического моделирования для задач большой сложности, к которым относятся задачи динамики и динамической устойчивости вязкоупругих элементов тонкостенных конструкций с переменной жесткостью. В работе построены математические модели задач динамики, разработаны эффективные вычислительные алгоритмы, исследованы вынужденные колебания плотины-пластины с перерменной жесткостью. Приведены результаты исследований задач о колебаниях плотины-пластины переменной толщины с учетом вязкоупругих свойств материала, гидродинамического давления воды, грунта и сейсмической нагрузки. Figs.:3, Refs.: 22 titles.

Ключевые слова: вязкоупругие системы; интегральные уравнения; математическое моделирование; вынужденные колебания плотины-пластины.

UDC 004.02

Simulation of oscillation of a dam-plate of variable thickness / B.A. Khudayarov, A.A. Tukhtaboev, O.R. Kucharov, F.Zh. Turaev, N.N. Yuldashev // Herald of the National

Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2023. – № 1 (9). – P. 27 – 39.

The hereditary theory of viscoelasticity has provided ample opportunities for describing the dynamic processes of deformation of various materials. However, the implementation of these possibilities in many cases is difficult due to the lack of an adequate mathematical apparatus, especially in the study of dynamic processes in viscoelastic systems. There are fundamental reasons to believe that the apparatus of integral equations is very promising in this sense. The use of modern computer technology capabilities makes it possible to create effective mathematical modeling technologies for problems of great complexity, which include problems of dynamics and dynamic stability of viscoelastic elements of thin-walled structures with variable stiffness. Mathematical models of dynamic problems are constructed, efficient computational algorithms are developed, and forced vibrations of a dam-plate with variable stiffness are studied. The results of studies of problems on vibrations of a dam-plate of variable thickness are given, taking into account the viscoelastic properties of the material, the hydrodynamic pressure of water, soil and seismic load. Figs.:3, Refs.: 22 titles.

Keywords: viscoelastic systems; integral equations; math modeling; forced vibrations of a dam-plate

Вісник Національного технічного університету "ХПІ", 2023, № 1–2 (9–10)
ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

УДК 004.391 **DOI: 10.20998/2411-0558.2023.01.03**

***Д. В. ПРОЧУХАН*,** ст. викл., Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", м. Харків

НЕЙРОМЕРЕЖЕВЕ МОДЕЛЮВАННЯ В РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ УРАЖЕННЯ СІТКІВКИ ОКА ДІАБЕТИЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ

З метою визначення стадії ураження сітківки ока діабетичного походження застосовано механізми машинного навчання. Обґрунтовано використання згорткової нейронної мережі DenseNet для якісного розпізнавання і сегментації зображень. Проведено модифікацію мереж DenseNet-121, DenseNet-169 і DenseNet-201 шляхом додавання додаткових шарів. Розроблено програмні механізми обробки зображень за допомогою розмиття Гауса, видалення чорних рамок і мінімізації впливу зміни положення зображень на якість розпізнавання. Здійснено побудування і навчання моделі. Отримано високі показники точності розпізнавання. Для мережі DenseNet-201 отримано показник 97.9%, що переважає показники мереж DenseNet-121 і DenseNet-169. Іл.: 3. Табл.: 1. Бібліогр.: 13 назв.

Ключові слова: згорткові нейронні мережі, моделювання, машинне навчання, сегментація, розпізнавання, діабет.

Постановка проблеми. Цукровий діабет є актуальною проблемою сучасного суспільства, оскільки є причиною значного погіршення загального стану здоров’я людини. Вказана хвороба призводить до уражень зору, серцевих захворювань. При виникненні ускладнень у хворого з цукрового діабету серцеві захворювання можуть спричинити інфаркт чи інсульт. Інфаркт або інсульт при цукровому діабеті може призвести до смерті. Ниркова недостатність дуже часто є наслідком цукрового діабету. Для важких форм цукрового діабету необхідне хірургічне втручання. Хірургічні операції у тяжких випадках вимагають видалення кінцівок. За даними Всесвітньої організації охорони здоров’я станом на кінець 2022 року у світі налічувалося 422 мільйона хворих на діабет. Кожен рік фіксується 1.5 мільйони летальних випадків.

Тривале захворювання цукровим діабетом може призвести до ураження сітківки ока. Прогресування вказаної хвороби призводить до погіршення зору. Ураження сітківки ока виявити вчасно дуже складно. Вказане захворювання проявляється незначними симптомами, доки не стає занадто пізно для ефективного лікування. Діагностика ураження сітківки ока є непростою задачею, яка вимагає від спеціаліста вміти

© Д.В. Прочухан, 2023

здійснювати точний ретельний аналіз зображень очного дна сітківки ока. Неправильне діагностування може призвести до затримки лікування і погіршення стану здоров'я. Спеціалісти можуть визначити хворобу за наявністю судинних аномалій, які пов'язані з ураженням сітківки ока. В Україні в сучасних умовах рівень цукрового діабету високий. Кожен рік збільшується кількість людей з вказаним захворюванням. Інфраструктура, необхідна для діагностування ураження сітківки ока, розвинута в нашій країні не в повному обсязі, обладнання не вистачає. Попередні дослідження в цій галузі пов'язані з використанням машинного навчання. Визначення ураження сітківки ока здійснювалося за допомогою нейронних мереж. Тому необхідно розвинути успіхи попередніх робіт, розробивши систему, що забезпечить високі показники точності розпізнавання ураження сітківки ока діабетичного походження.

Аналіз літератури. В дослідженнях вчені значну роль приділяють обробці зображень для вирішення задачі ураження сітківки ока діабетичного походження. В роботі [1] для вирішення вказаної задачі автори приділяють значну увагу такому питанню як якісна обробка зображень. Якісна обробка зображень сприяє виявленню захворювання на ранній стадії. Для якісної обробки зображень в роботі [2] пропонується використання сучасних моделей відеокамер. В роботі [3] розглянуто способи ефективного використання портативних відеокамер для роботи з зображеннями. В дослідженні [4] пропонується зробити подвійний аналіз зображення для покращення точності. В роботі [5] визначаються ефективні засоби для підвищення яскравості вхідних даних. В дослідженні [6] пропонуються інноваційні шляхи для покращення існуючих методів обробки зображень. В дослідженні [7] пропонуються шляхи обробки зображень з високим ступенем зашумлення. У вказаному дослідженні також пропонуються методи для вирішення проблеми різної роздільної здатності зображень. Після обробки зображень необхідно провести класифікацію зображень. На наступному кроці необхідно провести сегментацію зображення. Останній етап – виявлення ураження сітківки ока. В роботі [8] обгрунтовано, що другий і третій етапи з вказних найбільш складні в реалізації системи. Також доведено, що перший етап більш простий при розробці програмного комплексу ураження сітківки ока. В дослідженнях вчених розглядаються різні моделі типів згорткових нейронних мереж, порівнюються їх швидкодія, точність, ефективність. В роботі [9] було порівняно точність і швидкія моделей згорткових нейронних мереж ResNet, DenseNet та DetNet та значний вплив гіперпараметрів на точність вказаних моделей. В дослідженні [10] вказуються переваги архітектури DenseNet-100 у порівнянні з ResNet-101.

У дослідженні [11] підкреслюються переваги згорткової нейронної мережі DensNet. В роботі [12] наводяться особливості архітектури DensNet-121. В дослідженні [12] також наводяться переваги вказаної архітектури при вирішенні задач сегментації медичних зображень. В роботі [13] пропонується підхід глибокого навчання для ранньої діагностики ураження сітківки ока діабетичного походження з використанням згорткової мережі DenseNet-169.

Метою даної роботи є створення системи визначення ступеня важкості ураження сітківки ока за допомогою модифікації архітектури згорткових нейронних мереж DenseNet, порівння показників точності модифікованих архітектур DenseNet-121, DensNet-169 та DensNet-201.

Теоретичні передумови. В дослідженнях, зазначених вище, було продемонстровано, що згорткові нейронні мережі можуть бути значно ефективнішими, якщо в них забезпечено короткий зв’язок між шарами, які знаходяться ближче до ділянок входу та виходу. Нейронна мережа Dense Convolutional Network (DenseNet) використовує цю закономірність і з'єднує кожен шар з кожним наступним шаром. Вказана особливість спрацьовує під час розповсюдження сигналу. На відміну від інших типів згорткових мереж, що мають однакову кількість шарів та зв’язків, DenseNet має L(L+1)/2 зв’язків. Особливістю вказаної згорткової нейронної мережі є те, що карти ознак всіх попередніх шарів застосовуються як вхідні дані. При цьому власні карти ознак використовуються як вхідні дані у всі наступні шари.

Шари Dense Block мережі DenseNet мають тісний зв'язок з кожним наступним блоком. На рис. 1 представлено схематичне зображення роботи вказаного механізму.

Основні переваги вказаної згорткової нейронної мережі при її застосовуванні для розв’язування задач медичної діагностики полягають в тому, що вона забезпечує високі показники точності розпізнавання та сегментації зображень. Для вирішення вказаних задач можна використовувати невеликі набори даних. Ще однією перевагою DenseNet є мала кількість гіперпараметрів у порівнянні з аналогами. Головними характеристиками вказаної згорткової нейронної мережі є кількість шарів та темп зростання. До недоліків DenseNet необхідно віднести високі вимоги до обчислювального обладнання за рахунок використання великої кількості зв’язків. В дослідженні було розглянуто наступні версії згорткової нейронної мережі: DenseNet-121, DenseNet-169, DenseNet-201. Проведено модифікацію вказаних згорткових нейронних мереж шляхом додавання до вказаних моделей шарів GlobalAveragePooling2D, Dropout і Dense.

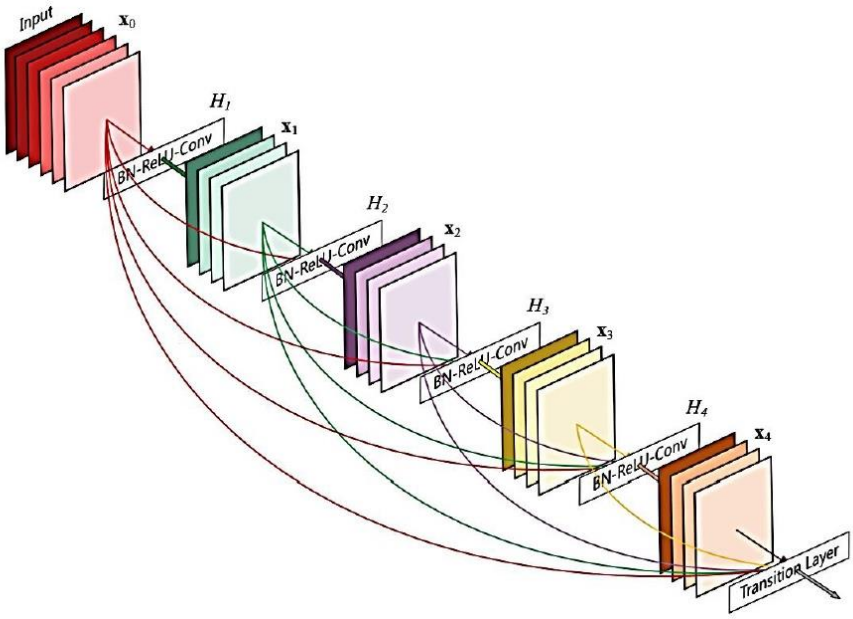


Рис. 1. Зв’язок шарів Dense Block мережі DenseNet

Доданий шар GlobalAveragePooling2D здійснює обробку отриманих даних. На початку обробки вони зберігаються у вигляді матриць.

Після виконання процесу обробки шар GlobalAveragePooling2D дозволяє здійснити перетворення матричних даних у векторні. Це відбувається шляхом знаходження середнього значення елементів матриці. Механізм вказаного процесу представлено на рис. 2 .

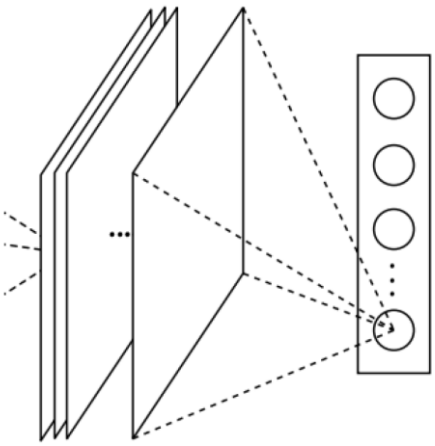


Рис 2. Механізм роботи шару GlobalAveragePooling2D

Використання вказаного методу дозволило отримати більш високі показники ефективності мережі у порівнянні з оптимізаторами SGD, Momentum, RMSProp.

Структуру модифікованої мережі DenseNet. представлено на рис. 3.

Рис. 3. Структура модифікованої мережі DenseNet

Для проведення дослідження було використано набір даних APTOS, який містить 5590 зображень. Начальний набір даних містить 3662 зображення. Тестовий набір даних містить 1928 зображень. Зважаючи на те, що в тестовому наборі відсутні мітки, то в дослідженні буде використано тільки навчальний набір даних з 3662 зображень, в якому передбачена розмітка. За ступенем важкості ураження сітківки ока діабетичного походження зображення розмічені від 0 до 4. В наборі даних APTOS міткою 0 розмічені зображення, які не містять ознак вказаного захворювання. В вказаному наборі 1805 зображень вказаного типу. Міткою 1 розмічені зображення з початковою стадією ураження сітківки ока діабетичного походження. У наборі даних 999 зображень вказаного типу. Міткою 2 розмічені зображення з помірною стадією ураження сітківки ока діабетичного походження. В наборі APTOS 370 зображень вказаного типу. Міткою 3 розмічені зображення з важкою стадією ураження сітківки ока діабетичного походження. В наборі APTOS 295 зображень вказаного типу. Міткою 4 розмічені зображення з найважчою стадією ураження сітківки ока діабетичного походження. В наборі APTOS 193 зображення вказаного типу. Відсоткове відношення різних типів захворювання має значні розбіжності. Зображення з міткою 0 складають 49.29%, а зображення з міткою 4 складають 5,27%. Завдяки розбіжностям зроблено перерахунок ваг для кожного класу. Вказаний перерахунок вирішує проблему незбалансованості набору даних і призводить до вирівнювання розподілу даних. Розглянутий механізм інтегровано в систему визначення ступеня ураження сітківки ока діабетичного походження.

В наборі APTOS 193 зображення вказаного типу. Відсоткове відношення різних типів захворювання має значні розбіжності. Зображення з міткою 0 складають 49.29%, а зображення з міткою 4

складають 5,27%. Для запобігання розбіжностей здійснено навчання ваг методом стохастичного грієнтного спуску.

Розглянутий механізм інтегровано в систему визначення ступеня ураження сітківки ока діабетичного походження.

Для подальшої розробки і побудування моделі вхідні зображення було розділено на навчальну і валідаційну вибірки. Для навчальної вибірки обрано 80% зображень. Для валідаційної вибірки 20% зображень. Навчальна вибірка склала 2930 зображень. Валідаційна вибірка склала 732 зображення.

Програмну реалізацію системи визначення ступеня ураження сітківки ока діабетичного походження здійснено на мові програмування Python в середовищі Google Colaboratory. Зважаючи на те, що згорткові нейронні мережі класу DenseNet приймають для обробки зображення розміром 224 на 224, розроблено функцію для зменшення зображення до вказаного розміру.

Для зниження зашумленості зображення використано метод обрізання чорних рамок. Для вказаного методу використовується наступний алгоритм. Для чорно-білого зображення знаходяться чорні плями за допомогою фільтру. Фільтр сприяє вилученню зайвих чорних рамок. Якщо у всьому зображенні переважає чорний колір, то обрізання не відбувається. Для кольорового зображення застовується наступний алгоритм. Спочатку зображення перетворюється у чорно-біле, а потім для отриманого зображення застосовується алгоритм, описаний вище.

Для вирішення проблеми недостатнього освітлення і зменшення шуму на зображеннях використано фільтр розмивання Гауса. Використання вказаного механізму дозволяє зменшити різкість неважливих елементів зображення і збільшити чіткість необхідних елементів. Пікселі на зображеннях мають високе стандартне відхилення, що спричиняє безліч варіацій. Розмиття Гауса забезпечує нормальний розподіл значень пікселів, згладжуючи вказані варіації. Кожен піксель при застосуванні цього механізму набуває середньозваженого значення щодо сусідніх пікселів. Різкість необхідних елементів зображення досягається зменшенням радіусу розмиття.

Для реалізації вказаного алгоритму використано функцію бібліотеки OpenCV2 GaussianBlur. Алгоритм роботи функції GaussianBlur полягає в тому в тому, що кожен піксель у зображенні заміщується на суму довколишніх, взятих з певними ваговими коефіцієнтами. Третій аргумент функції визначає стандартне відхилення ядра Гауса. Встановлення цього значення в 0 дозволяє автоматично визначити оптимальне відхилення.

Для зменшення зашумлення цифрового простору, BGR необхідно змінити на RGB. Для реалізації застосовано функцію бібліотеки OpenCV2

cvtColor. В перший параметр вказаної функції передається зображення, а другий набуває значення cv2. COLOR_ BGR2RGB.

В дослідженні також створено алгоритм, який забезпечує відстуність впливу таких операцій із зображеннями як поворот на кінцевий результат визначення ступеня захворювання. В розробленому програмному механізмі опрацювання даних здійснюється таким чином, що всі дані не зберігаються, а здійснюється обробка тільки певних даних у необхідний для цього час. Згорткова нейронна мережа в процесі навчання створює фільтри, які допомагають класифікувати зображення у різних положеннях.

В розробленому програмному забезпеченні здійснено перетворення міток у вектори розміром 1 на 5. Кожна стадія захворювання є важчою, ніж попередня. З вказаних міркувань випливає, що доцільно використовувати наступний підхід при формуванні векторів. При відсутності ураження сітківки ока діабетичного походження вектор набуває значення (1,0,0,0,0). У випадку початкової стадії захворювання вектор дорівнює (1,1,0,0,0). У випадку помірного ураження сітківки ока діабетичного походження вектор набуває значення (1,1,1,0,0). Для важкої стадії вектор набуває значення (1,1,1,1,0). Для останньої найважчою стадії вектор набуває значення (1,1,1,1,1). Шари моделі побудовано за допомогою бібліотеки Keras. При компіляції використано метрику accuracy. Для параметра lr оптимізатора Adam встановлено значення 0.00001. Для процесу тренування мережі використано метод fit_generator.

Експериментальні результати. В процесі дослідження було виявлено, що для досягнення максимальної точності необхідно 16 епох. Програма обчислює ймовірність належності зображення до певного класу. У разі ймовірності, що перевищує 50%, зображення слід віднести до цього класу. В результаті експерименту з одним із зображень було отримано значення 0.91, 0.85, 0.65. 0.56, 0.25. Після перетворення у 0 та 1 отримано вектор (1,1,1,1,0), тобто в цьому випадку визначено важкий ступінь захворювання.

В результаті обробки іншого зображення було отримано значення 0.92, 0.45, 0.35, 0.22, 0.15. Після перетворення у 0 та 1 отримано вектор (1, 0, 0, 0, 0), тобто в цьому випадку визначено початковий ступінь захворювання.

В табл. 1 наведено показники точності, які було отримано для модифікованих моделей DenseNet.

Таблиця 1

Точність визначення захворювання

Модифікована модель мережі	DenseNet-121	DenseNet-169	DenseNet-201
Точність, %	97,4	97,7	97,9

Висновки. 1. Обґрунтовано використання згоркових нейронних мереж DenseNet для визначення стадії ураження сітківки ока діабетичного походження.

2. Модифікація вказаних нейромереж шляхом додавання шарів GlobalAveragePooling2D, Dropout та Dense призводить до покращення точності розпізнавання.

3. Програмна реалізація розмиття по Гаусу, видалення чорних рамок і мінімізація впливу зміни положення зображень покращують якість подальшої обробки зображень.

4. Модифікована мережа DenseNet-201 має більш високу точність розпізнавання, ніж модифіковані мережі DenseNet-169 і DenseNet-121.

References:

1. Dai, L., Wu, L., Li, H. [et al.]. (2021) "A deep learning system for detecting diabetic retinopathy across the disease spectrum", Nature Communications. 2021. Vol. 12, № 3242. pp.1–11.

2. Chen, P. N., Lee, C. C., Liang, C. M., Pao, S. I., Huang, K. H., & Lin, K. F. (2021) "General deep learning model for detecting diabetic retinopathy", BMC Bioinformatics.. Vol. 22, № 84. pp. 1–14.

3. Nunez do Rio, J. M., Nderitu, P., Bergeles, C., Sivaprasad, S., Tan, G. S., & Raman, R. (2022). "Evaluating a Deep Learning Diabetic Retinopathy Grading System Developed on Mydriatic Retinal Images When Applied to Non-Mydriatic Community Screening", Journal of Clinical Medicine, Vol. 11, № 3, pp. 1–11.

4. Baget-Bernaldiz, M., Pedro, R. A., Santos-Blanco, E., Navarro-Gil, R., Valls, A., Moreno, A., ... & Puig, D. (2021), "Testing a Deep Learning Algorithm for Detection of Diabetic Retinopathy in a Spanish Diabetic Population and with MESSIDOR Database", Diagnostics. 2021. Vol. 11, № 8, pp. 1–11.

5. Kaushik, H., Singh, D., Kaur, M., Alshazly, H., Zaguia, A., & Hamam, H. (2021), "Diabetic Retinopathy Diagnosis From Fundus Images Using Stacked Generalization of Deep Models", IEEE Access, Vol. 9, pp. 108276–108292.

6. Khan, Z., Khan, F. G., Khan, A., Rehman, Z. U., Shah, S., Qummar, S., ... & Pack, S. (2021), "Diabetic Retinopathy Detection Using VGGNIN a Deep Learning Architecture", IEEE Access, Vol. 9, pp. 61408–61416.

7. Sikder, N., Masud, M., Bairagi, A. K., Arif, A. S. M., Nahid, A. A., & Alhumyani, H. A. (2021), "Severity Classification of Diabetic Retinopathy Using an Ensemble Learning Algorithm through Analyzing Retinal Images", Symmetry, Vol. 13, № 4, pp. 1–26.

8. Li, T., Gao, Y., Wang, K., Guo, S., Liu, H., & Kang, H. (2019), "Diagnostic assessment of deep learning algorithms for diabetic retinopathy screening", Information Sciences, Vol. 501, № 13, pp. 511–522.
9. Adriman, R., Muchtar, K., & Maulina, N. (2021), "Performance Evaluation of Binary Classification of Diabetic Retinopathy through Deep Learning Techniques using Texture Feature", Procedia Computer Science, Vol. 179, pp. 88–94.
10. Nazir, T., Nawaz, M., Rashid, J., Mahum, R., Masood, M., Mehmood, A., ... & Hussain, A. (2021), "Detection of Diabetic Eye Disease from Retinal Images Using a Deep Learning Based CenterNet Model", Sensors. Vol. 21, № 16, pp. 1–18.
11. Samanta, A., Saha, A., Satapathy, S. C., Fernandes, S. L., & Zhang, Y. D. (2020), "Automated detection of diabetic retinopathy using convolutional neural networks on a small dataset", Pattern Recognition Letters, Vol. 135, pp. 293–298.
12. Ayala, A., Ortiz Figueroa, T., Fernandes, B., & Cruz, F. (2021), "Diabetic Retinopathy Improved Detection Using Deep Learning", Applied Sciences, Vol. 11, № 24, pp. 1–11.
13. Mushtaq, G., & Siddiqui, F. (2021), "Detection of diabetic retinopathy using deep learning methodology", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 1070, № 012049, pp.1–13.

Статтю представив доктор технічних наук, професор ХНУРЕ Олег Григорович Руденко.

Поступила (received) 06.07.2023

Dmytro Prochukhan, senior lecture**,**
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute",
Chkalova str., 17, Kharkiv, Ukraine, 61070
Tel.;+38 099 701 12 49, e-mail: d.prochukhan@khai.edu
ORCID ID: 0000-0002-4622-1015

УДК 004.391

Нейромережеве моделювання в реалізації системи визначення ураження сітківки ока діабетичного походження / Прочухан Д.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2023. – № 1–2 (9–10). – С. 40 – 49.

З метою визначення стадії ураження сітківки ока діабетичного походження застосовано механізми машинного навчання. Обґрунтовано використання згорткової нейронної мережі DenseNet для якісного розпізнавання і сегментації зображень. Проведено модифікацію мереж DenseNet-121, DenseNet-169 і DenseNet-201 шляхом додавання додаткових шарів. Розроблено програмні механізми обробки зображень за допомогою розмиття Гауса, видалення чорних рамок і мінімізації впливу зміни положення зображень на якість розпізнавання. Здійснено побудовання і навчання моделі. Отримано високі показники точності розпізнавання. Для мережі DenseNet-201 отримано показник 97.9%, що переважає показники мереж DenseNet-121 і DenseNet-169. Іл.: 2. Табл.: 1. Бібліогр.: 13 назв.

Ключові слова: згорткові нейронні мережі; моделювання; машинне навчання; сегментація; розпізнавання.

UDC 004.391

Neuronet modeling in the implementation of the system for determining retinal damage of diabetic origin / Prochukhan D. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – № 1–2 (9–10). – P. 40 – 49.

In order to determine the stage of retinal damage of diabetic origin, machine learning mechanisms are applied. The use of the DenseNet convolutional neural network for high-quality image recognition and segmentation is substantiated. DenseNet-121, DenseNet-169 and DenseNet-201 networks have been modified by adding additional layers. Software mechanisms for image processing using Gaussian blurring, removal of black frames, and minimization of the influence of image position changes on recognition quality have been developed. The model was built and trained. High rates of recognition accuracy were obtained. For the DenseNet-201 network, an indicator of 97.9% was obtained, which exceeds the characteristics of the DenseNet-121 and DenseNet-169 networks. Figs.: 2. Tabl.: 1. Refs.: 13 titles.

Keywords: convolutional neural networks; modeling; machine learning; segmentation; recognition.

ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

Комп'ютерна інженерія

Вісник Національного технічного університету "ХПІ", 2023, № 1–2 (9–10)
ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

УДК 004.48: 004.94 **DOI: 10.20998/2411-0558.2023.01.04**

В. Д. ДМИТРІЄНКО, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ",
С. Ю. ЛЕОНОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ",
М. В. МЕЗЕНЦЕВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ"

НОВІ КОМП‘ЮТЕРНІ КОМПОНЕНТИ ДЛЯ ОЦІНКИ БЛИЗЬКОСТІ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ДВІЙКОВИХ ОБ‘ЄКТІВ, ЩО КОДУЮТЬСЯ СИМВОЛАМИ БІНАРНОГО АЛФАВІТУ

Численні двійкові міри схожості та відстані дозволяють ефективно вирішувати різноманітні завдання розпізнавання, класифікації, оцінки близькості двійкових послідовностей тощо. Оскільки продуктивність запропонованих систем багато в чому залежить від вибору відповідних заходів та відстаней, багато дослідників витратили чимало зусиль, щоб знайти більш ефективні двійкові співвідношення для вирішення зазначених завдань. Численні двійкові співвідношення, особливо бінарні, були запропоновані та досліджені у різних галузях науки. Однак визначити одну або групу відстаней або подібних заходів ефективних при вирішенні будь-яких завдань не вдавалося. У зв'язку з цим було запропоновано низку нових методів, заснованих на використанні для навчання алгоритмів, і на зовнішній схожості співвідношень, що мають різних назв методів і запропонованих різними фахівцями, та введення попередньої обробки вихідних даних з метою визначення вагових коефіцієнтів при їх використанні. Іл.: 2.; Бібліогр.: 15 назв.

Ключевые слова: комп‘ютерні компоненти; розпізнавання; класифікація; двійкові послідовності; відстань; вагові коефіцієнти; машинне навчання.

Постановка проблеми та аналіз літератури. При оцінці близькості та розпізнаванні бінарних двійкових об‘єктів часто використовуються функції близькості Жаккара, Kulzinsky, Dice, Yula і їм подібні, а також відстані Хеммінга, функції подібності за кількостью ознак, що збігаються і т.і. [1 – 5]. Всього відомо понад сотню часто застосовуваних різних функцій близькості та подоби, відстаній для порівняння об‘єктів в геології [3], в біології [6], біометрії та генних мережах [7, 8], метеорології [9], таксономії [10, 11], при розв'язанні задач три- та чотиризначної логіки, задач пропозиційної логіки (логіки висловлювань) [12 – 15], при дослідженнях та вирішенні завдань ідентифікації, розпізнавання тощо. Загальна кількість функцій значно перевищує кількість часто застосовуваних класичних залежностей. При порівнянні пари бінарних об'єктів $J_q(j_{q1}, j_{q2}, \ldots, j_{qn})$, $J_p(j_{p1}, j_{qp2}, \ldots, j_{pn})$ з n якісними ознаками (характеристиками) зазвичай використовують співвідношення табл. 1.

© В.Д. Дмитрієнко, С.Ю. Леонов, М.В. Мезенцев, 2023

Таблиця 1

Змінні для оцінки близькості бінарних об‘єктів J_q і J_p

	J_p	
J_q	1	0
1	$a = \sum_{k=1}^{n} j_{qk} j_{pk}$	$g = \sum_{k=1}^{n} (1 - j_{pk}) J_{qk}$
0	$f = \sum_{k=1}^{n} (1 - j_{qk}) j_{pk}$	$b = \sum_{k=1}^{n} (1 - j_{pk})(1 - j_{qk})$

За допомогою змінної *a* підраховується кількість ознак, які є в обох об'єктів J_q і J_p, а за допомогою змінної *b* підраховується кількість ознак, яких немає одночасно в наявності в обох об'єктів J_q і J_p. Змінна *g* необхідна для підрахунку числа ознак, які є у об'єкта J_q, але відсутні в об'єкті J_p. За допомогою змінної *f* підраховується кількість якісних ознак, які є у об'єкта J_p, але відсутні в об'єкті J_q. Сума чисел *g* + *f* вказує на кількість бінарних розрядів, у яких відрізняються об'єкти J_q і J_p, тобто. це аналог відстані Хеммінга. Сума (*a* + *b*) визначає кількість однакових бінарних розрядів в об'єктах J_q і J_p.

Різні поєднання змінних *a, b, g, f* дають можливість отримати безліч функцій близькості (афінності) для оцінки бінарних векторів [1 – 7]. Частина цих функцій має вигляд (1) – (17). Аналіз функцій (1) – (17) показує, що значна частина функцій (наприклад, (2) – (5) і (6) – (9)) мають однакову структуру і відрізняються один від одного тільки ваговими коефіцієнтами при змінних *a, b, f* і *g*. Якби ці функції застосовувалися вперше, спочатку вони повинні були для конкретних завдань випробувані за допомогою математичного моделювання, а потім за результатами моделювання виділено найбільш відповідні (ефективні) для виконання конкретного завдання. Однак через тривале використання цих функцій подібності таке моделювання не застосовується, а використовується досвід їх застосування в аналогічних випадках, у конкретних областях (геологія, біологія, біометрія тощо).

Функції подібності (позначаються *S*) та відстані (позначаються *D*)

$$S_{INTERSECTION} = a, \tag{1}$$

$$S_{Jaccard} = \frac{a}{a+f+g}, \tag{2}$$

$$S_{CZSKANSKI} \frac{2a}{2a+f+g}, \tag{3}$$

$$S_{3W-JACCARD} = \frac{3a}{3a+f+g}, \tag{4}$$

$$S_{SOCAL\&SNKATH-I} = \frac{a}{a+2f+2g}, \tag{5}$$

$$S_{SOCAL\&MICHENER} = \frac{a+b}{a+b+f+g} = \frac{a+b}{n}, \tag{6}$$

$$S_{SOCAL\&SNKATH-II} = \frac{2(a+b)}{2a+f+g+2b}, \tag{7}$$

$$S_{ROGER\&TANIMOTO} = \frac{a+b}{a+2(f+g)+b}, \tag{8}$$

$$S_{GOWER\&EGENDRE} = \frac{a+b}{a+0{,}5(f+g)+b}, \tag{9}$$

$$S_{INNERPRODUCT} = a+b, \tag{10}$$

$$S_{RUSSELL\&RAO} = \frac{a}{a+f+g+b}, \tag{11}$$

$$D_{HAMMING} = D_{CITYBLOCK} = f+g, \tag{12}$$

$$D_{CANBERRA} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\left| j_{pi} - j_{qi} \right|}{\left| j_{pi} + j_{qi} \right|}, \tag{13}$$

$$D_{MINKOWSKI} = \left(\sum_{i=1}^{n} \left| j_{pi} - j_{qi} \right|^{1/\lambda} \right)^{\lambda}, \tag{14}$$

$$D_{CHEBJAHEW} = \max_{i=1}^{n} \left| j_{pi} - j_{qi} \right|, \tag{15}$$

$$D_{VART} = \frac{f+g}{4(a+b+f+g)}, \tag{16}$$

$$S_{MICHAEL} \frac{4(a-g)}{(a+b)^2 + (b+g)^2} = \frac{4(ab-fg)}{(a+b)^2 + (b+g)^2}. \tag{17}$$

Як зазначено вище, функції подібності (афінності) та відстані не вичерпуються співвідношеннями (1) – (17), значна кількість яких і велика кількість публікацій порівняно з різними векторами з бінарним кодуванням інформації, вказують на відсутність єдиної теорії та універсальних функцій для оцінки подібності та відстаней між об'єктами, що описуються за допомогою бінарного алфавіту.

