

Харківський національний
університет радіоелектроніки

Kharkiv National
University of Radio Electronics

Державне підприємство
"Південний державний
проектно-конструкторський
та науково-дослідний інститут
авіаційної промисловості"

State Enterprise
"Southern National Design
&
Research Institute
of Aerospace Industries"

**СУЧАСНИЙ СТАН
НАУКОВИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ
ТА ТЕХНОЛОГІЙ
В ПРОМИСЛОВОСТІ**

**INNOVATIVE
TECHNOLOGIES
AND
SCIENTIFIC SOLUTIONS
FOR INDUSTRIES**

№ 2 (16), 2021

No. 2 (16), 2021

*Щоквартальний
науковий
журнал*

*Quarterly
scientific
journal*

Харків
2021

Kharkiv
2021

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор
Бодянский Євгеній Володимирович,
д-р. техн. наук, професор

Заступник головного редактора
Айзенберг Ігор Наумович,
канд. техн. наук, професор (США);
Шекер Серхат,
д-р. техн. наук, професор (Туреччина)

Члени редколегії:

Артиух Роман Володимирович, канд. техн. наук;
Бабенко Віталіна Олексіївна, д-р. екон. наук, канд. техн. наук, професор;
Безкоровайний Володимир Валентинович, д-р. техн. наук, професор;
Гасімов Юсіф, д-р. мат. наук, професор (Азербайджан);
Гопенко Віктор, д-р. техн. наук, професор (Латвія);
Го Цян, д-р. техн. наук, професор (КНР);
Джавад Хамісабаді, канд. техн. наук, доцент (Іран);
Зайцева Єлена, д-р. техн. наук, професор (Словаччина);
Зачко Олег Богданович, д-р. техн. наук, доцент;
Коваленко Андрій Анатолійович, д-р. техн. наук, професор;
Костін Юрій Дмитрович, д-р. екон. наук, професор;
Левашенко Віталій, д-р. техн. наук, професор (Словаччина);
Лемешко Олександр Віталійович, д-р. техн. наук, професор;
Малєєва Ольга Володимирівна, д-р. техн. наук, професор;
Момот Тетяна Валеріївна, д-р. екон. наук, професор;
Музика Катерина Миколаївна, д-р. техн. наук, професор;
Назарова Галина Валентинівна, д-р. екон. наук, професор;
Невлюдов Ігор Шакирович, д-р. техн. наук, професор;
Опанасюк Анатолій Сергійович, д-р. фіз.-мат. наук, професор;
Павлов Сергій Володимирович, д-р. техн. наук, професор;
Перова Ірина Геннадіївна, д-р. техн. наук, доцент;
Петленков Едуард, канд. техн. наук (Естонія);
Петришин Любомир Богданович, д-р. техн. наук, професор (Польща);
Рубан Ігор Вікторович, д-р. техн. наук, професор;
Семенець Валерій Васильович, д-р. техн. наук, професор;
Сетлак Галина, д-р. техн. наук, професор (Польща);
Терзіян Ваган Якович, д-р. техн. наук, професор (Фінляндія);
Телетов Олександр Сергійович, д-р. екон. наук, професор;
Тимофєєв Володимир Олександрович, д-р. техн. наук, професор;
Філатов Валентин Олександрович, д-р. техн. наук, професор;
Чумаченко Ігор Володимирович, д-р. техн. наук, професор;
Чухрай Наталія Іванівна, д-р. екон. наук, професор;
Юн Джин, канд. фіз.-мат. наук, професор (КНР);
Ястремська Олена Миколаївна, д-р. екон. наук, професор.

ЗАСНОВНИКИ

Харківський національний університет радіоелектроніки,
Державне підприємство "Південний державний
проектно-конструкторський та науково-дослідний
інститут авіаційної промисловості"

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

Україна, 61166, м. Харків, проспект Науки, 14
Інформаційний сайт: <http://itssi-journal.com>
E-mail редколегії: journal.itssi@gmail.com

EDITORIAL BOARD

Editor in Chief
Bodyanskiy Yevgeniy.
Dr. Sc. (Engineering), Professor, Ukraine

Deputy Chief Editor
Igor Aizenberg.
PhD (Computer Science), Professor (United States)
Serhat Seker.
Dr. Sc. (Engineering), Professor (Turkey)

Editorial Board Members:

Artiukh Roman, PhD (Engineering Sciences) (Ukraine);
Babenko Vitalina, Dr. Sc. (Economics); PhD (Engineering Sciences), Professor (Ukraine);
Bezkorovainyi Volodymyr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Gasimov Yusif, Dr. Sc. (Mathematical), Professor (Azerbaijan);
Gopayenko Vectors, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Latvia);
Guo Qiang, Dr. Sc. (Engineering), Professor (P.R. of China);
Javad Khamisabadi, PhD (Industrial Management), Associate Professor (Iran);
Zaitseva Elena, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Slovak Republic);
Zachko Oleh, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor (Ukraine);
Kovalenko Andrey, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Kostin Yuri, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Levashenko Vitaly, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Slovakia);
Lemeshko Olexsandr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Malayeva Olga, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Momot Tetiana, Dr. Sc. (Economics), Professor, (Ukraine);
Muzyka Kateryna, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Nazarova Galina, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Nevliudov Igor, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Opanasyuk Anatoliy, Dr. Sc. (Physical and Mathematical), Professor (Ukraine);
Pavlov Sergii, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Perova Iryna, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor (Ukraine);
Petlenkov Eduard, PhD (Engineering Sciences) (Poland);
Petryshyn Lubomyr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Poland);
Ruban Igor, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Semenets Valery, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Setlak Galina, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Poland);
Terziyan Vagan, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Finland);
Telotov Aleksandr, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Timofeyev Volodymyr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Filatov Valentin, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Chumachenko Igor, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Chukhray Nataliya, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Yu Zheng, PhD (Physico-Mathematical Sciences), Professor (P.R. of China);
Iastrenska Olena, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine).

ESTABLISHERS

Kharkiv National University of Radio Electronics,
State Enterprise "National Design & Research Institute
of Aerospace Industries"

EDITORIAL OFFICE ADDRESS:

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauka Ave, 14
Information site: <http://itssi-journal.com>
E-mail of the editorial board: journal.itssi@gmail.com

Журнал включено до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук" наказом Міністерства освіти і науки України від 16.07.2018 №775 (додаток 7).

Затверджений до друку Науково-технічною Радою Харківського національного університету радіоелектроніки (Протокол № 7 від 18 червня 2021 р.).

Свідectво про державну реєстрацію журналу Серія KB № 22696-12596P від 04.05.2017 р.

ЗМІСТ

Інформаційні технології

- 5 **Бутко І. М.**
Модель тематичної інтерпретації видових зображень
- 12 **Золотарьов Д. О.**
Платформа для побудови керованих подіями додатків на базі Wolfram Mathematica та Apache Kafka (eng.)
- 19 **Мазурова О. О., Набока А. О., Широкопетієва М. С.**
Дослідження методів реалізації розподілених ACID транзакцій за технологією реплікації (eng.)
- 32 **Подорожняк А. О., Баленко О. І., Соболев В. В.**
Модель та алгоритми визначення місцезнаходження та положення сільськогосподарської техніки під час руху (eng.)
- 39 **Чалий С. Ф., Лещинський В. О.**
Розробка методу інтерактивної побудови пояснень в інтелектуальних інформаційних системах на основі ймовірнісного підходу (eng.)

Сучасні технології управління підприємством

- 46 **Воронін А. В., Гунько О. В.**
Методи порівняльної статистики і динаміки у теорії економічних циклів (eng.)
- 54 **Момот Т. В., Філонич О. М., Косяк А. П., Лобач О. В.**
Збалансована система показників забезпечення безпекоорієнтованого управління підприємств будівельної галузі (eng.)

Інженерія та промислові технології

- 63 **Аврунін О. Г., Трубіцин О. О., Клименко В. А.**
Метод прогностичної оцінки стану хворих на atopічний дерматит на різних стадіях захворювання (eng.)
- 72 **Бондаренко І. С., Аврунін О. Г.**
Про акусто-магнітний метод вимірювання акустичного опору локальних ділянок біологічного середовища
- 80 **Раскін Л. Г., Парфенюк Ю. Л., Сухомлин Л. В., Кравцов М. О., Сурков Л. Я.**
Метод вирішення канонічної задачі транспортної логістики в умовах невизначеності (eng.)

Електроніка, телекомунікаційні системи та комп'ютерні мережі

- 89 **Сєліванов К. О., Муляр Б. П., Коляденко Ю. Ю., Москалець М. В.**
Модель взаємодій і фазових станів при розподілі частотного ресурсу в угрупованні радіоелектронних засобів мережі мобільного зв'язку 5G (рус.)
- 98 **Алфавітний показник**

CONTENTS

Information Technology

- 5 **Butko I.**
Model of thematic interpretation of the view images
- 12 **Zolotariov D.**
The platform for creation of event-driven applications based on Wolfram Mathematica and Apache Kafka
- 19 **Mazurova O., Naboka A., Shirokopetleva M.**
Research of ACID transaction implementation methods for distributed databases using replication technology
- 32 **Podorozhniak A., Balenko O., Sobol V.**
Model and algorithms for determining the location and position of agricultural machinery during the movement
- 39 **Chalyi S., Leshchynskiy V.**
Development of a method for the interactive construction of explanations in intelligent information systems based on the probabilistic approach

Modern Enterprise Management Technologies

- 46 **Voronin A., Gunko O.**
Methods of comparative statics and dynamics in the theory of economic cycles
- 54 **Momot T., Filonych O., Kosiak A., Lobach O.**
Balanced scorecard of safety-oriented management for the construction industry enterprises

Engineering & Industrial Technology

- 63 **Avrunin O., Trubitsin A., Klymenko V.**
The method for predictive assessment of the condition of patients with atopic dermatitis at different stages of the disease
- 72 **Bondarenko I., Avrunin O.**
On the acousto-magnetic method of measuring the acoustic resistance of local areas of the biological tissue
- 80 **Raskin L., Parfeniuk Yu., Sukhomlyn L., Kravtsov M., Surkov L.**
A method for solving the canonical problem of transport logistics in conditions of uncertainty

Electronics, Telecommunication Systems & Computer Network

- 89 **Sielivanov K., Muliar B., Kolyadenko Yu., Moskalets M.**
Model of interactions and phase states in the distribution of the frequency resource in the grouping of radio electronic means of a 5G mobile communication network
- 98 **Alphabetical index**