Вибір тієї чи іншої функції подібності або відстані для визначення подібності або розпізнавання об'єктів з якісними ознаками, закодованими за допомогою бінарного алфавіту здійснюється шляхом аналізу обчислювальних експериментів у *n*-мірному просторі ознак, закодованих за допомогою двійкового бінарного алфавіту та суб'єктивних переваг дослідників.

Метою статті є аналіз відомих співвідношень виду (1) – (17) та отримання на основі функцій близькості узагальнюючих властивостей відомих груп співвідношень (1) – (17) та їм подібних, та розробка нового підходу до отримання функцій афінності для бінарних об'єктів шляхом введення вагових коефіцієнтів у безлічі вихідних даних, а потім синтез нейронної мережі, що дозволяє обчислювати відповідні функції подібності та відстані.

Узагальнення співвідношень введеням вагових коефіцієнтів. Аналіз співвідношень (2) – (5) і (6) – (9), (11) показує, що кожна з двох груп співвідношень може бути замінена одним виразом з ваговими коефіцієнтами, що змінюються. Перші 4 співвідношення (2) – (5) можна записати так:

$$S = \frac{k_i a}{k_i^1 a + k_{if}^2 f + k_{ig}^3 g}, \; i = \overline{1,\ 4}, \; j = \overline{1,\ 4}, \; g = \overline{1,\ 4}, \tag{18}$$

де $i = \overline{1,\ 4}$, $k_1 = k_4 = 1$; $k_2 = 2$, $k_3 = 3$; $k_1^1 = k_1^4 = 1$; $k_2^1 = 2$; $k_3^1 = 3$; $k_{1f}^2 = k_{2f}^2 = k_{3f}^2 = 1$; $k_{4f}^2 = 2$; $k_{1g}^3 = k_{2g}^3 = k_{3g}^3 = 1$; $k_{4g}^3 = 2$; $k_i, k_i^1, k_{if}^2, k_{ig}^3$, $i = \overline{1,\ 4}$ – вагові коефіцієнти.

Аналогічним чином може бути записано співвідношення, де за допомогою одного співвідношення виду (18) може бути отримане співвідношення, за допомогою вагових коефіцієнтів якого можуть бути описані формули перших одинадцяти функцій (1) – (11). Отже, вперше показано, різні функції подібності, запропоновані різними авторами, мають однаковий математичний базис. Це може бути використано для вдосконалення та застосування всієї множини аналізованих методів.

Введення вагових коефіцієнтів при сопоставленні бінарних об‘єктів. Введення вагових коефіцієнтів при сопоставленні об‘єктів J_q $(j_{q1}, j_{q2}, \ldots, j_{qn})$, J_p $(j_{p1}, j_{p2}, \ldots, j_{pn})$ приводить до появи бінарних об‘єктів $J_q(j_{q1}k^1_{q1}, j_{q2}k^1_{q2}, \ldots, j_{qn}k^1_{qn})$, $J_p(j_{p1}k^2_{p1}, j_{p2}k^2_{p2}, \ldots, j_{pn}k^2_{pn})$ та зміни виразів у табл. 1. Зокрема, змінна *a* обчислюється за допомогою співвідношення $a = \sum_{h=1}^{n} j_{qh} j_{ph} k^1_{qh} k^2_{ph}$, де k^1_{qh}, k^2_{ph} – вагові коефіцієнти. Аналогічно змінюються і вирази для обчислення змінних *b*, *g*, *h*. У обчислювальних експериментах зазвичай застосовувалися значення $0{,}8 \le k^1_{qh}, k^2_{ph} \le 1{,}2$.

Оскільки нейронну мережу Хеммінга можна подати у вигляді узагальненої блок-схеми (рис. 1), то із загального алгоритму функціонування мережі Хеммінга випливає, що мережа, наведена в цій статті, може обчислювати різні міри близькості, зокрема, що задаються співвідношеннями (1) – (17). При реалізації співвідношень (1) – (17) припускаємо, що для отримання нейронних мереж, що описуються цими співвідношеннями, використовуються раніше отримані нейрони та нейронні мережі, що реалізують змінні *a*, *b*, *f*, *g* та опублікованих у ряді робіт авторів, наприклад, у статтях [2, 15].

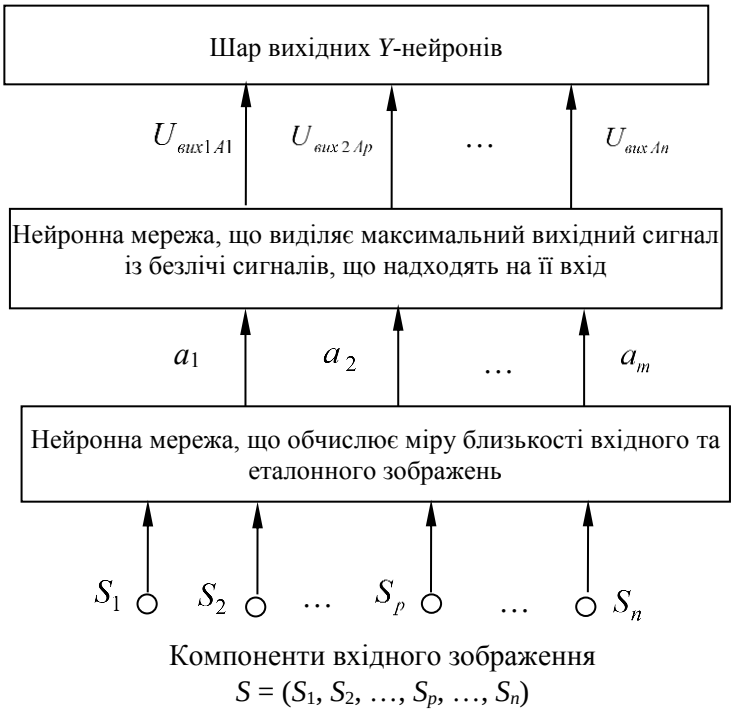


Рис. 1. Узагальнена блок-схема нейронної мережі Хеммінга

На рис. 2 прийняті такі позначення:

– Нейронна мережа, яка обчислює функцію S_{MICAEL}, наведено на рис. 2, де прийняті такі позначення: $\boxed{a}$, $\boxed{b}$, $\boxed{f}$, $\boxed{g}$, – нейронні мережі, обчислюючі допоміжні змінні *a*, *b*, *f*, *g*;

– $\boxed{\sum^d}$ ($d = \overline{1,\ 4}$) – блок алгебраїчного підсумовування;

– $\boxed{\times^k}$ ($k = \overline{1,\ 4}$) – блок добутку.

– $\boxed{:}$ – блок поділу.

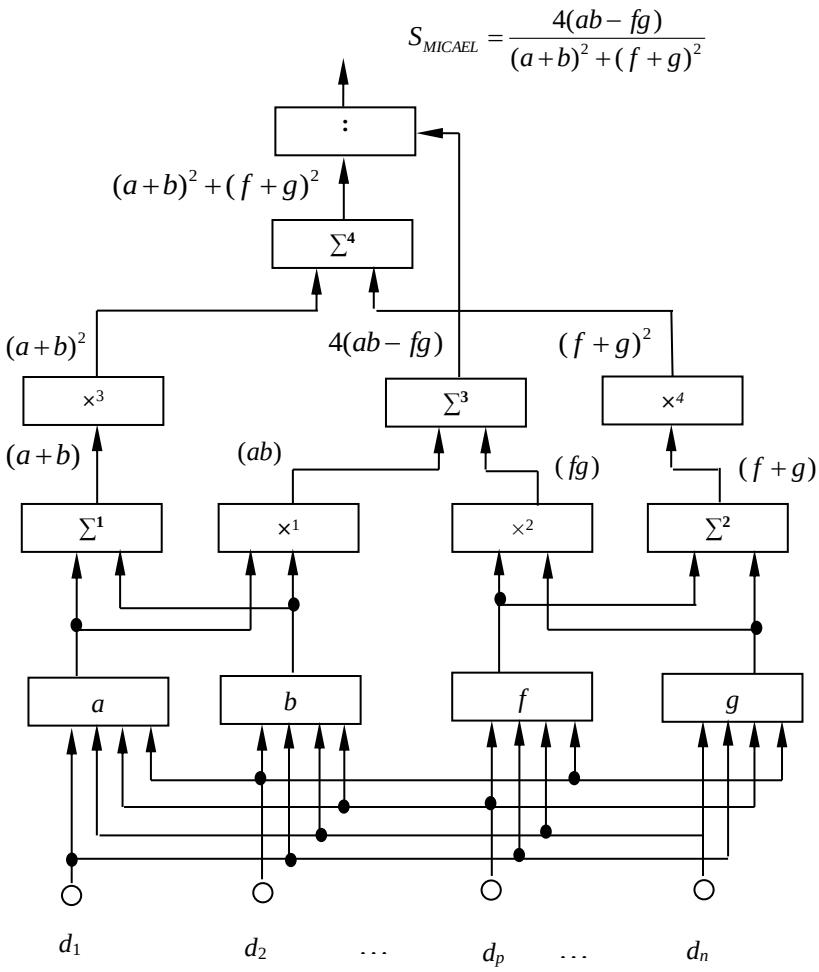


Рис. 2. Нейронна мережа, яка обчислює функцію S_{MICAEL}

Нейронна мережа, яка обчислює функцію S_{MICAEL}, складається з декількох шарів. Перший шар, включає нейронні мережі для обчислення змінних *a*, *b*, *f*, *g*. Побудова цих мереж детально описана у попередніх [2, 15] працях авторів. Другий шар нейронної мережі призначений для обчислення сум (*a* + *b*), (*f* + *g*) та добутків *ab* і *fg*. Третій та четвертий шари – для обчислення співвідношень $(a+b)^2$, $(f+g)^2$, $4(ab-fg)$, $(a+b)^2+(f+g)^2$. Функція подібності S_{MICAEL} обчислюється за допомогою блока поділу.

Висновки. Аналіз класичних співвідношень для оцінки близькості та розпізнавання бінарних двійкових об'єктів показав, що значна частина цих співвідношень відрізняється один від одного лише ваговими коефіцієнтами при відомих функціях *a*, *b*, *g*, *f*. Так, за допомогою співвідношення (18) з різними ваговими коефіцієнтами можуть бути записані чотири співвідношення (2) – (5). Якщо число одночленів у виразі (18) у чисельнику та знаменнику збільшити на одиницю, то за допомогою отриманого виразу можуть бути описані перші 11 співвідношень (1) – (11). Таким чином, вперше показано, що різні функції подібності, запропоновані різними авторами для дослідження, здавалося б абсолютно різних об'єктів, мають загальний математичний базис, що може бути в майбутньому використано для вдосконалення всієї множини методів, що розглядаються.

Ряд експериментів з вихідними даними показав, що введення нових вагових коефіцієнтів у відповідні співвідношення може бути ефективно виконано на стадії підготовки вихідних даних.

References:

1. Dmitrienko V.D., Zakovorotnyy A.Yu., and Leonov S.Yu. (2020), "Neural networks for determining affinity functions", *2020 Intenational Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, Ankara, Turkey, 2020, pp. 647-652.

2. Dmitrienko V.D., Leonov S.Yu. and Zakovorotnyy A.Yu. (2020), "Computer components for proximity estimation and binary object recognition under uncertainty", *Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling"*. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2020. – № 2 (4). – P. 58 – 76.

3. Michalski R.S., Stepp R.S., and Dilay (1981), "A recent advance in data analysis: chustering objects into classes characterized by cojunctive concepts", *Invited chapter in the book Progress in Pattern Recognition*, Vol. 1, North-Holland Publishing Company, Amsterdam-NewYork-Oxford, pp. 33-49.

4. Choi Send-Seok, Cha Sung-Hyuk, Tappert Charters C. (2010), "A survey of Binary Similarity and Distance Measures", *Systemics, Cybernetics and Informatics*, Vol. 8, pp. 43-48.

5. Hubalek Z. (1982), "Coefficients oj Association and Similarity, Based on Binary (Presence-Absence) Data", *An Evaluation, Biological Reviews*, Vol. 57, No. 4, pp. 669-689.

6. Willett P. (2003), Similarity-based approaches to virtual screening", *Biochemical Society Transactions*, Vol. 31, pp. 603-606.

7. Michael H. (1976), Binary Coefficients: A theoretical and empirical study", *Mathermatical Geolology*, Vol. 8, No. 2.

8. Dunn G., Everitt B.S. (1982), "An Introduction to Mathematical Taxonomy", *Cambridge University Pree*.

9. Fincly J.P. (1924), 'Tornado prediction", *The American Meteorological Journal*, 1, pp. 25-88.

10. Goodman L.A., Kruskal W.H (1963), "Measures of association for cross classification III. Approximate samling theary", *Journal of the American Statistical Association*, 58, pp. 310-364.

11. Sneath P.H.A., Socal R.R. (1973), "Numerical Taxonomy: The Principles and Practice of Numerical Classification", *W.H. Freeman and Company*, San-Francisco.

12. Tomova N.E. (2009), "The emergence of three-valued logics: logical and philosophical analysis", *Bulletin of Moskow University. Series 7, Philosophy*, Moskow, MSU, pp. 68-74.
13." Four-valued semantics for relevant logics (and some their rivals)", *Journal of Philosophical Logic*, 24 (2), pp. 139-160.
14. Burdyuk V.Ya. (2011), "Propositional trust logic", *Journal Cybernetics and Systems Analysis*, 3, pp. 182-187.
15. Dmitrienko V.D., Leonov S.Yu. (2019), "A neural network using a scalar product and defining several solutions" // Herald of the NATIONAL Tachnical University "KhPI". Series "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2019. – No. 28 (1353). – P. 68-82.

Статтю представив д.т.н., проф. Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" В.І. Носков.

Поступила (received) 06.08.2023

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

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

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

УДК 004.48: 004.94

Нові комп‘ютерні компоненти для оцінки близькості та розпізнавання двійкових об‘єктів, що кодуються символами бінарного алфавіту / Дмитрієнко В.Д., Леонов С.Ю., Мезенцев М.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2023. – № 1 – 2 (9 – 10). – С. 51 – 59.

Численні двійкові міри схожості та відстані дозволяють ефективно вирішувати різноманітні завдання розпізнавання, класифікації, оцінки близькості двійкових послідовностей тощо. Оскільки продуктивність запропонованих систем багато в чому залежить від вибору відповідних заходів та відстаней, багато дослідників витратили чимало зусиль, щоб знайти більш ефективні двійкові співвідношення для вирішення зазначених завдань. Численні двійкові співвідношення, особливо бінарні, були запропоновані та досліджені у різних галузях науки. Однак визначити одну або групу відстаней або подібних заходів ефективних при вирішенні будь-яких завдань не вдавалося. У зв'язку з цим було запропоновано низку нових методів, заснованих на використанні для навчання алгоритмів, і на зовнішній схожості співвідношень, що мають різних назв методів і запропонованих різними фахівцями, та введення попередньої обробки вихідних даних з метою визначення вагових коефіцієнтів при їх використанні. Іл.: 2; Бібліогр.: 15 назв.

Ключевые слова: комп‘ютерні компоненти; розпізнавання; класифікація; двійкові послідовності; відстань; вагові коефіцієнти; машинне навчання.

УДК 004.48: 004.94

New computer components for proximity assessment and recognition of double objects, which are encoded with symbols of the binary alphabet / Dmitrienko V.D., Leonov S.Yu., Mezentsev M.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2023. – № 1 – 2 (9 – 10). – С. 51 – 59.

Numerous binary measures of similarity and distance make it possible to effectively solve various tasks of recognition, classification, estimation of proximity of binary sequences, etc. Since the performance of the proposed systems largely depends on the choice of appropriate measures and distances, many researchers have spent considerable effort to find more efficient binary ratios for solving the mentioned tasks. Numerous binary relations, especially binary ones, have been proposed and investigated in various fields of science. However, it was not possible to determine one or a group of distances or similar measures effective in solving any tasks. In this regard, a number of new methods were proposed, based on the use of algorithms for learning, and on the external similarity of ratios that have different names of methods and proposed by different specialists, and the introduction of pre-processing of the initial data in order to determine the weighting factors when using them. Il.: 2; Bibliogr.: 15 titles.

Keywords: computer components; recognition; classification; binary sequences; distance; weighting factors; machine learning.

Вісник Національного технічного університету "ХПІ", 2023, № 1–2 (9–10)
ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

УДК 004.942:621.373 **DOI: 10.20998/2411-0558.2023.01.05**

В. М. САВЧЕНКО, канд. техн. наук, НТУ "ХПІ",
О. В. МНУШКА, ст. викл. НТУ "ХПІ",
С. Ю. ЛЕОНОВ, д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПІ"

ПРИКЛАДНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СЕНСОРІВ НА ОСНОВІ КВАРЦОВИХ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Розв'язано прикладну науково-технічну задачу побудови програмного забезпечення для дослідження параметрів кварцових п'єзоелементів з міжелектродним зазором. Проведено аналітичний огляд задач, що виникають під час моделювання параметрів, основні підходи до побудови наукового програмного забезпечення із використанням універсальних математичних пакетів та вузько спеціалізованих програм. Розроблено структуру компонентів програмного забезпечення із використанням принципів об'єктно-орієнтованого дизайну та програмування. Розроблено бібліотеку підпрограм для розрахунків фізичних параметрів кварцових елементів мовою програмування Python. Програмне забезпечення може бути розширеним за рахунок використання додаткових уточнених математичних моделей. Іл.: 3. Бібліогр.: 14 назв.

Ключові слова: моделювання, кварцовий п'єзоелемент, еквівалентна електрична схема, генератор, Python.

Актуальність дослідження. Сучасні технології віддаленого моніторингу стану пристроїв, технологічних процесів, логістичних потоків, навчального процесу під час COVID-19 й т. п. використовують велику номенклатуру сенсорів – від традиційних до сучасних, що дозволяє будувати системи на основі Інтернету речей або промислового Інтернету речей. Швидкий темп розвитку технологій побудови малогабаритних обчислювальних систем дозволяє використовувати високоточні перетворювачі фізичних величин і потребує вдосконалення параметрів сенсорів [1 – 2].

П'єзоелектричні сенсори на основі кварцових чутливих елементів використовують для вимірювання різних фізичних величин таких як тиск, температура, вологість, вібрація тощо. Окремий клас таких сенсорів становлять сенсори із частотним виходом в яких модуляція частоти здійснюється шляхом зміни величини міжелектродного зазору, що впливає на частоту коливань п'єзорезонатора. Міжелектродний зазор – це відстань між двома електродами, які утворюють п'єзорезонатор. Коли на п'єзорезонатор впливає зовнішній вплив, наприклад, тиск, температура, вологість або вібрація, він деформується, що призводить до зміни частоти коливань п'єзорезонатора. Зміна частоти коливань п'єзорезонатора є

© В.М. Савченко, О.В. Мнушка, С.Ю. Леонов, 2023

функцією зовнішнього впливу та може бути виміряна і використана для вимірювання величини такого впливу. Сенсори з частотним виходом є одними з найпоширеніших типів п’єзоелектричних сенсорів. Вони мають ряд переваг, зокрема високу точність, стабільність і швидкість відгуку. Сенсори з частотним виходом використовуються в широкому спектрі застосувань, зокрема в контролі якості, вимірюванні, медицині та промисловості [3 – 5].

Розробка та вдосконалення таких сенсорів базуються на використанні аналітичних та чисельних моделей. Аналітичні моделі у випадку кварцового елементу є складними внаслідок наявності більшої кількості у порівнянні із п’єзокерамікою незалежних матеріальних констант, що входять до тензорів властивостей матеріалу. Загальна задача визначення параметрів зв’язаних коливань п'єзоелектричного елементу є тривимірний простір у випадку певних класів сенсорів може бути зведеною до одновимірної задачі та одного виду коливань. Відзначимо, що коливання п’єзоелектричного елементу описуються за допомогою трансцендентних рівнянь для хвильового числа, тому для отримання аналітичного розв’язку потрібно використовувати їх розкладання у ряд Макларена-Тейлора в околі деякої точки.

З урахуванням складності та трудомісткості обчислень актуальною є задача розробки програмного забезпечення для моделювання параметрів таких сенсорів або із використанням універсальних математичних пакетів, або із використанням спеціалізованого програмного забезпечення.

Огляд літератури. В [3] наведено результати моделювання температурно-частотних характеристик кварцових резонаторів у системі комп’ютерної математики Maple, показана можливість побудови бібліотеки підпрограм для обчислення параметрів кварцових чутливих елементів для кристалічних елементів довільної просторової орієнтації. Недолік – використання пропрієтарного математичного пакета, що вимагає ліцензування пакета та обмежує використання результатів розробки.

В [6] представлено результати дослідження похибок імітаційного моделювання із використанням спеціальних математичних функцій, показано, що у певних спеціальних випадках похибки моделювання мають тенденції до накопичення, що може бути суттєвим для задач імітаційного моделювання. Зазначимо, що універсальні пакети на кшталт MATLAB можуть мати суттєві похибки, що має бути врахованим під час розробки та тестування програм.

Представлено результати чисельно-аналітичного моделювання кварцових п’єзоелементів у COMSOL Multiphysics. Показано, що створена

в COMSOL комп'ютерна модель кварцових п'єзоелементів, для температурозалежних коливань обернутих Y-зрізів, може бути використана для обчислення частот власних резонансів, аналізу активності мод коливань і дослідження впливу варіативності геометричних розмірів п'єзоелементів, термічних і вібраційних характеристик, а похибка в обчисленні резонансних частот для механічних гармонік і ангармонічних коливань становить від 0,5 до 0,75 відсотка відносно аналітичних розрахунків. Точність розрахунків залежить від кроку сітки та вихідної моделі, зі зменшенням сітки суттєво зростають вимоги до обчислювальної системи.

В [7, 8] розглянуто загальні питання до побудови спеціального програмного забезпечення наукового призначення, показано можливість використання мови C++ для таких задач. В [8] висвітлюються дуже важливі питання використання спеціального програмного забезпечення на кшталт статичних аналізаторів у розробці наукового програмного забезпечення, особливості використання мов зі статичної та динамічною типізацією.

В [9, 11] показано можливість реалізації вузько спеціалізованого програмного забезпечення для моделювання сенсорів на основі кварцових п’єзоелементів. В [9] показана можливість побудови програмного забезпечення, для симуляції датчиків QCM у рідині. Показано, що потрібно враховувати нелінійну динаміку осцилятора, що дозволяє здійснювати більш точні розрахунки реальної частоти коливань та її зміни в залежності від маси та умов застосування. В [10] показано застосування пакета ANSYS для моделювання параметрів п’єзоелектричного елементу, показано, що параметрів, що моделюються похибка складає не більше 14 відсотків у порівнянні з аналітичними методами. В [11] представлено комп'ютерну програму для моделювання поведінки кварцових кристалічних генераторів. З урахуванням того, що струм через кварцевий кристал є майже ідеально синусоїдальним, кварцовий резонатор можна замінити на нелінійний імпеданс, що залежить лише від величини струму, що проходить через нього. Зазначимо, що у [3 – 6] показано, що імпеданс також залежить від великої кількості конструктивно-технологічних параметрів.

В [12, 13] представлено наукове програмне забезпечення, реалізоване мовою Python, в [12] для моделювання електричних схем, в [13] показана можливість використання фізичних одиниць відповідно до предметної галузі, що дозволяє надати обчисленням певний фізичний сенс.

На даний час існує певна кількість універсального програмного забезпечення, що може бути застосованим для розв’язання стандартних наукових задач у різних галузях науки, в першу чергу це MATLAB, Maple,

Mathemathica, COMSOL, ANSYS та ін. Безперечно ці пакети мають велику кількість готових алгоритмів, програмних модулів, розширень тощо, що допомагають науковцям проводити симуляцію та отримувати достатньо точні із практичної точки зору результати. До недоліків їх використання слід віднести їх суттєву вартість, тому для конкретних дослідницьких задач доцільно розробляти спеціалізоване програмне забезпечення із використанням універсальних мов програмування таких як C, C++ або Python, які наразі мають весь необхідний функціонал для розв'язання таких задач. На додаток, спеціалізоване програмне забезпечення має такі переваги:

– урахування конкретних потреб дослідницької задачі, що може гарантувати більш точні та ефективні результати;
– економія часу та зусиль дослідників;
– гнучкість та масштабованість.

Метою роботи є побудова програмного забезпечення для обчислення параметрів п’єзоелектричних сенсорів із частотним виходом та модуляцію частоти на основі зміни параметрів міжелектродного зазору на основі наближених аналітичних моделей коливань.

Програмне забезпечення для моделювання параметрів сенсорів на основі кварцових п’єзоелектричних елементів. Як показано у [3] параметри сенсорів на основі кварцових п’єзоелементів суттєво залежать від фізичних параметрів кристалічного елементу – кута зрізу, товщини, форми, наявності електродів на поверхні, наявності та величини міжелектродного зазору тощо.

У загальному випадку програма для моделювання параметрів сенсорів повинна складатися із декількох модулів — розрахунків матеріальних констант для кута зрізу кристалічного елемента, розрахунків параметрів еквівалентної електричної схеми, розрахунків параметрів кварцового осцилятора, розрахунків параметрів сенсора (рис. 1).

Розглянемо більш докладно призначення кожного модуля.

Модуль "Material Constants" призначений для визначення параметрів кристалічного елементу, які суттєвим чином залежать від кута зрізу елементу та включають тензор четвертого рангу коефіцієнтів жорсткості c^E, Па, тензор третього рангу п’єзоелектричних коефіцієнтів e, К/м, тензор другого рангу коефіцієнтів діелектричної проникності ε^S, Ф/м. Числові величини для кварцу визначені у та зберігаються у вигляді JSON файлів. Такий підхід дозволяє використовувати різні п’єзоелектричні матеріали, в т. ч. для фіксованих кутів зрізу.

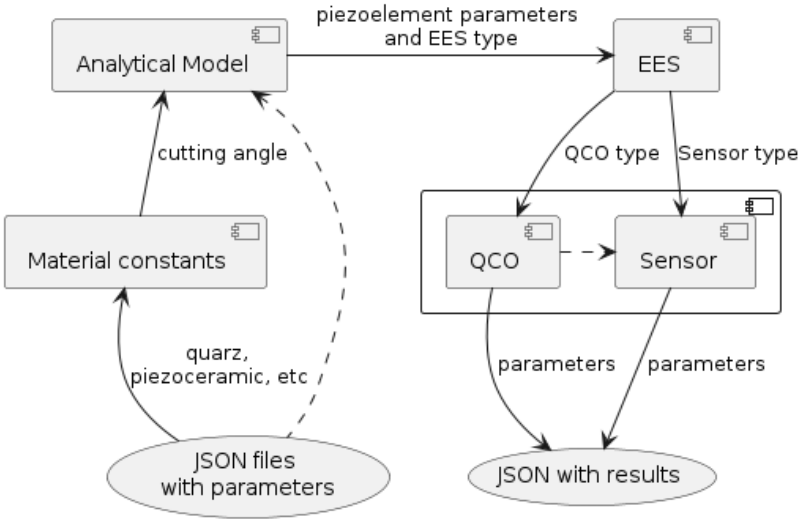


Рис. 1. Структура програми

Для розрахунку означених коефіцієнтів побудовано обчислювальний модуль, що використовує матричну форму запису обертань із використанням кутів Ейлера, що забезпечує можливість досліджувати параметри п’єзоелектричних елементів із довільними кутами зрізу.

Модуль "Analytical Model" дозволяє обрати аналітичну модель для хвильового числа та резонансної частоти коливань п’єзоелектричної пластини, наразі підтримуються найбільш поширені моделі для п’єзоелектричних елементів із міжелектродними зазорами: модель п’єзоелемента із симетричними зазорами та масонавантаженням, модель коливань із несиметричними зазорами [14], модель коливань із одним зазором [3, 5], та модель коливань із одним зазором та однобічним масонавантаженням [3, 5]. Від результату вибору моделі залежать параметри еквівалентної електричної схеми, параметри якої визначено для стандартної схеми Butterworth-van Dyke.

Розраховані параметри у модулях "Analytical Model" та "EES" є вхідними параметрами для моделювання кварцового осцилятора у модулі "QCO" та сенсора із частотним виходом "Sensor".

Для реалізації програмного забезпечення вибрано мову програмування Python. Такий вибір обумовлено наступними факторами: простота та поширеність на різних обчислювальних платформах, можна використовувати у "хмарі", велика кількість прикладних бібліотек, в т. ч. для побудови графіків функцій, можливість простої реалізації інтерфейсу користувача на основі Tk або PyQt. На першому етапі для базової реалізації

та тестування обрано інтерфейс на основі Tk з огляду на наступні причини:

1) він є "легшим" за PyQt, який є складнішою бібліотекою в порівнянні з Tk, що вимагає використання більшого обсягу ресурсів для її функціонування;

2) у контексті наукового програмування, де часто необхідно виконувати програми на обмежених ресурсах, таких як ноутбуки або Raspberry Pi, це може стати проблемою;

3) Tk надає більшу портативність та дозволяє використовувати той самий код і для запуску програми на Windows, macOS та Linux.

Результат розробки для модулів роботи із матеріальними константами кварцу та параметрами еквівалентної електричної схеми представлений на рис. 2 та рис. 3.

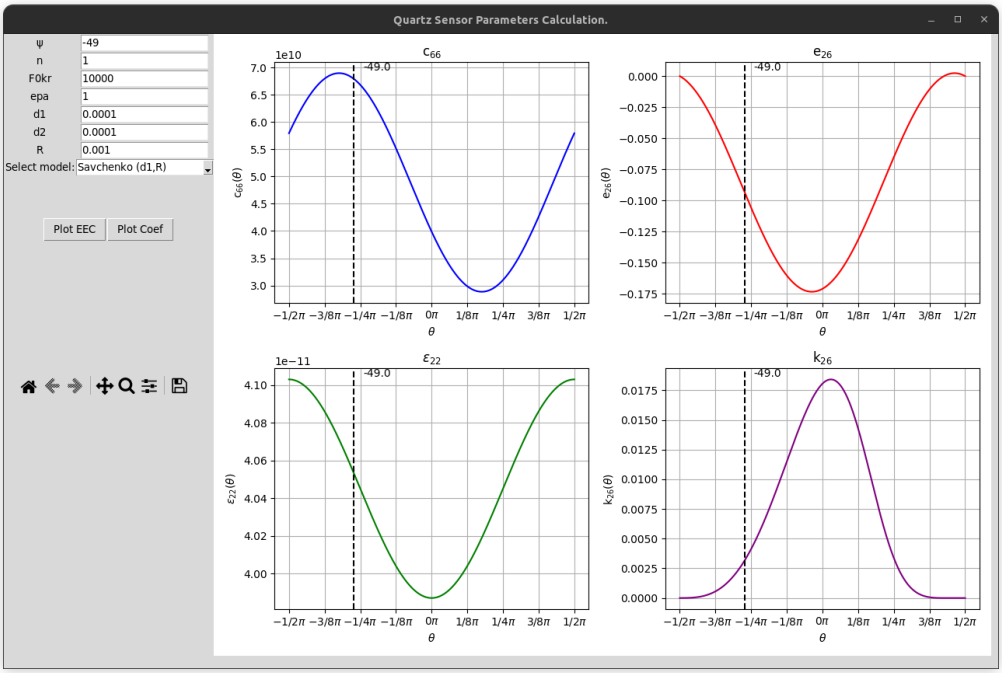


Рис. 2. Розрахунок матеріальних констант

У програмі використовуються математичні моделі отримані для різних типів кварцових п’єзоелементів, в т. ч. отримані авторами [3, 5]. Програму побудовано із використанням принципів об’єктно-орієнтованого програмування та дизайну. Для побудови графіків використано можливості бібліотеки Matplotlib (https://matplotlib.org). Всі основні компоненти програмного забезпечення є окремими класами, для реалізації інтерфейсу розроблено клас основної програми. Програма

дозволяє обирати одну із чотирьох математичних моделей для кварцового п’єзоелемента із міжелектродним зазором, а також задавати певні конструктивно-технологічні параметри – величину міжелектродних зазорів, масонавантаження та ін. Ці параметри впливають на параметри еквівалентної електричної схеми резонатора при його використанні у кварцових вимірювальних осцилляторах, що використовують у сенсорах із частотним виходом.

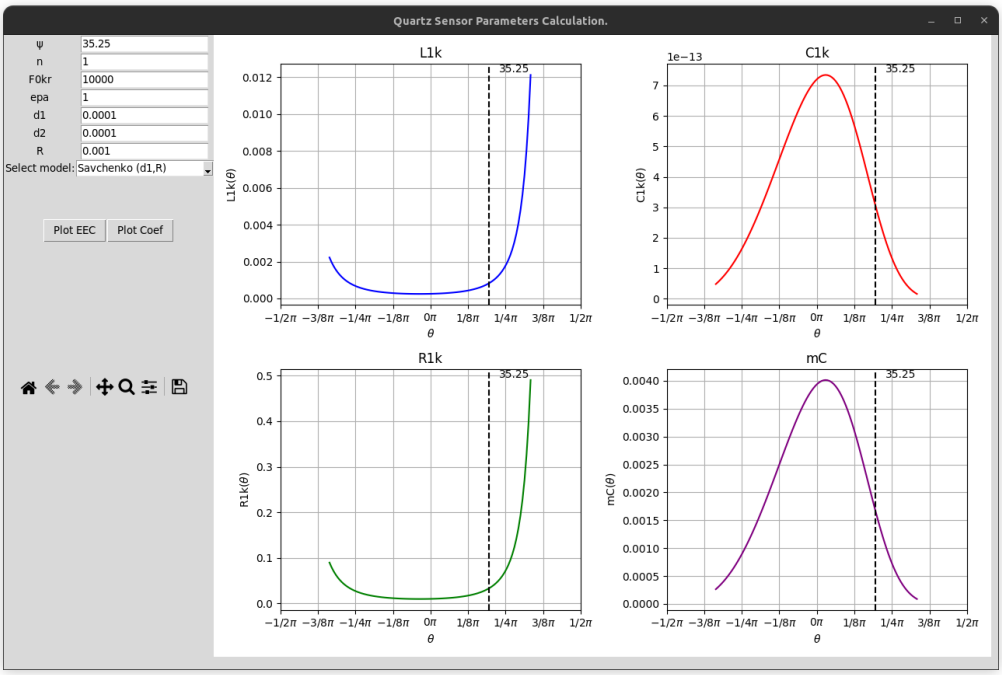


Рис. 3. Розрахунок параметрів еквівалентної електричної схеми

Висновки. Розв’язано прикладну науково-технічну задачу побудови програмного забезпечення для дослідження параметрів кварцових п'єзоелементів із міжелектродним зазором, що використовуються у якості чутливих елементів високоточних сенсорів фізичних величин. На відміну від [3, 5] реалізовано прикладну бібліотеку та програму мовою програмування Python, забезпечено можливість використання декількох математичних моделей чутливих елементів сенсорів, роботу із зовнішніми файлами параметрів та результатів, що дозволяє інтегрувати дане програмне забезпечення із іншими системами, можливість додавання нових уточнених моделей. Розрахунок параметрів генераторів відбувається автоматично для схеми ємнісна триточка.