УДК 004.89

DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.005>

І. М. БУТКО

МОДЕЛЬ ТЕМАТИЧНОЇ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ВИДОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Предметом дослідження в статті є тематична інтерпретація видових зображень. **Мета** роботи – розробка моделі тематичної інтерпретації видових зображень, яка базується на моделі формування видових зображень та додатково враховує географічне зонування. В статті вирішується наступне **завдання**: розробка моделі тематичної інтерпретації видових зображень, яка враховує недоліки існуючих моделей та базується на моделі формування видових зображень, проводить обернену трансформацію координат зображення у геопросторові координати і кластеризацію зображення на окремі класи по їх кольору та текстурі, додатково враховуючи географічне зонування, що забезпечує можливість розширеного аналізу і прогнозування часової динаміки даних у системах обробки геопросторової інформації. Використовуються такі **методи**: математичний апарат теорії матриць, методи математичного моделювання, методи кластеризації даних, методи диференційного обчислення, методи цифрової обробки зображень. Отримано наступні **результати**: проаналізовано групи існуючих моделей інтерпретації результатів дистанційного зондування Землі, їх переваги та недоліки; сформована у загальній формі математична модель формування видового зображення для ділянки земної поверхні; сформована у загальній формі математична модель тематичної інтерпретації видових зображень; розглянуто оператор перетворення координат, оператори кластеризації, оператори зонування та їх явний вигляд; отримано модель тематичної інтерпретації видових зображень в операторній формі. **Висновки**: вперше розроблено модель тематичної інтерпретації видових зображень, яка, базуючись на моделі формування видових зображень, проводить обернену трансформацію координат у геопросторові координати і кластеризацію по їх кольору та текстурі, додатково враховуючи географічне зонування, що забезпечує можливість розширеного аналізу і прогнозування часової динаміки даних у системах обробки геопросторової інформації.

Ключові слова: видове зображення; тематична інтерпретація; дешифрування; модель; геопросторова інформація; геопросторові координати; сегментація.

Вступ

На сьогоднішній день данні дистанційного зондування Землі – видові зображення, які представлені в цифровій формі у вигляді растрових зображень [1]. Тому проблема обробки та інтерпретації даних дистанційного зондування Землі напряму пов'язана з цифровою обробкою зображень. Данні дистанційного зондування Землі сьогодні у вільному доступі доступні великій кількості користувачів та застосовуються не тільки в наукових дослідженнях, а й в інших сферах людської діяльності [2-3]. Такі данні є також основним джерелом актуальних та оперативних даних для геоінформаційних систем. Географічна інформаційна система містить дані про просторові об'єкти у формі їх цифрових представлень та є великим класом інформаційних систем, що дозволяє працювати з просторовими даними. В сучасних геоінформаційних системах виконується комплексна обробка такої інформації – від збору до зберігання, представлення та оновлення [1].

Вирішення задачі тематичної обробки видових зображень є етапом аналізу, тобто інтерпретації, зображення після попередньої цифрової обробки. Кінцевим результатом вирішення такого завдання є реалізація процесу виявлення та розпізнавання об'єктів. На практиці такий процес називається дешифруванням зображення [4].

Результатом дешифрування є тематична карта території, що була представлена на видовому зображенні, з нанесеними інтерпретованими розпізнаними об'єктами. Інтерпретація може проводитися за допомогою візуальних та автоматизованих моделей тематичної інтерпретації видових зображень.

Аналіз проблеми та існуючих методів

На сьогоднішній день тематична інтерпретація видових зображень земної поверхні проводиться за допомогою великої кількості моделей. Усі їх умовно можна поділити на три окремі групи моделей інтерпретації або дешифрування результатів дистанційного зондування Землі [4-7].

1. Візуальні моделі. Коли оператор-дешифрувальник за допомогою спеціальної апаратури виконує візуальну інтерпретацію видових зображень та на основі попередніх результатів інтерпретації та знань, що отримані за допомогою власного досвіду, робить деякі висновки. Дана модель є дуже поширеною незважаючи на низьку точність з боку математичного опису. Група таких моделей є неприйнятною у випадку тематичної інтерпретації великої кількості видових зображень або необхідності прийняття оперативного рішення за результатами даних дистанційного зондування Землі. Також група даних моделей має й ряд інших суттєвих недоліків, а саме: візуальна інтерпретація має суб'єктивний характер, вимагає звірки отриманих результатів інтерпретації з реальними результатами та є занадто тривалим процесом у часі [4].

2. Математичні моделі. Коли при обробці видового зображення обчислюються різні параметри, на основі аналізу яких оператор-дешифрувальник приймає рішення про віднесення об'єкту на зображенні до того чи іншого класу. З точки зору математичної реалізації, дана група моделей є значно точнішою, однак при цьому вони потребують достатньо високого рівня знань оператора-дешифрувальника в галузі теорії імовірності та математичної статистики [5]. Також дана група моделей інтерпретації видових зображень має

недоліки й групи візуальних моделей.

3. Аналітичні моделі. Коли до видового зображення застосовуються алгоритми контрольованої або неконтрольованої класифікації. Перша група алгоритмів класифікації потребує задання еталонних областей, що є важковирішуваною задачею в умовах нечіткого розділення поверхні на видовому зображенні [6]. Основними недоліками алгоритмів неконтрольованої класифікації є ймовірна поява класів, з якими оператор-дешифрувальник може не погодитися або обмеженість контролю класів та їх властивостей з боку оператора.

Метою даної статті є розробка моделі тематичної інтерпретації видових зображень, яка буде базуватися на моделі формування видових зображень та додатково враховувати географічне зонування.

Вирішення завдання

Математична модель формування видового зображення I для ділянки земної поверхні g (**TGeoSurface** → **TImage**) у загальній формі може бути представлена, як результат дії двох операторів:

1) оператора $\hat{T}$, що здійснює перетворення координат:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \hat{T} \begin{pmatrix} \varphi \\ \theta \\ h \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де $\begin{pmatrix} \varphi \\ \theta \\ h \end{pmatrix}$ – вектор географічних координат (довгота, широта, висота над рівнем моря); $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ – вектор координат на зображенні.

2) операторів $\hat{\Phi}$, що визначають яскравість відповідного елемента зображення для заданого елемента земної поверхні g у спектральному каналі c :

$$I_c = \Phi_c(g). \quad (2)$$

Математична модель тематичної інтерпретації видових зображень (побудови набору бінарних масок M для геознак по видовому зображенню I) у загальній формі може бути представлена, як результат дії таких операторів:

1) оператора $\hat{T}^{-1}$ (оберненого до оператора $\hat{T}$), який здійснює перетворення координат:

$$\hat{T}^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi \\ \theta \\ h \end{pmatrix}, \quad (3)$$

2) операторів $\hat{C}_k$, які проводять кластеризацію зображення (**TImage** → **TMap**) за деякою ознакою k :

$$M_k = \hat{C}_k(I), \quad (4)$$

3) операторів $\hat{Z}_l$, які проводять зонування (**TDecision** → **TMap**) за деякою ознакою l (наприклад, виділення адміністративних районів):

$$M_l = \hat{Z}_k. \quad (5)$$

Розглянемо докладніше введені оператори та їх явний вигляд.

Оператор перетворення координат. Даний оператор $\hat{T}^{-1}$ є оберненим до оператора $\hat{T}$, явний вигляд якого задається виразом (6):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f/p_x & \tan \chi & c_x \\ 0 & f/p_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R^T & -R^T t \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \times \\ \times \left[R_{Earth} \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \right], \quad (6)$$

де p_x, p_y – розміри пікселя матриці сканера; χ – кут нахилу пікселя; (c_x, c_y) – координати головної точки; f – фокусна відстань сканера, R_{Earth} – радіус Землі.

В (6) R^T – транспонована 3x3-матриця повороту площини сканера відносно земної поверхні (кут між відповідними нормальними), t – 3-вектор зміщення центру сканера відносно його проекції на поверхню Землі, 0^T – транспонований нульовий 3-вектор-стовбець (іншими словами, нульовий 3-вектор-рядок).

Щоб відобразити той факт, що матрицю $\begin{pmatrix} R^T & -R^T t \\ 0^T & 1 \end{pmatrix}$ формують складні об'єкти – виділили їх жирним шрифтом (на відміну від звичайного числа 1 у правому нижньому кутку матриці).

Зауважимо, що знаходження оберненої функції за виразом (6) неможливе для 1 окремої точки (у зв'язку із втратою інформації), отже, вимагає набору точок. Розв'язок при цьому знаходиться як розв'язок оптимізаційної задачі. Знаходження оператора $\hat{T}^{-1}$, який дозволяє ототожнити точки зображення з відповідними точками земної поверхні, носить назву задачі геоприв'язки [7]–[9].

Задача геоприв'язки певною мірою є оберненою до задачі калібрування: маючи набори відповідних точок (7):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_i = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_i, \quad (7)$$

оскільки земна поверхня не є пласкою, то проводимо компенсацію нелінійних спотворень (8)–(11) [10]:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}_i = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}_i, \quad (8)$$

Перейдемо від координат $\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$ до координат

$$X'_i = (X_i - \bar{X}_i)(1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4) + \bar{X}_i, \quad (9) \quad \begin{pmatrix} \varphi \\ \theta \\ h \end{pmatrix} :$$

$$Y'_i = (X_i - \bar{Y}_i)(1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4) + \bar{Y}_i, \quad (10)$$

$$r_i^2 = (X_i - \bar{X}_i)^2 + (X_i - \bar{Y}_i)^2, \quad (11)$$

де X'_i , Y'_i – координати із скомпенсованими нелінійностями; $\bar{X}_i$, $\bar{Y}_i$ – середні значення для X_i , Y_i відповідно; k_1 , k_2 – параметри радіальних спотворень.