Розроблене програмне забезпечення може бути використаним для

проведення досліджень у галузі побудови сенсорів, порівнянні математичних моделей, вибору та оптимізації параметрів, а також в учбовому процесі.

Перспективою подальших досліджень є інтеграція програмного забезпечення та моделей на основі чисельних методів, що має значно розширити застосування розроблених бібліотеки та програми.

Список літератури:

1. Maceda D.D.C. Web-Based Instrumentation and Control Laboratory with Real-Time Remote Monitoring and Control System for Columban College / D.D.C. Maceda, G.V. Magwili // 2022 IEEE 14th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM). – Boracay Island, Philippines, 2022. – pp. 1-6. – doi: 10.1109/HNICEM57413.2022.10109507.0.

2. Mnushka O. Information Technology of Remote Monitoring and Control / O. Mnushka, V. Savchenko, S. Leonov, O. Shaposhnikova // 2021 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Mauritius, 2021. – pp. 1-5. – doi: 10.1109/ICECCME52200.2021.9590889.

3. Savchenko V. Simulation of the Parameters and Temperature Characteristics of the BAW QCR based Sensors / V. Savchenko, O. Mnushka // 2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), Lviv, Ukraine, 2021. – pp. 24-28. – doi: 10.1109/CADSM52681.2021.9385231.

4. Taranchuk A. Quartz Pulse Wave Sensor With a Capacitive Control for Healthcare Solutions / A. Taranchuk, S. Pidchenko // IEEE Sensors Journal. – vol. 21. – no. 6. – pp. 8613-8620, 15 March15, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3049065.

5. Savchenko V. High-Sensitive Sensors Based on QCR for Smart Devices / V. Savchenko, O. Mnushka // 2020 IEEE XVIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH). – Lviv, Ukraine, 2020. – pp. 72-75, doi: 10.1109/MEMSTECH49584.2020.9109435.

6. Таранчук А.А. Чисельно-аналітичне моделювання механічних коливань кварцових п'єзоелементів ат-зрізу / А.А. Таранчук, Б.В. Кушнір // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2019. – № 1. – С. 32-38, doi: 10.31891/2219-9365-2019-63-1-32-38.

7. Jianzhou L. Development of an Integrative Electromagnetic Simulation Software / L. Jianzhou, Z. Haixuan, C. Shuhui // 2022 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES-China). – Xuzhou, China, 2022. – pp. 1-3, doi: 10.1109/ACES-China56081.2022.10065232.

8. Krishnamurthy R. Scientific Developers v/s Static Analysis Tools: Vision and Position Paper / R. Krishnamurthy, T.S. Heinze, C. Haupt, A. Schreiber, M. Meinel // 2019 IEEE/ACM 12th International Workshop on Cooperative and Human Aspects of Software Engineering (CHASE), Montreal, QC, Canada, 2019, pp. 89-90, doi: 10.1109/CHASE.2019.00029.

9. Rodriguez-Pardo L. Software for Simulation of QCM Sensors in Liquid Media / L. Rodriguez-Pardo, J. Farina, C. Gabrielli, H. Perrot, R. Brendel, M. J. Brana // EUROCON 2005 - The International Conference on "Computer as a Tool". – Belgrade, Serbia, 2005. – pp. 1695-1698, doi: 10.1109/EURCON.2005.1630299.

10. Gabbi R. Computational Simulation for Square Diaphragms of a Piezoresistive Pressure Sensor / R. Gabbi, L.A. Rasia, A.C. Valdiero, M.T. Tolfo Gabbi // IEEE Latin America Transactions. – vol. 16. – no. 12. – pp. 2963-2969. – doi: 10.1109/TLA.2018.8804263.

11. Addouche M. ADOQ: a quartz crystal oscillator simulation software / M. Addouche, N. Ratier, D. Gillet, R. Brendel, F. Lardet-Vieudrin, J. Delporte // Proceedings of the 2001 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition (Cat. No.01CH37218), Seattle, WA, USA, 2001. – pp. 753-757. – doi: 10.1109/FREQ.2001.956375.
12. Zhang H. Application of Python Scientific computing library and Simulation in Circuit Analysis / H. Zhang, P. Yang and Y. Niu // 2023 IEEE 12th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT), Bhopal, India, 2023, pp. 892-898, doi: 10.1109/CSNT57126.2023.10134600.
13. Hall B.D. Software for calculation with physical quantities / B.D. Hall // 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT. – Roma, Italy, 2020. – pp. 458-463, doi: 10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138281.
14. Yang Z. Thickness-shear vibration of rotated Y -cut quartz plates with unattached electrodes and asymmetric air gaps / Z. Yang, S. Guo, Y. Hu, J. Yang // Philosophical Magazine Letters. – 89:5. pp. 313-321. – doi: 10.1080/09500830902841903.

References:

1. Maceda, C. and Magwili, G.V. (2022). *Scada Web-Based Instrumentation and Control Laboratory with Real-Time Remote Monitoring and Control System for Columban College*. doi:10.1109/hnicem57413.2022.10109507.
2. Mnushka, O., Savchenko, V., Leonov, S. and Shaposhnikova, O. (2021). "Information Technology of Remote Monitoring and Control". *2021 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME).* doi:10.1109/iceccme52200.2021.9590889.
3. Savchenko, V.G. and Oksana Mnushka (2021). *Simulation of the Parameters and Temperature Characteristics of the BAW QCR based Sensors*. doi:10.1109/cadsm52681.2021.9385231/
4. Taranchuk, A. and Sergey Pidchenko (2021). *Quartz Pulse Wave Sensor With a Capacitive Control for Healthcare Solutions*. 21(6), pp.8613–8620. doi:10.1109/jsen.2020.3049065.
5. Savchenko, V.G. and Oksana Mnushka (2020*). High-Sensitive Sensors Based on QCR for Smart Devices*. doi:10.1109/memstech49584.2020.9109435.
6. Taranchuk, A.A. and Kushnyr, B.V. (2019). *Numerical and analytical modeling of thickness-vibration of AT-cut quartz piezoelement*. 63(1), pp.32–38. doi:10.31891/2219-9365-2019-63-1-32-38. (In Ukrainian).
7. Jianzhou, L., Zhang Haixuan and Chen Shuhui (2022). *Development of an Integrative Electromagnetic Simulation Software*. doi:10.1109/aces-china56081.2022.10065232.
8. Krishnamurthy, R., Heinze, T., Haupt, C., Schreiber, A.W. and Meinel, M. (2019). *Scientific Developers v/s Static Analysis Tools: Vision and Position Paper*. doi:10.1109/chase.2019.00029.
9. Rodriguez-Pardo L., Farina, J., Gabrielli, C., Perrot, H., Brendel, R. and Brana, M.J. (2005). *Software for Simulation of QCM Sensors in Liquid Media*. doi:10.1109/eurcon.2005.1630299.
10. Gabbi, R., Rasia, L.A., Valdiero, A.C. and Tolfo Gabbi, M.T. (2018). "Computational Simulation for Square Diaphragms of a Piezoresistive Pressure Sensor". *IEEE Latin America Transactions*, 16(12), pp.2963–2969. doi:10.1109/tla.2018.8804263.
11. Mahmoud Addouche, N. Ratier, Gillet, D., Brendel, R., Franck Lardet-Vieudrin and J. Delporte (2002). *ADOQ: a quartz crystal oscillator simulation software*. doi:10.1109/freq.2001.956375.
12. Zhang, H., Yang, P. and Niu, Y. (2023). *Application of Python Scientific computing library and Simulation in Circuit Analysis*. doi:10.1109/csnt57126.2023.10134600.

13. Hall, B.R. (2020). *Software for calculation with physical quantities*. doi:10.1109/metroind4.0iot48571.2020.9138281.
14. Yang, Z., Guo, S., Hu, Y. and Yang, J. (2009). *Thickness-shear vibration of rotatedY-cut quartz plates with unattached electrodes and asymmetric air gaps*. 89(5), pp.313–321. doi:10.1080/09500830902841903.

Статтю представив д.т.н., проф. Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" В.І. Носков.

Надійшла (received) 16.07.2023.

Savchenko Volodymyr, Cand. Sc. (Engineering),
National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”
2, Kyrpychova str., Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.:(067)5767884, e-mail: savchenko@live.com
ORCID ID: 0000-0001-6548-0891

Mnushka Oksana, Senior Lecturer, M.S. (Computer. Science)
National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”
2, Kyrpychova str., Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.:(050)2428846, e-mail: mnushka.ov@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-7756-9260

Leonov Serhii, Dr. Sc. (Engineering), Professor
National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”
2, Kyrpychova str., Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: (099) 9119113, e-mail: serleomail@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-8139-0458

УДК 004.942:621.373

Прикладне програмне забезпечення для моделювання параметрів сенсорів на основі кварцових п’єзоелектричних елементів / Савченко В.М., Мнушка О.В., Леонов С.Ю. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2023. – № 1 – 2 (9 – 10). – С. 61 – 71.

Розв’язано прикладну науково-технічну задачу побудови програмного забезпечення для дослідження параметрів кварцових п'єзоелементів із міжелектродним зазором. Проведено аналітичний огляд задач, що виникають під час моделювання параметрів, основні підходи до побудови наукового програмного забезпечення із використанням універсальних математичних пакетів та вузько спеціалізованих програм. Розроблено структуру компонентів програмного забезпечення із використанням принципів об’єктно-орієнтованого дизайну та програмування. Розроблено бібліотеку підпрограм для розрахунків фізичних параметрів кварцових елементів мовою програмування Python. Програмне забезпечення може бути розширеним за рахунок використання додаткових уточнених математичних моделей. Іл.: 3. Бібліогр.: 14 назв.

Ключові слова: моделювання, кварцовий п’єзоелемент, еквівалентна електрична схема, генератор, Python

UDC 004.942:621.373

Applied software for modeling parameters of sensors based on quartz piezoelectric elements / Savchenko V., Mnushka O., Leonov S. // Herald of NTU “KhPI”. Series: Informatics and modeling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2023. – 1 – 2 (9 – 10). – P. 61 – 71.

An applied scientific and technical problem of constructing software for studying the parameters of quartz piezoelectric elements with an interelectrode gap has been solved. An analytical review of the issues arising during parameter modeling, the main approaches to constructing scientific software using universal mathematical packages and narrowly specialized programs, have been conducted. The structure of software components has been developed using object-oriented design and programming principles. A subroutine library for calculating the physical parameters of quartz elements in the Python programming language has been developed. The software can be expanded by using additional refined mathematical models. Figs.: 3. Bibl.: 14 titles.

Keywords: modeling, quartz piezoelectric element, equivalent electrical circuit, generator, Python.

ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Вісник Національного технічного університету "ХПІ", 2023, № 1–2 (9–10)
ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

УДК 004.932 **DOI: 10.20998/2411-0558.2023.01.06**

А. О. ДАШКЕВИЧ, канд. техн. наук, доц., Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків.

ГЕОМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ПОСЛІДОВНОСТЯХ ЗОБРАЖЕНЬ

В результаті роботи розроблено підхід до швидкої ідентифікації динамічних об'єктів, що описуються як точки в метричних просторах, процес ідентифікації відбувається на основі припущення про близькість точок, що відповідають різним станам одного об'єкта у заданому метричному просторі. Представлений підхід базується на порівнянні відстаней між точками, що описують стан об'єкту. Результати роботи реалізовано в вигляді програмного забезпечення для ідентифікації динамічних об'єктів на послідовностях цифрових зображень та візуалізації таких експериментів. Проведено тестування підходу на синтетичних даних та на реальних даних для ідентифікації об'єктів, знайдених на відео. Іл.: 4. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: ідентифікація динамічних об'єктів; метричний простір; близькість точок.

Постановка проблеми. Обробка цифрових зображень та відео набула великого значення у практичних задачах сучасності. Однією із подібних задач є аналіз послідовностей зображень для пошуку на них рухомих об'єктів. В задачах пошуку об'єктів суттєвий прогрес показали штучні нейронні мережі, такі як YOLO [1] або R-CNN [2]. Важливого значення у способах отримання та аналізу зображень набувають практичні застосування безпілотних літальних апаратів, наприклад, для аналізу земної поверхні [3] та будівельних конструкцій [4, 5], моніторингу ферм та електричних мереж [6, 7]. В таких задачах виникає необхідність визначення та ідентифікації конкретних об'єктів, які можуть знаходитись в процесі руху.

Аналіз останніх досліджень. В сучасних дослідженнях приділяється багато уваги до вдосконалення алгоритмів пошуку та відслідковування об'єктів на відео [8, 9], зокрема, покращенню якості пошуку об'єктів із використанням штучних нейронних мереж [10]. В роботах [11, 12] розглядаються методи на основі теорії графів та Байєсівських мереж для розв'язання задачі відслідковування множин об'єктів. Наведені методи дозволяють досягти кращих результатів, але потребують значних додаткових обчислювальних витрат на пошук розв'язків, що може бути непридатним у задачах ідентифікації в реальному

© А.О. Дашкевич, 2023

часі, тому можливим напрямком досліджень є пошук більш швидких способів ідентифікації об'єктів.

Мета роботи. Розробка підходу та програмного забезпечення для швидкої ідентифікації динамічних об'єктів, стан яких заданий як точки у багатовимірних метричних просторах.

Основна частина. Сформулюємо задачу ідентифікації об'єктів: для точкової множини у багатовимірному просторі $P = \{p_1, ..., p_M\}^d$, яка задана точками $p_i = (x_1,\ldots, x_d)$, що унікальним чином характеризують вхідні об'єкти, та заданих послідовних моментах часу t та t+1, визначити таку відповідність між двома станами множини P^t та P^{t+1}, що:

$$p_i \in P^t \equiv p_j \in P^{t+1}. \tag{1}$$

Якщо на вхідному просторі задана деяка метрика d, тоді умова (1) може бути переформульована як:

$$d(p_i, p_j) \le d_{\min}, \tag{2}$$

де d_{min} – деяка порогова відстань.

Таким чином, умова (2) базується на припущенні, що однакові об'єкти, або їх стани у послідовні моменти часу знаходяться близько в метричному просторі, що надає можливість визначати такі об'єкти або їх стани. В якості метрики може бути використана будь-яка функція, що задовольняє умовам:

$$\begin{aligned} &d(p,q) \ge 0, \\ &d(p,q) = 0 \mid p = q, \\ &d(p,q) \ge d(p,w) + d(w,q). \end{aligned} \tag{3}$$

Розглянемо приклад ідентифікації об'єктів на синтетичному прикладі, для якого було згенеровано двовимірну точкову множину, для кожної точки якої було задано випадковий вектор зміщення, приклад двох ітерацій руху наведено на рис. 1, кожна точка позначена унікальним кольором. Протягом симуляцій знаходимо пари точок, для яких виконується умова (2) за наступною схемою:

1) задаємо нульове значення лічильнику помилки e для кожної точки на кроці t+1 та складаємо усі попарні комбінації точки з точками кроку t;

2) серед усіх потенційних пар знаходимо пару із мінімальною відстанню між точками та їх індекси у вхідних масивах, які також унікальним чином поставлені у відповідність кожній точці;

3) якщо індекси точок в парі із мінімальною відстанню однакові, то переходимо до наступної точки з множини кроку $t + 1$, якщо ні, то збільшуємо лічильник помилки для поточної точки на одиницю $e = e + 1$;

4) визначаємо загальну помилку для усіх точок між ітераціями t+1 та t:

$$E = \frac{e}{N_P}, \tag{4}$$

де N_P – загальна кількість точок. На рис. 2 показано залежність середніх значень помилки за виразом (4) для різних значень d_{min}. На рис. 3 наведено залежність поточного значення e від d_{min}.

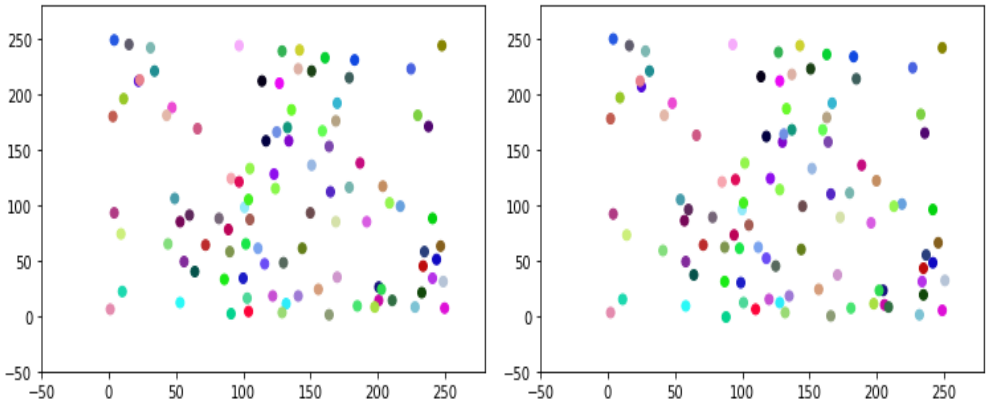


Рис. 1. Приклад тестової точкової множини

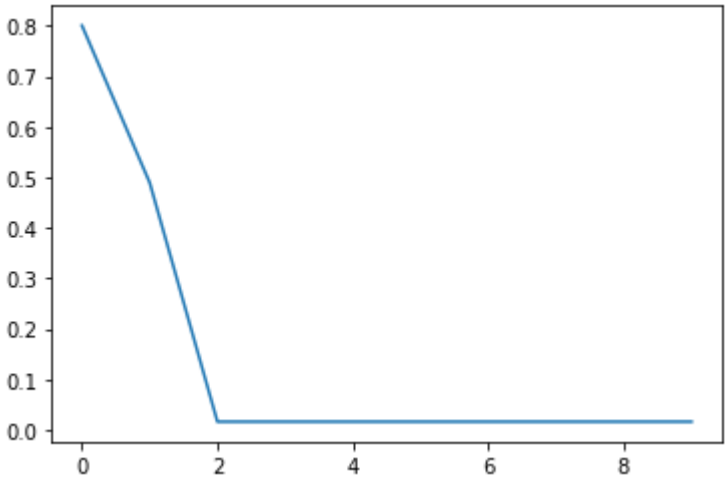


Рис. 2. Середні значення помилки в залежності від d_{min}

Продемонструємо застосування підходу до задачі ідентифікації знайдених об’єктів на відео, пошук об’єктів здійснювався засобами

штучної нейронної мережі YOLO, також може бути використана ШНМ R-CNN, або будь-який подібний детектор об’єктів.

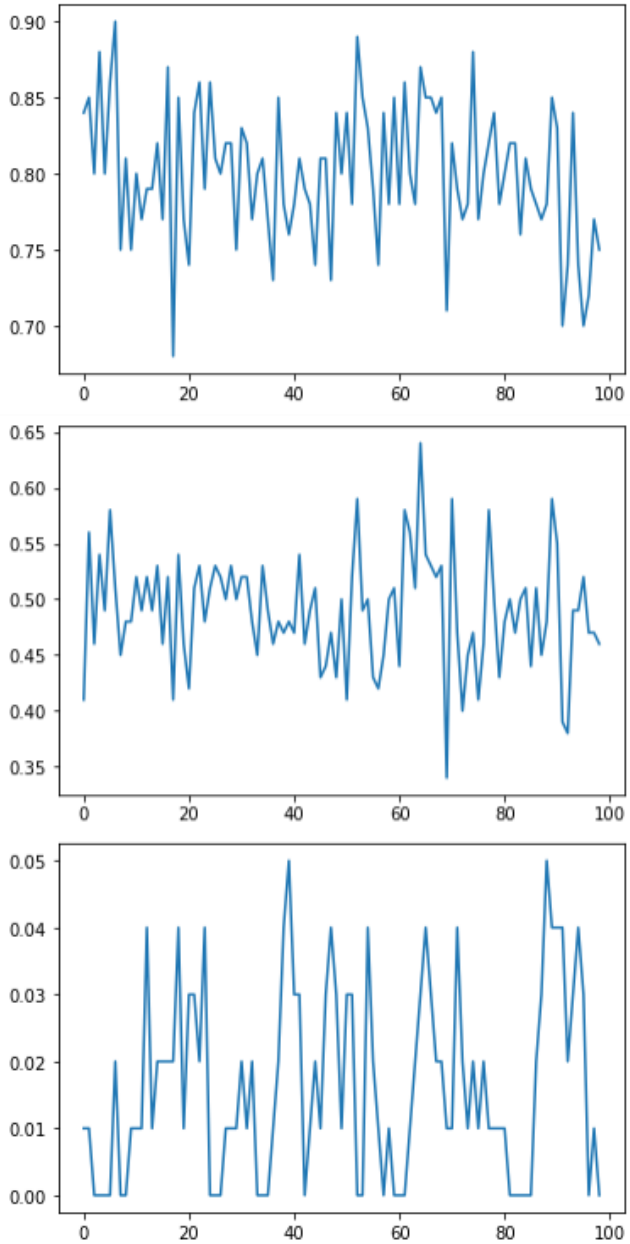


Рис. 3. Залежність поточної помилки e для d_{min} = {1, 2, 3}

Детектори об’єктів здійснюють пошук об’єктів на зображеннях через знаходження відповідних обмежуючих прямокутників (рис. 4), недоліком таких систем є те, що вони не ідентифікують знайдені об’єкти. В роботі

пропонується застосувати вищенаведений підхід до ідентифікації унікальних об’єктів на послідовності зображень, в якості точкових множин виступатимуть множини знайдених обмежувальних прямокутників B^t та B^{t+1} для попереднього та поточного кадру, відповідно. Кожен елемент $b_i \in B$ являє набір значень в тривимірному просторі $\{x, y, w/h\}$ – {координати центру, співвідношення сторін}.

В результаті тестування було проведено експерименти на послідовності з 50 розпізнаних зображень, оцінювання відбувалось за модифікованою умовою (4):

$$E = \frac{N_I}{N_F}, \tag{4}$$

де N_I та N_F – кількість невірно ідентифікованих об’єктів та кількість кадрів, на якій об’єкт було знайдено, відповідно.

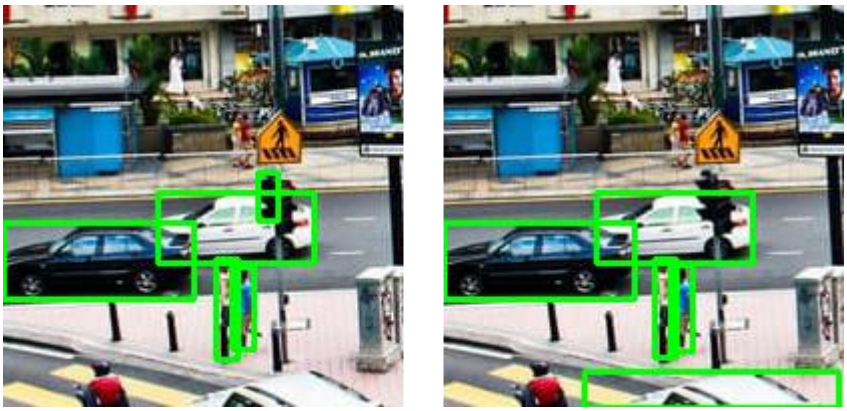


Рис. 4. Результат пошуку об’єктів на послідовності кадрів

Висновки і перспективи подальших досліджень. В результаті роботи розроблено підхід до ідентифікації динамічних об’єктів, що описуються як точки в метричних просторах, процес ідентифікації відбувається на основі припущення про близькість точок, що відповідають різним станам одного об’єкта у заданому метричному просторі. Результатом виконання роботи є створення обчислювального програмного забезпечення для ідентифікації динамічних об’єктів на послідовностях цифрових зображень та візуалізації таких експериментів. Подальші дослідження будуть спрямовані на автоматизацію підбору параметрів системи.

Список літератури:

1. Wang C.-Y. Scaled-yolov4: scaling cross stage partial network / C.Y. Wang, A. Bochkovskiy, H.-Y.M. Liao. – 2021. – 13029–13038 p.

2. Girshick R. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation / R.Girshick, J. Donahue, T. Darrell, J. Malik. – USA : IEEE Computer Society, 2014. – 580–587 p. – ISBN 978-1-4799-5118-5.
3. Kleinschroth F. Drone imagery to create a common understanding of landscapes / F. Kleinschroth, K. Banda, H. Zimba, [et al.] // Landscape and Urban Planning. – 2022. – Vol. 228. – P. 104571.
4. Asnafi M. A review on potential applications of unmanned aerial vehicle for construction industry / M. Asnafi, S. Dastgheibifard // Sustainable Structures and Materials, An International Journal. – 2018. – Vol. 1, No. 2. – P. 44–53.
5. Mandirola M. Use of uas for damage inspection and assessment of bridge infrastructures / M. Mandirola, C. Casarotti, S. Peloso, [et al.] // International Journal of Disaster Risk Reduction. – 2022. – Vol. 72. – P. 102824.
6. Hafeez A. Implementation of drone technology for farm monitoring & pesticide spraying: a review / A. Hafeez, M.A. Husain, S P. Singh, [et al.] // Information Processing in Agriculture. – 2023. – Vol. 10, No. 2. – P. 192–203.
7. Schofield O. B. Autonomous power line detection and tracking system using uavs / O. B. Schofield, N. Iversen, E. Ebeid // Microprocessors and Microsystems. – 2022. – Vol. 94. – P. 104609.
8. Liu C. Robust object detection with inaccurate bounding boxes / C. Liu, K. Wang, H. Lu, [et al.] // Computer Vision – ECCV 2022 / S. Avidan, G. Brostow, M. Cissé, [et al.]. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2022. – P. 53–69.
9. Mandel T. Detection confidence driven multi-object tracking to recover reliable tracks from unreliable detections / T. Mandel, M. Jimenez, E. Risley, [et al.] // Pattern Recognition. — 2023. — Vol. 135. — P. 109107.
10. Yuan J. Identification method of typical defects in transmission lines based on yolov5 object detection algorithm / J. Yuan, X. Zheng, L. Peng, [et al.] // Energy Reports. – 2023. – Vol. 9. – P. 323–332.
11. Han S. ORT: occlusion-robust for multi-object tracking / S. Han, H. Wang, E. Yu, Z. Hu // Fundamental Research. – 2023. – P. S2667325823000328.
12. Saada M. A multi-object tracker using dynamic bayesian networks and a residual neural network based similarity estimator / M. Saada, C. Kouppas, B. Li, Q. Meng // Computer Vision and Image Understanding. – 2022. – Vol. 225. – P. 103569.

References:

1. Wang, C.-Y., Bochkovskiy, A., Liao, H.-Y.M. (2021),. Scaled-YOLOv4: Scaling Cross Stage Partial Network, *in: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).* pp. 13029–13038.
2. Girshick, R., Donahue, J., Darrell, T., Malik, J. (2014), Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation, *in: Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR '14. IEEE Computer Society*, USA, pp. 580–587. https://doi.org/10.1109/CVPR.2014.81.
3. Kleinschroth, F., Banda, K., Zimba, H., Dondeyne, S., Nyambe, I., Spratley, S., Winton, R.S. (2022), *Drone imagery to create a common understanding of landscapes. Landscape and Urban Planning* 228, 104571. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104571.
4. Asnafi, M., Dastgheibifard, S. (2018), A Review on Potential Applications of Unmanned Aerial Vehicle for Construction Industry. Sustainable Structures and Materials, *An International Journal* 1, 44–53. https://doi.org/10.26392/SSM.2018.01.02.044.

5. Mandirola, M., Casarotti, C., Peloso, S., Lanese, I., Brunesi, E., Senaldi, I. (2022), Use of UAS for damage inspection and assessment of bridge infrastructures. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 72, 102824. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.102824.
6. Hafeez, A., Husain, M.A., Singh, S.P., Chauhan, Anurag, Khan, Mohd.T., Kumar, N., Chauhan, Abhishek, Soni, S.K. (2023), Implementation of drone technology for farm monitoring & pesticide spraying: *A review. Information Processing in Agriculture* 10, 192–203. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2022.02.002.
7. Schofield, O.B., Iversen, N., Ebeid, E. (2022), Autonomous power line detection and tracking system using UAVs. *Microprocessors and Microsystems* 94, 104609. https://doi.org/10.1016/j.micpro.2022.104609.
8. Liu, C., Wang, K., Lu, H., Cao, Z., Zhang, Z. (2022), Robust Object Detection with Inaccurate Bounding Boxes, in: Avidan, S., Brostow, G., Cissé, M., Farinella, G.M., Hassner, T. (Eds.*), Computer Vision – ECCV 2022, Lecture Notes in Computer Science. Springer Nature Switzerland, Cham*, pp. 53–69. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20080-9_4.
9. Mandel, T., Jimenez, M., Risley, E., Nammoto, T., Williams, R., Panoff, M., Ballesteros, M., Suarez, B. (2023), Detection confidence driven multi-object tracking to recover reliable tracks from unreliable detections. *Pattern Recognition* 135, 109107. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2022.109107.
10. Yuan, J., Zheng, X., Peng, L., Qu, K., Luo, H., Wei, L., Jin, J., Tan, F. (2023), Identification method of typical defects in transmission lines based on YOLOv5 object detection algorithm. *Energy Reports* 9, 323–332. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.078..
11. Han, S., Wang, H., Yu, E., Hu, Z. (2023), ORT: Occlusion-robust for multi-object tracking. *Fundamental Research* S2667325823000328. https://doi.org/10.1016/j.fmre.2023.02.003.
12. Saada, M., Kouppas, C., Li, B., Meng, Q. (2022), A multi-object tracker using dynamic Bayesian networks and a residual neural network based similarity estimator. *Computer Vision and Image Understanding* 225, 103569. https://doi.org/10.1016/j.cviu.2022.103569.

Поступила (received) 30.06.2023

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

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

УДК 004.932

Геометрична ідентифікація динамічних об’єктів на послідовностях зображень / Дашкевич А.О. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2023. – № 1–2 (9–10). – С. 72 – 80.

В результаті роботи розроблено підхід до швидкої ідентифікації динамічних об’єктів, що описуються як точки в метричних просторах, процес ідентифікації відбувається на основі припущення про близькість точок, що відповідають різним станам одного об’єкта у заданому метричному просторі. Представлений підхід базується на порівнянні відстаней між точками, що описують стан об’єкту. Результати роботи реалізовано в вигляді програмного забезпечення для ідентифікації динамічних об’єктів на послідовностях цифрових зображень та візуалізації таких експериментів. Проведено тестування підходу на синтетичних даних та на реальних даних для ідентифікації об’єктів знайдених на відео. Іл.: 4. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: ідентифікація динамічних об’єктів; метричний простір; близькість точок.

UDC 004.932

Geometric identification of dynamic objects on image sequences / Dashkevych A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2023. – № 1–2 (9–10). – С. 46 – 54.

As a result of the work, an approach to fast identification of dynamic objects described as points in metric spaces has been developed, the identification process is based on the assumption of the proximity of points corresponding to different states of the same object in a given metric space. The presented approach is based on the comparison of distances between points describing the state of the object. The results of the work are implemented in the form of software for the identification of dynamic objects on sequences of digital images and visualization of such experiments. The approach was tested on synthetic data and on real data for the identification of objects found in the video. Figs.: 4. Refs.: 12 titles.

Keywords: dynamic objects identification; metric space; proximity of points.

Вісник Національного технічного університету "ХПІ", 2023, № 1–2 (9–10)
ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

УДК 681.326 **DOI: 10.20998/2411-0558.2023.01.07**

М. А. МІРОШНИК, д-р техн. наук, проф., Харківський національний університет ім. Каразіна, м. Харків,
О. С. ШКІЛЬ, канд. техн. наук, доц., проф., Харківський Національний університет радіоелектроніки, м. Харків,
Д. Ю. РАХЛІС, канд. техн. наук, доц., Харківський Національний університет радіоелектроніки, м. Харків,
А. М. МІРОШНИК, асп., Харківський Національний університет радіоелектроніки, м. Харків,
Д. А. ЛОБОЙЧЕНКО, магістр, Харківський Національний університет радіоелектроніки, м. Харків

МЕТОДИ ПОБУДОВИ ТЕСТІВ ДЛЯ ІНТЕРАКТИВНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ НА СТРУКТУРНО-ЛОГІЧНОМУ РІВНІ

Розроблено методи синтезу перевіряючих послідовностей інтерактивних комп'ютерних мереж з використанням циклічних, відмінних і характеристичних символів автоматної моделі комірки мережи. Розроблено та обґрунтовано новий метод модифікації автоматної діаграми комірки, яка не має відмінної послідовності і передбачає введення додаткового вхідного символу та використання кодів станів, що породжує Гамільтонів цикл у послідовності переходів. Розроблено методи та процедури синтезу одновимірних і двовимірних мереж з розподіленим управлінням конфігурацією. Іл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: діагностичний експеримент; інтерактивна комп'ютерна мережа; одновимірна і двовимірна мережа, перевіряюча послідовність; комірка; додатковий вхідний символ.