І знаходимо матрицю P^{-1} (зауважимо, що ми не обертаємо матрицю, дане позначення просто підкреслює зв'язок із раніше введеною матрицею P), таку, що мінімізує квадрат норми:

$$\min_P \sum_i \left\| P^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}_i - \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}_i \right\|^2. \quad (12)$$

Отже

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = P^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

і оскільки параметри радіальних спотворень k_1 , k_2 відомі, то

$$X = \frac{X' - \bar{X}}{1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4} + \bar{X}, \quad (14)$$

$$Y = \frac{Y' - \bar{Y}}{1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4} + \bar{Y}, \quad (15)$$

де r_i^2 знаходиться за формулою (11).

$$\begin{aligned} \varphi &= a \tan \frac{Y}{X}, \\ \theta &= a \sin \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{R_{Earth}}, \\ h &= Z - R_{Earth} \cos a \sin \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{R_{Earth}}. \end{aligned} \quad (16)$$

Таким чином, враховуючи все вищесказане, явний деталізований вигляд оператора перетворення координат $\hat{T}^{-1}$ пропонується задавати у вигляді (17):

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = P^{-1} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix},$$

$$X = \frac{X' - \bar{X}}{1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4} + \bar{X},$$

$$Y = \frac{Y' - \bar{Y}}{1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4} + \bar{Y}, \quad (17)$$

$$\begin{pmatrix} \varphi \\ \theta \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \tan \frac{Y}{X} \\ a \sin \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{R_{Earth}} \\ h = Z - R_{Earth} \cos a \sin \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{R_{Earth}} \end{pmatrix},$$

де матриця P^{-1} знаходиться як розв'язок задачі геоприв'язки.

Оператори кластеризації. Розглянемо, введений вище, явний деталізований вигляд оператора $\hat{\Phi}$, що визначає яскравість відповідного елемента зображення для заданого елемента земної поверхні (18):

$$I(X, Y, c) = S \left[\alpha_c + \beta_c \sum_{k'} \rho_{k,c} \delta_{k,k'} \cdot \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} \frac{1 + \Omega_x \frac{\partial h}{\partial X} + \Omega_y \frac{\partial h}{\partial X}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial h}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial Y} \right)^2}} d\Omega \right], \quad (18)$$

де c – спектральний канал; $S(i)$ – функцію чутливості сканера; ρ – коефіцієнт відбивання світла від поверхні, який залежить від того, до якого класу k належить об'єкт, і від спектрального каналу c , тобто $\rho = \rho(k, c)$.

Розглянемо спочатку множник

$$w = \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} \left(\frac{1 + \Omega_x \frac{\partial h}{\partial X} + \Omega_y \frac{\partial h}{\partial Y}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial h}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial Y}\right)^2}} \right) d\Omega. \quad (18)$$

Цей множник очевидно залежить тільки від геометрії поверхні і не залежить від коефіцієнта відбивання, в такому випадку в моделі формування зображення він буде відповідати за *текстуру* зображення. Якщо кожен об'єкт поверхні має свою геометрію, то w буде залежати від класу об'єкта k , тобто $w = w_k$, і в такому випадку (18) можна переписати у вигляді:

$$I(X, Y, c) = S \left(\alpha_c + \beta_c \sum_{k'} \rho_{k,c} w_k \delta_{k,k'} \right). \quad (19)$$

Отже оператори $\hat{C}_k$, які проводять кластеризацію зображення, повинні повертати бінарні маски належності об'єкту до класу k в залежності від кольору зображення та його текстури для всіх спектральних каналів і реалізуються за допомогою методів сегментації мультиспектральних зображень. Слід зауважити, що для даних методів є необхідним попередній етап навчання, для того щоб ототожнити кожен клас сегментації зображення (відповідну бінарну маску) з конкретною геоознакою.

Найчастіше з цією метою використовується метод сегментації алгоритмом k -середніх (англ. k -means), суть якого – поділ n спостережень на k кластерів таким чином, щоб кожне спостереження належало до кластера з найближчим до нього середнім значенням [11]–[14].

Розглянемо даний метод докладніше. Нехай в нас є набір спостережень $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, де кожне спостереження є d -мірним дійсним вектором, мета кластеризації – розділити n спостережень на k множин (при чому $k \leq n$) $S = (S_1, S_2, \dots, S_n)$, так, щоб мінімізувати внутрішньокластерну суму квадратів відстаней (тобто дисперсію). Формально, метою є знайти таке розбиття на множини S :

$$S = \arg \min_S \sum_{i=1}^k \sum_{x \in S_i} \|x - \mu_i\|^2 = \arg \min_S \sum_{i=1}^k |S_i| \text{var } S_i, \quad (20)$$

де μ_i – середнє по множині S_i , через $|S_i|$ позначено кількість елементів у S_i .

Це еквівалентно мінімізації попарних середньоквадратичних відхилень по кожному кластеру:

$$S = \arg \min_S \sum_{i=1}^k \frac{1}{2|S_i|} \sum_{x, y \in S_i} \|x - y\|^2. \quad (21)$$

Дана рівність випливає з того, що

$$\sum_{x \in S_i} \|x - \mu_i\|^2 = \sum_{x, y \in S_i} (x - \mu_i)^T (\mu_i - y). \quad (22)$$

Оскільки загальна дисперсія є константою, яка не залежить від порядку сумування, то вираз (21) еквівалентно максимізації суми квадратних відхилень між точками в різних кластерах (міжкластерною сумою квадратів, BCSS [15]).

Найпростіша версія алгоритму (т. зв. наївний k -means) використовує ітераційний метод уточнення [11]–[13]. В початковий момент роботи алгоритму довільним чином обираються центри кластерів, далі для кожного елемента множини ітеративно обраховується відстань від центрів з приєднанням кожного елемента до кластера з найближчим центром, виконуючи на кожній ітерації t по чергово два кроки:

1) крок зіставлення – зіставлення кожної точки з кластером, відстань до центру якого є мінімальна:

$$S_i^{(t)} = \left\{ x_p : \|x_p - \mu_i^{(t)}\|^2 \leq \|x_p - \mu_j^{(t)}\|^2 \forall j, 1 \leq j \leq k \right\}. \quad (23)$$

де кожен x_p зіставляється рівно з одним кластером $S_i^{(t)}$, навіть якщо він міг бути віднесений до двох або більше;

2) крок оновлення – перерахунок середніх значень для спостережень, що зіставлені з кожним кластером:

$$\mu_i^{(t+1)} = \frac{1}{|S_i|} \sum_{x_j \in S_i} x_j. \quad (24)$$

Незважаючи на очевидні переваги методу (простота та швидкість виконання), він має суттєві недоліки:

- результат класифікації сильно залежить від випадкових початкових позицій кластерних центрів;
- алгоритм чутливий до викидів, які можуть викривлювати середнє;
- кількість кластерів повинна бути заздалегідь визначена дослідником.

Додатковим недоліком простого методу є порушення умови зв'язності елементів одного кластера, тому розвиваються різні модифікації методу, а також його нечіткі аналоги (англ. fuzzy k -means methods), у яких на першій стадії алгоритму допускається приналежність одного елемента множини до декількох кластерів (із різним ступенем приналежності) [16].

Оператори зонування. Ці оператори $\hat{Z}_i$ просто задають відповідні набори бінарних масок у

географічних координатах $\begin{pmatrix} \varphi \\ \theta \\ h \end{pmatrix}$ і використовуються

для задання області інтересів, виділення адміністративних районів тощо.

Враховуючи все вищесказане, модель тематичної інтерпретації зображення в операторній формі задається як

$$M(\varphi, \theta, h) = \left\{ \bigcup_k \bar{C}_k \{I(\hat{T}^{-1}\{x, y\})\} \right\} \bigcup_i \bar{Z}_i \{\varphi, \theta, h\}, \quad (25)$$

де оператор $\hat{T}^{-1}$ задається виразами (25), оператори $\bar{C}_k$ пропонується реалізувати у вигляді метода семантичної сегментації, а оператори $\bar{Z}_i$ задають географічне зонування.

Приклад тематичної інтерпретації вихідного мультиспектрального зображення з використанням удосконаленої моделі наведений на рис. 1.

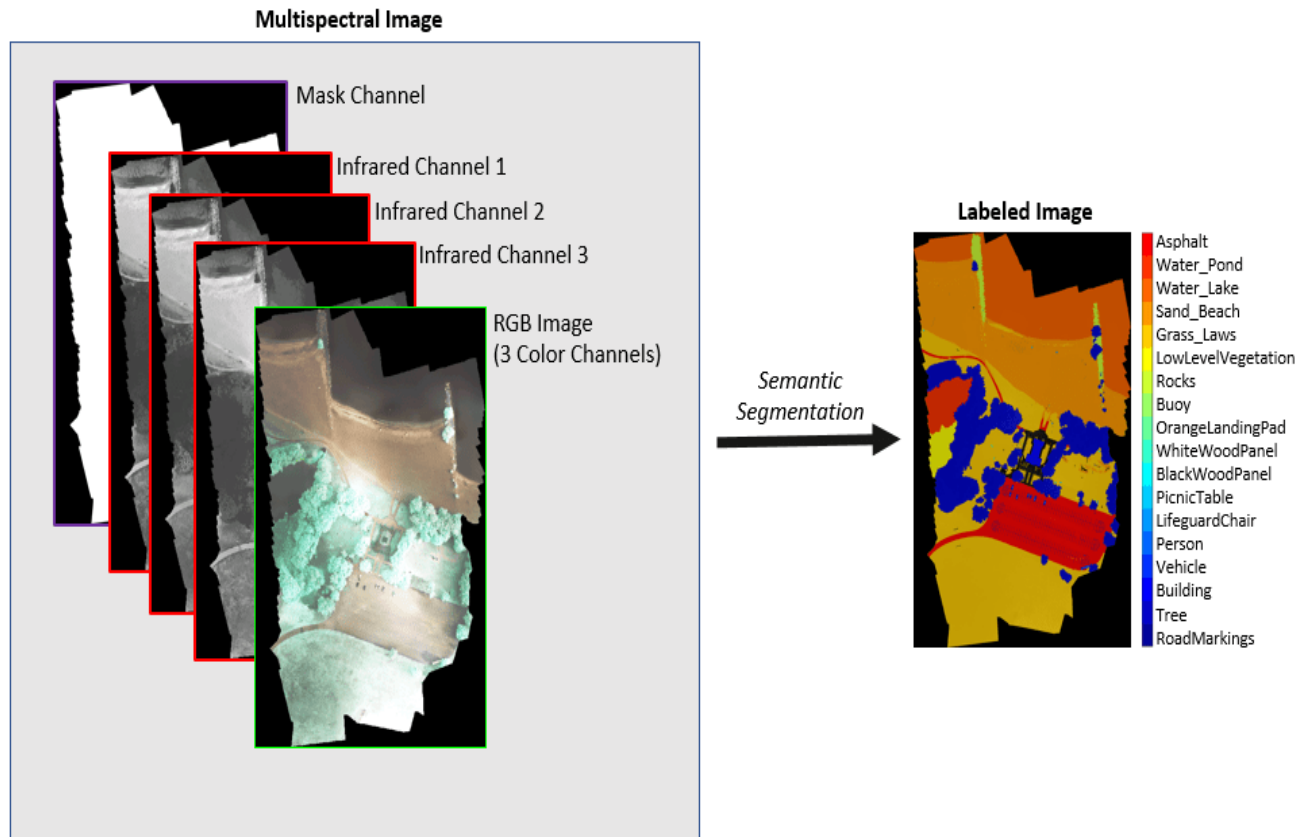


Рис. 1. Приклад тематичної інтерпретації вихідного мультиспектрального зображення з використанням удосконаленої моделі

За результатами інтерпретації вихідного мультиспектрального зображення обчислено відсоток рослинного покриття в регіоні (рис. 1).

Висновки

Таким чином, в статті проаналізовано групи існуючих моделей інтерпретації видових зображень, їх переваги та недоліки. Сформульована у загальній формі математична модель формування видового зображення для ділянки земної поверхні, як результат оператору, що здійснює перетворення координат та операторів, що визначають яскравість відповідного елемента зображення для заданого елемента земної поверхні у спектральному каналі. Сформульована у загальній формі математична модель тематичної інтерпретації видових зображень, яка може бути представлена, як результат дії оператору, який здійснює перетворення координат, операторів, які проводять кластеризацію зображення та операторів, які проводять зонування за деякою ознакою. Розглянуто оператор перетворення координат,

оператори кластеризації, оператори зонування та їх явний вигляд. Отримано модель тематичної інтерпретації видових зображення в операторній формі.

В результаті вперше розроблено модель тематичної інтерпретації видових зображень, яка, базуючись на моделі формування видових зображень, проводить обернену трансформацію координат зображення у геопросторіві координати і кластеризацію зображення на окремі класи по їх кольору та текстурі, додатково враховуючи географічне зонування, що забезпечує можливість розширеного аналізу і прогнозування часової динаміки даних у системах обробки геопросторової інформації.

Враховуючи складність проведення верифікації якості тематичної інтерпретації видових зображень, напрямком подальших досліджень є розробка методів вимірювання і оцінки ефективності класифікації, що мінімізують суб'єктивність оцінки та візуальну інтерпретацію видових зображень.

Список літератури

1. A-Xing Z., Fang-He Z., Peng L., Cheng-Zhi Q. Next generation of GIS: must be easy. *Annals of GIS*. 2021. Vol. 27. P. 71–86. DOI: <https://doi.org/10.1080/19475683.2020.1766563>
2. Fu W., Ma J., Chen P., Chen F. Remote Sensing Satellites for Digital Earth. In: Guo H., Goodchild M.F., Annoni A. (eds) *Manual of Digital Earth*. Springer, Singapore. 2020. P. 55–123. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-32-9915-3_3
3. Кавац Ю.В. Інформаційна технологія дешифрування антропогенних змін на супутникових зображеннях. *Регіональний міжвузівський збірник наукових праць "Системні технології"*. 2019. № 5 (124). С.77–83.
4. Пеньков В. О. Фотограмметрія : конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 100 с.
5. Довбиш А. С., Шелехов І. В. Основи теорії розпізнавання образів : навч. посіб. : у 2 ч. Суми, 2015. 109 с.
6. Вершовский Е. А. Интерпретация данных дистанционного зондирования Земли. *Системный анализ, управление и обработка информации*. 2010. С. 43–45.
7. Burrough P. A., McDonnell R. A. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford, Oxford University Press, 1998. 333 p.
8. Schott J. *Remote Sensing: The Image Chain Approach / 2nd ed.* Oxford, Oxford University Press, 2007. 668 p.
9. Худов Г. В., Бутко И. М., Маковейчук А. Н. Теоретическое обоснование методики выбора реперных объектов на видовых изображениях. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2005. № 2. С. 92–94.
10. Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration. MSR-TR-98-71. Microsoft Research. 1998. [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/3193178_A_Flexible_New_Technique_for_Camera_Calibration. (дата звернення: 19.01.2020).
11. Потапов А. А., Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Пахомов А. А., Герман В. А. Новейшие методы обработки изображений / под ред. А.А. Потапова. Москва: Физматлит, 2008. 456 с.
12. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2006. 752 с.
13. Дэвид Форсайт, Жан Понс. Компьютерное зрение. Современный подход. Москва: Вильямс, 2004. 928 с.
14. Желтов С.Ю. и др. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. Москва: Физматкнига, 2010. 672 с.
15. Yong Y. Image segmentation based on fuzzy clustering with neighborhood information. *Optica Applicata*, 2009. XXXIX.
16. Shumway R., Stoffer D. *Time series analysis and its applications : with R examples (3rd ed.)*. Springer, 2010. ISBN 144197864X.

References

1. A-Xing, Z., Fang-He, Z., Peng, L., Cheng-Zhi, Q. (2021), "Next generation of GIS: must be easy", *Annals of GIS*, Vol. 27. P. 71–86. DOI: <https://doi.org/10.1080/19475683.2020.1766563>
2. Fu, W., Ma, J., Chen, P., Chen, F. (2020), "Remote Sensing Satellites for Digital Earth", In: *Guo, H., Goodchild, M. F., Annoni, A. (eds) Manual of Digital Earth*, Springer, Singapore, P. 55–123. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-32-9915-3_3
3. Kavats, Yu. V. (2019), "Information technology for decoding anthropogenic changes in satellite images" ["Informatsiina tekhnolohiia deshyfruvannia antropohennykh zmin na suputnykovykh zobrazhenniakh"], *Regional interuniversity collection of scientific works "System technologies"*, Vol. 5, No. 124, P. 77–83.
4. Penkov, V. O. (2019), *Photogrammetry: lecture notes [Fotohrammetriia : konspekt lektsii]*, Kharkiv : KhNUMG them O. M. Beketova, 100 p.
5. Dovbysh, A. S., Shelekhov, I. V. (2015), *Fundamentals of pattern recognition theory [Osnovy teorii rozpoznavannia obraziv] : textbook in 2 parts*, Sumy, 109 p.
6. Vershovskiy, E. A. (2010), "Interpretation of Earth Remote Sensing Data" ["Ynterpretatsiya dannikh dystantsyonnoho zondirovaniya Zemli"], *System analysis, management and information processing*, P. 43–45.
7. Burrough, P. A., McDonnell, R. A. (1998), *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford, Oxford University Press, 333 p.
8. Schott, J. (2007), *Remote Sensing: The Image Chain Approach / 2nd ed*, Oxford, Oxford University Press, 668 p.
9. Khudov, H. V., Butko, Y.M., Makoveichuk, A.N. (2005), "Theoretical substantiation of the method for selecting reference objects in view images" ["Teorytycheskoe obosnovanye metodyky vibora repnykh ob'ektov na vydovikh yzobrazheniyakh"], *Aerospace engineering and technology*, No. 2, P. 92–94.
10. Zhang, Z. (1998), "A Flexible New Technique for Camera Calibration. MSR-TR-98-71. Microsoft Research", available at : https://www.researchgate.net/publication/3193178_A_Flexible_New_Technique_for_Camera_Calibration (last accessed: 19.01.2020).
11. Potapov, A. A., Huliev, Yu. V., Nykytov, S. A., Pakhomov, A. A., Herman, V. A. (2008), *The latest methods of image processing [Noveishye metody obrabotky yzobrazheniy]* / ed. A. A. Potapova, Moscow : Fizmatlit, 456 p.
12. Shapuro, L., Stokman, Dzh. (2006), *Computer vision [Kompiuternoe zrenye]*, Moscow : Bynom, Knowledge laboratory, 752 p.
13. Forsait, D., Pons, Z. (2004), *Computer vision. Modern hike [Kompiuternoe zrenye. Sovremenniy pokhod]*, Moscow : Vyliams, 928 p.
14. Zheltov, S.Iu. et al. (2010), *Image processing and analysis in machine vision tasks [Obrabotka y analiz yzobrazheniy v zadachakh mashynnoho zreniya]*, Moscow : Fizmatbook, 67 p.
15. Yong, Y. (2009), "Image segmentation based on fuzzy clustering with neighborhood information", *Optica Applicata*, XXXIX.
16. Shumway, R., Stoffer, D. (2010), *Time series analysis and its applications : with R examples (3rd ed.)*, Springer. ISBN 144197864X.

Надійшла (Received) 25.05.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бутко Ігор Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, Державне підприємство "Центр державного земельного кадастру", заступник генерального директора, Київ, Україна; email: butko_igor@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2859-0351>.

Бутко Игорь Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Государственное предприятие "Центр государственного земельного кадастру", заместитель генерального директора, Киев, Украина.

Butko Ihor – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, SE "State Land Cadaster", Deputy general director, Kyiv, Ukraine.

МОДЕЛЬ ТЕМАТИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ВИДОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Предметом исследования в статье является тематическая интерпретация видовых изображений. **Цель** работы – разработка модели тематической интерпретации видовых изображений, которая будет базироваться на модели формирования видовых изображений и дополнительно учитывать географическое зонирование. В статье решается следующая **задача**: разработка модели тематической интерпретации видовых изображений, которая учитывает недостатки существующих моделей и базируется на модели формирования видовых изображений, проводит обратную трансформацию координат изображения в геопространственные координаты и кластеризацию изображения на отдельные классы по их цвету и текстуре, дополнительно учитывая географическое зонирование, что обеспечивает возможность расширенного анализа и прогнозирования временной динамики данных в системах обработки геопространственной информации. Используются следующие **методы**: математический аппарат теории матриц, методы математического моделирования, методы кластеризации данных, методы дифференциального исчисления, методы цифровой обработки изображений. Получены следующие **результаты**: проанализированы группы существующих моделей интерпретации результатов дистанционного зондирования Земли, их преимущества и недостатки; сформулирована в общей форме математическая модель формирования видового изображения для участка земной поверхности; сформулирована в общей форме математическая модель тематической интерпретации видовых изображений; рассмотрен оператор преобразования координат, операторы кластеризации, операторы зонирования и их явный вид; получена модель тематической интерпретации видовых изображений в операторной форме. **Выводы**: впервые разработана модель тематической интерпретации видовых изображений, которая, основываясь на модели формирования видовых изображений, проводит обратную трансформацию координат в геопространственные координаты и кластеризацию по их цвету и текстуре, дополнительно учитывая географическое зонирование, что обеспечивает возможность расширенного анализа и прогнозирования временной динамики данных в системах обработки геопространственной информации.

Ключевые слова: видовое изображение; тематическая интерпретация; дешифрирование; модель; геопространственная информация; геопространственные координаты; сегментация.