Аналіз структур та тенденцій розвитку інтерактивних комп'ютерних мереж. Широке застосування елементної бази NoC, SoC і ПЛІС FPGA при проектуванні комп'ютерних систем (КС) дало поштовх численним дослідженням щодо створення одновимірних та двовимірних інтеративних комп'ютерних мереж (ІКМ) з конструктивними властивостями архітектурно-структурної однорідності, тестопридатності, самоперевірюваності, високої продуктивності та реактивності [1]. Просторова розподіленість конфігурованих логічних блоків (КЛБ) FPGA; паралелізм їх функціонування та можливість програмної реконфігурації сполук та налаштувань КЛБ визначили інтерес дослідників до реалізації КС у вигляді ІКМ [2, 3].

Розвиток математичної теорії однорідних структур у КС для паралельної обробки інформації шляхом паралельного виконання

© М.А. Мірошник, О.С. Шкіль, Д.Ю. Пахліс, А.М. Мірошник, Д.А. Лобойченко, 2023

обчислювальних алгоритмів у поєднанні із сучасними досягненнями субмікронних технологій в електронній промисловості дає **актуальність** та перспективи побудови діагностичної інфраструктури на ІКМ [4 – 5].

Ціллю статті є розробка та обгрунтування нового методу модифікації автоматних діаграм комірок, розробка процедури синтезу одномірних і двомірних мереж з розоділенним управлінням конфігурацією.

ІКМ є впорядкованим масивом однорідних функційних модулів (ФМ) у *n*-мірному просторі, в якому кожен модуль або клітина має обмежену множину станів, а перехід з одного стану в інший визначається набором правил або функцією переходів ФМ, відповідно до якої будь-який модуль мережі обчислює свій новий стан на кожному такті функціонування мережі. Структура ФМ ІКМ ідентична структурі КЛБ FPGA і тому будь-яка мережа з довільними правилами функціонування та еволюцією може бути конфігуровано у структурі ПЛІС. ІКМ, всі ФМ-клітини якої налаштовані за одним правилом, називають однорідною ІКМ (ОІКМ), в іншому випадку вона називається гібридною ІКМ (ГІКМ) [6].

Наразі ІКМ популярні серед вітчизняних та закордонних дослідників, які досліджують властивості мереж. В [7, 8] представлено та проаналізовано найбільш поширену трирівневу магістральну архітектуру КС та її компоненти, а також структуру фреймів неінтерактивних та ІКМ і систем. В [9] показано як інтерактивні моделі руху даних застосовуються в КС реального часу, та показано які існують інтерфейсні виконавчі механізми мікропроцесорних систем автоматизації виробничих процесів. Аналіз існуючих методів проектування відмовостійких систем на основі розподілених ІКМ (РІКМ) показує, що знаходять широке застосування два підходи: 1) запровадження та використання апаратної надлишковості у вигляді резервних модулів (РМ) ФМ, де РМ замінюють несправні; 2) виключення несправних ФМ із РІКМ із деградацією її продуктивності в допустимих межах (Degradable Arrays). Проблема побудови двомірних РІКМ, що деградують, у яких використовуються чотирипортові комутатори є NP-повною. Надзвичайно складно маршрутизувати ДІКМ одночасно по рядкам і стовпцям. Було запропоновано алгоритм реконфігурації, у якому маршрутизація справних ФМ рядками і стовпцям здійснюється обмеженого за розмірністю і площі ділянки двовимірної мережі, та велику кількість алгоритмів, що мінімізують час реконфігурації, енергетичні витрати. Відсутність доступу до внутрішніх модулів мережі ускладнює процедуру генерації тестових наборів, оцінки їхньої ефективності та пошуку несправного модуля. Тому виникає завдання модифікації структур ІКМ, що забезпечило б підвищення

ефективності процедур тестового діагностування ІКМ, та розробки методів синтезу перевіряючих послідовностей, які дозволяють виключити трудомісткі процедури моделювання виявлених несправностей [10].

Синтез перевіряючої послідовності за тестовим графом функціональної комірки ІКМ. Розроблено методи синтезу перевіряючих тестів ІКМ, функціональні модулі яких не мають виходів, що спостерігаються, а функціонування представляється моделями кінцевих детермінованих автоматів. Методи синтезу перевіряючих послідовностей та побудови діагностичних експериментів, запропоновані в цій роботі, засновані на концепціях керованості та спостерігальності, які широко використовуються для оцінок тістопридатності об'єкта діагностування (ОД).

У деяких структурах ІКМ відсутні верхні керовані входи, що знижує показники керованості мережі, а отже ускладнює процедуру тестового діагностування (ТД) справності мережі.

З метою покращення показників керованості та спостережуваності, спрощення процедур синтезу перевіряючих тестів та діагностування одновимірної ІКМ пропонується модифікувати структуру ІКМ та процедуру перевірки її справності відповідно до таких пропозицій та умов:

1) ввести до кожної комірки мережі **додаткові входи** x_i, i = 1, 2, …, n для забезпечення умов керованості та транспортування несправностей у мережі на бічні виходи, що спостерігаються;

2) ввести до кожної комірки мережі **додаткові виходи** x_i, i = 1, 2, …, n для забезпечення умов спостережуванння станів;

3) процедури перевірки справності елементів пам'яті та комбінаційної частини комірок мережі проводити окремо;

4) перевіряючий експеримент виконувати у 2 етапи відповідно до 2 напрямів поширення сигналів: ліворуч – праворуч та у зворотному напрямку, що дозволить виключити вплив зворотних зв'язків між комірками мережі та спростити процедури синтезу тестів та перевірки справності ІКМ.

При реалізації мережі на базі ПЛІС типу FPGA перелічені вище умови легко виконуються шляхом відповідного вибору типу ПЛІС та налаштування логічних блоків, що конфігуруються. Таким чином, завдання ТД ІКМ зводиться до завдання ТД одновимірної ІКМ (ОІКМ) або тільки з керованими входами в кожній комірці, або до перевірки справності ІКМ з керованими входами та спостережуваністю виходів у кожної комірці мережі.

Представлений метод синтезу перевіряючих послідовностей для ІКМ без спостережуваних виходів у кожній комірці мережі. На функціональному рівні опису комірки ОІКМ з бічними виходами, що спостерігаються, будемо розглядати його таблицю істинності як таблицю переходів-виходів (ТПВ) автомата Мура, що задається трійкою (X, Z, Q). Така мережа є керованою, якщо в таблиці переходів комірки мережі множина станів наступників дорівнює повній множині станів. З умови керованості ІКМ випливає, що завжди існує перекладна послідовність $T(z_i, z_j)$, яка забезпечує появу на правому виході комірки $C(\alpha), \alpha = \overline{1, p-1}$, стану z_j, $j = 1, 2, \ldots, n$.

Під спостережуваністю розумітимемо таку властивість ІКМ, яка забезпечує можливість ідентифікації в будь-якому внутрішньої комірки мережі кожного стану $z_i \in Z_\alpha$ та транспортування несправності типу $z_i \to Z/z_i$ на виходи мережі, що спостерігається. Необхідною умовою спостережуваності ІКМ є властивість мінімальності автоматної моделі комірки мережі, яка забезпечує помітність кожного стану комірки на виходах, що спостерігаються. Транспортування несправності на виходи мережі, що спостерігається, здійснюється додатком такого вхідного вектора X_T, який дозволяє відрізнити деякий стан z_i, $i = 1, 2, \ldots, n$, комірки мережі, що перевіряється, від множини інших станів Z/z_i.

Наведемо метод синтезу перевіряючих послідовностей для ІКМ без виходів, що спостерігаються x_i', заснований на аналізі автоматної моделі комірки мережі, побудові тестового графа (ТГ) пар станів за таблицею переходів автоматної моделі комірки та знаходження множини фундаментальних циклів у ТГ, що визначає, множина циклічних перевіряючих послідовностей усієї ІКМ. В основі побудови ТГ та його використання для знаходження безлічі перевіряючих тестів лежить поняття розрізнення пар станів, що входять до цього замкнутого циклу. Якщо у ТГ існує шлях із певної вершини $V_i = (z_a, z_b)$ до вершини V_j, що входить у деякий замкнутий цикл, то пара станів (z_a, z_b) є також помітною.

Метод синтезу перевіряючих тестів для ОІКМ, заснований на використанні ТГ комірку мережі, можна розглянути на прикладі одновимірної мережі без виходів, що спостерігаються, де мережа (рис. 1) складається з шести комірок із чотирма станами та однаковими правилами налаштування.

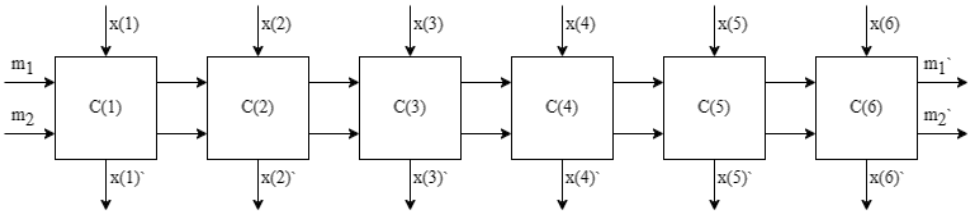


Рис. 1. Одновимірна ІКМ з виходами, що спостерігаються та додатковими виходами x_i

ТГ для аналізованої комірки мережі, побудований з його ТПВ і двох зв'язкових компонентів, у кожному з яких можна виділити множини фундаментальних циклів, тобто таких циклів, у яких є, щонайменше, одна дуга, що не належить ніякому іншому циклу. Якщо ТГ містить фундаментальний цикл, для виявлення всіх несправностей типу $(z_i \to z_j)$, $(z_j \to z_i)$, $(z_a \to z_в)$ і $(z_в \to z_a)$ у будь-якої комірки мережі достатньо докласти наступні чотири тести:

$$1)\ z_i \overset{x_\alpha}{-} z_a \overset{x_\beta}{-} z_i \overset{x_\alpha}{-} z_a \overset{x_\beta}{-} \ldots ,$$

$$2)\ z_a \overset{x_\beta}{-} z_i \overset{x_\alpha}{-} z_a \overset{x_\beta}{-} z_i \overset{x_\alpha}{-} \ldots ,$$

$$3)\ z_j \overset{x_\alpha}{-} z_в \overset{x_\beta}{-} z_j \overset{x_\alpha}{-} z_в \overset{x_\beta}{-} \ldots ,$$

$$4)\ z_в \overset{x_\beta}{-} z_j \overset{x_\alpha}{-} z_в \overset{x_\beta}{-} z_j \overset{x_\alpha}{-} \ldots .$$

Незалежно від числа комірок мережі ці тести викликають появу різних станів в одній і тій ж комірці, а, отже, перелічені вище несправності виявляються на виході z мережі, що спостерігається. Оскільки множина переходів ТГ розглянутої вище мережі покривається множиною фундаментальних циклів, крім переходу $(z_0 z_1) \overset{x_0}{-} z_1$, то для кожного циклу можна визначити множини тестів, що перевіряють правильність переходів та станів кожної комірки мережі. Для кожного фундаментального циклу G_1-G_7 ТГ комірки мережі наведено тести, що дозволяють виявити несправну комірку мережі. Однак у ТГ є перехід $(z_0 z_1) \overset{x_0}{-} z_1$, який не входить до жодного з розглянутих вище циклів і породжує невизначеність під час перевірки стану комірки мережі тестом $t_7 : z_1 \overset{x_0}{-} z_1 \overset{x_0}{-} z_1 \overset{x_0}{-} z_1 \overset{x_0}{-} z_1 \overset{x_0}{-} z_1 \overset{x_0}{-} z_1$.

Методика синтезу перевіряючих тестів заснована на використанні ТГ комірки мережі та виділенні множини фундаментальних циклів у ТГ, що має наступні особливості.

1. Складність процедури синтезу визначається складністю побудови ТГ та процедури знаходження фундаментальних циклів у графі.

2. Тести, побудовані за фундаментальними циклами ТГ комірки мережі, є, як правило, надлишковими.

3. Отримані тести можуть містити множину невизначених переходів, поява яких обумовлена наявністю в ТПВ комірки пар сумісних станів. Тому отримані тести необхідно аналізувати з метою знаходження таких невизначених переходів та подальшого розширення множини тестів, що перевіряють.

Складність процедури синтезу перевіряючих тестів за ТГ комірки ІКМ: n – кількість станів комірки мережі, g – ТГ, $g = Q(n2)$. Якщо в графі t дуг, $(g – 1)$ які належать остову, то кількість всіх фундаментальних циклів дорівнює цикломатичному числу $U = t – g + b$, де b – число зв'язкових компонентів ТГ, $b \approx 0(n)$. Так $z_к$ $t \geq g \times g \approx (n^4)$, це верхня оцінка трудомісткості, в якою оцінці не враховується складність знаходження основного підграфа ТГ комірки мережі. Розглянуті вище недоліки існуючої методики синтезу перевіряючих тестів для ІКМ без виходів, що спостерігаються, можна виключити, якщо скористатися підходом, заснованим на використанні характеристичних послідовностей автоматної моделі комірки та побудові перевіряючих тестів на основі цих послідовностей, що буде предметом дослідження в наступних роботах.

Висновки. Запропоновано процедуру модифікації структури функціональних комірок мережі шляхом введення додаткового входу, що спрощує процедуру синтезу перевіряючих тестів для ОІКМ із бічними виходами, що спостерігаються, з метою покращення показників керованості ОІКМ у процесі діагностичного експерименту.

Розроблено процедуру побудови діагностичного експерименту для ІКМ із виходами, що спостерігаються, у якої автоматна модель ФМ мережі є сильнозв'язним автоматом і має відрізняючу послідовність. Показано, що така мережа є тестопридатною.

Список літератури:

1. Мірошник М. А. Проектування діагностичної інфраструктури обчислювальних систем і пристроїв на ПЛІС: монографія / М.А. Мірошник. – Харків.: ХУПС, 2012. – 188 с.

2. Мірошник М. А. Обробка подій у цифрових пристроях реального часу. / Мірошник М.А., Шкіль О.С., Рахліс Д.Ю., Пшеничний К.Ю., Мірошник А.Н. / Збірник наукових праць "Вісник ЧДТУ", 2023, №2, С. 50-57.

3. Мірошник М.А.Синтез часових автоматів з операційним перетворенням коду станів / Мірошник М.А., Зайченко О.Б., Мірошник А.М., Зайченко Н.С. // Modern scientific researches. №12, 2021,– С.65-79.
4. Miroschnyk, M.A. Design timed fsm with vhdl moore pattern / Miroschnyk, M.A.; Shkil, O.S; Kulak, E.N.;, Rakhlis, D.Y.; Miroshnyk, A.M.; Malahov, N.V. // Journal Radio electronics computer science control, ISSN 1607-3274 eISSN 2313-688X, 2020, Issue 2. – P. 137-148.
5. Hardware Implementation of Timed Logical Control FSM. Miroschnyk, M., Shkil, A., Rakhlis, D., ...Filippenko, I., Malakhov, M., 2020 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTS 2020 - Proceedings, 2020. – 6 p.
6. Miroshnik M. A. Methods for designing self-checking digital machines. / M. A. Miroshnik, E. N. Kulak, E. M. Aliyeva, D. G. Karaman, Yu. V. Pakhomov // Telecommunications and Radio Engineering. – 2017. – Vol. 76, Issue 15, 2017. – P. 1367-1377.
7. Николайчук, Я. М. Структуризація, методи та моделі інтерактивної взаємодії оператор-інформаційна система моніторингу об’єктів нафтогазової галузі / Я.М. Николайчук, Н.Я. Возна, Г.Я. Процюк та ін. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ: всеукр. наук.-техн. журнал. – Івано-Франківськ, 2015. – № 2 (55). – С. 111-118.
8. Николайчук, Я. М. Дослідження системних функцій та архітектури інтерактивних комп’ютерних мереж [Ел. ресурс] / Я.М. Николайчук, Р.В. Цанько, Н.Я. Возна // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2012. – № 4 (191). – С. 73-78.
9. Кузьо М.М. Реконфігуровані обчислювальні системи на однорідній структурі Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua, CSN., Number 688 2010; С.152-157.
10. Мирошник М. А. Однородные сети с распределенной системой реконфигураций / М.А. Мирошник, Я.Ю. Королева, Л.В. Дербунович // Вісник НТУ „ХПІ”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – № 20. – С. 71-78.

References:

1. Miroshnyk, M.A. (2012), *Designing the diagnostic infrastructure of computing systems and devices on FPGAs: a monograph*, Kharkiv., KHUPS, 188 p.
2. Miroshnyk, M.A., Shkil′, O.S., Rakhlis, D.Yu., Pshenychnyy, K.Yu., Miroshnyk, A.N. (2023), Event processing in real-time digital devices. Collection of scientific works "ChDTU Bulletin, 2023, № 2, pp. 50-57.
3. Miroshnyk ,M.A., Zaychenko, O.B., Miroshnyk, A. M., Zaychenko, N.S. (2021), Synthesis of time automata with operational state code transformation, *Modern scientific researches*, № 12, 2021, pp. 65-79.
4. Miroschnyk, M.A., Shkil, A.S., Kulak, E.N., Rakhlis, D.Y., Miroshnyk, A.M., Malahov, N.V. (2020), Design timed FSM with VHDL Moore pattern [Design timed FSM with VHDL Moore pattern], *Radio Electronics, Computer Science, Control - Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2 (53), pp. 137-148.
5. Miroschnyk, M. A., Shkil, A. S., Kulak, E. N., Rakhlis, D. J, Filippenko, I.V. and Malakhov M. (2020), Hardware implementation of timed logical control FSM [Hardware implementation of timed logical control FSM]. Proc. of 2020 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'20), *Proc. of 2020 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'20)*, 6 p. [Electronic resource] / *IEEE Xplore Digital Library* – Access mode: www / URL: https://ieeexplore. ieee.org/document/ 9225129.

6. Miroshnik, M.A. Kulak, E.N., Aliyeva, E.M., Karaman, D.G., Pakhomov, Yu.V. (2017), Methods for designing self-checking digital machines, *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 76, Issue 15, pp. 1367-1377.
7. Nykolaychuk, Ya. M., Vozna, N.Ya., Protsyuk, H.YA. at all. (2015), Structuring, methods and models of interactive interaction between the operator and the information system for monitoring objects in the oil and gas industry, *Exploration and development of oil and gas deposits: throughout Ukraine. science and technology magazine*, Ivano-Frankivsk, № 2 (55), pp. 111-118.
8. Nykolaychuk, Ya.M., Tsan′ko, R.V., Vozna, N.Ya. (2012), Study of system functions and architecture of interactive computer networks [E-mail. resource], *Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, Khmelnytskyi, № 4 (191), pp. 73-78.
9. Kuz′o, M.M. (2010), Reconfigurable computing systems on a homogeneous structure, *Lviv Polytechnic National University Institutional Repository*, http://ena.lp.edu.ua, CSN., Number 688 2010; S. 152-157.
10. Myroshnyk, M.A., Koroleva, Ya.Yu., Derbunovych, L.V. (2010), Homogeneous networks with a distributed system of reconfigurations, *Bulletin of NTU "KhPI". Collection of scientific works. Thematic issue: Automation and instrumentation*, Kharkiv, NTU "KHPI", № 20, pp. 71-78.

Статтю представив д-р техн. наук, проф., професор кафедри автоматизації проектування обчислювальної техники Харківського Національного Університету Радіоелектроніки Кривуля Генадій Федорович

Надійшла 13.06.2023 р.

Miroshnyk Maryna, PhD Tech. Sc., professor.
V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv
Sq. Svobody, 4, Kharkov, Ukraine, 61166
Tel.: (099) 063-31-45, e-mail: m.miroshnyk@karazin.ua
ORCID ID: 0000-0002-2231-2529

Shkil Olexandr, PhD Tech, professor.
Kharkiv National University of Radioelectronics
Nauki, Ave.14, Kharkiv, Ukraine, 61166
Tel.: (067) 57-377-99, e-mail: oleksandr.shkil@nure.ua
ORCID ID: 0000-0003-1071-3445.

Rakhlis Dariia, PhD Tech, associate professor
Kharkiv National University of Radioelectronics
Nauki, Ave.14, Kharkiv, Ukraine, 61166
Tel.: (068) 920-22-60, e-mail: dariia.rakhlis@nure.ua
ORCID ID: 0000-0002-6652-1840.

Miroshnyk Anatolii, aspirant.
Kharkiv National University of Radioelectronics
Nauki, Ave.14, Kharkiv, Ukraine, 61166
Tel.: (095) 82-69-640, e-mail: anatolii.miroshnyk@nure.ua
ORCID ID: 0000-0001-5702-9611

Loboyhenko Dmytro, magistr.
Kharkiv National University of Radioelectronics
Nauki, Ave.14, Kharkiv, Ukraine, 61166
Tel.: (066) 139-20-67, e-mail: danylo.loboichenko@nure.ua
ORCID ID: 0000-0000-0000-0000

УДК 681.326

Методи побудови тестів для інтерактивних комп'ютерних мережах на структурно-логічному рівні / М.А. Мірошник, О.С. Шкіль, Д.Ю. Рахліс А.М. Мірошник, Д. А. Лобойченко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2023. – № 1–2 (9–10). – С. 81 – 90.

Розроблено методи синтезу перевіряючих послідовностей інтеративних комп'ютерних мереж з використанням циклічних, відмінних і характеристичних символів автоматної моделі комірки мережи. Розроблено та обґрунтовано новий метод модифікації автоматної діаграми комірки, яка не має відмінної послідовності і передбачає введення додаткового вхідного символу та використання кодів станів, що породжує Гамільтонів цикл у послідовності переходів. Розроблено методи та процедури синтезу одновимірних і двовимірних мережі з розподіленим управлінням конфігурацією. Іл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: діагностичний експеримент; інтерактивна комп'ютерна мережа; одновимірна і двовимірна мережа; перевіряюча послідовність; комірка; додатковий вхідний символ.

UDC 681.326

Constructing tests methods for the interactive computer networks at the structural-logical level / M.A. Miroshnyk, O.S. Shkil, A.M. Miroshnyk, D.Yu. Rakhlis, D.A. Loboychenko // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2023. – № 1–2 (9–10). – P. 81 – 90.

Synthesizing test sequences methods for interactive computer networks using cyclic, distinguishing and characteristic symbols for the FSM model of a network cell have been developed. A new method for state diagram modification of a cell, which doesn't have a distinguishing sequence and provides for the input of an additional input symbol and usage of state codes, which generates a Hamilton cycle in the sequence of transitions has been developed and substantiated. Methods and procedures for the synthesis of one-dimensional and two-dimensional networks with distributed configuration control have been developed. Figs.: 1. Refs.: 10 titles.

Keywords: diagnostic experiment; interactive computer network; one-dimensional and two-dimensional networks; test sequence; cell; additional input symbol.

ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

Інформаційні технології

Вісник Національного технічного університету "ХПІ", 2023, № 1–2 (9–10)
ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

УДК 004.02 **DOI: 10.20998/2411-0558.2023.01.08**

С. В. ІЛЬЇН, завідувач відділом Науково-дослідного, проектно-конструкторського та технологічного інституту мікрографії (НДІ мікрографії), Харків,
Є. Л. ХОЛОД, заступник завідувача відділу Науково-дослідного, проектно-конструкторського та технологічного інституту мікрографії (НДІ мікрографії), Харків,
А. Б. МАЗНИЧКО, провідний інженер-програміст Науково-дослідного, проектно-конструкторського та технологічного інституту мікрографії (НДІ мікрографії), Харків,
Л. О. ГОРОДНИЧА, інженер-програміст ІІ категорії Науково-дослідного, проектно-конструкторського та технологічного інституту мікрографії (НДІ мікрографії), Харків

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ ДЛЯ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОЇ МОДЕЛІ КОНСОЛІДАЦІЇ ІТ-РЕСУРСІВ СФД УКРАЇНИ

Вибір оптимальної технології для консолідації інформаційних ресурсів, що здійснюють інформаційне забезпечення Державного реєстру документів страхового фонду документації України здійснювався серед технологій IaaS, PaaS, SaaS, DaaS, веб-застосунки тощо. Це виявилось багатокрітеріальною задачею із великою кількістю чинників різної розмірності, яку було розв’язано за допомогою методу аналізу ієрархій. Іл.: 1. Табл.: 2. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: консолідація; реєстри; страховий фонд документації України; IaaS; PaaS; SaaS; DaaS; веб-застосунок, метод аналізу ієрархій.

Вступ. Державний реєстр документів страхового фонду документації України (далі – Реєстр документів СФД) – автоматизована інформаційна система державного обліку та обробки інформації про документи страхового фонду документації (документи, необхідні для поставлення на виробництво, експлуатацію та ремонт продукції оборонного, мобілізаційного і господарського призначення, для проведення будівельних (відбудовчих), аварійно-рятувальних та аварійно-відновлювальних робіт під час ліквідування надзвичайних ситуацій та в особливий період, а також для збереження культурної спадщини, на випадок утрати або псування оригіналу документа). Ведення Реєстру документів СФД здійснюється його держателем (Укрдержархівом), посадовими особами, які здійснюють інформаційне наповнення Реєстру документів СФД, та адміністратором Реєстру документів СФД (Науково-

© С.В. Ільїн, Є.Л. Холод, А.Б. Мазничко, Л.О. Городнича, 2023

дослідним, проектно-конструкторським та технологічним інститутом мікрографії) з метою створення та ведення бази даних, супроводу програмного забезпечення, надання доступу, захисту та адміністрування бази даних Реєстру [1].

Інформаційне забезпечення Реєстру документів СФД здійснюється групою територіально розподілених регіональних центрів страхового фонду документації (далі – РЦ СФД), в локальних обчислювальних мережах, в яких у 2006 році було впроваджено розроблене НДІ мікрографії ПЗ автоматизованих робочих місць (далі – АРМ). ПЗ АРМ РЦ СФД побудоване за технологією клієнт-сервер [2]. Відповідно до чинного технологічного процесу інформаційне забезпечення Реєстру документів СФД відбувається за допомогою дампів локальних баз даних (далі – БД) [3].

Клієнтську частину ПЗ АРМ РЦ СФД було розроблено для функціювання під керуванням операційної системи (далі – ОС) Windows XP та системи керування базами даних (далі – СКБД) Oracle 9i. Півтора десятка років, що минули із впровадження ПЗ АРМ РЦ СФД, є великим терміном для будь якої обчислювальної техніки, що як виходить з ладу, так і морально старіє. Тому РЦ СФД під час оновлення власного "парку" персональної електронно обчислювальної техніки зіткнулся із наступними проблемними питаннями:

– несумісністю СКБД Oracle 9i із сучасними операційними системами та високою вартістю нових версій СКБД Oracle;

– несумісністю деяких компонентів ПЗ АРМ РЦ СФД із сучасними версіями Windows.

Крім того, під час дослідження шляхів із забезпечення функціювання корпоративних ІТ-ресурсів в умовах постійного розвитку інформаційних технологій були визначені додаткові проблемні питання:

– необхідність виділення в кожному РЦ СФД додаткових апаратних ресурсів для організації сервера БД;

– відсутність єдиної політики із забезпечення безпеки інформації, яка зберігається в БД окремих РЦ СФД та єдиного регламенту обслуговування та адміністрування БД окремих РЦ СФД.

Аналіз сучасної тенденції стосовно консолідації корпоративних ІТ-ресурсів свідчить можливості суттєво зменшити витрати на ІТ, а заощаджені кошти – направити на підвищення якості наявних інформаційних послуг і впровадження нових. Крім оптимізації витрат на ІТ, консолідація ІТ-ресурсів сприяє покращенню керованості підприємств за рахунок більш актуальної та повної інформації про їхнє функціонування.

Постановка проблеми. Постає питання із визначення моделі консолідації ІТ-ресурсів у сфері інформаційного забезпечення Реєстру документів страхового фонду документації України в умовах обмеженості ресурсів (людських, часу, фінансових тощо), необхідних на модифікацію/адаптацію чинної моделі інформаційного забезпечення ПЗ до сучасного апаратно-програмного забезпечення та на впровадження оновленої моделі у Державній системі СФД.

Визначення моделі є багатокритеріальним завданням, для вирішення якого недостатньо практичного досвіду людини, та потребує застосовування математичних методів. Це реальні умови невизначеності, де виникають слабоструктуровані та неструктуровані проблеми, які вирішують за допомогою стохастичного програмування, кореляційно-регресивного аналізу, теорії ігор, методу аналізу ієрархій.

Аналіз літератури. Запропонований Сааті метод аналізу ієрархій знайшов застосування для вирішення найрізноманітніших проблем для вибору інвестиційного проекту [4, 5], торгівлі [6, 7], у будівництві [8, 9], при стратегічному плануванні [7, 5] тощо. У роботі [9] розроблена методика реалізації методу Сааті у середовищі Excel за допомогою матричних функцій. Доступність математичного апарату в частині використання власного вектора, як вектора пріоритетів, дозволяє застосувати цей метод для вирішення питання вибору моделі консолідації ІТ-ресурсів.

Мета. Визначення моделі організації спеціалізованого ПЗ для інформаційного забезпечення Реєстру документів СФД в умовах консолідації ІТ-ресурсів, зокрема визначення:

– критеріїв оцінювання та вибору моделі організації спеціалізованого ПЗ;

– альтернативних моделей організації спеціалізованого ПЗ;

– методу оцінювання моделей організації спеціалізованого ПЗ та визначення за його допомогою моделі, яка оптимальним чином задовольнить встановленим критеріям.

Виклад основного матеріалу статті. Визначення критеріїв оцінювання та вибір моделі організації спеціалізованого ПЗ здійснювались на підставі критеріїв оцінювання моделі якості програмного продукту [10].

Оцінювання якості програмного забезпечення та систем виконується за такими групами критеріїв: функціональна придатність, надійність, ефективність, працездатність, безпека, сумісність, ремонтопридатність, переносимість.

Кожну зазначену групу поділяють на низку критеріїв, які було застосовано для вибору моделі організації спеціалізованого ПЗ.

У результаті аналізу сучасних моделей організації ПЗ було визначено, що для інформаційного забезпечення Реєстру документів СФД крім чинної моделі організації спеціалізованого ПЗ можна використовувати модель організації у вигляді веб-застосунків та різноманітні моделі надання хмарних послуг.

Модель веб-застосунків передбачає створення та використання клієнт-серверного застосування, в якому клієнтом виступає браузер, а сервером – веб-сервер. Для створення веб-застосунків використовують різноманітні технології, зокрема, системи керування вмістом [11].

Модель надання хмарних послуг – це технологія оброблення даних, заснована на наданні кінцевому користувачеві віддаленого доступу до орендованих комп’ютерних потужностей за допомогою мережі Інтернет. Такий аутсорсинг інфраструктури дозволяє користувачеві не звертати уваги на апаратні засоби, встановлене ПЗ, технічну підтримку тощо. Розрізняють такі моделі надання хмарних послуг:

– "Інфрактура як сервіс" (IaaS) [12], орієнтована для надання послуг архітекторам мереж. Віртуалізоване прикладне ПЗ замінює мережеві пристрої, а мережева інфраструктура стає більш програмованою. Приклади: VMware, Amazon Web Services, RackSpace Cloud Services;

– "Платформа як сервіс" (PaaS) [12], орієнтована для створення ПЗ, яке постачається через апаратне забезпечення Інтернету. Це допомагає підприємствам розгортати та запускати самостійно створені або придбані програми, створені за допомогою наданих інструментів. Приклади: Azure, Google App Engine, Heroku та інші служби, які забезпечують підтримку контейнерних платформ, таких як Docker;

– "Програмне забезпечення як сервіс" (SaaS) [12], яка робить програми доступними через Інтернет. Приклади: Google Workspace apps, Microsoft 365, Netflix, Zoom, Zendesk;

– "Робочий стіл як послуга" (DaaS) [13], схожа на VDI, але замість розміщення настільних комп’ютерів у локальному центрі обробки даних, де середовищем має керувати власний IT-відділ, DaaS використовує хмарну серверну систему. DaaS, яка передбачає передачу керування апаратним забезпеченням хмарному постачальнику. Але потреба у внутрішніх IT-ресурсах залишається для завдань із керування власними програмами, даними та безпекою;

– "Робоче місце як сервіс" (WaaS) [14] на відміну від DaaS надає повний пакет, від віртуального робочого столу до хмарного середовища, а також усі необхідні функції для ведення вашого бізнесу і тому не потребує

внутрішніх ІТ-ресурсів для керування інфраструктурою, програмами, даними чи безпекою такої служби.

Відповідно до поставленого завдання вибір серед хмарних технологій моделі організації спеціалізованого ПЗ для інформаційного забезпечення Реєстру документів СФД мав здійснюватися відносно кінцевого користувача – користувачів ПЗ АРМ РЦ СФД, які не є ІТ-фахівцями та не мають власних відповідних ІТ підрозділів. Таким чином, із низки наведених моделей надання хмарних послуг як альтернативні варіанти вибору моделі організації спеціалізованого ПЗ було обрано SaaS та WaaS.