MODEL OF THEMATIC INTERPRETATION OF THE VIEW IMAGES

The **subject** matter of the article is thematic interpretation of species images. The **goal** of the work is to develop a model for thematic interpretation of species images, which will be based on the model for the formation of species images and additionally take into account geographic zoning. The following **task** was solved in the article: development of a model of thematic interpretation of view images, which takes into account the shortcomings of existing models and is based on the model of formation of view images, carries out the reverse transformation of the image coordinates into geospatial coordinates and clustering the image into separate classes according to their color and texture, additionally taking into account geographic zoning, which provides the possibility of advanced analysis and forecasting the temporal dynamics of data in geospatial information processing systems. The following **methods** used are – mathematical apparatus of the theory of matrices, methods of mathematical modelling, methods of data clustering, methods of differential calculus, methods of digital image processing. The following **results** were obtained – groups of existing models for interpreting the results of remote sensing of the Earth, their advantages and disadvantages have been analyzed; a mathematical model of the formation of a species image for a section of the earth's surface has been formulated in general form; a mathematical model of thematic interpretation of species images was formulated in general form; the operator of transformation of coordinates, operators of clustering, operators of zoning and their explicit form are considered; a model of thematic interpretation of species images in operator form is obtained. **Conclusions**: for the first time, a model of thematic interpretation of view images was developed, which, based on the model of formation of view images, carries out the inverse transformation of coordinates into geospatial coordinates and clustering by their color and texture, additionally taking into account geographical zoning, which provides the possibility of advanced analysis and forecasting of the temporal dynamics of data in processing systems geospatial information.

Keywords: species image; thematic interpretation; decryption; model; geospatial information; geospatial coordinates; segmentation.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Бутко І. М. Модель тематичної інтерпретації видових зображень. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 2 (16). С. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.005>

Butko, I. (2021), "Model of thematic interpretation of the view images", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (16), P. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.005>

D. ZOLOTARIOV

THE PLATFORM FOR CREATION OF EVENT-DRIVEN APPLICATIONS BASED ON WOLFRAM MATHEMATICA AND APACHE KAFKA

The article is devoted to the study and development of the mechanism of interaction between Wolfram Mathematica programs and Apache Kafka queue to provide the ability to build event-driven applications based on it. The **subject** of the research is the practical principles of building a mechanism for interaction between Wolfram Mathematica and Apache Kafka through a proxy-server. The **purpose** of the article is to develop and substantiate practical recommendations regarding the formation of proxy-server and a mechanism for its work to publishing messages to the Apache Kafka queue and reading messages from it for programs of the mathematical processor Wolfram Mathematica, which will make it possible to build event-driven applications. The **tasks** are: to determine the mechanism of such interaction, prove the choice of tools for its implementation, create and test the obtained results. The research used the following **tools**: Apache Kafka, Kafkacat, servers Ubuntu 20 LTS, the method of developing the Wolfram Mathematica package. The **results** of the research: the mechanism of interaction between Wolfram Mathematica and Apache Kafka through a proxy-server was determined and the corresponding toolkit was created on its basis in the form of two Mathematica packages, which are built on using bash-scripts, Apache Kafka and third-party Kafkacat software. The first - for use on the end user's computer, the second - on a compute server with a remote Mathematica kernel. It is confirmed that the Mathematica processor is currently not suitable in its pure form for real-time data analysis. **Conclusions.** Practical recommendations have been developed and substantiated regarding the formation of the mechanism of interaction between the Wolfram Mathematica mathematical processor and the Apache Kafka queue manager through a proxy-server for the possibility of working in two directions with the queue: publishing messages and reading them. A toolkit for such interaction in the form of Mathematica packages has been created, their capabilities have been demonstrated. The economic benefit of using the described tools is shown. Future ways of its improvement are given.

Keywords: event-driven applications; queue manager; mathematical processor; saving resources and funds; cloud technologies; Kafka; Mathematica.

Introduction

The rapid development of distributed data processing and the transition in the construction of applications from monolithic architecture to service-oriented [1], and later micro service [2-4], which focuses on event processing (or messages), in recent years has led to improvement of real-time or near-real-time data transmission facilities, including such as queue managers or message brokers. One of the most common, refractory and powerful of them is Apache Kafka, which is demonstrated, for example, in [5-6]. It is able not only to dynamically adapt to the load from the queue customers, but also to scale vertically and horizontally.

Event-oriented software architecture is increasingly being implemented outside of commercial products. One such promising area is the processing of message flow by mathematical processors, which allows you to use their wide range of tools for data analysis: for example, developed and intensively developing interface for the interaction of MathWorks MATLAB with Kafka [7].

For the Wolfram Mathematica processor, which is also one of the world leaders in the field of intelligent data processing, this urgent task was solved in [8] - developed a mechanism for publishing messages and reading them from the Kafka queue. But the approaches outlined there are based on the local launch of applications that have the following shortcomings. Each of these approaches requires the installation and configuration of several complex components on the Kafka queue client computer. In addition, a direct connection to the Kafka cluster is associated with the following complications: each client needs to know the IP addresses of bootstrap servers, have authorization data on all servers in the cluster, and know all the necessary settings to work with them. This leads to

such operational problems. First, when you change the IP addresses, ports, or other network settings of any of the Kafka cluster servers, and especially the bootstrap servers, you must make these changes on all clients. Second, when changing authentication settings, these changes must also be made on all clients. And, thirdly, when updating the version of Kafka, it may also be necessary to update it on all clients if it changes the data transfer protocol or other critical properties of the interface, because this may cause problems with interconnection, such as those described in [9 -10].

These shortcomings in the complex lead to the conclusion that such a system is unreliable and can be operated for a long time only when there is no need to make any changes to the Kafka cluster, and if necessary - can be used only with a small number of Kafka customers due to the large amount of work that needs to be performed synchronously in the event of changes in cluster settings.

This indicates that the task of building a reliable mechanism for the interaction of Wolfram Mathematica with Kafka remains unsolved. The most versatile way to increase this reliability is to use the approach of building a proxy server to centralize and hide all interaction settings and provide the client with a simple interface.

Therefore, the **aim** of this article is to develop and substantiate practical recommendations for the formation of the mechanism of bidirectional interaction of Wolfram Mathematica processor and queue manager Apache Kafka, which should be as simple as possible for queue clients, require a minimum of third-party applications, have a maximum deployment speed. cost of service. The task of the article is to identify the necessary elements of such a mechanism, to provide an analysis of the functional load for each of them, to justify the choice of tools for

their construction, to create and test the obtained result.

Building an intermediary server

All of the above issues and disadvantages of using Apache Kafka or Kafkacat locally as a queue client can be solved with a single approach - using a proxy server that hides all settings and gives clients a simple interface to interact with the Kafka queue.

The purpose of transferring the complexity of the client's interaction with the Kafka queue manager from the user's computer to the Linux-based proxy server is to solve the following tasks. First, centralizing the entire Kafka queue connection mechanism in one place and hiding all the details and settings. Second, guaranteeing the security of the network connection by using a network tunnel through the SSH channel from the end client to the proxy server. This minimizes the applications that need to be installed on the user's computer, reducing them to a single SSH client. The proxy server also solves another problem - incompatibility of the client and any of the Kafka cluster servers due to protocol versions or other differences - all settings are available at any time for change by the administrator, and the server can be updated and restarted at one time, thereby making changes for all customers to queue together.

Important non-technical advantages of this approach include cost savings - only one DevOps specialist is

required to monitor such a server, whose function can also be performed by a Kafka cluster administrator.

The disadvantages of this approach include the lack of support for modern data compression algorithms (zStd, Snappy, and others) in the SSH tunnel. This can be partially corrected by the LZ77's built-in SSH compression algorithm. Tunnel security is achieved by using crypto-strong passwords (less recommended) or authorization keys. In contrast to the approach previously discussed in [8], such a server has access to all Kafka cluster servers, and therefore these servers can be easily protected from unauthorized network connections via a firewall.

In [8] it was proved that the use of third-party software Kafkacat [11] to interact with the queue gives at least an order of magnitude faster communication channel of the queue client with the cluster than the standard queue client Apache Kafka, and an order of magnitude less computer resources for work. Therefore, it is worth using it on the server, because each client launches a new copy of the application for publishing or consuming messages, and saving resources in this case is already very significant. But this application at the time of writing does not have the functionality to delete and create queues, so these rare operations use standard Apache Kafka scripts.

The diagram of the system built on this approach is shown below in fig. 1.

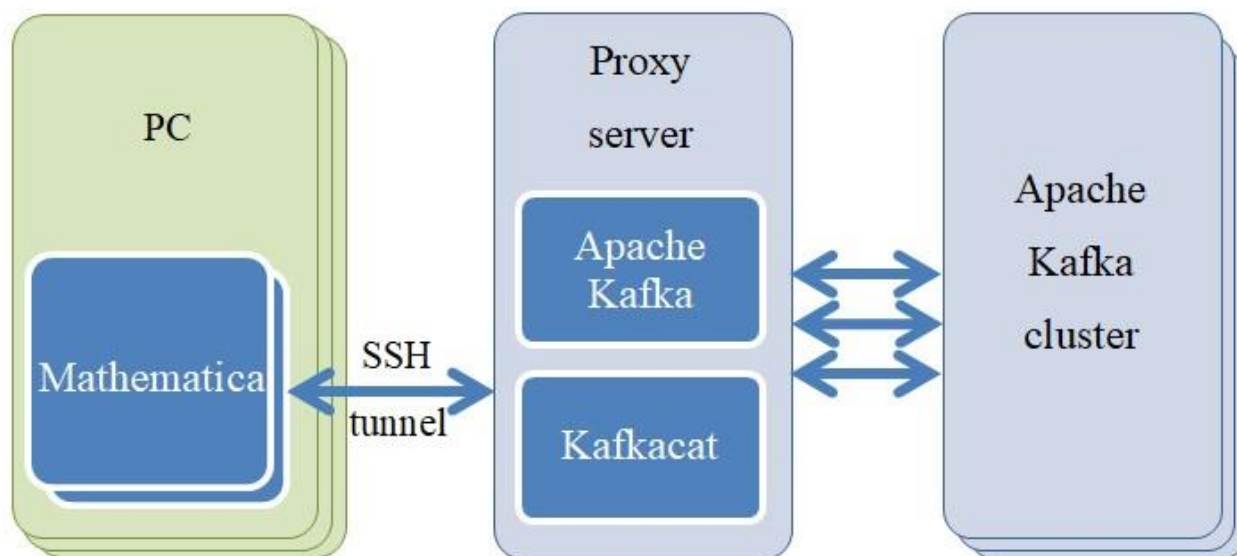


Fig. 1. Connecting Mathematica to the Kafka queue cluster through a proxy server

The well-known SSH package PuTTY is used to create an SSH tunnel [12]. Its significant features include cross-platform and portable distribution with a pre-configured connection profile, which hides from the end user the need to know the network settings of the SSH connection to the proxy server and greatly simplifies the use.

The basic idea of how Mathematica interacts with a proxy server is to open an SSH connection as a write channel and use it to execute remote commands on the proxy server. Such commands will be specially designed bash scripts that will be responsible for: reading and writing to the message queue - `kafkaConsume.sh` and

`kafkaPublish.sh`, getting a list of existing queues - `kafkaList.sh`, deleting and creating queues - `kafkaDelete.sh` and `kafkaCreate.sh`.

Each script, except `kafkaList.sh` for obvious reasons, receives a queue name (variable "`$ __ TOPIC`" below the text), and `kafkaPublish.sh` also the key and text of the message published to the queue.

To simplify the configuration and ease of use of the developed bash-scripts on the server, environment variables `$ KAFKA` and `$ BOOTSTRAP_SERVERS` have been added, which describe the path to the `"/bin/"` subdirectory of the Kafka installation directory and the list of Kafka bootstrap servers, respectively.

The kafkaConsume.sh, kafkaPublish.sh, and kafkaList.sh scripts use the Kafkacat plugin. An important feature of this application is the default buffered output to the standard stream (stdout). This prevents reading from third-party applications like Mathematica. To disable this, use the "-u" argument.

The central design of the script for reading messages from the kafkaConsume.sh queue is:

```
kafkacat -C -J -u -q \
  -b "$BOOTSTRAP_SERVERS" \
  -t "${__TOPIC}"
```

The argument "-C" includes read mode, "-J" - receive a message in full JSON-format, "-u" - switches to unbuffered output mode, "-q" - disables the output of service information, the latter - understandable in content.

Posting in a queue differs only in the first line, which has the form:

```
echo "${__KEY}:${__VALUE}" | kafkacat -P -K: \
```

The argument "-P" includes the publishing mode, "-K:" - includes the division of the key and the value of the message by a colon.

The essence of the script kafkaList.sh, which is responsible for obtaining a list of queues, is reflected by the following construction:

```
kafkacat -L \
  -b $BOOTSTRAP_SERVERS \
  | egrep "^s+topic" \
  | sed -r 's/^[""]+(.+)[""]+$\n/'
```

This complexity is due to the fact that "kafkacat -L" displays detailed information in queues, to get only the names you need to separate them.

The kafkaDelete.sh and kafkaCreate.sh scripts use the same ideas and constructions as set out in [8] and are based on the standard Apache Kafka scripts due to the fact that the Kafkacat application does not have such functionality at the time of writing.

```
SSHStream = OpenWrite["!"<> SSHPuttyCommand, FormatType->OutputForm, PageWidth->Infinity];
```

Opening a write stream via OpenWrite is important because Mathematica can only have a thread for one operation: read or write - a combination of them is not possible. You should pay attention to the values of the For-matType and PageWidth options when opening the stream: the first sets the output of the string without shielding and other modifications, the second - disables automatic string transfers. The SSHPuttyCommand variable stores the command to run the plink component from the PuTTY program set with the parameters "-batch

```
KafkaGetBashScript[name_, args__ : Null] := Module[{path},
  path = FileNameJoin[{SSHKafkaBashPath, name<>".sh"},
  Return[ StringJoin[Riffle[{ "bash", path, args}, " " ] ]];
];
```

To increase the security of the described scripts, you need to create and configure a separate Linux user for Mathematica SSH clients on the proxy server.

Development of the Mathematica package

To build the described system, you also need to develop a Wolfram Mathematica package for the client side, which will use the developed bash-scripts on the side of the proxy server for operations with messages and queues.

By analogy with the Mathematica package [8], the KafkaProxyServerLink package was developed. Its structure of files and directories, shown in fig.2, is completely repeated except for the added directory "bash", which contains the above-developed bash-scripts that implement interaction with the queue manager Kafka.

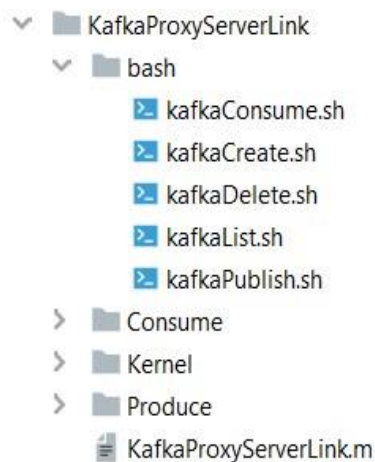


Fig. 2. Mathematica directory structure for SSH connection to proxy server

The "bash" subfolder must be uploaded to the proxy server and the files in it can be executed by a user connecting via SSH.

The interaction of the package with the queue differs from [8] only by using the Write function instead of Run to write to the stream (publish to the queue), which must be opened using the OpenWrite function as follows:

```
-v -ssh -t -C -x -l <username> -i <path / to / id_rsa.ppk>
<ip: port>".
```

The open stream ID is stored in the global SSHStream variable for use, and is closed by the exit command from the SSH session:

```
Write[SSHStream, "exit"];
```

The function which has the following look is responsible for construction of correct term of a call of bash-scripts with parameters.:

Which takes the name of the script and optionally its arguments through a comma, creates a full path to the bash script on the proxy server in Unix notation (the global variable SSHKaf-kaBashPath stores the path to the directory of bash scripts on the server) and combines it with arguments, separating them with spaces.

The use of the package in the Mathematica document is completely similar to the option with local start [8]. The JSON string returned by Kafkacat is processed in a similar way.

Using the remote Mathematica kernel

Mathematica processor is built on a client-server architecture with a platform-independent core [13]. Therefore, it is necessary to stop separately in case of use of a remote kernel [14] on the computing server built on

the basis of Linux operating system which example can serve [15].

If you combine two servers into one: the Mathematica computing server and the proxy server for Kafka, then the connection to the queue core processor connection to the queue manager client will be local.

This allows you to combine the simplicity of the local connection package [8] to the Kafka queue manager client with the call from inside the bash scripts used in the package for the proxy server. This will provide the advantages of both packages without their disadvantages: no need to install additional software on the client other than PuTTY, the use of a fast application Kafkacat, direct execution of the core of bash-scripts instead of SSH. Also, obviously, you do not need a separate proxy server.

The system diagram for the computing server is shown in fig. 3 below.

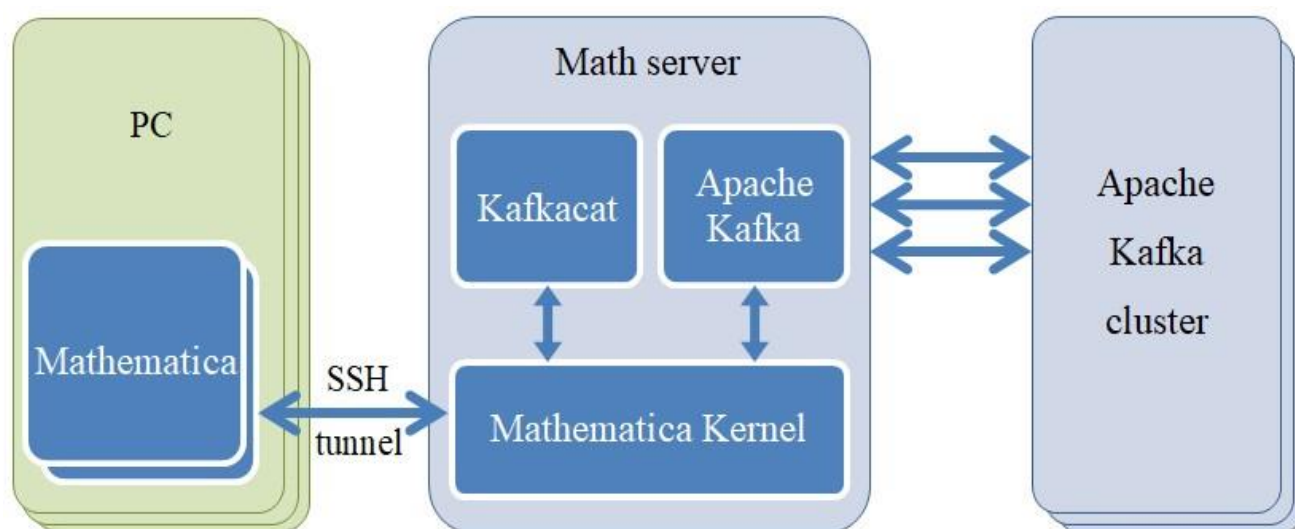


Fig. 3. Connecting the Mathematica client to the Kafka cluster via a computing server

The differences are, first, the description of all paths in the document using the FileNameJoin function, which uses a directory delimiter based on kernel settings, rather than Mathematica FrontEnd. Second, to use the Linux sh shell instead of calling PuTTY for local bash scripts to run on the server.

The package "KafkaRemoteKernelLocalLink" for Mathematica created for this case is a wrapper for the one developed above and has the following directory structure, which is shown in fig. 4.



Fig. 4. The structure of the directories of the Mathematica package with the computing server as an intermediary server

It automatically downloads the above package as a dependency:

```
BeginPackage["KafkaRemoteKernelLocalLink`",
{"KafkaProxyServerLink`"}]
```

And replaces its function of opening a stream for reading or writing with one that uses the Linux application sh, as mentioned above.

Thus, it is achieved that from the Mathematica document both packages are identical in use.

Demonstration of work

To demonstrate the work of the developed tools for building event-driven programs in Mathematica using an intermediary server, we will conduct an identical [8] experiment - generating an arbitrary number in the range [-50.50], repeated 100 times with a delay of one second.

To implement the experiment on a local computer, two Mathematica documents were created: a generator and a reader. The reader has a local core processor, which is allocated its own processor core for independent operation, and uses the developed package "KafkaProxyServerLink" to connect to the proxy server. The generator is connected to a computing server, which is built similarly to [15] and configured as an intermediary server in accordance with the requirements set out in the

article, and uses the developed package "KafkaRemoteKernelLocalLink". DigitalOcean cloud technologies were chosen as the platform, where servers based on Ubuntu 20.04 LTS x64 OS were located. Choosing a cloud service as a basis allowed you to quickly deploy servers and change their configurations to meet the needs of the task.