Основна перевага моделі SaaS для споживача послуги полягає у відсутності витрат, пов’язаних з установкою, оновленням і підтримкою працездатності устаткування і встановленого на ньому ПЗ. Перевагою WaaS є те, що її клієнт отримує у своє користування повністю оснащене всім необхідним для роботи ПЗ віртуальне АРМ.

Порівняльний аналіз чинної моделі інформаційного забезпечення Реєстру документів СФД здійснювався в умовах консолідації ІТ-ресурсів здійснювався за визначеними в [10] критеріями серед наступних варіантів альтернативних моделей:

– "Веб-застосунок";
– "SaaS";
– "WaaS".

Оцінювання ускладняються відсутністю необхідного обсягу інформації, оскільки не всі критерії можуть бути кількісно враховані. Такі оцінювання здійснюють експертним шляхом. До них можна віднести і методи розв’язання задач багатокритеріального вибору, де в загальному випадку постановка задачі має такий вигляд: задано безліч альтернатив вирішення деякої проблеми і безліч критеріїв для оцінки корисності альтернатив. Кожній альтернативі a_i експерти виставляють оцінки x_{ij} за всією безліччю критеріїв. Q – це оцінка i-й альтернативи за j-м критерієм. Оцінки виставляють або в балах безпосередньо, або в частках одиниці (ваги), або в межах нечіткої логіки. Результати винесення оцінок представляють як матрицю рішень.

Таким чином, вибір методу визначення нової моделі організації спеціалізованого ПЗ для інформаційного забезпечення Реєстру документів СФД в умовах консолідації ІТ-ресурсів здійснювався згідно з методами:

– прямого розташування;
– ранжирування чинників;
– присвоєння коефіцієнтів чинникам;
– аналізу ієрархій.

У разі використання методу прямого розташування експерти розставляють ваги чинникам, беручи до уваги вимоги рівняння суми всіх ваг будь-якої константи, зручної для подальших розрахунків. Труднощі цього підходу полягають у необхідності тримати в полі зору одночасно всі чинники, оскільки, присвоюючи визначене числове значення конкретному чиннику, експерт повинен одночасно його зіставляти з усіма іншими. Труднощі зростають у геометричній прогресії зі збільшенням кількості чинників.

Використання методу ранжирування чинників дещо полегшує експертам роботу, оскільки не вимагає контролю загальної суми коефіцієнтів. Експерти проводять ранжирування, тобто впорядковують обстежувані чинники, що формують об’єкт, за ступенем прояву їх властивостей у порядку зростання або зменшення. Перевага цього методу полягає в його простоті, але усереднення рангів призводить до більш грубих оцінок вагових коефіцієнтів порівняно з іншими методами. Крім того, цей метод не позбавляє експерта від необхідності тримати в полі зору всі чинники, як і метод прямого розташування.

У разі використання методу присвоєння коефіцієнтів чинникам експертам пропонується оцінювати чинники за деякою бальною шкалою, наприклад від 1 до 10. Зведені оцінки вагових коефіцієнтів зазвичай знаходять шляхом підбору відповідної регресійної моделі. Цей метод певною мірою робить більш слабкою залежність оцінки конкретного чинника від інших, але остаточно не позбавляє від неї, оскільки зіставляти чинники все ж таки потрібно – інакше коефіцієнти значущості неможливо коректно розставити.

Використання методу аналізу ієрархій [7] дозволяє частково позбутися зазначених вище складнощів. Суть цього методу полягає в тому, що чинники порівнюються між собою по парах відносно один одного за їхнім впливом на кінцеву мету, при цьому вплив інших чинників не враховується. Для попарного порівняння чинників автором методу запропонована спеціальна оціночна шкала, що складається з п’яти основних і чотирьох проміжних тверджень.

До переваг методу аналізу ієрархій належать:

– властива людській природі попарність порівнянь;

– наявність вербально-числової шкали;

– вбудований критерій якості роботи експерта.

Таким чином, Визначення нової моделі організації спеціалізованого ПЗ для інформаційного забезпечення Реєстру документів СФД в умовах консолідації ІТ-ресурсів було здійснено методом аналізу ієрархій. Важливо відзначити, що цей метод, як і інші аналітичні процедури, може бути неправильно використаний у тих випадках, коли обробляють

твердження, засновані на упереджених поглядах експертів.

На першому етапі було виконано структурування проблеми у вигляді ієрархії:

– вершина (мета);

– проміжні рівні (критерії, від яких залежать наступні рівні);

– останній рівень – перелік альтернатив.

Результат декомпозиції ієрархії задачі визначення технології інформаційного забезпечення Реєстру документів СФД в умовах консолідації ІТ-ресурсів наведено на рис. 1. Можна вважати отриману ієрархію повною, оскільки кожен елемент заданого рівня функціонує як критерій для всіх елементів нижчого рівня.

На другому етапі згідно з принципом дискримінації та порівняльних суджень було встановлено пріоритети критеріїв і визначено оцінку кожної з альтернатив за критеріями. Для чого після ієрархічного подання проблеми було:

– складено матрицю порівняння відносної важливості критеріїв по відношенню до загальної мети на першому рівні;

– складено матриці парних порівнянь кожної альтернативи на третьому рівні по відношенню до критеріїв другого рівня.

Розмірність матриць відповідала числу попарно порівнюваних елементів певного рівня.

На третьому етапі було розраховано вектори локальних пріоритетів кожної матриці [15].

На четвертому етапі за результатом ієрархічного синтезу було отримано вектор глобальних пріоритетів. Відповідно до процедури ієрархічного синтезу шукані глобальні пріоритети розраховують шляхом зваженого сумування за всіма шляхами, що ведуть від мети (1-й рівень) до певної альтернативи (3-й рівень), і, у нашому випадку, є результатом добутку вектору локального пріоритету та матриці, утвореної векторами локальних пріоритетів.

Для проведення суб’єктивних парних порівнянь було використано шкалу відносної важливості (шкала парних порівнянь Т. Сааті), яка розподіляється від 1 ("однаково важливість") до 9 ("абсолютна перевага одного над другим"). Якщо в разі порівняння елемента x_{ij} з об’єктом x_{ji}, перший елемент одержав перший із вищевказаних рангів, тоді другий об’єкт одержує ранг, обернений за значенням до рангу першого об’єкта.

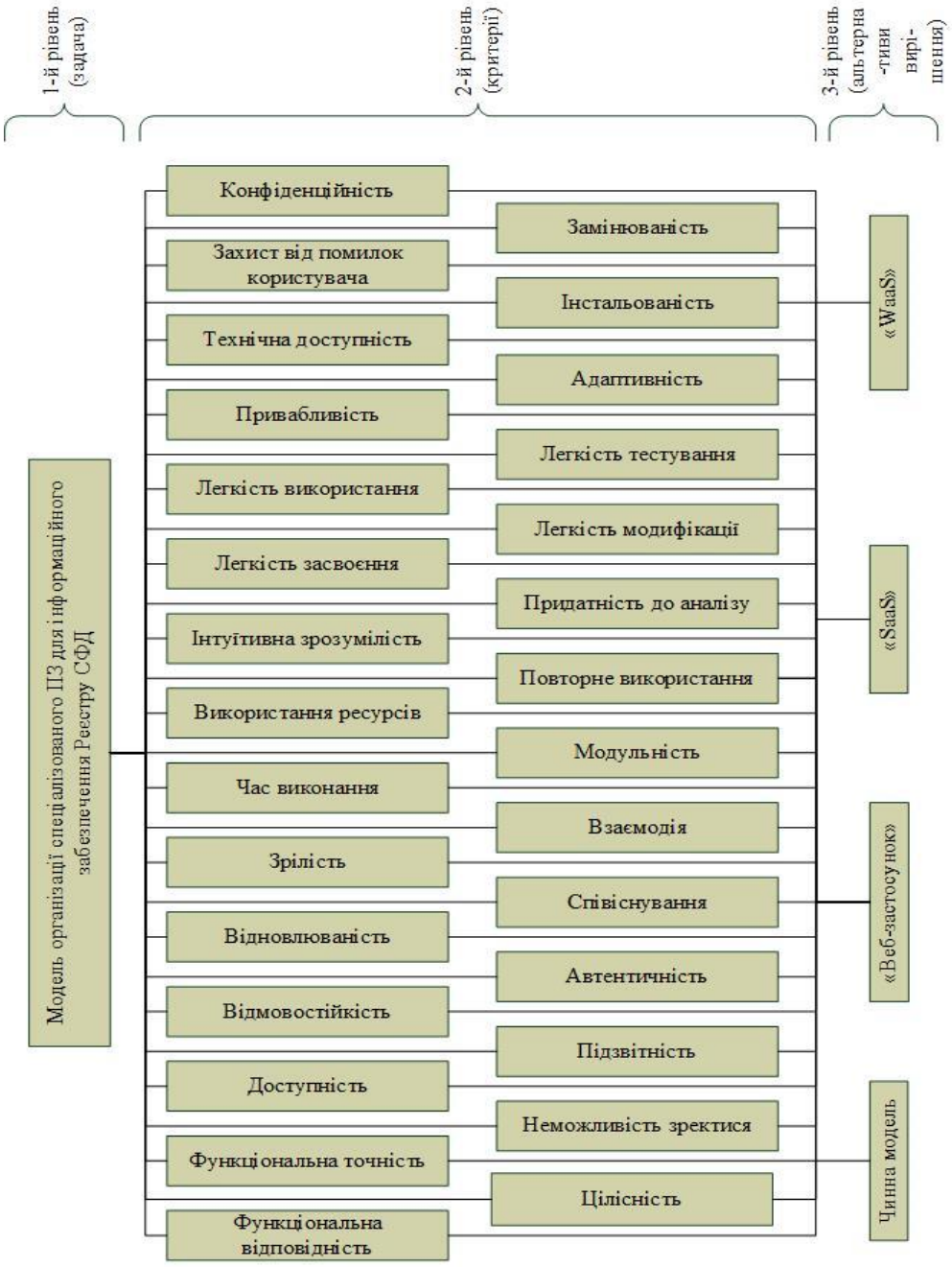


Рис. 1. Результат декомпозиції ієрархії задачі визначення технології інформаційного забезпечення Реєстру документів СФД в умовах консолідації ІТ-ресурсів

Табл. 1 містить стислу характеристику кожної альтернативи, необхідних для виконанням попарних порівнянь альтернатив (моделей організації спеціалізованого ПЗ) відносно кожного критерію.

Таблиця 1

Характеристика альтернативних моделей організації спеціалізованого ПЗ

Критерії вибору	Опис
Функціональна відповідність	Значна перевага чинної моделі та "WaaS" оскільки десктопні ПЗ не мають функціональних обмежень веб-застосунків та "SaaS"
Функціональна точність, Привабливість, Технічна доступність, Повторне використання, Замінюваність	Жодна з моделей не має переваг
Доступність, Відмовостійкість	Визначається працездатністю мережі Інтернет та устаткування
Відновлюваність	Усі моделі поступаються "WaaS" в умовах несталої роботи мережі Інтернет: дані зберігаються на сервері віртуалізації, що у подальшому забезпечить можливість продовжити сеанс роботи
Зрілість	Несумісність моделей "Веб-застосунок", "SaaS" із мовою Delphi потребуватиме повної переробки програмного коду ПЗ АРМ РЦ СФД. Це призведе до тривалого процесу усунення початкових недоліків та до значних фінансових витрат. Використання чинної моделі і "WaaS" не потребує адаптації ПЗ АРМ РЦ СФД
Час виконання, Використання ресурсів	Перевага всіх моделей над чинною зумовлена перенесенням виконання завдань, що потребують обчислювальних потужностей, на зовнішні сервери
Інтуїтивна зрозумілість, Легкість використання, Легкість засвоєння	Перевага чинної моделі та "WaaS" над іншими полягає в тому, що ПЗ АРМ РЦ СФД за роки експлуатації добре адаптоване до логіки користувачів

Критерії вибору	Опис
Захист від помилок користувача	Більш функціонально оздоблені об’єктно-орієнтовні мови програмування для десктопних застосунків, що використовують чинна модель та "WaaS", мають перевагу в реалізації захисту від помилок користувача клієнтського ПЗ у порівнянні з мовами, які використовують моделі "Веб-застосунок" та "SaaS"
Конфіденційність, Цілісність, Неможливість зректися, Підзвітність, Автентичність	Для безпеки даних повинні використовуватися спеціалізовані засоби захисту, які мало залежатимуть від обраної моделі
Співіснування	Чинна модель поступається іншим, оскільки має певну залежність від версій офісного ПЗ, необхідних для встановлених на клієнтському ПЕОМ сторонніх ПЗ
Взаємодія	Усі моделі поступаються "WaaS", оскільки мають певну залежність від версій офісного ПЗ, встановленого на клієнтському ПЗ
Модульність	Усі моделі поступаються "WaaS", оскільки її модулі (віртуальні АРМ) мають найвищий рівень ізольованості один від іншого
Придатність до аналізу	Невелика перевага на користь чинної моделі, та "WaaS" викликана досвідом роботи фахівців НДІ мікрографії у середовищах розробки десктопних застосунків
Легкість модифікації, Легкість тестування	Те саме
Адаптивність	Значна перевага всіх моделей над чинною зумовлена їх кросплатформеністю. Перевага "WaaS" над моделями "Веб-застосунок", "SaaS" викликана тим, що попри декларацій про їх кросплатформеність існує певна залежність функціювання клієнтського ПЗ від версій та налаштувань браузерів
Інстальованість	Значна перевага всіх моделей над чинною зумовлена повною відсутністю дій з боку користувача щодо встановлення (інсталяції) на клієнтському ПЕОМ спеціалізованого ПЗ

На підставі матриць попарних порівнянь альтернативних моделей організації спеціалізованого ПЗ та вектору локальних пріоритетів [15] було розраховано вектор глобальних пріоритетів, наведений в табл. 2.

Таблиця 2

Вектор глобальних пріоритетів

	Веб-застосунок	SaaS	WaaS	Чинна модель
Функціональна відповідність	0,08	0,08	0,417	0,4167
Функціональна точність	0,25	0,25	0,25	0,25
Доступність	0,25	0,25	0,25	0,25
Відмовостійкість	0,25	0,25	0,25	0,25
Відновлюваність	0,1	0,1	0,7	0,1
Зрілість	0,05	0,05	0,45	0,45
Час виконання	0,21	0,21	0,483	0,093
Використання ресурсів	0,32	0,32	0,318	0,0455
Інтуїтивна зрозумілість	0,06	0,06	0,438	0,4375
Легкість засвоєння	0,05	0,05	0,45	0,45
Легкість використання	0,06	0,06	0,438	0,4375
Привабливість	0,25	0,25	0,25	0,25
Технічна доступність	0,25	0,25	0,25	0,25
Захист від помилок користувача	0,06	0,06	0,438	0,4375
Конфіденційність	0,25	0,25	0,25	0,25
Цілісність	0,25	0,25	0,25	0,25
Неможливість зректися	0,25	0,25	0,25	0,25
Підзвітність	0,25	0,25	0,25	0,25
Автентичність	0,25	0,25	0,25	0,25
Співіснування	0,31	0,31	0,313	0,0625
Взаємодія	0,17	0,17	0,5	0,1667
Модульність	0,13	0,13	0,625	0,125
Повторне використання	0,25	0,25	0,25	0,25
Придатність до аналізу	0,13	0,13	0,375	0,375
Легкість модифікації	0,13	0,13	0,375	0,375
Легкість тестування	0,13	0,13	0,375	0,375
Адаптивність	0,22	0,22	0,51	0,0421
Інстальованість	0,32	0,32	0,318	0,0455
Замінюваність	0,25	0,25	0,25	0,25
Глобальні приорітети	0,17	0,17	0,367	0,2913

Висновки. Таким чином, за допомогою методу аналізу ієрархій дійшли висновку про те, що як модель організації спеціалізованого ПЗ для інформаційного забезпечення Реєстру документів СФД в умовах

консолідації ІТ-ресурсів доцільно використовувати модель "WaaS" (значення 0,367 вектора глобальних пріоритетів, наведене в табл. 2).

References:

1. "On the approval of the Procedure for maintaining of the State Register of Documents of the Insurance Fund of Ukraine: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 05/16/2002 No. 642", available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/642-2002-%D0%BF#Text (accessed: 20.02.2023).

2. "Thick and thin client. What is it and what is the difference?", available at: https://training.qatestlab.com/blog/technical-articles/thick-and-thin-client/ (accessed: 20.02.2023).

3. "Database Dump. What Does Database Dump Mean?", available at: https://www.techopedia.com/definition/23340/database-dump (accessed: 20.02.2023).

4. Trunova, O.V. (2013), "Implementation of the Saaty method in making management decisions", *Herald of the Chernihiv National Pedagogical University. Pedagogical sciences*, No. 108.1, available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VchdpuP_2013_1_108_34 (accessed: 20.02.2023).

5. Khomyakov V.I. (2005), *Enterprise Management. 2nd edition, revised and enlarged*, Condor, Kyiv, 434 p.

6. Evstrat D.I. and Kushneruk Y.I. (2012), "Implementation of the hierarchy analysis method for evaluating the marketing activity of trade enterprises", *Problems of Economics Journal*, No. 2. pp. 66–71.

7. Saaty, T. (1993), *Decision making. Analityc hierarchy process. Trans. from Eng. by Vachnadze, R.G.*, Radio and Communication, Moscow, 278 p.

8. Badyul M.G. and Kramarenko V.A. (2013), "Implementation of the hierarchy analysis method in design and construction", *Construction, materials science, mechanical engineering Journal*, No. 70. pp. 27–35.

9. Ershova N.M. (2015), "Decision making, based on the hierarchy analysis method", *Herald of the Prydniprovska State Academy of building and architecture Journal*, No. 9 (210). pp. 39–45.

10. "ISO/IEC 25010:2011. Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – System and software quality models", available at: https://www.iso.org/standard/35733.html (accessed: 20.02.2023).

11. "Usage statistics of content management systems", available at: https://w3techs.com/technologies/overview/content_management (accessed: 20.02.2023).

12. "Cloud Pyramid: IAAS, PAAS and SAAS", available at: https://gigacloud.ua/blog/navchannja/hmarna-piramida-iaas-paas-i-saas (accessed: 20.02.2023).

13. "Desktop as a Service", available at: https://itglobal.com/ru-ru/company/glossary/desktop-as-a-service (accessed: 20.02.2023).

14. "Workplace as service", available at: https://optima-service.ua/workplace-as-service. (accessed: 20.02.2023).

15. "Results of calculations by the hierarchy analysis method. Calculation of local and global vectors", available at: https://drive.google.com/file/d/1XL4iLsmvrumti9STEEeyF2c8gf73qE71/view?usp=sharing, (accessed: 20.02.2023).

Статтю представив доктор технічних наук, професор НТУ "ХПІ" Носков В.І.

Поступила (received) 06.03.2023

Ilin Serhii,
Head of the department of research and development of information technologies,
Project-Design and Technological Institute of Micrography,
Str. Moskalivska, 139, Kharkiv, Ukraine, 61157
Tel.: +38 (050) 99-88-263,
e-mail: sillhol@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-5667-1100

Kholod Ievgenii,
deputy head of the department of research and development of information technologies,
Project-Design and Technological Institute of Micrography,
Str. Moskalivs'ka, 139, Kharkiv, Ukraine, 61157
Tel.: +38 (050) 838-38-99
e-mail: kkarlgott@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-2295-1291

Maznychko Andrij,
leading engineer-programmer of the department of research and development of information technologies,
Project-Design and Technological Institute of Micrography,
Str. Moskalivs'ka, 139, Kharkiv, Ukraine, 61157
Tel.: +38 (097) 53-000-86,
e-mail: a.maznychko.ndi_m@arch.gov.ua
ORCID ID: 0009-0009-6260-2270

Horodnycha Lubov,
II category software engineer of the department of research and development of information technologies,
Project-Design and Technological Institute of Micrography,
Str. Moskalivs'ka, 139, Kharkiv, Ukraine, 61157
Tel.: +38 (097) 30-00-348,
e-mail: gorod-la@meta.ua
ORCID ID: 0009-0005-9391-5043

УДК 004.02

Застосування методу аналізу ієрархій для вибору оптимальної моделі консолідації ІТ-ресурсів СФД України / Ільїн С.В., Холод Є.Л., Мазничко А.Б., Городнича Л.О. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2023. – № 1–2 (9–10). – С. 91 – 105.

Вибір оптимальної технології для консолідації інформаційних ресурсів, що здійснюють інформаційне забезпечення Державного реєстру документів страхового фонду документації України здійснювався серед технологій IaaS, PaaS, SaaS, DaaS, веб-застосунки тощо. Це виявилось багатокрітеріальною задачею із великою кількістю чинників різної розмірності, яку було розв'язано за допомогою методу аналізу ієрархій. Іл.: 1, Табл.: 2, Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: консолідація; реєстри; страховий фонд документації України; IaaS; PaaS; SaaS; DaaS; веб-застосунок; метод аналізу ієрархій.

UDC 004.02

Application of the method of analysis of hierarchies for the selection of the optimal model of consolidation of IT resources of the SFD of Ukraine / Ilin S.V., Kholod E.L., Maznychko A.B., Horodnycha L.O. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2023. – № 1–2 (9–10). – P. 91 – 105.

The selection of the optimal technology for the consolidation of information resources from the information support of the State Register of Documents of the Documentation Insurance Fund of Ukraine was carried out among technologies IaaS, PaaS, SaaS, DaaS, web applications, etc.

This multi-criteria problem with a large number of factors of different dimensions was solved using the method of analysis of hierarchies. Figs.:1. Tabl.: 2, Refs.: 15 titles.

Keywords: consolidation; registers; documentation insurance fund of Ukraine; IaaS; PaaS; SaaS; DaaS; web application; method of analysis of hierarchies.

Вісник Національного технічного університету "ХПІ", 2023, № 1–2 (9–10)
ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

УДК 004.942 **DOI: 10.20998/2411-0558.2023.01.09**

В. Д. ПАВЛЕНКО, д.т.н., професор, "Одеська політехніка", м. Одеса,
Т. В. ШАМАНІНА, д-р філософії, "Одеська політехніка", м. Одеса,
В. В. ЧОРІ, аспірант, "Одеська політехніка", м. Одеса

ВИКОРИСТАННЯ КВАДРАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВОЛЬТЕРРИ ОКУЛО-МОТОРНОЇ СИСТЕМИ В ДІАГНОСТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ ЛЮДИНИ

Містяться результати дослідження ефективності застосування апроксимаційних моделей Вольтерри першого і другого порядку окуло-моторної системи в діагностичних дослідженнях психофізіологічного стану людини за даними айтрекінгу. В якості тестових сигналів використовуються візуальні стимули, які відображаються на екрані монітора на різних відстанях від початкової позиції, що формально відповідає дії ступінчатих сигналів з різними амплітудами на вході ОМС. Здійснено експериментальні дослідження "вхід-вихід" ОМС за допомогою айтрекера Tobii Pro TX300 та визначені за даними айтрекінга перехідні функції першого та діагональні перетини перехідних функцій другого порядку. Отримані перехідні функції використовуються для формування просторів діагностичних ознак. Досліджено діагностичну цінність всіх можливих поєднань ознак в пари за показником імовірності правильного розпізнавання (ІПР). Результати досліджень отримано за допомогою навчання байєсівського класифікатора та з використанням метода опорних векторів у різних просторах запропонованих ознак. Здійснено дослідження робастності ознак за показником ІПР, виділені сполучення ознак з максимальним і найбільш стабільним показником ІПР. Іл.: 13. Табл.: 5. Бібліогр.: 28 назв.

Ключові слова: окуло-моторна система; айтрекінг; психофізіологічний стан; діагностика; квадратична модель Вольтерри; ідентифікація; тестові візуальні стимули; перехідні функції.

Постановка проблеми. Аналіз взаємозв'язку окорухової і центральної нервової системи, з вмістом психічних процесів, з різними формами активності (поведінка, діяльність, спілкування), сприяє вивченню механізмів роботи мозку та їх порушень, виявленню динаміки психофізіологічних станів людини, моделей сприйняття, мислення, уявлень, диференціації особистих намірів. Розкрити структуру взаємовідносин індивіда з середовищем, людини зі світом дозволяють дослідження рухів очей людини і траєкторії їх переміщення за допомогою інноваційної технології айтрекінгу [1].

Внаслідок бойових дій, стихійних лих, що відбуваються сьогодні, значна кількість людей отримують психологічні травми різного ступеня, які часто призводять до посттравматичного стресового розладу (ПТСР) і

© В.Д. Павленко, Т.В. Шаманіна, В.В. Чорі, 2023

потребують постійної психологічної підтримки та допомоги [2]. Оскільки ПТСР є комплексним розладом, який проявляється одночасно на психологічному, біологічному та соціальному рівнях, лікування, залежить від його глибини, включає психотерапію, а іноді й використання психофармакологічних препаратів [3]. Запропонована в [4] модель окуломоторної системи (ОМС) дозволяє визначити наявність синдрому ПТСР, а також отримати кількісну оцінку глибини ПТСР і на основі цих досліджень обрати найбільш ефективну тактику лікування.

Найбільш ефективними методами допомоги при ПТСР є два психотерапевтичні методи: когнітивно-поведінкова терапія (Cognitive behavioral therapy – CBT) [5 – 7] і метод десенсибілізації (тобто зниження чутливості) та репроцесуалізації травми за допомогою руху очей (Eye movement desensitization and reprocessing – EMDR) [8 – 10]. Тому для успішності лікування важливо діагностувати поточний психофізіологічний стан людини.

EMDR-терапія використовує біполярні (по горизонтальній осі) стимулюючі рухи очей (подібні рухи очей відбуваються у людини під час сну). В результаті подібної стимуляції, шляхом близьким до природного, на нейрофізіологічному рівні, психіка травмованої особи звільняє себе від заблокованих "застиглих" спогадів викликаних психотравмою. Коли людина проживає якусь травмуючу подію, дистрес, інформація про це також складується в мозку, проходить переробку і перетворюється в життєвий досвід. Важливо відстежувати динаміку змін запропонованої моделі ОМС і таким чином визначати термін припинення сеансів EMDR-терапії.

Аналіз літератури. В останні роки високотехнологічна інновація айтрекінг отримала подальший розвиток і ефективне застосування при побудові математичної моделі процесу неперервного відстеження рухів очей з метою виявлення аномалій у даних відстеження для кількісної оцінки рухової активності симптомів хвороби Паркінсона [11, 12]. При цьому використовуються нелінійні динамічні моделі Вінера та Вольтерри-Лагерра [13], а ідентифікація ОМС базується на використанні тестових випадкових стимулів, що вимагає використання методів кореляційного аналізу та отримання великої кількості експериментальних даних (велика тривалість експериментальних досліджень).

Для побудови моделі Вольтерри ОМС людини можуть бути використані детерміновані тестові стимули, наприклад, ступінчаті сигнали (найбільш придатні для дослідження динаміки ОМС) [14, 15], що спрощує обчислювальний алгоритм ідентифікації та значно скорочує час обробки експериментальних даних [4, 16 – 19].

У роботі [20] розроблено метод детермінованої ідентифікації ОМС у вигляді багатовимірних перехідних функцій (БПФ) за допомогою ступінчатих тестових сигналів, аналогічний компенсаційному методу ідентифікації нелінійних динамічних систем за допомогою імпульсних тестових впливів [14]. Хоча метод вимагає мінімальної кількості тестових сигналів для ідентифікації ОМС, його точність недостатня для побудови моделей Вольтерри вище другого порядку, що ускладнює його практичне застосування.

Перевагами детермінованих методів у порівнянні з методами статистичної ідентифікації є порівняльна простота обробки експериментальних даних і реалізації тестових сигналів. Проте на результати детермінованої ідентифікації суттєво впливають похибки вимірювань [21, 22]. Отримані оцінки перехідних функцій нестійкі до похибок вимірювань відгуків ОМС, що обмежує застосування методів в умовах реального експерименту.

В [23] розглядається процес діагностики та моніторингу психофізіологічного стану особистості на основі інформаційних моделей Вольтерри ОМС "вхід-вихід". В якості тестових сигналів використовуються візуальні стимули, які відображаються на екрані монітора на різних відстанях від стартової позиції, що формально відповідає дії ступінчатих сигналів з різними амплітудами на вході ОМС. Для реєстрації відгуків ОМС застосовуються програмно-апаратні засоби інноваційної технології айтрекінгу. Визначені на основі даних окулографічних досліджень перехідні функції першого та діагональні перетини перехідних функцій другого та третього порядку при моделюванні ОМС кубічним поліном Вольтерри. Отримані багатовимірні перехідні функції використовуються в якості джерела первинних даних при реалізації інтелектуальної інформаційної технології діагностики та моніторингу психофізіологічного стану людини (стану втоми). Досліджується інформативність всіх можливих сполучень ознак в парах за показником імовірності правильного розпізнавання (ІПР). Результати досліджень отримано за допомогою побудови байєсівських класифікаторів у різних просторах запропонованих ознак і визначення пар ознак з максимальними значеннями ІПР та найбільш стійких до завад.

Виникає інтерес здійснити подібні дослідження при використанні лінійного та квадратичного поліному Вольтерри ОМС в діагностичних дослідженнях психофізіологічного стану людини на тих самих експериментальних даних, що отримано в роботі [23].

Мета даної роботи полягає в дослідженні ефективності використання апроксимаційних моделей Вольтерри першого і другого порядку окуло-

моторної системи у вигляді одновимірних і двовимірних перехідних функцій в діагностичних дослідженнях психофізіологічного стану людини за даними айтрекінгу із застосуванням розроблених методів та засобів нелінійної динамічної ідентифікації "вхід-вихід" окуло-моторної системи, що розширює діагностичні можливості традиційних засобів діагностики у нейронауках.

Предметом дослідження є обчислювальні алгоритми та програмні засоби визначення діагностичних ознак на основі ідентифікаційних даних ОМС у вигляді перехідних функцій першого і другого порядку та побудови байєсівських класифікаторів у вибраних просторах ознак.

1. Ідентифікація ОМС на основі дискретного квадратичного поліному Вольтерри. Співвідношення "вхід – вихід" для НДС з невідомою структурою (типу "чорний ящик") з одним входом і одним виходом може бути представлено дискретним квадратичним поліномом Вольтерри у вигляді [23, 24]:

$$y[m]=\sum_{n=1}^{N=2}\hat{y}_n[m]=\sum_{k_1=0}^{m}w_1[k_1]x[m-k_1]+\sum_{k_1=0}^{m}\sum_{k_2=0}^{m}w_2[k_1,k_2]x[m-k_1]x[m-k_2], \qquad (1)$$

де $w_1[k_1]$, $w_2[k_1,k_2]$ – дискретні вагові функції – ядра Вольтерри (ЯВ) першого та другого порядків; $x[m]$, $y[m]$ – вхідна (стимул) і вихідна (відгук) функції системи, яка моделюється, відповідно; $\hat{y}_n[m]$ – парціальні складові відгуку n-го порядку (згортка послідовностей n-го порядку); m – дискретна змінна часу.

Задача ідентифікації полягає в виборі тестових впливів $x[m]$ і розробці алгоритму, який дозволяє за вимірюваними реакціями $y[m]$ виділяти парціальні складові $\hat{y}_n[m]$ (n = 1, 2) і визначати на їх основі ЯВ $w_1[k_1]$, $w_2[k_1,k_2]$ [23].

Якщо тестовий сигнал $x[m]$ = θ$[m]$, де θ$[m]$ – одинична функція (функція Ґевісайда), тоді парціальна складова відгуку $\hat{y}_1[m]$ дорівнює перехідній функції першого порядку $h_1[m]$ і $\hat{y}_2[m]$ – діагональному перетину перехідній функції другого порядку $h_2[m,m]$:

$$\hat{y}_1[m]=\hat{h}_1[m]=\sum_{k_1=0}^{m}w_1[m-k_1],\quad \hat{y}_2[m]=\hat{h}_2[m,m]=\sum_{k_1,k_2=0}^{m}w_2[m-k_1,m-k_2]. \qquad (2)$$

Для ідентифікації використовуються тестові багатоступінчасті сигнали з різними амплітудами a_j (j = 1, 2, …, L; L – кількість експериментів, $L \geq N$) $x_j(t) = a_j\theta(t)$ [18]. Відгуки ОМС, які при цьому вимірюються, позначимо як $y_1[m]$, $y_2[m]$, …, $y_L[m]$. Якщо визначити парціальні складові відгуку моделі $\hat{y}_1[m]$, $\hat{y}_2[m]$, то це призведе до оцінки

перехідних функцій першого порядку $\hat{h}_1[m]$ та діагонального перетину перехідної функції $\hat{h}_2[m,m]$ (2).

Відгуки квадратичної моделі Вольтерри дорівнюють

$$\tilde{y}_j[m] = a_j \hat{y}_1[m] + a_j^2 \hat{y}_2[m],\ j = \overline{1,L};\ \forall m > 0. \tag{3}$$

Для визначення перехідних функцій $h_1[m], h_2[m,m]$ використовується метод найменших квадратів (МНК) [4], який забезпечує мінімум середньоквадратичної похибки відхилення відгуків моделі від відгуків ОМС на один і той же стимул:

$$J_N = \sum_{j=1}^{L}\left(y_j[m] - \sum_{n=1}^{N} a_j^n \hat{y}_n[m] \right)^2 \to \min,\ \forall m > 0;\ N = 1, 2. \tag{4}$$

Мінімізація критерію (4) зводиться до розв'язку системи нормальних рівнянь Гауса, яку в векторно-матричній формі можна записати у вигляді

$$\mathrm{A}'\mathrm{A}\hat{\mathrm{y}} = \mathrm{A}'\,\mathrm{y}, \tag{5}$$

де

$$\mathrm{A} = \begin{bmatrix} a_1 & a_1^2 \\ a_2 & a_2^2 \\ \dots & \dots \\ a_L & a_L^2 \end{bmatrix},\quad \mathrm{y} = \begin{bmatrix} y_1[m] \\ y_2[m] \\ \cdots \\ y_L[m] \end{bmatrix},\quad \hat{\mathrm{y}} = \begin{bmatrix} \hat{y}_1[m] \\ \hat{y}_2[m] \end{bmatrix}.$$

Розв'язавши систему рівнянь (5) щодо $\hat{y}_1[m],\ \hat{y}_2[m]$, отримуємо оцінки перехідних функцій ОМС $h_1[m], h_2[m,m]$ в кожен момент часу m на інтервалі спостереження. З рівняння (5), отримуємо

$$\hat{\mathrm{y}} = (\mathrm{A}'\mathrm{A})^{-1}\mathrm{A}'\mathrm{y}. \tag{6}$$

Виконавши в (6) матричні операції, отримуємо

$$\begin{bmatrix} \hat{h}_1^{(2)}[m] \\ \hat{h}_1^{(2)}[m,m] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}_1[m] \\ \hat{y}_2[m] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{L} a_j^2 & \sum_{j=1}^{L} a_j^3 \\ \sum_{j=1}^{L} a_j^3 & \sum_{j=1}^{L} a_j^4 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{L} a_j y_j[m] \\ \sum_{j=1}^{L} a_j^2 y_j[m] \end{bmatrix}. \tag{7}$$

Таким чином, для моделі на основі квадратичного поліному Вольтерри для N = 2 (1), дістанемо оцінки перехідних функцій першого $\hat{h}_1^{(2)}[m]$ і другого $\hat{h}_2^{(2)}[m,m]$ порядків:

$$\hat{h}_1^{(2)}[m] = \hat{y}_1^{(2)}[m] = \frac{\sum_{j=1}^{L} a_j^4 \sum_{j=1}^{L} a_j y_j[m] - \sum_{j=1}^{L} a_j^3 \sum_{j=1}^{L} a_j^2 y_j[m]}{\sum_{j=1}^{L} a_j^2 \sum_{j=1}^{L} a_j^4 - \left(\sum_{j=1}^{L} a_j^3\right)^2}, \tag{8}$$

$$\hat{h}_2^{(2)}[m,m] = \hat{y}_2^{(2)}[m] = \frac{\sum_{j=1}^{L} a_j^2 \sum_{j=1}^{L} a_j^2 y_j[m] - \sum_{j=1}^{L} a_j^3 \sum_{j=1}^{L} a_j y_j[m]}{\sum_{j=1}^{L} a_j^2 \sum_{j=1}^{L} a_j^4 - \left(\sum_{j=1}^{L} a_j^3\right)^2}. \tag{9}$$

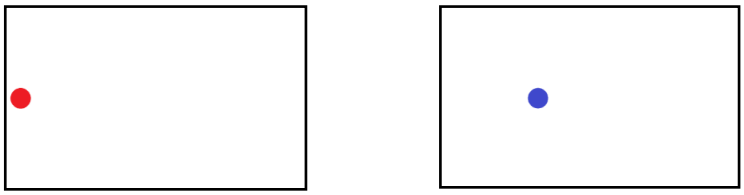
Аналогічно отримуємо формулу для оцінки перехідної функції першого порядку $\hat{h}_1^{(1)}[m]$ для лінійної моделі (при N = 1):

$$\hat{h}_1^{(1)}[m] = \hat{y}_1^{(1)}[m] = \frac{\sum_{j=1}^{L} a_j y_j[m]}{\sum_{j=1}^{L} a_j^2}. \tag{10}$$

Для отримання стійкого до похибок вимірювань розв’язку СЛАР (6) використовується метод регуляризації А.М. Тихонова [19], який базується на варіаційному методі побудови регуляризуючого оператора. Цей метод зводиться до знаходження наближеного вектора розв’язку, який мінімізує певний функціонал згладжування [21, 22].

2. Експериментальні дослідження ОМС з використанням технології айтрекінгу та обчислення перехідних функцій. За допомогою розробленого програмного забезпечення було проведено дослідження психофізіологічних станів людини. Метою проведення експериментів було класифікувати досліджуваних (інформантів) за рівнем їх втоми.

Дані, які отримано для побудови моделей ОМС, складаються з відгуків ОМС на ідентичні візуальні стимули, що відображаються на екрані монітора комп’ютера на різних відстанях x_j (j = 1, 2, 3) від стартової позиції у напрямку "по горизонталі". На рис. 1 наведено стартова позиція (рис. 1, а) та тестовий стимул (рис. 1, б). Такий тестовий сигнал еквівалентний вхідному ступінчатому сигналу $a_j\theta(t)$ з амплітудою a_j, яка визначається значенням відстані x_j



а *б*

Рис. 1. Тестовий стимул: *а* – стартова позиція;
б – позиція тестового стимула

Емпіричні дані були отримані за допомогою айтрекера Tobii Pro TX300 у різні моменти часу протягом дня, зокрема "Вранці" (до роботи) і "Ввечері" (після роботи), а також у різні дні [4]. Один повний цикл дослідження ОМС для одного респондента складається з трьох експериментів при різних амплітудах тестових сигналів a_1, a_2 та a_3. Вихідні дані айтрекера наведено на рис. 2 і рис. 3.

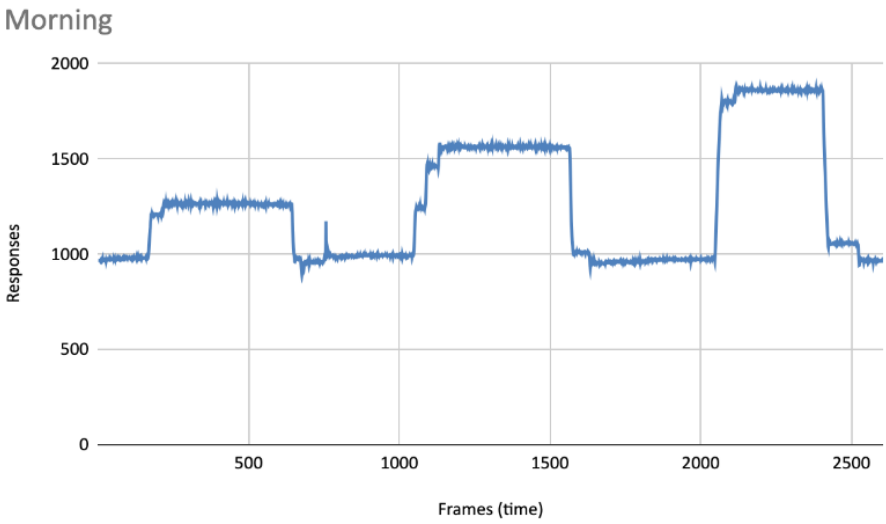


Рис. 2. Вихідні сигнали айтрекера для стану респондента "Вранці"

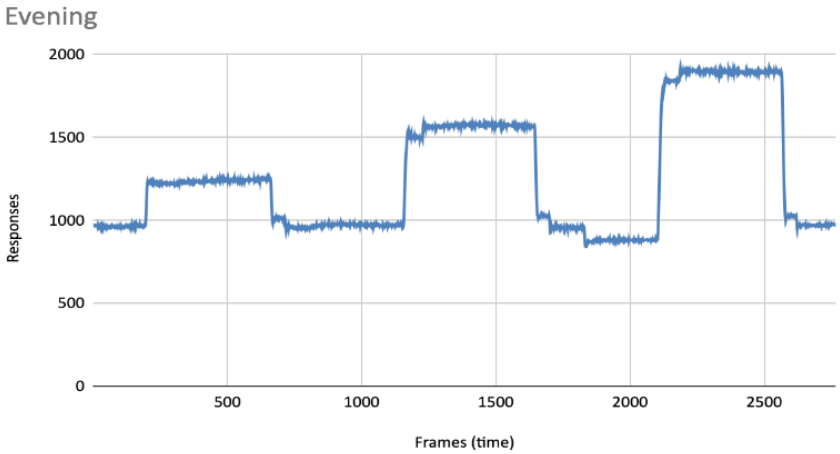


Рис. 3. Вихідні сигнали айтрекера для стану респондента "Ввечері".

Графіки відгуків ОМС одного респондента, які отримано "Вранці" та "Ввечері", приведені до спільного початку (стартова позиція) і наведено на рис. 4. При цьому для реалізації алгоритму непараметричної ідентифікації ОМС додатково було здійснено попередню обробку відгуків: нормалізацію, синхронізацію та виділення переднього фронту у відгуках.

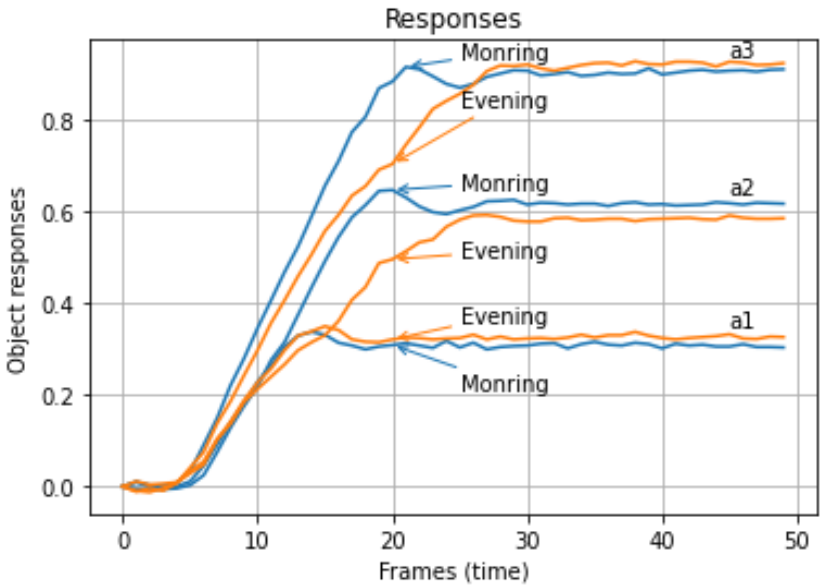


Рис. 4. Відгуки OMS респондента "Вранці" і "Ввечері" при різних амплітудах тестових сигналів a_1, a_2 та a_3

На основі даних експериментальних досліджень ОМС при амплітудах тестових сигналів $a_1 = 1/3$, $a_2 = 2/3$ та $a_3 = 1$ обчислені перехідні функції ОМС "Вранці" і "Ввечері". Для моделі на основі квадратичного поліному Вольтерри при $N = 2$ за допомогою (8) і (9) отримано оцінки перехідних функцій першого $\hat{h}_1^{(2)}[m]$ і діагонального перетину перехідної функцій другого $\hat{h}_2^{(2)}[m,m]$ порядку. Для моделі при $N = 1$ за допомогою (10) отримано оцінки перехідних функцій першого порядку $\hat{h}_1^{(1)}[m]$.

Графіки перехідних функцій та відповідних відгуків ОМС на основі моделі при $N = 1$ (3) при різних амплітудах вхідних сигналів для стану респондента "Вранці" та "Ввечері" наведено на рис. 5 і рис. 6.

Подібні результати отримані на основі моделі при $N = 2$ і наведені на рис. 7 та рис. 8 – для стану респондента "Вранці" та "Ввечері".

Нормовані середньо-квадратичні похибки (НСКП) моделі Вольтерри ОМС розраховано для різних амплітуд вхідних сигналів a_1, a_2 та a_3 для станів респондента "Вранці" та "Ввечері" і наведено в табл. 1 при $N = 1$ і в табл. 2 при $N = 2$.

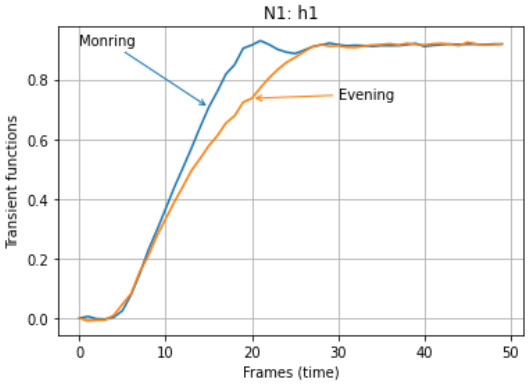


Рис. 5. Перехідні функції моделей OMS при $N = 1$ для стану респондента "Вранці" та "Ввечері"

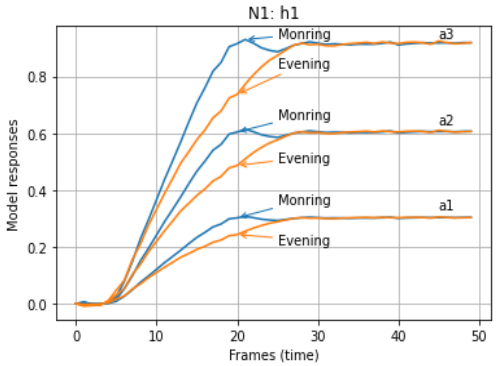


Рис. 6. Відгуки моделей ОМС при N = 1 для різних амплітуд тестових сигналів a_1, a_2 та a_3 у станах респондента "Вранці" і "Ввечері"

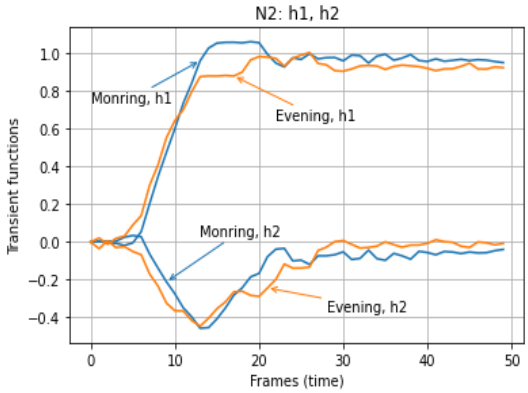


Рис. 7. Перехідні функції моделей OMS при N = 2 для стану респондента "Вранці" та "Ввечері"

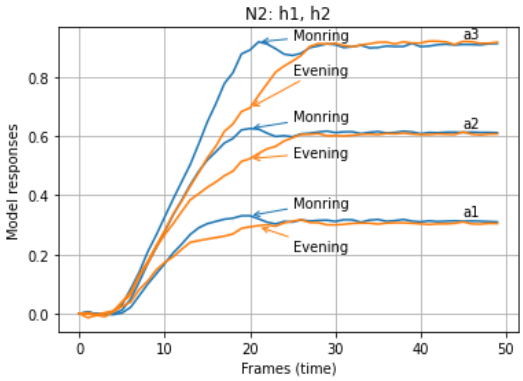


Рис. 8. Відгуки моделей ОМС при N = 2 для різних амплітуд тестових сигналів a_1, a_2 та a_3 у станах респондента "Вранці" і "Ввечері"

Таблиця 1

НСКП моделі ОМС при N = 1

Стан респондента	Амплітуди вхідних сигналів			Середня НСКП
	a_1	a_2	a_3	
"Вранці"	0.0468	0.0185	0.0193	0.0282
"Ввечері"	0.0670	0.0215	0.0162	0.0349

Таблиця 2

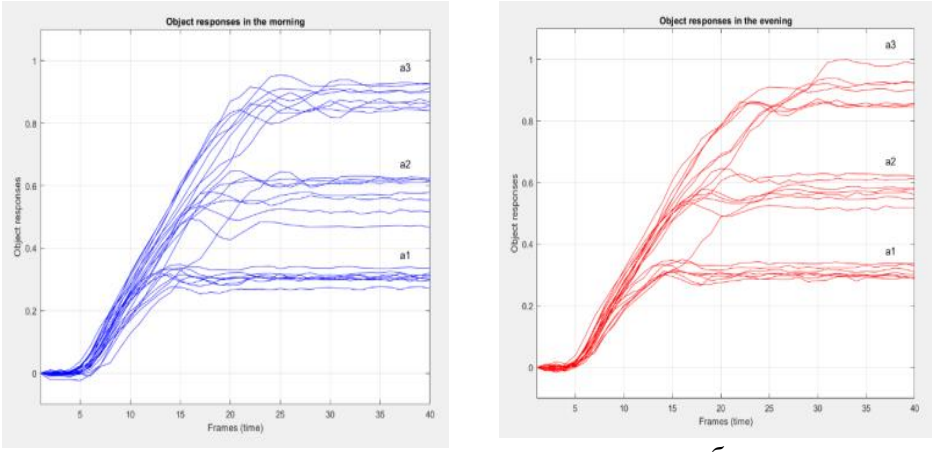
НСКП моделі ОМС при N = 2

Стан респондента	Амплітуди вхідних сигналів			Середня НСКП
	a_1	a_2	a_3	
"Вранці"	0.0230	0.0230	0.0077	0.0179
"Ввечері"	0.0379	0.0379	0.0126	0.0295

Як видно з таблиць 1 і 2 точність квадратичної моделі Вольтерри (N = 2) вище лінійної моделі (N = 1) у 1.5 – 2 рази.

3. Побудова байєсівського класифікатора для оцінки психофізіологічного стану людини. Для оцінки психофізіологічного стану на основі моделі Вольтерри виконано 8 повних циклів дослідження одного респондента за допомогою айтрекера для стану "Вранці" та 8 – для стану "Ввечері". Графіки відгуків ОМС, що отримані "Вранці" та "Ввечері", були приведені до спільного початку (точка старту) і наведені на рис. 9, а та рис. 9, б, відповідно.

За даними відгуків ОМС на основі розрахунків за формулами (8), (9) та (10) визначено перехідні функції ОМС "Вранці" та "Ввечері" при використанні апроксимаційних моделей різного ступеня N (N = 1, 2). На основі лінійної та квадратичної моделі Вольтерри було сформовано тренувальні вибірки даних для двох станів респондента "Вранці" та "Ввечері" за допомогою запропонованих евристичних ознак, що визначаються на основі отриманих перехідних функцій: $\hat{h}_1^{(1)}[m]$ та $\hat{h}_1^{(2)}[m]$, $\hat{h}_2^{(2)}[m,m]$ [25]. Тренувальні вибірки даних використовуються для побудови класифікаторів психофізіологічних станів індивіда за допомогою засобів машинного навчання [25, 26].



а *б*

Рис. 9. Відгуки OMS при різних амплітудах тестових сигналів:
а – "Вранці"; *б* – "Ввечері"

На основі навчальних вибірок даних для об’єктів класів Ω_1 ("Вранці") і Ω_2 ("Ввечері") побудовано байєсівський класифікатор психофізіологічного стану.

Аналіз достовірності класифікації психофізіологічних станів в просторі запропонованих ознак полягає у формуванні всіх можливих комбінацій ознак та оцінці їх інформативності на основі результатів класифікації досліджуваної вибірки даних з використанням критерію імовірності правильного розпізнавання (ІПР) [27, 28]. Таким чином, методом повного перебору були досліджені всі можливі пари ознак. Оскільки маємо невеликий об’єм навчальної вибірки, досліджується діагностична цінність лише всіх можливих пар ознак.

Побудовано байєсівські класифікатори психофізіологічного стану у двовимірному просторі ознак, що забезпечують максимальну ІПР при наступних комбінаціях ознак, які визначено на основі моделі Вольтерри при $N = 1$:

$$\left(x_1 = \sum_{m=0}^{M} \left| h_1[m] \right| \;\&\; x_4 = \max_{m \in [0,M]} h_1^{'}[m] \right), \text{or}$$

$$\left(x_5 = \arg\max_{m \in [0,M]} h_1^{'}[m] \;\&\; x_{16} = \max_{m \in [0,M]} \left| h_1[m] \right| \right), \text{ or}$$

$$\left(x_{11} = \arg\min_{m\in[0,M]} h_1^{'}[m] \;\&\; x_{16} = \max_{m\in[0,M]} \left| h_1[m] \right| \right), \text{ or}$$

$$\left(x_{4} = \max_{m\in[0,M]} h_1^{'}[m] \;\&\; x_{17} = \arg\max_{m\in[0,M]} \left| h_1[m] \right| \right), \text{ or}$$

$$\left(x_{10} = \min_{m\in[0,M]} h_1^{'}[m] \;\&\; x_{16} = \max_{m\in[0,M]} \left| h_1[m] \right| \right), \text{ or}$$

$$\left(x_{16} = \max_{m\in[0,M]} \left| h_1[m] \right| \;\&\; x_{17} = \arg\max_{m\in[0,M]} \left| h_1[m] \right| \right),$$

тут $h_2^{'}[m,m]$ – похідна перехідної функції другого порядку.

Для окремих ознак маємо такі значення критерію ІПР: x_{16} – $P_{\max} = 0.625$; x_{10}, x_{11} – $P_{\max} = 0.688$; x_4 , x_5 – $P_{\max} = 0.75$; x_1, x_{17} – $P_{\max} = 0.876$.

Для моделі Вольтерри при $N = 2$ отримано наступні комбінації ознак:

$$\left(x_{5} = \arg\max_{m\in[0,M]} h_1^{'}[m] \;\&\; x_{16} = \max_{m\in[0,M]} \left| h_1[m] \right| \right), \text{ or}$$

$$\left(x_{13} = \arg\min_{m\in[0,M]} h_2^{'}[m,m] \;\&\; x_{16} = \max_{m\in[0,M]} \left| h_1[m] \right| \right), \text{ or}$$

$$\left(x_{4} = \max_{m\in[0,M]} h_1^{'}[m] \;\&\; x_{12} = \min_{m\in[0,M]} h_2^{'}[m,m] \right), \text{ or}$$

$$\left(x_{4} = \max_{m\in[0,M]} h_1^{'}[m] \;\&\; x_{16} = \max_{m\in[0,M]} \left| h_1[m] \right| \right), \text{ or}$$

$$\left(x_{18} = \max_{m\in[0,M]} \left| h_2[m,m] \right| \;\&\; x_{17} = \arg\max_{m\in[0,M]} \left| h_1[m] \right| \right),$$

тут $h_2^{'}[m,m]$ – похідна перехідної функції другого порядку.

Для окремих ознак маємо такі значення критерію ІПР: x_5 – $P_{\max} = 0.625$; x_{12}, x_{13}, x_{17}, x_{18} – $P_{\max} = 0.75$; x_4 – $P_{\max} = 0.813$; x_{16} – $P_{\max} = 0.875$.

4. Дослідження робастності ознак за показником ІПР. Здійснено аналіз стабільності показника інформативності різних просторів ознак. Для цього було створено випадкові вибірки із гаусівським розподілом щільності імовірності, де стандартне відхилення розподілу дорівнює добутку середнього значення вектора ознак на рівні шуму (1% і 5%). Результати аналізу стійкості ІПР для ознак, що отримано на моделі при

N = 1 представлено в табл. 3 та на рис. 10, а – для ознак, що отримано на моделі при N = 2 – в табл. 4 та на рис. 11.

Таблиця 3

Середні значення ІПР (%) для класифікаторів в просторах ознак, що отримані на основі моделі при N=1, з різним рівнем шуму

Поєднання ознак	Рівень шуму, %		
	0	1	5
x_1, x_4	93.75	93.75	77.5
x_5, x_{16}	93.75	88.75	88.5
x_{11}, x_{16}	100	96.25	80
x_4, x_{17}	93.75	93.75	81.25
x_{10}, x_{16}	93.75	93.75	75
x_{16}, x_{17}	93.75	93.75	82.25

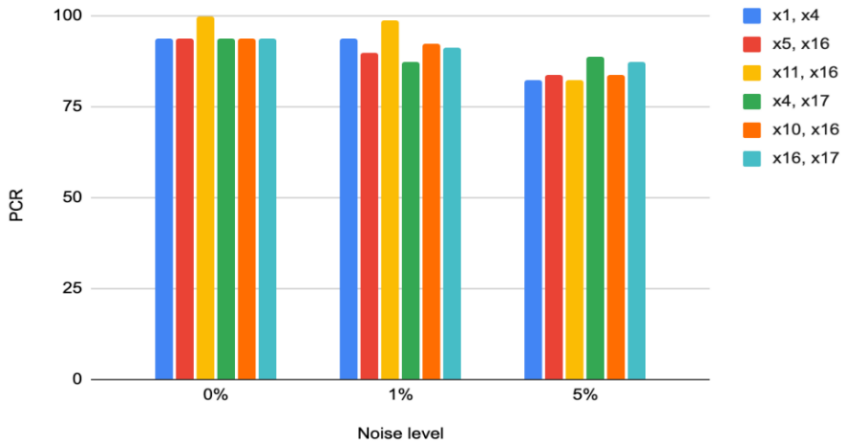


Рис. 10. Значення ІПР для класифікаторів у просторах вибраних ознак, що отримані на основі моделі при N = 1 при впливі на ознаки різних рівнів шуму

Таблиця 4

Середні значення ІПР (%) для класифікаторів в просторах ознак, що отримані на основі моделі при N = 2, з різним рівнем шуму

Поєднання ознак	Рівень шуму, %		
	0	1	5
x_5, x_{16}	93.75	95	80
x_{13}, x_{16}	93.75	93.75	85
x_4, x_{12}	100	100	81.25
x_4, x_{16}	93.75	93.75	86.25
x_{18}, x_{17}	100	100	88.75

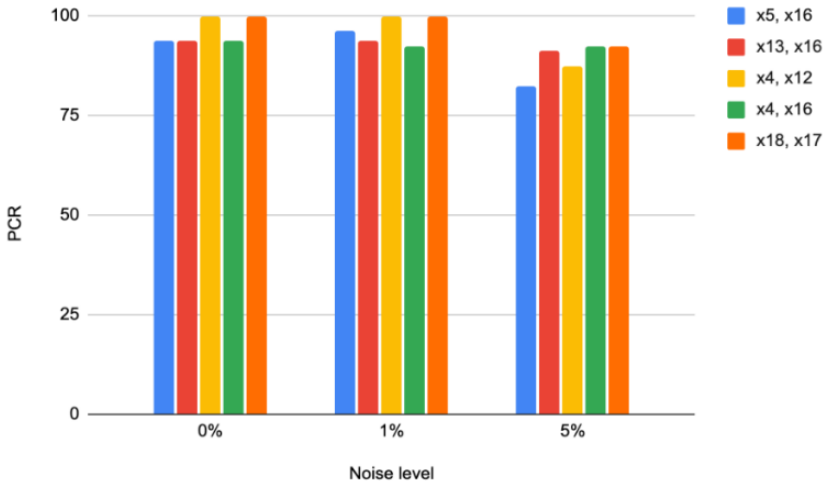


Рис. 11. Значення ІПР для класифікаторів у просторах вибраних ознак, що отримані на основі моделі при $N = 2$ при впливі на ознаки різних рівнів шуму

Отже, аналіз табл. 3 та табл. 4 показує, що найбільш інформативними та завадостійкими комбінаціями ознак за показником ІПР при рівні шуму в ознаках 1% маємо для лінійної моделі: $(x_{16}, x_{17}) - P_{\max} = 0.9375$ (виділено в табл. 3), для квадратичної моделі: $(x_4, x_{16}) - P_{\max} = 0.9375$ (виділено в табл. 4). Але при рівні шуму 5% для зазначених пар ознак значення ІПР значно знижуються. Тому апроксимаційні лінійна та квадратична моделі Вольтерри можуть використовуватися в діагностичних дослідженнях психофізіологічного стану людини тільки при високоточних вимірюваннях перехідних функцій і невеликих похибках обчислень ознак (не більше 1%).

На рис. 12 і рис. 13 представлено розташування об’єктів навчальних вибірок даних в просторі ознак (x_{16}, x_{17}) та (x_4, x_{16}), відповідно.

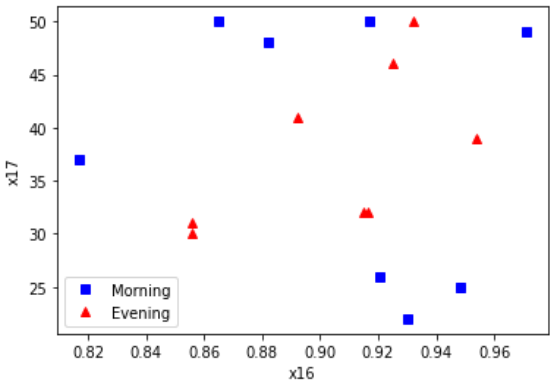


Рис. 12. Розташування об'єктів навчальної вибірки даних в просторі ознак (x_{16}, x_{17})

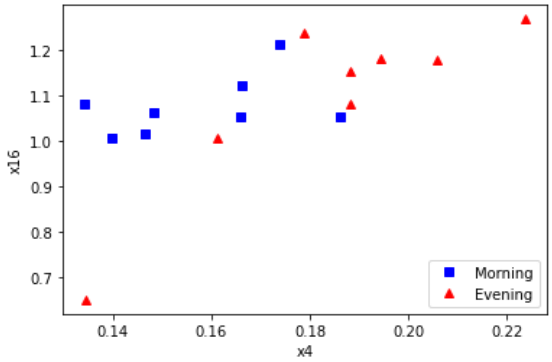


Рис. 13. Розташування об'єктів навчальної вибірки даних в просторі ознак (x_4, x_{16})

5. Оцінки ефективності класифікаторів, які побудовано у відібраних просторах ознак за допомогою метода SVM [22]. Для побудови класифікатора використовувався також метод опорних векторів (SVM, Support Vector Machine) [27, 28]. Результати оцінки ефективності класифікаторів психофізіологічного стану людини, що побудовано за допомогою SVM у просторах ознак (x_{16}, x_{17}) і (x_4, x_{16}), наведено у табл. 5. При цьому застосовується SVM з використанням гаусова ядра з радіальною базовою функцією (RBF):

$$K(\mathrm{x}, \mathrm{x}') = \exp(-\gamma \|\mathrm{x} - \mathrm{x}'\|^2), \tag{11}$$

де x, x´ - вектори; x, x´ є R^2 ; γ – параметр, який підлягає оптимізації. Обчислення показників з табл. 5 [29] було отримано за допомогою

бібліотеки Scikit-learn (клас sklearn.svm.SVC) і функцій модуля sklearn.metrics.

Таблиця 5

Метрики оцінки ефективності класифікаторів, що побудовано у двовимірних просторах ознак за допомогою метода SVM

Метрики	Модель N=1	Модель N=2
	x_{16} & x_{17}	x_4 & x_{16}
Error Type I, α	0	1
Error Type II, β	1	0
$\text{Accuracy} = \frac{TP+TN}{TP+FP+FN+TN}$	0.9375	0.9375
$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN}$	0.875	1
$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP}$	1	0.8889
$\text{F1-Scale} = \frac{2*\text{Precision}*\text{Recall}}{\text{Precision}+\text{Recall}}$	0.9333	0.9412

Як видно з табл. 5 отримані значення критерію ІПР (Accuracy = 0.9375) у класифікаторів, що побудовано за допомогою метода SVM на основі даних лінійної і квадратичної моделі ОМС, однакові і збігаються з показником ІПР байєсівських класифікаторів.

Висновки. Приведені результати досліджень ефективності використання апроксимаційних моделей Вольтерри першого і другого порядку ОМС у вигляді одновимірних і двовимірних перехідних функцій в діагностичних дослідженнях психофізіологічного стану людини за даними айтрекінгу із застосуванням розроблених методів та засобів нелінійної динамічної ідентифікації "вхід-вихід" ОМС.

Отримано емпіричні дані спостережень "вхід-вихід" ОМС, що застосовувались для ідентифікації ОМС на основі поліномів Вольтерри. В якості тестових сигналів використовуються візуальні стимули, які відображаються на екрані монітора на різних відстанях від початкової позиції, що формально відповідає дії ступінчатих сигналів з різними амплітудами на вході ОМС. Здійснено експериментальні дослідження "вхід-вихід" ОМС за допомогою айтрекера Tobii Pro TX300 та визначені за даними айтрекінга перехідні функції першого та діагональні перетини перехідних функцій другого порядку. Отримані перехідні функції використовуються для формування просторів діагностичних ознак.

Експерименти з ОМС респондента здійснювались до початку та після робочого дня, тобто оцінювався стан утоми. Сформовані тренувальні вибірки даних для двох станів "Норма" та "Утома" у різних двовимірних просторах евристичних ознак, на основі яких побудовано байєсовськи класифікатори і вибрано класифікатори (простори ознак) з максимальним значенням імовірності правильного розпізнавання.

Виконано дослідження робастності ознак за показником імовірності правильного розпізнавання, виділені поєднання ознак з максимальним ($P_{\max}$= 0.9375) і найбільш стабільним показником ІПР.

Отримана в [23] на тих самих експериментальних даних пара ознак, які визначено на основі кубічного поліному Вольтерри (N = 3), має більшу стабільність ніж ознаки, визначені на основі квадратичного поліному (N = 2) при однакових значеннях $P_{\max}$ = 0.9375 і впливі на ознаки однакових рівнів шуму.

References

1. Baziyan, B. Kh., Chigaleichik, L. A., Testenko, E. L. and Lachinova, D. R. (2007), "Using eye, head and hand trajectory analysis for early functional diagnosis of Parkinson's disease", *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, Vol. 143, No 5, pp. 484-486.

2. Jansson, D., Medvedev, A., Axelson, H. and Nyholm, D. (2014), "Stochastic Anomaly Detection in Eye-Tracking Data for Quantification of Motor Symptoms in Parkinson's Disease", *Signal and Image Analysis for Biomedical and Life Sciences*, Springer International Publishing, Cham, pp. 63-82.