The content of the experiment is as follows: an arbitrary number is generated on the publication side and added to the end of the points array, which has a dynamic update in the document, and is sent to the queue. At the same time, the client-reader receives a message with this number, adds it to its array, which automatically leads to

the restructuring of the graph based on it, which also has a dynamic output. The graph is constructed by the ListPlot function for the whole definition area, with the option "InterpolationOrder -> 2", which makes the graph smoother, but at the boundary points leads to values out of the original range [-50.50], and serves as an additional load on message processing.

Since the client can only connect to a queue that already exists, the document with the publication of messages that creates the queue was launched first, followed by the reader's document. The result obtained at the same time for both documents is shown in fig. 5.

```

NN = 100;
Dynamic[Text[points]]

{-34, 9, -42, 15, 25, -14, -41, -2, 28, 49, 39, -28, 43, 26, 4, 42, 32, -20, 4,
 9, -11, -8, 48, -41, 23, 2, 12, -38, -11, 39, 12, 30, 23, 49, -17, 24, 28, 37,
 -25, -11, 49, 36, 35, 24, -11, -12, 12, 33, -50, 47, 50, -1, 18, -11, 26, 32,
 -38, 12, 8, -9, -8, 20, 29, 28, 35, 18, -6, -5, -49, -20, 4, -30, 16, 31}

KafkaClearTopic[kafkaTopic];
Do[
  int = ToString[RandomInteger[{-50, 50}]];
  AppendTo[points, int];
  KafkaPublish[kafkaTopic, ToString[i], int];

  Pause[1];
  , {i, NN}];
KafkaPublishFinish[];

```

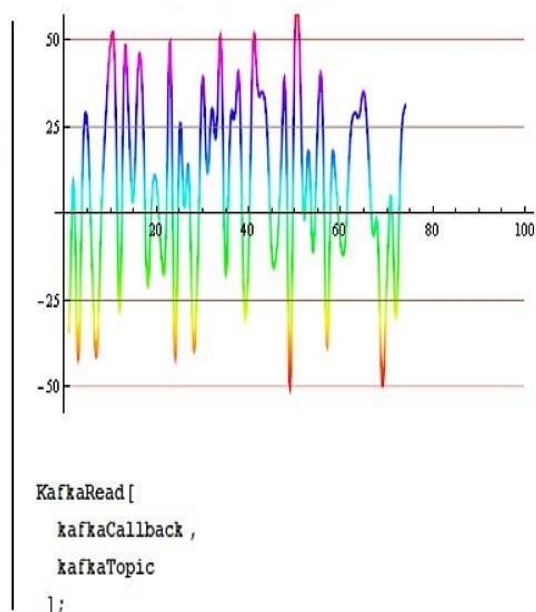


Fig. 5. Simultaneous publication (right) and reading (left) from the same queue

The figure above shows that the client-reader does not lag behind the client-publisher. The main delay, as in [8], is the updating of dynamic objects in the document.

The experiment was repeated 15 times to exclude measurement error, with one result – a delay on the side of Mathematica Frontend, i.e. compilation [16] is unlikely to solve this problem. This in turn confirms the conclusions made in [8] that the Mathematica matpack is not yet designed for real-time data analysis.

Prospects for further development of the system

Prospects for further development of the developed tools are the following improvements.

To completely eliminate the need for third-party client-side applications, it makes sense to consider using Mathematica's built-in features for SSH connections, starting with version 11.3: RemoteConnect and RemoteRunProcess [17], which could eventually replace the use of PuTTY software.

On the side of the intermediary server – it seems relevant to develop a Docker-container with built-in

ready-made tools, which is described in the article, for the fastest deployment.

Conclusions

The paper develops and substantiates practical recommendations for the formation of the mechanism of interaction between the mathematical processor Wolfram Mathematica and the queue manager Apache Kafka using an intermediary server to work in two directions: publishing messages in the queue and consuming messages from it. Appropriate tools have been created.

The mechanism is developed in two variants: use of the intermediary server and combination of the last with the calculation server for a remote kernel. The second option allows you to have only one server for both tasks.

It is shown that the toolkit developed in the article allows you to easily build event-driven programs in Mathematica that require client-only PuTTY applications and data to connect to a single proxy server – that is, in the most simplified way, with maximum deployment speed on a new client and without maintenance needs by centralizing all interaction with the Kafka cluster on the proxy server. In addition, using a proxy server resolves the incompatibility issue between the client and any of the

Kafka cluster servers due to protocol versions or other differences due to its availability to change settings at any time.

The economic benefit of using the described tools is achieved by saving money on the maintenance of the described system: to monitor the proxy server requires only one DevOps specialist, whose function can be performed by the administrator of the Kafka cluster, on

the client side such a specialist is not needed. Also, significant economic benefits are achieved by deploying an intermediary server in the cloud infrastructure, where the cost of ownership is much lower compared to real equipment and reduced to the time of its actual use, and the time and cost of its modification are the lowest.

References

1. Villamizar, M., Garcés, O., Ochoa, L. et al. (2017), "Cost comparison of running web applications in the cloud using monolithic, microservice, and AWS Lambda architectures", *SOCA*, Vol. 11, P. 233–247. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11761-017-0208-y>
2. Gutiérrez-Fernández, A. M., Resinas, M., Ruiz-Cortés, A. (2017), "Redefining a Process Engine as a Microservice Platform", In: *Dumas M., Fantinato M. (eds) Business Process Management Workshops. BPM 2016. Lecture Notes in Business Information Processing*, Vol. 281, Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-58457-7_19
3. Brogi, A., Canciani, A., Neri D., Rinaldi, L., Soldani, J. (2018), "Towards a Reference Dataset of Microservice-Based Applications", In: *Cerone A., Roveri M. (eds) Software Engineering and Formal Methods. SEFM 2017. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 10729, Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-74781-1_16
4. Monteiro, D., Gadelha, R., Maia, P. H. M., Rocha, L. S., Mendonça, N. C. (2018), "Beethoven: An Event-Driven Lightweight Platform for Microservice Orchestration", In: *Cuesta C., Garlan D., Pérez J. (eds) Software Architecture. ECSA 2018. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 11048, Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-00761-4_13
5. GitHub (2020), "Ultimate Message Broker Comparison", available at: <https://ultimate-comparisons.github.io/ultimate-message-broker-comparison/> (last accessed 10 December 2020).
6. G2 (2020), "Best Message Queue (MQ) Software in 2021: Compare Reviews on 40+ MQs", available at: <https://www.g2.com/categories/message-queue-mq> (last accessed 10 December 2020).
7. GitHub (2020), "Mathworks-ref-arch/matlab-apache-kafka: MATLAB Interface for Apache Kafka", available at: <https://github.com/mathworks-ref-arch/matlab-apache-kafka> (last accessed 10 December 2020).
8. Zolotariov, D. (2021), "The mechanism for creation of event-driven applications based on Wolfram Mathematica and Apache Kafka", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 53–58. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.053>
9. Stack Overflow (2020), "Kafka bootstrap-servers vs zookeeper in kafka-console-consumer", available at: <https://stackoverflow.com/questions/41774446/kafka-bootstrap-servers-vs-zookeeper-in-kafka-console-consumer> (last accessed 10 December 2020).
10. Stack Overflow (2020), "Apache Kafka - bootstrap-server vs zookeeper params in consumer console", available at: <https://stackoverflow.com/questions/53954877/bootstrap-server-vs-zookeeper-params-in-consumer-console> (last accessed 10 December 2020).
11. GitHub (2020), "Edenhill/kafkacat: Generic command line non-JVM Apache Kafka producer and consumer", available at: <https://github.com/edenhill/kafkacat> (last accessed 10 December 2020).
12. PuTTY (2020), "Download PuTTY - a free SSH and telnet client for Windows", available at: <https://www.putty.org/> (last accessed 10 December 2020).
13. Wolfram (2020), "Wolfram Mathematica: Modern technical calculations", available at: <https://www.wolfram.com/mathematica/> (last accessed 12 November 2020).
14. Wolfram Library Archive (2020), "Remote Kernel Strategies", available at: <https://library.wolfram.com/infocenter/Conferences/7250/> (last accessed 10 December 2020).
15. Zolotariov, D. (2020), "The distributed system of automated computing based on cloud infrastructure", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (14), P. 47–55. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.047>
16. Zolotariov, D. A. (2020), *Automation and optimization of scientific and engineering calculations in Wolfram Mathematica*, Kharkiv : FOP Panov A.M., ISBN: 978-617-7859-36-8 [In Ukrainian]
17. Wolfram Language Documentation (2020), "RemoteConnect", available at: <https://reference.wolfram.com/language/ref/RemoteConnect.html> (last accessed 10 December 2020).

Received 13.04.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Золотарьов Денис Олексійович – кандидат фізико-математичних наук, Харків, Україна; email: denis@zolotariov.org.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4907-7810>.

Золотарёв Денис Алексеевич – кандидат физико-математических наук, Харьков, Украина.

Zolotariov Denis – PhD (Physics and Mathematics Sciences), Kharkiv, Ukraine.

ПЛАТФОРМА ДЛЯ ПОБУДОВИ КЕРОВАНИХ ПОДІЯМИ ДОДАТКІВ НА БАЗІ WOLFRAM MATHEMATICA ТА APACHE KAFKA

Стаття присвячена дослідженню та розробці механізму взаємодії програм Wolfram Mathematica із менеджером черги Apache Kafka для надання можливості побудови на його основі керованих подіями додатків. **Предметом** дослідження є практичні засади побудови механізму взаємодії Wolfram Mathematica із Apache Kafka через сервер-посередник. **Метою** статті є розробка та обґрунтування практичних рекомендацій щодо формування сервера-посередника та механізму його роботи для публікації повідомлень у чергу Apache Kafka та споживання повідомлень із неї програмами математичного процесору Wolfram Mathematica, що дасть можливість побудови керованих подіями додатків на його основі. **Завдання** роботи: визначити механізм такої взаємодії, обґрунтувати вибір інструментів для його реалізації, створити та протестувати отриманий результат. У ході дослідження використано **засоби**: інформаційні технології Apache Kafka, Kafkacat, сервера на базі Ubuntu 20 LTS, спосіб побудови пакету Wolfram Mathematica. **Результати** дослідження: визначений механізм взаємодії Wolfram Mathematica із Apache Kafka через сервер-посередник та створений відповідний інструментарій на його основі у вигляді двох пакетів Mathematica, що побудовані на використанні bash-скриптів, Apache Kafka та стороннього програмного забезпечення Kafkacat. Перший – для використання на комп'ютері кінцевого клієнта, другий – на сервері обчислень із віддаленим ядром Mathematica. Протестована їх робота. Підтверджено, що на даний момент математичний процесор Mathematica не підходить у чистому вигляді для аналізу даних у реальному часі. **Висновки**. Розроблені та обґрунтовані практичні рекомендації щодо формування механізму взаємодії математичного процесору Wolfram Mathematica та менеджера черги Apache Kafka через сервер-посередник для можливості роботи у двох напрямках із чергою: публікації повідомлень та їх читання. Створений інструментарій для такої взаємодії у вигляді двох пакетів Mathematica, продемонстровані їх можливості. Показана економічна вигода від використання описаного інструментарію. Наведені майбутні шляхи його вдосконалення.