3. Jansson, D., Rosen, O. and Medvedev, A. (2015), "Parametric and Nonparametric Analysis of Eye-Tracking Data by Anomaly Detection", *IEEE Transactions on Control Systems Technolog*, Vol. 23, No. 4, pp. 1578-1586.

4. Doyle, F. J. I., Pearson, R. K. and Ogunnaike, B. A. (2001), *Identification and Control Using Volterra Models (Communications and Control Engineering)*, Springer London, 314 p.

5. Apartsyn, A. S., Solodusha, S. V. and Spiryaev, V. A. (2013), "Modeling of Nonlinear Dynamic Systems with Volterra Polynomials", *International Journal of Energy Optimization and Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 16-43.

6. Pavlenko, V. and Pavlenko, S. (2018), "Deterministic identification methods for nonlinear dynamical systems based on the Volterra model", *Applied Aspects of Information Technology*, Vol. 01, No. 01, pp. 9-29.

7. Pavlenko, V., Salata, D., Dombrovskyi, M. and Maksymenko, Yu. (2017), "Estimation of the Multidimensional Transient Functions Oculo-Motor System of Human", *Mathematical Methods and Computational Techniques in Science and Engineering*, pp. 110-117.

8. Pavlenko, V. D., Salata, D. V. and Chaikovskyi, H. P. (2017), "Identification of a Oculo-Motor System Human Based on Volterra Kernels", *International Journal of Biology and Biomedical Engineering*, Vol. 11, pp. 121-126.

9. Pavlenko, V., Salata, D. and Maksymenko, Yu. (2017), "Nonlinear Dynamic Model of a Oculo-Motor System Human based on Volterra Kernels", *WSEAS Transactions on Systems*, pp. 234-241.

10. Pavlenko, V., Ivanov, I. and Kravchenko, E. (2017), "Estimation of the Multidimensional Dynamical Characteristic Eye-Motor System", *Proceedings of the 9th IEEE International*

Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), IEEE, Vol. 2, pp. 645-650.

11. Pavlenko, V. D., Milosz, M. and Dzienkowski, M. (2020), "Identification of the oculo-motor system based on the Volterra model using eye tracking technology", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1603, pp. 012011.

12. Fomin, O. O., Masri, M. M., Pavlenko, V. D. and Fedorova, A. N. (2015), "Method and information technology for constructing a non-parametric dynamic model of the oculomotor system", *Eastern European Journal of Advanced Technologies.* 2015. Vol. 4, pp. 64-69.

13. Fomin, O. O., Pavlenko, V. D. and Fedorova, A. N. (2015), "Method for constructing a multidimensional Volterra model of the oculomotor apparatus", *Electrical and computer systems*, No.19 (95), pp. 296-302.

14. Pavlenko, V. D., Fomin, O. O., Fedorova, A. N. and Dombrovskyi, M. M. (2016), "Identification of Human Eye-Motor System Base on Volterra Model", *Herald of the National Technical University "KhPI". A series of "Information and Modeling"*, No. 21 (1193), pp. 74-85.

15. Pavlenko, V. D. (2009), "Compensation Method for Identification of Nonlinear Dynamic Systems in the Form of Volterra Kernels", *Proceedings of the Odessa Polytechnic University*, 2 (32), pp. 121-129.

16. Pavlenko, S. V., Pavlenko, V. D. and Polozhaenko, S. A. (2012), "Methods of identification of nonlinear systems based on Volterra models using test polypulse effects", *Herald of the National Technical University "KhPI". A series of "Information and Modeling"*, No. 62 (968), pp. 155-161.

17. Apartsyn, A. S. (2011), "On the study of the stability of a solution to a polynomial Volterra equation of the first kind", *Automation and telemechanics*, No. 6, pp. 95-102.

18. Pavlenko, V. D. and Shamanina, T. V. (2020), "Construction of the Volterra model of the human eye-motor system based on eyetracking data", *Herald of the National Technical University "KhPI". A series of "Information and Modeling"*, No.1 (3), pp. 15-29.

19. Tikhonov, A. N., Goncharskyi, A. V., Stepanov, V. V. and Yagola, A. G. (1990), *Numerical methods for solving ill-posed problems*, 230 p.

20. Pavlenko, V., Shamanina, T. and Chori, V. (2021), "Nonlinear Dynamics Identification of the Oculo-Motor System based on Eye Tracking Data", *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, Vol. 15, pp. 569-577.

21. Fainzilberg, L. S. (1998), "Information technology for diagnosing the functional state of the operator", *Control systems and machines*, No. 4, pp. 40-45.

22. Medvedew, A., Fomin, O., Pavlenko, V. and Speranskyy, V. (2017), "Diagnostic features space construction using Volterra kernels wavelet transforms", *2017 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, IEEE.

23. Fainzilberg, L. S. (2010), *Mathematical methods for evaluating the usefulness of diagnostic features*, 152 p.

24. Tharwat, A. (2020), "Classification assessment methods", *Applied Computing and Informatics*, pp. 1-13.

25. Vapnik, V. N. (2019), "Complete Statistical Theory of Learning", *Automation and Remote Control*, Vol. 80, No. 11, pp. 1949-1975.

26. Vapnik, V. N. (2000), *The Nature of Statistical Learning Theory. Statistics for Engineering and Information Science*.

27. Pavlenko, V. D., Shamanina, T. V. and Chori, V. V. (2021), "Identification of the oculo-motor system in the form Volterra model based on eye-tracking data", *EPJ Web of Conferences*, 248, 01009 (MNPS-2020), pp. 1-6.

28. Chori, V. V., Shamanina, T. V. and Pavlenko, V. D. (2021), "Building a classifier in the personality recognition system based on eye tracking data", *Bulletin of the National Technical University "KhPI" A series of "Information and Modeling"*, Vol. 1, No. 2 (6), p. 44-58.

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

Надійшла (Received) 10.05.2023

Pavlenko Vitaliy, Dr.Sci.Tech, Professor
Odessa Polytechnic National University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
tel./phone: +3(8-048) 705-8-436, e-mail: pavlenko_vitalij@ukr.net
ORCID ID: 0000-0002-5655-4171

Shamanina Tetiana, PhD Eng
Odessa Polytechnic National University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
tel./phone: +3(8-096) 959-65-65, e-mail: tatanatv8@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-3857-1867

Chori Vladyslav, Graduate student
Odessa Polytechnic National University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
Tel./phone: +3(8-096) 611-71-21, e-mail: vladyslav.chori@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-7823-8383

УДК 004.942

Використання квадратичної моделі Вольтерри окуло-моторної системи в діагностичних дослідженнях психофізіологічного стану людини / Павленко В.Д., Шаманіна Т.В., Чорі В.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2023. – № 1 – 2 (9 – 10). – С. 106 – 126.

Містяться результати дослідження ефективності застосування апроксимаційних моделей Вольтерри першого і другого порядку окуло-моторної системи в діагностичних дослідженнях психофізіологічного стану людини за даними айтрекінгу. В якості тестових сигналів викорстовуються візуальні стимули, які відображаються на екрані монітора на різних відстанях від початкової позиції, що формально відповідає дії ступінчатих сигналів з різними амплітудами на вході ОМС. Здійснено експериментальні дослідження "вхід-вихід" ОМС за допомогою айтрекера Tobii Pro TX300 та визначені за даними айтрекінга перехідні функції першого та діагональні перетини перехідних функцій другого порядку. Отримані перехідні функції використовуються для формування просторів діагностичних онак. Досліджено діагностичну ціннісь всіх можливих поєднань ознак в пари за показником імовірності правильного розпізнавання (ІПР). Результати досліджень отримано за допомогою навчання байєсівського класифікатора у різних просторах запропонованих ознак. Здійснено дослідження робастності ознак за показником ІПР, виділені сполучення ознак з максимальним і найбільш стабільним показником ІПР. Іл: 13. Табл.: 5. Бібліогр.: 28 назв.

Ключові слова: окуло-моторна система, айтрекінг, психофізіологічний стан, діагностика, квадратична модель Вольтерри, ідентифікація, тестові візуальні стимули, перехідні функції,

UDC 004.942

Using quadratic Volterra model of the oculo-motor system in diagnostic research of psychophysiological state of human / Pavlenko V.D., Shamanina T.V., Chori V.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2023. – № 1 – 2 (9 – 10). – P. 106 – 126.

It contains the results of the study of the effectiveness of the application of approximation Volterra models of the first and second order of the oculo-motor system in diagnostic studies of the psychophysiological state of a person based on eye-tracking data. Visual stimuli are used as test signals, which are displayed on the monitor screen at different distances from the initial position, which formally corresponds to the action of step signals with different amplitudes at the OMS input. Experimental studies of the "input-output" of the OMS were carried out using the Tobii Pro TX300 eyetracker, and the first-order transient functions and the second-order diagonal intersections of the second-order transient functions were determined based on the eye-tracking data. The resulting transient functions are used to form the spaces of diagnostic features. The diagnostic value of all possible combinations of features in pairs according to the indicator of the probability of correct recognition (PCR) was studied. The research results were obtained using Bayesian classifier training in different spaces of the proposed features. A study of the robustness of features according to the PCR indicator was carried out, the combinations of features with the maximum and most stable PCR indicator were selected. Figs.: 13. Tabl.: 5. Refs.: 28 titles.

Keywords: oculo-motor system, eye-tracking, psychophysiological state, diagnostic, quadratic Volterra model, identification, test visual stimuli, transient functions

Біологічні та медичні прилади і системи

Вісник Національного технічного університету "ХПІ", 2023, № 1–2 (9–10)
ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

УДК 004.8 **DOI: 10.20998/2411-0558.2023.01.10**

Т. О. БІЛОБОРОДОВА, канд. техн. наук, доц., ІПМЕ, м. Київ,
І. С. СКАРГА-БАНДУРОВА, докт. техн. наук, проф., ТНТУ, м. Тернопіль

МЕТОДОЛОГІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА ОСНОВІ СУКУПНОЇ ДОСТОВІРНОСТІ ТА ІНТЕПРЕТОВАНОСТІ РЕКОМЕНДАЦІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Стаття розглядає проблему переходу в медичній діагностиці від клінічно-залежних методологій до підходів, базованих на доказах, з використанням штучного інтелекту (ШІ). Основна мета дослідження полягає у розробці методології прийняття рішення на основі об'єднаного рішення людини та ШІ, та інтерпретованості результату ШІ для людини. Запропонована методологія включає формування рішень на основі людського інтелекту (ЛІ) та ШІ, оцінку корисності рекомендацій, і формування спільного рішення на основі сукупної ймовірності. Практичне застосування методології було демонстровано на прикладі експерименту з класифікації немедичних зображень. Експеримент показав, що спільне рішення, засноване на об'єднаному підході, досягає більшої достовірності (0,77) порівняно з окремими підходами ЛІ (0,73) та ШІ (0,82). Результати дослідження підкреслюють важливість прозорості, інтерпретованості та довіри до результатів ШІ для успішного використання ШІ в медицині. Іл.: 1. Бібліогр.: 16 назв.

Ключові слова: прийняття рішень, штучний інтелект, достовірність, інтепретованість

Постановка проблеми. У сфері медичної діагностики спостерігається перехід від традиційних клінічно-залежних методологій обстеження до підходів, що переважно базуються на доказах, коли лікарі значною мірою покладаються на об’єктивні дані та стандартизовані критерії діагностики, щоб підвищити точність і послідовність діагностики. У цьому контексті залучення штучного інтелекту (ШІ) є цінним інструментом для аналізу медичних доказів, надаючи суттєву підтримку медичним працівникам. Рішення на основі ШІ сприяють швидкому наданню медичних послуг за рахунок прискорення часу діагностики та оптимізації розподілу ресурсів у системах охорони здоров’я. Теледерматологія є одним із прикладів демонстрації потенціалу впровадження ШІ. Дослідження [1, 2] показали, що модель згорткової нейронної мережі перевершила діагностичну точність більшості з 58 дерматологів у ідентифікації меланоми. Цей успіх підкреслює можливості подібного прогресу в інших областях автоматизованої діагностики, таких як скринінг раку молочної залози та раку шийки матки [3]. Однак прийнятність рішень на основі ШІ викликає певні занепокоєння.

© Т.О. Білобородова, І.С. Скарга-Бандурова, 2023

Покладаючись виключно на можливості моделей штучного інтелекту, передбачається, що людські судження є достатньо надійними, щоб компенсувати будь-які неточності в результатах, створених ШІ. Тим не менш, цей підхід не бере до уваги людські помилки та можливу неузгодженість, особливо при роботі з великими обсягами даних. Більшість методів спільного прийняття рішень людиною та штучним інтелектом в першу чергу враховують достовірність рішень штучного інтелекту, недооцінюючи значення достовірності рішення людини в прийнятті рішень у остаточному процесі прийняття рішень. Таким чином, для забезпечення ефективного та точного прийняття рішень стає обов'язковим враховувати впевненість рішень як ШІ, так і людського інтелекту (ЛІ).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Достовірність рішень ЛІ разом із існуючими упередженнями навколо них є темою, яка широко вивчається в різних областях досліджень, включаючи прийняття рішень [4]. Автори [5] досліджують процес формування рішення людиною та пропонують двокомпонентний простір моделі поведінки людини, включаючи компонент корисності та компонент вибору, для визначення яким чином впливає рекомендація ШІ на прийняття рішення людиною в залежності від довіри людини до результатів ШІ. Результати показують, що моделі, скориговані людиною, перевершують вихідні дані моделі штучного інтелекту, що свідчить про те, що люди схильні використовувати власне судження під час процесу прийняття рішень, щоб оцінити, чи слід приймати рекомендації штучного інтелекту. Порівняння параметрів моделі показує, що коли ставки рішень стають більшими, люди, як правило, знижують свою віру в правильність рекомендацій ШІ та більше покладаються на власні судження в ухваленні рішень за допомогою ШІ.

Дослідження [6] було зосереджено на співпраці людини та машини для прийняття різноманітних рішень. Автори запропонували рішення, спрямоване на використання взаємодоповнюваності між людиною та машиною для максимізації винагороди за рішення, яке перевершує як алгоритм, так і людину, коли вони приймають рішення самостійно.

Специфічний тип взаємодії людини та штучного інтелекту, коли людина-наглядач вирішує або прийняти рекомендацію штучного інтелекту, або самостійно вирішити завдання, вивчається в дослідженні [7]. Автори максимізують очікувану корисність команди людини та штучного інтелекту, виражену в термінах якості остаточного рішення, вартості перевірки та індивідуальної точності людини та машин. Дослідження показує переваги моделювання командної роботи під час навчання через покращення очікуваної командної користі для наборів

даних, враховуючи такі параметри, як людські навички та вартість помилок.

Достовірність, визначена як суб'єктивна ймовірність того, що рішення буде правильним [8, 9], забезпечує засіб для оцінки впевненості людського рішення. Одним із підходів до оцінки ступеня достовірності в прийнятих рішенням людини є калібрування, яке перевіряє узгодженість між рівнями достовірностями окремих людей і фактичною точністю рішень [10, 11]. Крім того, клінічна діагностика дотримується принципу не завдавати шкоди, що вимагає зусиль для забезпечення інтерпретації та прозорості клінічних рішень на основі ШІ. Успішне впровадження рішень на основі ШІ залежить від встановлення довіри між медичними експертами та системами ШІ. Якщо пояснення, надані ШІ, не відповідають очікуванням лікарів, вони навряд чи будуть прийняті, що підкреслює важливість ефективних механізмів комунікації та пояснення в результатах ШІ. Ці факти обумовлюють актуальність поставленої мети та вибір методів її реалізації.

Мета статті. Метою дослідження є розробка методології прийняття рішення на основі об'єднаного рішення ЛІ та ШІ та інтепретованості результату ШІ для людини.

Формалізація параметрів прийняття рішення на основі рекомендацій ШІ. Формально, параметри прийняття рішень за допомогою ШІ можуть бути визначені наступним чином. Визначимо множину випробувань з прийняття рішень у вигляді n-вимірного вектору ознак x, таке, що $x \in X$. Визначимо бінарне рішення, яке потрібно прийняти в цьому випробуванні як $y \in \{+1, -1\}$. Результати моделі ШІ $m(x)$ під час прийняття рішень є розподілом ймовірностей набору можливих рішень, тобто $m(x) = \{+1: P(y = +1|x, -1: P(y = -1|x)\}$. Враховуючи $m(x)$, модель ШІ надає людині рекомендацію щодо прийняття рішення, яка складається з двох частин – рекомендованого рішення $\hat{y}^m = \arg\max m(x)$, і достовірності рекомендованого рішення $c^m = \max m(x) = m(x)[y = \hat{y}^m]$. Припустимо, що достовірність моделі ШІ відкаліброваа, тобто $c^m = P(y = \hat{y}^m)$. Також, припустимо, що людина, яка приймає рішення, також формує свою власну пропозицію щодо рішення – $h(x)$, що визначає результат ЛІ в процесі прийняття рішення, та, також, складається з рішення людини $\hat{y}^h = \arg\max h(x)$, і достовірності рішення людини $c^h = \max h(x) = h(x)[y = \hat{y}^h]$.

Множина випробувань включає дані з прийняття рішення ЛІ на основі послідовності T випробувань прийняття рішень за допомогою моделі ШІ. У кожному випробуванні $t (1 \le t \le T)$ людині надається вектор

ознак x^t разом із результатом та рекомендацією моделі ШІ $\hat{y}^{m,t}$ і достовірністю $c^{m,t}$. Людина також формує власне судження $h(x^t)$ щодо вхідного зразка. Маючи всю цю інформацію, людина повинна прийняти рішення $\hat{y}^t$ виконавши дію $d^t \in \{accept, reject\}$, щоб прийняти рекомендацію моделі ШІ або відхилити її.

Таким чином, мета прийняття остаточного рішення ШІ полягає у формалізації процесу прийняття рішення людиною щодо прийняття чи відхилення рекомендації ШІ, тобто, визначення d^t для кожного випробування t.

Методологія прийняття рішення на основі об'єднаного рішення ЛІ та ШІ та інтепретованості результату ШІ для людини. Запропонована методологія включає наступні етапи: (1) формування рішень ЛІ та ШІ, (2) оцінка сукупної корисності прийняття/відхилення рекомендації, (3) формування спільного рішення на основі сукупної ймовірності прийняття/відхилення рекомендації.

На першому етапі, при формуванні сукупної достовірності відносно кожного рішення, враховується результат передбачення ЛІ та моделі ШІ, а також достовірність цього передбачення. Далі розраховується сукупна корисність кожної дії яка використовується на останньому етапі за уваги довіри людини до рекомендації ШІ для формування остаточного рішення щодо дії на основі рекомендації ШІ: прийняти або відхилити рекомендацію ШІ, та, також, розраховується ймовірність цієї дії.

Оцінка сукупної достовірності рішень ЛІ та ШІ. Формування рішень відбувається в залежності від поставленого завдання. Результатом формування рішень є передбачення та достовірність передбачення, тобто впевненість у правильності цього передбачення, для кожного зразку випробування від кожного представника ЛІ та ШІ незалежно.

Достовірність ЛІ розраховується з використанням моделі на основі реальних даних від групи експертів. Для розрахунку достовірності ЛІ для низки випробувань, декілька експертів повинні прийняти рішення чи сформулювати заключення на основі низки випробувань. В цьому випадку частка точних рішень визначається як достовірність людини c^h наступним чином (1).

$$c^h = \frac{1}{|\Omega_H|} \sum_{i \epsilon \Omega_H} 1(h_i = y), \quad (1)$$

де Ω_H група експертів, h_i – результат, пропонований експертом-людиною, y – дійсний результат, i – ідентифікатор експерта.

Враховуючи достовірності ЛІ та ШІ, об‘єднане рішення формується на основі сукупної достовірності $c^{m+h,t}$ для подальшого прийняття або відхилення рекомендації моделі ШІ.

Сукупна достовірність ЛІ та ШІ розраховується на основі критерію середньозважених логарифмічних шансів, що представляє собою комбінацію усереднення та Байєсова правила [12], відповідно до якого логарифмічні шанси агрегованої ймовірності представлені як середнє значення логарифмічних шансів окремої оцінки наступним чином (2):

$$c^{m+h,t} = \frac{\exp(\alpha)}{1+\exp(\alpha)}, \tag{2}$$

де $\alpha = \frac{1}{2}\left(\ln\frac{c^{m,t}}{1-c^{m,t}} + \ln\frac{c^{h,t}}{1-c^{h,t}}\right)$. Оскільки логарифмічне значення шансів ймовірності підкреслює відмінності екстремальних ймовірностей (тобто ймовірностей, близьких до 0 або 1), чистий ефект цього правила, таким чином, полягає в тому, щоб призвести екстремальні ймовірності до середнього значення.

Враховуючи вхідний зразок $x \in X$, функцію передбачення моделі $m(x)$ і функцію передбачення ЛІ $h(x)$, метою схеми прийняття рішень є оптимізація правила прийняття рішення на цьому етапі $g: X \to \{0,1\}$, яка визначає рішення на цьому етапі на основі сукупної достовірності $c^{m+h,t}$ наступним чином (3):

$$(m,h,g)(x) \triangleq \begin{cases} h(x) \text{ якщо } g(x) = 1, \\ m(x) \text{ якщо } g(x) = 0. \end{cases} \tag{3}$$

Таким чином, враховуючи оцінку сукупної достовірності $c^{m+h,t}$ формулюємо $g(c^t)$ наступним чином (4):

$$g\big(m(x), h(x)\big) = \begin{cases} 1, \text{якщо } c^t \geq c^{m+h,t}, \\ 0, \text{в іншому випадку.} \end{cases} \tag{4}$$

Шляхом оптимізації порогового значення є пропонується спільне рішення між ЛІ та ШІ на основі достовірності.

Формування рішення на основі довіри людини до рекомендації ШІ. Неспричинення шкоди є основним правилом охорони здоров‘я. Етап формування рішення на основі довіри застосовується лише у випадку, коли на попередньому етапі результатом є рішення на основі ШІ $m(x)$.

Формування рішення на основі довіри людини до результату ШІ формується на основі результату ШІ та довіри експерта до цього результату на основі заключень норма або патологія з використанням наступних сформульованих сценаріїв [13].

Сценарій 1: лікар довіряє правильним рекомендаціям, що надані ШІ.

Сценарій 2: лікар не довіряє неправильній рекомендації ШІ і відкидає її

Сценарій 3: лікар довіряє невірній рекомендації ШІ.

Сценарій 4: лікар відхиляє правильну рекомендацію ШІ.

Запропоновані сценарії можуть бути розширені в залежності від кількості досліджуваних ступенів захворювання.

Сценарій 1 та 2 є безпечними практиками, але сценарій 2 є результатом, коли ШІ не має довіри експерту. Сценарій 3 та 4 є ризиком для пацієнта.

Результати ШІ та ЛІ порівнюються з еталонним значенням. На основі тестування рішення ШІ отримуються результати хибно позитивних (ХП), хибно негативних (ХН), істино позитивних (ІП), істино негативних (ІН) спрацьовувань та розраховується частота хибно позитивних результатів FP як ХП/(ХП+ІН). Це ймовірність того, що буде дано позитивний результат, коли справжнє значення є негативним. Хибно негативний показник FN – це ймовірність того, що модель ШІ пропустить справді позитивний результат. Він розраховується як ХН/(ХН+ІП).

Кількість помилок ШІ з точки зору експерту має бути зведена до мінімуму, оскільки кількість хибно позитивних (твердження, що здоровий пацієнт має певний діагноз) і хибно негативних (твердження, що хворий пацієнт здоровий) може призвести до надмірного виявлення пацієнтів, які здорові або не лікують пацієнтів, які насправді є нездоровими чи хворими. Важливо підтримувати баланс між надмірним виявленням і зниженням глобальних витрат на медичне обслуговування та оплату праці, зберігаючи при цьому високий рівень справжнього позитивного виявлення, отже, гарантуючи швидке й адекватне лікування людей із позитивними випадками.

Кількість помилкових спрацьовувань має бути збалансована з кількістю помилково негативних результатів. В ідеалі це означає, що як хибно позитивні, так і хибно негативні результати ШІ мають бути нижчими, ніж результати ЛІ.

Для оцінки спрацьовувань для порівняння стандартних методів ЛІ із методами ШІ використовуються еталонні результати діагностики. Міра підтверджує рівень похибки, який, у свою чергу, повинен перевищувати рівень поточної найкращої практики. У тесті чотири випадки з результатами, де лише два дають однозначну відповідь:

(1) $FN^{M} < FN^{H}$ та $FP^{M} < FP^{H}$,
(2) $FN^{M} > FN^{H}$ та $FP^{M} < FP^{H}$.
(3) $FN^{M} < FN^{H}$ та $FP^{M} > FP^{H}$,

(4) $FN^M > FN^H$ та $FP^M > FP^H$.

Розглядаючи наслідки груп результатів:

− у випадку (1) ШІ штучний інтелект вважатиметься таким, що відповідає вимозі неспричинення шкоди пацієнту;

− у випадку результату (4) ШІ не проходить перевірку, оскільки обидві змінні мають менш сприятливий результат, ніж результати ЛІ;

− чи потрапляє результат (2) і (3) у прийнятний етичний діапазон, залежатиме від тяжкості шкоди, до якої призведе хибний результат.

Таким чином, керуючись вимогою "Не причини шкоди", враховуючи хибнопозитивні *FP* та хибнонегативні помилки *FN* ШІ та ЛІ, правило оцінки довіри до ШІ $q: X \to \{0,1\}$ формулюємо $q(FN^{AI}, FP^{AI}, FN^H, FP^H)$ наступним чином (5)

$$q(\mathrm{FN}^{\mathrm{M}}, \mathrm{FP}^{\mathrm{M}}, \mathrm{FN}^{\mathrm{H}}, \mathrm{FP}^{\mathrm{H}}) = \begin{cases} 1, \text{якщо } \mathrm{FN}^{\mathrm{M}} < \mathrm{FN}^{\mathrm{H}} \text{ та } \mathrm{FP}^{\mathrm{M}} < \mathrm{FP}^{\mathrm{H}}, \\ 0, \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (5)$$

За правилом прийнятності рекомендації ШІ єдиним можливим варіантом рішення є сценарій за яким хибнопозитивні *FP* та хибнонегативні помилки *FN* результату ШІ з точки зору еталонного результату є нижчими за помилки ЛІ.

Формування остаточного рішення. Враховуючи результати правил прийняття рішення на основі сукупної достовірності та на основі довіри до результат ШІ, правило остаточного прийняття рішення щодо результату отриманого клінічним рішенням на основі ШІ $D: X \to \{0,1\}$ формулюємо $D(g, q)$ наступним чином (6).

$$D(g, q) = \begin{cases} 1, \text{якщо } m(x) \text{ та } q = 1, \\ 0, \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (6)$$

Враховуючи вхідний зразок $x \in X$, результат правил прийняття рішення на основі достовірності та на основі довіри, правило остаточного прийняття рішення, що визначає кінцевий результат між передбаченням моделі ШІ та прогнозом людини наступним чином (7)

$$(m, h, g, D)(x) \triangleq \begin{cases} d^t = accept\ m(x) \text{ якщо } D(x) = 0, \\ d^t = reject\ m(x) \text{ якщо } D(x) = 1. \end{cases} \quad (7)$$

Практичне застосування запропонованої методології. Експеримент було реалізовано для збору даних про відношення, довіру та поведінку людини в умовах прийняття рішення з використанням

рекомендацій ШІ. В експерименті прийняло участь 66 суб‘єктів. Експеримент проводився з використанням Cats and Dogs Breeds Classification Oxford Dataset [14]. В експерименті суб‘єктам поставлено завдання на класифікацію зображень. Всього в експерименті використано 100 зображень, що належать до 10 класів. Перед початком експерименту кожен суб‘єкт отримав відповідні інструкції щодо завдання. Після закінчення навчання суб'єкт почав працювати над набором зі 100 завдань з прийняття рішень, які демонструвалися йому випадковим чином. На першому етапі суб'єкт бачив зображення тварини і потім мав визначити породу тварини. На другому етапі суб'єкт бачив результат моделі ШІ щодо породи тварини та достовірність цього результату. З урахуванням цих даних суб'єкт повинен був ухвалити остаточне рішення щодо породи тварини, прийнявши або відхиливши рекомендацію моделі ШІ. Дані, зібрані в ході дослідження, дозволяють вивчити функцію прийняття рішень людиною $h(x)$, щоб зробити висновок про прогноз і достовірність людини, яка приймає рішення, в ході випробування з прийняття рішення.

Дизайн експерименту. Реалізовано наступні режими експерименту:

- виключно ЛІ: режим має на увазі використання виключно ЛІ для прийняття рішень щодо набору даних зображень;
- виключно ШІ: режим має на увазі використання виключно ШІ для прийняття рішень щодо набору даних зображень;
- спільне рішення: режим має на увазі використання запропонованої методології для формування остаточного рішення щодо класифікації зображень.

На етапі випробувань з прийняття рішень виключно людиною без підтримки ШІ кожен суб‘єкт повинен виконати 100 завдань з класифікації породи кішки чи собаки на зображенні, що демонструвалися випадковим чином. Перед початком експерименту кожен суб‘єкт отримав відповідні інструкції щодо завдання. В кожному завданні людину просили дати відповідь щодо породи кішки чи собаки. Крім того, для кожної відповіді суб’єкт повинен вказати очікувану достовірність свого рішення щодо класифікації зображення за шкалою від 0 до 10, де 0 – найнижча, а 10 найвища достовірність. Таким чином, отримано результат класифікації зображень людським інтелектом та очікувана достовірність цього результату, яка використовується далі для оптимізація правила прийняття рішення на основі сукупної достовірності на цьому етапі. Розраховано істинну достовірність ЛІ c^h на основі (1). Середня істинна достовірність результатів прийняття рішення у 100 випробуваннях 6 експертами склала 0,73.

На етапі випробувань з прийняття рішень виключно ШІ використано попередньо навчені моделі ШІ GoogLeNet Inceptionv3 [15] та Local Interpretable Model-agnostic Explanations (LIME) [16], які використані для класифікації зображення та генерації пояснення на основі теплокарти (англ. heatmap), що представляє візуалізацію на основі кольорової матриці ймовірностей пікселів, віднесених до певного класу зображення для пояснення результатів класифікації. Таким чином, отримано результати передбачення породи тварини на зображенні ШІ, достовірність цього результату та інтепретація результату класифікації для людини. Достовірність ШІ c^h результатів прийняття рішення у 100 випробуваннях склала 0,82.

Далі розраховано сукупну достовірність ЛІ та ШІ $c^{m+h,t}$ на основі (2), що склала 0,77. Сукупна достовірність використовується для оптимізації правила прийняття рішення на цьому етапі.

На етапі випробувань з прийняття спільного рішення суб’єктам продемонстровано результати класифікації моделі, тобто породу тварин, разом із поясненнями LIME, які включали теплокарту із зазначенням області найвищої ймовірності для класифікованого класу. Суб'єкти повинні прийняти або відхилити результат класифікації ШІ та зробити висновок про те, була інтерпретація результату моделі зрозумілою чи ні. Приклад інтерфейсу завдання для суб‘єктів наведено на рис. 1.

Рис. 1. Приклад інтерфейсу завдання для суб‘єктів щодо довіри до результатів ШІ

На основі довіри до інтепретації результату ШІ формується остаточне рішення щодо прийняття чи відхилення рекомендації ШІ.

Висновки. Результати цього дослідження роблять внесок у загальну прийнятність використання рішень на основі ШІ. Цей підхід підкреслює важливість підтримки прозорості, інтерпретації та довіри до результатів штучного інтелекту для досягнення визнання серед медичних працівників. Вирішуючи проблеми, пов'язані з достовірністю штучного інтелекту, методологія забезпечує структуру, яка підвищує впевненість медичних працівників у використанні систем ШІ та також враховує фактор прийняття невірних рішень людиною.

References:

1. Esteva, A., Kuprel, B., Novoa, R.A., Ko, J., Swetter, S.M., Blau, H.M. and Thrun, S., (2017), Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks. nature, 542(7639), pp.115-118.

2. Goldstein, B.A. and Pencina, M.J., (2014), Developing Implementable Risk Prediction Models with Electronic Health Records Data. *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*, pp.1-8.

3. Hendy, J., Chrysanthaki, T., Barlow, J., Knapp, M., Rogers, A., Sanders, C., Bower, P., Bowen, R., Fitzpatrick, R., Bardsley, M. and Newman, S., (2012), An organisational analysis of the implementation of telecare and telehealth: the whole systems demonstrator, *BMC health services research*, 12, pp.1-10.

4. Kremer, M., Moritz, B. and Siemsen, E., (2011), Demand forecasting behavior: System neglect and change detection, *Management Science*, 57(10), pp.1827-1843.

5. Wang, X., Lu, Z., Yin, M., (2022), April. Will you accept the ai recommendation? predicting human behavior in ai-assisted decision making. *In Proceedings of the ACM Web Conference*, pp. 1697-1708.

6. Gao, R., Saar-Tsechansky, M., De-Arteaga, M., Han, L., Lee, M. K., Lease, M., (2021), *Human-AI collaboration with bandit feedback. arXiv preprint arXiv*:2105.10614.

7. Bansal, G., Nushi, B., Kamar, E., Horvitz, E., Weld, D. S., (2021), Is the most accurate ai the best teammate? optimizing ai for teamwork. *In Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 35(13), pp. 11405-11414.

8. Guo, C., Pleiss, G., Sun, Y. and Weinberger, K.Q., (2017), July. On calibration of modern neural networks, *In International conference on machine learning*, pp. 1321-1330.

9. Pouget, A., Drugowitsch, J. and Kepecs, A., (2016), Confidence and certainty: distinct probabilistic quantities for different goals, *Nature neuroscience*, 19 (3), pp. 366-374.

10. Fischhoff, B., Slovic, P. and Lichtenstein, S., 1977. Knowing with certainty: The appropriateness of extreme confidence, *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, 3 (4), pp. 552.

11. Pulford, B.D. and Colman, A.M., (1997), Overconfidence: Feedback and item difficulty effects, *Personality and individual differences*, 23 (1), pp. 125-133.

12. David V Budescu and Hsiu-Ting Yu. (2006), To Bayes or not to Bayes? A comparison of two classes of models of information aggregation, *Decision analysis 3*, pp. 145-162.

13. Choudhury, A., Asan, O., Medow, J. E., (2022), Effect of risk, expectancy, and trust on clinicians' intent to use an artificial intelligence system-Blood Utilization Calculator, *Applied Ergonomics*, 101, pp. 103708.

14. Parkhi, O.M., Vedaldi, A., Zisserman, A. and Jawahar, C.V., (2012), Cats and dogs, *In 2012 IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 3498-3505.
15. Szegedy, C., Vanhoucke, V., Ioffe, S., Shlens, J. and Wojna, Z., (2016), Rethinking the inception architecture for computer vision, *In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 2818-2826.
16. Ribeiro, M.T., Singh, S. and Guestrin, C., (2016), Why should I trust you? Explaining the predictions of any classifier, *In Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining*, pp. 1135-1144.

Статтю представив д.т.н., проф. НТУ "ХПІ" Поворознюк А.І.

Надійшла (received) 18.07.2023

Biloborodova Tetiana, Cand.Sci.Tech, Assotiate Professor
G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering
15 General Naumov Street, Kyiv, 03164, Ukraine
e-mail: beloborodova.t@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-7561-7484

Skarga-Bandurova Inna, D.Sci.Tech, Professor
Ternopil Ivan Puluj National Technical University
56 Ruska Street, Ternopil, 46001, Ukraine
e-mail: skarga_bandurova@ukr.net
ORCID ID: 0000-0003-3458-8730

УДК 004.8

Методологія прийняття рішень на основі сукупної достовірності та інтепретованості рекомендації штучного інтелекту / Білобородова Т.О., Скарга-Бандурова І.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – № 1 – 2 (9 – 10). – С. 127 – 139.

У статті розглядається перехід у медичній діагностиці від традиційних клініцистських методологій до доказових підходів із використанням штучного інтелекту (ШІ). Основною метою дослідження є розробка методології прийняття рішень, заснованої на інтеграції людських рішень і рекомендацій на основі ШІ, а також можливості інтерпретації результатів ШІ. Запропонована методологія передбачає формування рішень на основі людського інтелекту (ЛІ) та ШІ, оцінку корисності рекомендацій та генерацію спільного рішення на основі кумулятивної ймовірності. Практичне застосування методики було продемонстровано шляхом експерименту з класифікації немедичних зображень. Результати дослідження підкреслюють важливість прозорості, інтерпретації та довіри до результатів ШІ для успішного використання ШІ в охороні здоров'я. Іл.: 1. Бібліогр.: 16 назв.

Ключові слова: прийняття рішень; штучний інтелект; достовірність; інтепретованість.

UDC 004.8

Decision making methodology based on generalized confidence and interpretability of artificial intelligence recommendation / Biloborodova T.O., Skarga-Bandurova I.S. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – № 1 – 2 (9 – 10). – P. 127 – 139.

The article examines the transition in medical diagnostics from traditional clinician-dependent methodologies to evidence-based approaches using artificial intelligence (AI). The primary objective of the research is to develop a decision-making methodology based on the integration of human decisions and AI-based recommendations, as well as the interpretability of AI results for humans. The proposed methodology involves the formation of decisions based on human intelligence (HI) and AI, the assessment of the utility of recommendations, and generation of a joint decision based on cumulative probability. The practical application of the methodology was demonstrated through an experiment involving the classification of non-medical images. The research findings underscore the importance of transparency, interpretability, and trust in AI results for the successful utilization of AI in healthcare. Figs.: 1. Refs.: 16 titles.

Keywords: decision making; artificial intelligence; confidence; interpretability.

Вісник Національного технічного університету "ХПІ", 2023, № 1–2 (9–10)
ISSN 2079-0031 (Print) ISSN 2411-0558 (Online)

УДК 322.2:623.446.4 **DOI: 10.20998/2411-0558.2023.01.11**

І. П. ЗАНЕВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., зав. каф. інформатики та кінезіології Львівського державного університету фізичної культури ім. Івана Боберського, м. Львів
Л. Г. ЗАНЕВСЬКА, канд. наук фіз. вих., доц., доцент кафедри інформатики та кінезіології, Львівського державного університету фізичної культури ім. Івана Боберського, м. Львів

ВНУТРІШНЯ БАЛІСТИКА СИСТЕМИ СТРІЛА–ЛУК У ПОПЕРЕЧНІЙ ПЛОЩИНІ

Розроблено механіко–математичну модель системи стріла–лук з урахуванням поздовжнього динамічному згину стріли у поперечній площині. Застосовано метод дослідження системи у формі рівнянь Лагранжа другого роду, побудованих на основі варіаційного принципу Гамільтона. Власні частоти і форми коливань визначено за допомоги модифікованого методу Ньютона із застосуванням рядів Феодосьєва. Іл.: 3. Бібліогр.: 23 назв.

Ключові слова: модель; система; стріла; лук; власні частоти, натуральні форми

Постановка проблеми. За свою багато тисячолітню історію мисливський лук постійно вдосконалювався й трансформувався з військової у спортивну зброю [1, 2]. Стосовно вогнепальної зброї внутрішня балістика – це комплекс процесів, які відбуваються при пострілі, особливо підчас руху кулі (набою, міни, гранати) каналом ствола [3]. Стосовно спортивного лука (арбалета) внутрішня балістика – це в основному процес спільного руху стріли з тятивою лука плюс положення після відриву стріли від тятиви, перед виходом стріли з площини лука [4].

Конструкції спортивних луків і стріл стрімко вдосконалюються, для їх виробництва застосовують все більш міцні й надійні полімерні матеріали [5]. Ускладнюються правила проведення змагань [6]. Спортивний результат значною мірою залежить від правильного узгодження параметрів системи стріла–лук. Спортивна зброя стає все більш складним приладдям точної механіки. Отож актуальним залишається проблема механіко-математичного моделювання пострілу зі спортивного лука [7].

Питання балістики посідають центральне місце як у військовій, так і в спортивній галузях. Дослідження балістики стріли – одна з головних проблем теорії і практики спортивної стрільби з лука. Зокрема, приділено щільну увагу важливому явищу парадокса лучника, оскільки стріла з тятивою, здавалося б загадковим чином оминають руків'я лука підчас

© І.П. Заневський, Л.Г. Заневська, 2023

спільного руху у поперечній площині. Виявилося, що одночасно відбувається їхній спільний рух у поперечній площині системи, коли стріла втрачає поперечну стійкість, піддаючись поздовжньому динамічному згину [8,9].

Статтю підготовлено на матеріалах теми 2.3 «Теоретико-методологічні основи техніки у спорті» Зведеного плану науково-дослідної роботи Львівського державного університету фізичної культури імені Івана Боберського на 2021 – 2025 рр. (№ держ. реєстрації: 0121U100634).

Аналіз літератури. Питанням балістики спортивної та військової зброї приділено певну увагу у дослідженнях авторитетних науковців, результати яких опубліковано у низці наукових статей й матеріалів міжнародних науково-технічних і спортивних конференцій [10 – 12]. Спеціальну увагу приділено умовам збереження рівноваги стрільця з луком, забезпеченню стабільності системи стрілець – лук в процесі прицілювання й випуску тятиви [13, 14]. Поряд із проблемами механіко-математичного моделювання процесів, що супроводжують спортивну вправу пострілу з лука, у центрі уваги знаходяться аспекти фізіологічного й біомеханічного забезпечення дій стрільця підчас виконання пострілу. У медико-біологічних виданнях розглядаються відповідні аспекти спортивної діяльності лучника, його психологічний стан, а також вплив цих питань на змагальний результат [15 – 17].

Спеціальної уваги приділено питанням математичного моделювання механіки блочних луків. Поза тим, що конструкція блочного лука суттєво відрізняється від традиційної конструкції олімпійського лука, до головних проблем балістики цих популярних видів спортивних луків застосовують універсальний підхід розподілу рухів системи стріла – лук на дві частини, а саме, на рухи в проекції на головну площину лука й на його поперечну площину [18 – 20].

З аналізу спеціальної літератури можна зробити висновок, що важлива науково-технічна проблема механіко-математичного моделювання системи стріла – лук розглядається на сьогодні стосовно переміщень у головній площині лука. Відповідних робіт стосовно рухів лука у поперечній площині нами не виявлено, хоча розроблення відповідної механіко-математичного моделі є на часі [21 – 23].

Метою статті було створення механіко–математичної моделі системи стріла–лук з урахуванням поздовжнього динамічному згину стріли у поперечній площині.

Основні результати. ***Диференціальні рівняння руху системи стріла – лук.*** Відповідні рівняння Лагранжа другого роду було виведено із використанням принципу Гамільтона:

$$\delta\int_{t_1}^{t_2}(T-V)dt=0, \tag{1}$$

де V і T – потенціальна й кінетична енергія системи (рис. 1, 2):

$$V=\frac{1}{2}\int_0^l EJ(y'')^2dx+\frac{1}{2}c(y_2-y_0)^2-$$

$$-\frac{a}{2}\int_0^l\left[\rho A\int_0^x(y'-2u')y'd\chi+m_1(y'-2u')y'\right]dx$$

$$T=\frac{1}{2}m_0\dot{y}_0^2+\frac{1}{2}\int_0^l\rho A\dot{y}^2dx+\frac{1}{2}m_1\dot{y}_1^2+\frac{1}{2}m_2\dot{y}_2^2, \tag{2}$$

де u – початковий вигин осі стріли у проекції на поперечну площину; y – переміщення осі стріли; y_0 – переміщення гнізда тятиви; y_1 – переміщення наконечника стріли; y_2 – віртуальне переміщення лука; E – модуль Юнга; J – осьовий момент інерції поперечного перетину стріли; ρ – питома маса древка стріли; l – довжина стріли; A – площа поперечного перетину древка стріли m_0 – маса хвостовика стріли; m_1 – маса наконечника стріли; m_2 – маса лука, приведена до хвостовика стріли; (•) – похідна по часу; (′) – похідна по поздовжній координаті x; EJ – прогінна жорсткість стріли на згин. Третина маси тятиви приєднується до хвостовика стріли при її виході з лука.

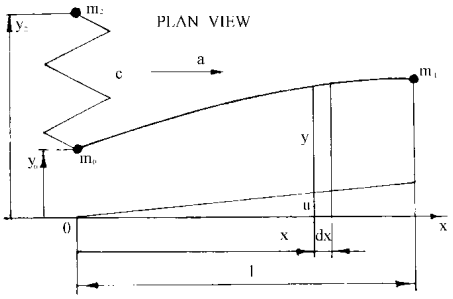


Рис.1. Схема моделі лук-стріла

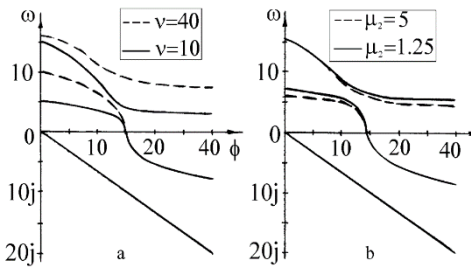


Рис. 2. Графіки власних частот

В результаті підстановки (2) в (1) отримано диференціальні рівняння

$$(EJy'')'' - (FY')' + \rho A\ddot{y} = 0, \quad m_2\ddot{y}_2 - c(y_0 - y_2) = 0,$$

граничні умови:

$$x = 0 \quad y'' = 0, \ (EJy'')' + (m + m_1)aY' + m_0\ddot{y}_0 + c(y_0 - y_2) = 0;$$

$$x = l \quad y'' = 0, \ (EJy'')' + m_1(aY' - \ddot{y}_1) = 0$$

і початкові умови:

$$t = 0 \quad y = 0, \ y_2 = 0, \ \dot{y} = 0, \ \dot{y}_2 = 0, \tag{2}$$

де $m = \int_0^l \rho A dx$ – маса древка стріли; $Y = y + u$ – загальне переміщення осі стріли в результаті згину; $F = -a(m_1 + \int_x^l \rho A d\chi)$ – сила інерції Даламбера, яка стикає древко стріли; a – прискорення поздовжнього переміщення стріли.

Розв'язання рівнянь руху. Оскільки параметри поперечного перетину древка стріли циліндричної форми й величина прискорення її поздовжнього руху практично не змінні, розв'язок рівнянь руху системи можна шукати вигляді добутку функції вигину осі стріли й функції часу (EJ=const, ρF=const):

$$y = \sum_k X_k(x)T_k(t), \qquad y_2 = \sum_k L_k T_k(t), \tag{3}$$

де $X_k(x)$ – власні форми згинних коливань; $T_k(t)$ – часові функції; L_k – амплітуди згинних переміщень руків'я лука.

В результаті підстановки цих розв'язків й безрозмірних координат в рівняння (2), було отримано таку систему:

$$X_k^{IV} + \phi[(1 + \mu_1 - \xi)X_k']' - \lambda_k X_k = 0 \tag{4}$$

й граничні умови:

$$\xi = 0: L_k = \frac{\nu X_k}{\nu - m_2\lambda_k}; \quad X_k'' = 0,$$

$$X_k''' + \phi(1 + \mu_1)X_k' + \left(\nu - \mu_0\lambda_k - \frac{\nu^2}{\nu - \mu_2\lambda_k}\right)X_k = 0;$$

$$\xi = 1 \quad X_k'' = 0, \quad X_k''' + \phi\mu_1 X_k' + \mu_1\lambda_k X_k = 0,$$

де $\xi = \frac{x}{l}, \mu_0 = \frac{m_0}{m}, \mu_1 = \frac{m_1}{m}, \mu_2 = \frac{m_2}{m}$, $\lambda_k = \frac{\omega_k^2 m l^3}{EI}$, $\nu = \frac{cl^3}{EI}$ – безрозмірні параметри системи стріла – лук; □k – власні кругові частоти, λ_k –власні форми згинів.

Розв'язки для власних форм було записано у формі поліноміального ряду:

$$X_k = \sum_{i=0}^{n} B_i \xi^i , \tag{5}$$

де i – номер форми; B_i – незалежні коефіцієнти.

Після підстановки виразів розв'язань (5) в (4) й проміжних перетворень було отримано систему рекурентних алгебричних рівнянь записаних відносно L_k і B_1:

$$\sum_{i=0}^{n} i(i-1)B_i = 0, \quad \sum_{i=0}^{n} i(i-1)(i-2)B_i + \varphi\mu_1 \sum_{i=1}^{n} iB_i + \lambda_k \mu_1 \sum_{i=0}^{n} B_i = 0, \tag{6}$$

де $B_0 = L_k\left(1 - \frac{\mu_2 \lambda_k}{\nu}\right)$, $B_3 = -\frac{1}{6}\left\{\varphi(1+\mu_1)B_1 + \left[\nu - \mu_0\lambda_k - \frac{\nu^2}{\nu - \mu_2\lambda_k}\right]B_0\right\}$,

$$B_i = \frac{\lambda_k B_{i-4} + \varphi\left[(i-3)^2 B_{i-3} - (1+\mu_1)(i-2)(i-3)B_{i-2}\right]}{i(i-1)(i-2)(i-3)}, \quad 4 \le i \le n .$$

Власні форми й частоти системи. При L_k=1 величини власних частот $\omega_k = \sqrt{\lambda_k}$ обертають детермінант на нуль. Кількісні результати для перших чотирьох власних частот було отримано з використанням двадцяти одного члена ряду (6) при зменшенні величини похибки в кінці ряду до машинного нуля. Форма 2 є кривою з одним вузлом, а форма 3 – з двома вузлами, а форма 4 – з трьома вузлами. Форми 5 … 20 представляють криві підчас прискореного руху стріли уздовж осі *Ox*. Форми 5, 6, 7 і 8 (ϕ = 10) представляють криві до і дещо над першою втратою пружної стабільності стріли при ϕ=14,79. Форма 5 являє собою криву, яка представляє монотонно зростаюче бокове відхилення стріли, як недеформівного стрижня, що є трансформацією форми 1. Форми 6, 7 і 8 можна кваліфікувати як родинні із формами 2, 3, і 4 відповідно, але м'якші з меншими величинами власних частот (рис. 3).

Форми 9, 10, 11 і 12 (ϕ = 20) представляють криві моди трохи вищі точки першої втрати пружної стабільності. Стріла втрачає динамічну стабільність зі зміною фази коливань форми 6 на протилежну з перетворенням на форму 10. Форма 5 перетворюється на форму 9 з двома

вузлами. Форма 7 перетворюється на форму 11 з одним вузлом, а форма 12 подібна на форму 8. Форми 13, 14, 15 і 16 (див. рис. 3, ϕ=50) представляють модальні криві дещо нижчі другої точки втрати пружної стійкості при осьовій силі ϕ=56.47. В якісному сенсі ці форми подібні до форм 9, 10, 11 і 12 відповідно. Форми 9 … 16 попадають у першу зону пружної нестабільності. Форми 17, 18, 19 і 20 (ϕ=60) представляють моди трохи вище другої точки втрати динамічної стабільності при зміні фази коливань на протилежну по формі 16 на форму 19. Форма 5 перетворюється на форму 9 з двома вузлами. Форми 17, 18 і 20 подібні до форм 13, 14 і 15.

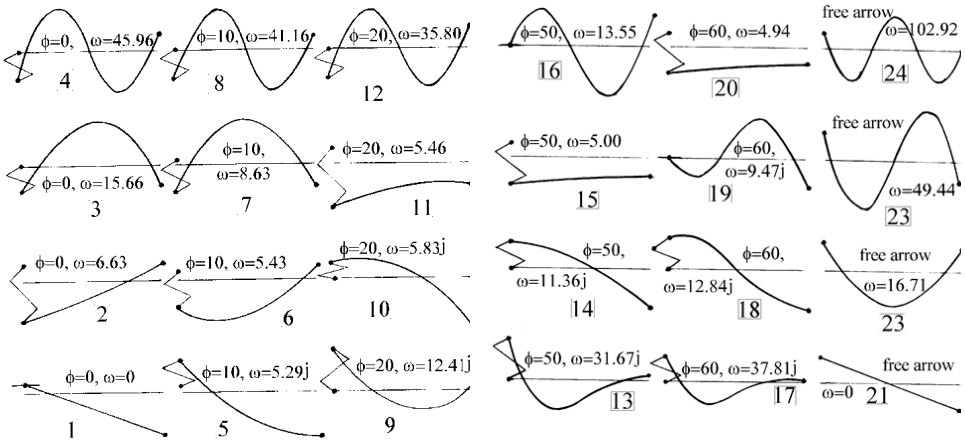


Рис. 3. Власні частоти і форми коливань системи стріла – лук

Форми 21, 22, 23 і 24 представляють моди вільних коливань стріли після її виходу з тятиви. Вони майже симетричні відносно центру мас стріли. Несиметричність пояснюється різними величинами наконечника й хвостовика стріли. Величину асиметрії можна визначити відношенням відстані між серединою стріли та її центром мас до довжини стріли. Віднесення положення центра мас вперед стріли сприяє її динамічній стійкості. Форма 21 ілюструє моду обертового руху навколо центра мас стріли як не формівного твердого тіла. Положення центра мас визначається безрозмірною відстанню:

$$\xi_{cm} = \frac{0{,}5(\mu_1 - \mu_0)}{1 + \mu_1 + \mu_0}. \tag{7}$$

Наприклад, μ_0=0,05; μ_1=0,25; $\xi_{cm} = 0{,}077$.

З використанням формули (7) перевіряють стрілу на стійкість при дії осьової поздовжньої сили. Розв’язання цієї задачі можливе з

використанням синусоподібних форм коливань, які ідеально задовольняють рівняння коливань і всі граничним умови: $X_k = \sin k\pi\xi$. Найменша величина осьової сили за якої відбувається втрата стійкості стріли $\phi_1 \cong 9.87$ (k=1) має форму напівсинусоїди. Величини критичної сили, коли стріла втрачає стійкість визначаються формулою: $\phi_k = k^2\pi^2$. Графіки перших двох власних частот показано пунктирними лініями (див. рис. 2). Наведено порівняльні результати залежності власних частот від величини осьової сили (ϕ=0÷2). Критична величина цієї сили за результатами тесту на одну третину менша відповідної сили за результатами моделювання системи стріла – лук. Величина першої власної частоти за результатами тесту знаходиться між величинами першої і другої власних частот системи стріла – лук. Величина другої власної частоти у тесті на одну восьму менша відповідної частоти для моделі системи.

Висновки. Проведено аналіз динамічного відхилення стріли по мішенях у спортивній стрільби з лука. Теоретичні дослідження базуються на механіко-математичній моделі системи стріла-лук. Розв’язання математичної задачі отримано чисельним методом послідовних наближень. Бічний прогин стріли при її спільному русі з луком було обчислено шляхом комп’ютерної симуляції математичної моделі. Номінальні параметри внутрішньої балістики лука і стріл показують хорошу кореляцію з відомими експериментальними результатами, отриманими за допомогою відеоаналізу.

В результаті проведеного дослідження отримано наступне.

(1) Теоретичне дослідження системи лука і стріл можна розділити на дві частини. Бічний прогин стріли на порядок-два менший від її поздовжнього переміщення, яке, відповідно, є незалежним від прогину. Результати аналізу даних задачі показують, що похибки, зумовлені поділом системи на дві частини, не перевищують одного відсотка в розподілі енергії системи.

(2) Збільшення сили лука викликає зменшення власних частот стріл. Коли сила досягає критичного значення, частота знижується до нуля, й стріла втрачає свою динамічну стійкість. Її періодичні рухи (коливання) трансформуються в монотонне збільшення вигину стріли, яка відхиляється від заданого напрямку.

(3) Уявні значення власних частот не залежать від параметрів лука. Параметри лука мають істотний вплив на реальні значення власних частот стріл. За решти інших однакових умов жорсткість лука й тятиви впливає на коливання вигину стріли більш істотно, ніж маса лука.

(4) Для правильного узгодження спільного руху з луком стріла повинна завершити близько одного циклу коливань до моменту її

спільного руху з гніздом тятиви. Вигин повинен бути прямо пропорційний масі стріли.

Список літератури:

1. *Маковеев, Д.В.* (2019), "Проблема реконструкции чжурчжэньского лука". *История Сибири и Дальнего Востока*, 2019 ГПНТБ СО РАН www.spsl.nsc.ru › download › onb_2 › History-1-2019, С. 209–232. – DOI: 10.24411/1026–8804–2018–10044.

2. *Oliveira, A.* (2019), "The Mechanical Sciences in Leonardo da Vinci's Work". *Advances in Historical Studies*, Vol. 8, pp. 215-38. doi: 10.4236/ahs.2019.85016.

3. *Smith, S.D.* (2018), "Interior ballistics of guns". *Engineering design handbook*. US Army, Material Command, Washington, D.C.

4. *Заневский, И.Ф.* (2012), "Компьютерная модель внутренней баллистики стрелы лука". *Вестник национального технического университета «ХПИ» Информатика и моделирование*. – № 62 (968). – С. 76-82.

5. *Zanevskyy, I. and Zanevska, L.* (2023), "Testing and Tuning of the Sport Archery Bow and Arrow System". *International Journal of Sport Culture and Science*, 2023, Vol. 11(2), pp. 132-49. DOI: 10.14486/IntJSCS.2023.682.

6. "World Archery's rulebook". (2019), *World Archery Federation*, Lausanne, Режим доступу www URL: https://worldarchery.org/ rulebook/ (дата звернення 17.12.2022).

7. *Zanevskyy, I.* (2010), "Mathematical and Computer Model of Sport Archery Bow and Arrow Interaction". *Int. J. Comput. Sci. Sport.*

8. *Callaway, A.J., Wiedlack, J. and Heller, M.* (2017), "Identification of temporal factors related to shot performance for indoor recurve archery". *Education journal of sports sciences*, Vol. 35(12), pp. 1142-7.

9. *Wang, Y., Zhu, W., Di, J. and Hu, X.* (2018), "Study on the analysis method on ballistic performance of deterred propellant with large web size in large caliber artillery". *Defence Technology*, Vol. 14(5), pp. 522-6.

10. *Dong, X., Rui, X., Li, C., Wang,Y. and Fan, L.* (2021), "A calculation method of interior ballistic two-phase flow considering the recoil of gun barrel". *Applied Thermal Engineering*. Vol. 185, 116239, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116239.

11. *Hu, C. and Zhang, X.* (2019), "Influence of multiple structural parameters on interior ballistics based on orthogonal test methods". *Defence Technology*, Vol. 15(5), pp. 690-697, https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.06.014.

12. *Dong, X., Rui, X. and Li, C.* (2023), "Interior ballistic two-phase flow model and its calculation for a mixed charge structure". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 144, 106788 https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106788.

13. *Wu, T.T, Lo, S.L., Chen, H., Yang, J.S. and Peng, H.T.* (2022), "Arch-Support Insoles Benefit the Archery Performance and Stability of Compound Archers". *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(14), pp. 8424, doi: 10.3390/ijerph19148424.

14. *Wang, D., Hu, T., Luo, R., Shen, Q., Wang, Y., Li, X., Qiao, J., Zhu, L., Cui, L. and Yin, H.* (2022), "Effect of Cognitive Reappraisal on Archery Performance of Elite Athletes: The Mediating Effects of Sport-Confidence and Attention. *Front Psychol*. 2022 Apr 21;13:860817. doi: 10.3389/fpsyg.2022.860817.

15. *Gu, F., Gong, A., Qu, Y., Bao, A., Wu, J., Jiang, C. and Fu, Y.* (2022), "From Expert to Elite? - Research on Top Archer's EEG Network Topology". *Front Hum Neurosci*. Feb 25;16:759330. doi: 10.3389/fnhum.2022.759330.

16. *Zemkova, E. and Zapletalova, L.* (2022), "The Role of Neuromuscular Control of Postural and Core Stability in Functional Movement and Athlete Performance". *Front Physiol*. Feb 24;13:796097. doi: 10.3389/fphys.2022.796097.

17. *Zemkova, E. and Kovacikova, Z.* (2023), "Sport-specific training induced adaptations in postural control and their relationship with athletic performance." *Front Hum Neurosci*. Jan 12;16:1007804. doi: 10.3389/fnhum.2022.1007804. eCollection 2022.
18. *Peters, R.D.* (2017), "Archer's compound bow – smart use of nonlinearity". *Mercer University, Department of Physics.* http://physics.mercer.edu/petepag/combow.html.
19. *Tınazcı, C.* (2011), "Shooting dynamics in archery: A multidimensional analysis from drawing to releasing in male archers". *Procedia Engineering*, Vol. 13, pp. 290-6.
20. *Sarro, K.J., Viana, T.C. and Leite De Barros, R.M.* (2020), "Relationship between bow stability and postural control in recurve archery". *Eur J Sport Science*, Vol. 21(4), pp. 515-20. doi: 10.1080/17461391.2020.1754471.
21. *Fokin, R., Abissova, M. and Atoyan, A.* (2021), "Tension devices: mathematical modeling and applications in water transport". *Journal of Physics: Conference, Series* 2131 032106, DOI 10.1088/1742-6596/2131/3/032106.
22. *Spratford, W. and Campbell, R.* (2017), "Postural stability, clicker reaction time and bow draw force predict performance in elite recurve archery". *Eur J Sport Sci*. Vol. 17(5), pp. 539-545. doi: 10.1080/17461391.2017.1285963.
23. Vendrame, E., Belluscio, V., Truppa, L., Rum, L., Lazich, A., Bergamini, E. and Mannini, A. (2022), "Performance assessment in archery: a systematic review". Sports Biomechanics, Published online, Mar 29; pp. 1-23. doi: 10.1080/14763141.2022.2049357.

Zanevskyy Ihor, Dr. Sc., Professor, Lviv State University of Physical Culture named after Ivan Boberskyj, Kostyushka str. 11, Lviv, 79007 Ukraine, Tel.: +380685034845, E- mail: izanevsky@ukr.net, https://orcid.org/0000-0002-9326-1167

Zanevska Lyudmyla, Cand. Sc., Docent Lviv State University of Physical Culture named after Ivan Boberskyj, Kostyushka str. 11, Lviv, 79007 Ukraine Tel.: +380681372243, E-mail: lzanevska@ukr.net, https://orcid.org/ 0000-0001-9279-2372

Статтю представив д.т.н., проф. Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" В.І. Носков.

Надійшла (received) 16.07.2023.

УДК 322.2:623.446.4

Внутрішня балістика системи стріла–лук у поперечній площині \ Заневський І.П., Заневська Л.Г. // Вістник НПУ "ХПІ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання – Харьків: НПУ "ХПІ". – № 1 – 2 (9 – 10). – С. 139 – 149

Розроблено механіко–математичну модель системи стріла–лук з урахуванням поздовжнього динамічному згину стріли у поперечній площині. Застосовано метод дослідження системи у формі рівнянь Лагранжа другого роду, побудованих на основі варіаційного принципу Гамільтона. Власні частоти і форми коливань визначено за допомоги модифікованого методу Ньютона із застосуванням рядів Феодосьєва. Іл.: 3. Бібліогр.: 23 назв.

Ключові слова: модель; система; стріла; лук; власні частоти; натуральні форми.

UDC 322.2:623.446.4

Internal ballistics of the arrow-bow system in the transverse plane \ Zanevskyy I.P., Zanevska L.H. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – № 1 – 2 (9 – 10). – P. 139 – 149.

A mechanical-mathematical model of the arrow-bow system has been developed, taking into account the longitudinal dynamic bending of the arrow in the transverse plane. The method of studying the system in the form of Lagrange equations of the second kind, constructed on the basis of Hamilton's variation principle, was applied. The natural frequencies and Eigen functions were determined using a modified Newtonian method with use of Feodosiev series. Il.: 3. Bibliogr.: 23 items.

Keywords: model; system; arrow; bow; natural frequencies; Eigen functions.

ЗМІСТ

Розміщення Вісника НТУ "ХПІ" серії "Інформатика та моделювання" в міжнародних наукометричних базах, репозитаріях та пошукових системах 3

Математичні методи та моделі

Дмитрієва О.А. Методи композиції різницевих апроксимацій при моделюванні динамічних процесів 5

Худаяров Б.А., Тухтабоев А.А., Кучаров О.Р., Тураев Ф.Ж., Юлдашев Н.Н. Моделирование колебаний плотины-пластинки переменной толщины 27

Прочухан Д.В. Нейромережеве моделювання в реалізації системи визначення ураження сітківки ока діабетичного походження 40

Комп'ютерна інженерія

Дмитрієнко В.Д., Леонов С.Ю., Заковоротний О.Ю., Мезенцев М.В. Нові комп‘ютерні компоненти для оцінки близькості та розпізнавання двійкових об‘єктів, що кодуються символами бінарного алфавіту 51

Савченко В.М., Мнушка О.В., Леонов С.Ю. Прикладне програмне забезпечення для моделювання параметрів сенсорів на основі кварцових п’єзоелектричних елементів 61

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Дашкевич А.О. Геометрична ідентифікація динамічних об’єктів на послідовностях зображень 73

Мірошник М.А., Шкіль О.С., Рахліс Д.Ю., Мірошник А.М., Лобойченко Д.А. Методи побудови тестів для інтерактивних комп’ютерних мереж на структурно-логічному рівні 81

Інформаційні технології

Ільїн С.В., Холод Є.Л., Мазничко А.Б., Городнича Л.О. Застосування методу аналізу ієрархій для вибору оптимальної моделі консолідації ІТ-ресурсів СФД україни 92

Павленко В.Д., Шаманіна Т.В., Чорі В.В. Використання квадратичної моделі вольтерри окуло-моторної системи в діагностичних дослідженнях психофізіологічного стану людини 106

Біологічні та медичні прилади і системи

Білобородова Т.О., Скарга-Бандурова І.С. Методологія прийняття рішень на основі сукупної достовірності та інтепретованості рекомендацій штучного інтелекту 128

Заневський І.П., Заневська Л.Г. Внутрішня балістика системи стріла–лук у поперечній площині 140

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ"

Збірник наукових праць
Серія
Інформатика та моделювання
№ 1–2 (9–10)

Науковий редактор д.т.н. Дмитрієнко В.Д.
Технічний редактор д.т.н. Леонов С.Ю.
Відповідальний за випуск к.т.н. Шайда В.П.

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Кірпічова, 2, НТУ "ХПІ".
Кафедра обчислювальної техніки та програмування,
тел. (057) 7076198, E-mail: serleomail@gmail.com

Підп. до друку 09.07.2023 р. Формат 70х100/16. Папір офсетний.
Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,8. Облік. вид. арк. 10,0.
Наклад 300 прим.
Ціна договірна

НТУ "ХПІ", 61002, Харків, вул. Кірпічова, 2,

Видавничий центр НТУ "ХПІ"
Свідоцтво ДК № 116 від 10.07.2000 р.

Виготовлено у ТОВ ВПП "Контраст".
Україна, 61166, м. Харків, пр. Науки, 40, оф. 221.
Св-во: ДК №1778 від 05.05.2004.