Ключові слова: керовані подіями додатки; менеджери черги; математичний процесор; хмарні технології; економія ресурсів та коштів; Kafka; Mathematica.

ПЛАТФОРМА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ СОБЫТИЯМИ ПРИЛОЖЕНИЙ НА БАЗЕ WOLFRAM MATHEMATICA И APACHE KAFKA

Статья посвящена исследованию и разработке механизма взаимодействия программ Wolfram Mathematica с менеджером очереди Apache Kafka для предоставления возможности построения на его основе управляемых событиями приложений. **Предметом** исследования являются практические принципы построения механизма взаимодействия Wolfram Mathematica с Apache Kafka через сервер-посредник. **Целью** статьи является разработка и обоснования практических рекомендаций относительно формирования сервера-посредника и механизма его работы для публикации сообщений в очередь Apache Kafka и чтения сообщений из нее для программ математического процессора Wolfram Mathematica, что даст возможность построения управляемых событиями приложений на его основе. **Задача** работы: определить механизм такого взаимодействия, обосновать выбор инструментов для его реализации, создать и протестировать полученный результат. В ходе исследования использованы **средства**: информационные технологии Apache Kafka, Kafkacat, сервера на базе Ubuntu 20 LTS, способ разработки пакета Wolfram Mathematica. **Результат** исследования: определен механизм взаимодействия Wolfram Mathematica с Apache Kafka через сервер-посредник и создан соответствующий инструментарий на его основе в виде двух пакетов Mathematica, которые построены на использовании bash-скриптов, Apache Kafka и стороннего программного обеспечения Kafkacat. Первый – для использования на компьютере конечного пользователя, второй – на сервере вычислений с удаленным ядром Mathematica. Подтверждено, что на данный момент математический процессор Mathematica не подходит в чистом виде для анализа данных в реальном времени. **Выводы**. Разработаны и обоснованы практические рекомендации относительно формирования механизма взаимодействия математического процессора Wolfram Mathematica и менеджера очереди Apache Kafka через сервер-посредник для возможности работы в двух направлениях с очередью: публикации сообщений и их чтения. Создан инструментарий для такого взаимодействия в виде пакетов Mathematica, продемонстрированы их возможности. Показана экономическая выгода от использования описанного инструментария. Приведены будущие пути его усовершенствования.

Ключевые слова: управляемые событиями приложения; менеджеры очереди; математический процессор; облачные технологии; экономия ресурсов и средств; Kafka; Mathematica.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Золотарьов Д. О. Платформа для побудови керованих подіями додатків на базі Wolfram Mathematica та Apache Kafka. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 2 (16). С. 12–18. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.012>

Zolotariov, D. (2021), "The platform for creation of event-driven applications based on Wolfram Mathematica and Apache Kafka", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (16), P. 12–18. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.012>

O. MAZUROVA, A. NABOKA, M. SHIROKOPETLEVA

RESEARCH OF ACID TRANSACTION IMPLEMENTATION METHODS FOR DISTRIBUTED DATABASES USING REPLICATION TECHNOLOGY

Today, databases are an integral part of most modern applications designed to store large amounts of data and to request from many users. To solve business problems in such conditions, databases are scaled, often horizontally on several physical servers using replication technology. At the same time, many business operations require the implementation of transactional compliance with ACID properties. For relational databases that traditionally support ACID transactions, horizontal scaling is not always effective due to the limitations of the relational model itself. Therefore, there is an applied problem of efficient implementation of ACID transactions for horizontally distributed databases. The **subject** matter of the study is the methods of implementing ACID transactions in distributed databases, created by replication technology. The **goal** of the work is to increase the efficiency of ACID transaction implementation for horizontally distributed databases. The work is devoted to solving the following **tasks**: analysis and selection of the most relevant methods of implementation of distributed ACID transactions; planning and experimental research of methods for implementing ACID transactions by using of NoSQL DBMS MongoDB and NewSQL DBMS VoltDB as an example; measurements of metrics of productivity of use of these methods and formation of the recommendation concerning their effective use. The following **methods** are used: system analysis; relational databases design; methods for evaluating database performance. The following **results** were obtained: experimental measurements of the execution time of typical distributed transactions for the subject area of e-commerce, as well as measurements of the number of resources required for their execution; revealed trends in the performance of such transactions, formed recommendations for the methods studied. The obtained results allowed to make functions of dependence of the considered metrics on loading parameters. **Conclusions**: the strengths and weaknesses of the implementation of distributed ACID transactions using MongoDB and VoltDB were identified. Practical recommendations for the effective use of these systems for different types of applications, taking into account the resources consumed and the types of requests.

Keywords: distributed database; transaction; performance; ACID; NOSQL; NewSQL; MongoDB; VoltDB.

Introduction

Databases (DB) are the basis of the vast majority of modern software applications in various spheres of human life. These are medical solutions, financial and banking systems, social networks, etc. Today, databases and their shells, DBMSs, store and process data, the number of which is significantly increasing every year.

Because the resources of any server on which the DBMS is deployed are limited, to store new amounts of data requires its scaling, vertical or horizontal [1]. Vertical scaling, which consists in increasing the hardware resources (increase in RAM, permanent media) on the database server machine, obviously has limitations and does not provide the necessary result for the implementation of large systems. For this reason, horizontal scaling has become more popular, the essence of which is the introduction of additional node machines, which are combined into a single cluster. Thus, the database is stored on several physical machines, and there are no restrictions on this type of scaling.

Thus, a horizontally distributed database consists of several physical nodes that are hosted on different physical servers and store certain data throughout the database [2]. For this type of scaling, there are two distribution technologies: sharding and replication. The essence of sharding is to place part of the data of the entire database on a particular server, while in the case of replication; copies of all database data are stored on all nodes of the cluster simultaneously.

On the other hand, it is critical for modern databases to execute ACID transactions [3], which have become an integral part of business operations (money transfer, ticket booking) for most areas. But for horizontally scalable databases, there is a problem with performing such ACID

transactions, which is that different nodes of the database cluster can interact with each other using a network TCP protocol, which in itself does not support transactionality. This problem applies to both horizontal scaling technologies, but is especially relevant for replicated databases, where the same data is on different physical servers, which must always be in a consistent state [4].

Thus, the developers of distributed systems are faced with the problem of choosing and implementing methods to support distributed transactions when creating applications based on replicated databases.

Analysis of recent research and publications

Classic relational DBMSs were the first to face the problems of horizontal scaling and implementation of distributed transactions: PostgreSQL, MySQL, SQL Server, Oracle and others. Due to the features of the relational data model, such as reference integrity and unique constraints, the corresponding DBMS cannot be easily distributed to several physical machines. In addition, relational ACID principles have been developed to operate within a single address space, and have some difficulty in implementing in a distributed environment. Therefore, most relational databases do not provide out-of-the-box capabilities to support distributed ACID transactions.

Later, to solve the problems of horizontal scaling, databases of a new class NoSQL were developed, in which the developers tried to overcome the limitations inherent in relational data models and the SQL language [5-8]. Since NoSQL DBMSs are not based on the concept of DB schema and relationships between tables, they provide a fairly easy possibility of horizontal scaling from the beginning [9].

However, most NoSQL DBMSs support transactionality at the single-record level only, which prevents them from being used in a number of important transactional business operations. A number of developers of NoSQL systems to implement this shortcoming implement additional functionality. An example of such a DBMS is MongoDB [10-11], which fully supports distributed ACID transactions. This one of the most popular systems shows quite high performance results and has integration with a large number of programming languages.

As an attempt to combine the advantages of classic relational and NoSQL DB, a new class of DBMS has recently appeared - NewSQL [12-13]. NewSQL DBMSs have both built-in support for horizontal scaling and, inherent in relational systems, support for transaction ACID and most SQL functionality. And although this class of systems has a fairly high potential, but it has not yet gained much popularity among developers. However, the DBMS VoltDB, which is quite popular among systems of this class, already has integration with many programming languages.

It should not be forgotten that one of the first methods of implementing distributed transactions, which is still used by developers, is their implementation at the application level. That is, the application itself takes responsibility for fixing transactions on all nodes of the cluster, for example, using the template Two-phase commit [14].

Given the analysis, more modern and promising for further research and comparison are the methods of implementing distributed ACID transactions in NoSQL DBMS (on the example of MongoDB) and NewSQL DBMS (on the example of VoltDB).

The purpose of this article is to improve the implementation of ACID transactions for horizontally distributed databases by comparing the effectiveness of such methods on the example of using NoSQL DBMS MongoDB and NewSQL DBMS VoltDB, and develop appropriate recommendations for their application.

This study requires the design of a pilot DB and related transactions, as well as the planning and conduct of a series of experiments on different DB volumes, loads, and DB access modes. Evaluation of the effectiveness of the use of methods should be carried out taking into account such criteria [15-16] as:

- the average execution time of read requests, as well as transactional write requests;
- resources required to perform these queries: database size, RAM required, and percentage of CPU time.

In addition to the absolute values of measurements, it is advisable to determine and analyze the functions of their growth.

Materials and methods

A DB was designed for the experiment, which will then be implemented as a BSON model for MongoDB, as well as a relational model for VoltDB.

The design area is e-commerce, for which distributed systems are created and which is associated with heavy workload and big data. In addition, the real field of activity allowed for a clear demonstration of the need for distributed transactions for applied tasks.

The simplified structure of the experimental DB contains the following basic essences:

- product categories: have only a name;
- goods: have a name, description, quantity in stock, price, and also belong to a certain category;
- properties of goods: have the name of the property, its meaning, and also belong to a particular product;
- customers: have a name, surname, e-mail address, telephone number, and physical address;
- orders: have a specific delivery date, discount, and also belong to a specific customer;
- order elements: indicate a specific product, have the ordered quantity, and also belong to a specific order.

The data structures developed for the experiment are shown in fig. 1 (relational scheme DB) and in fig. 2 (in BSON format).

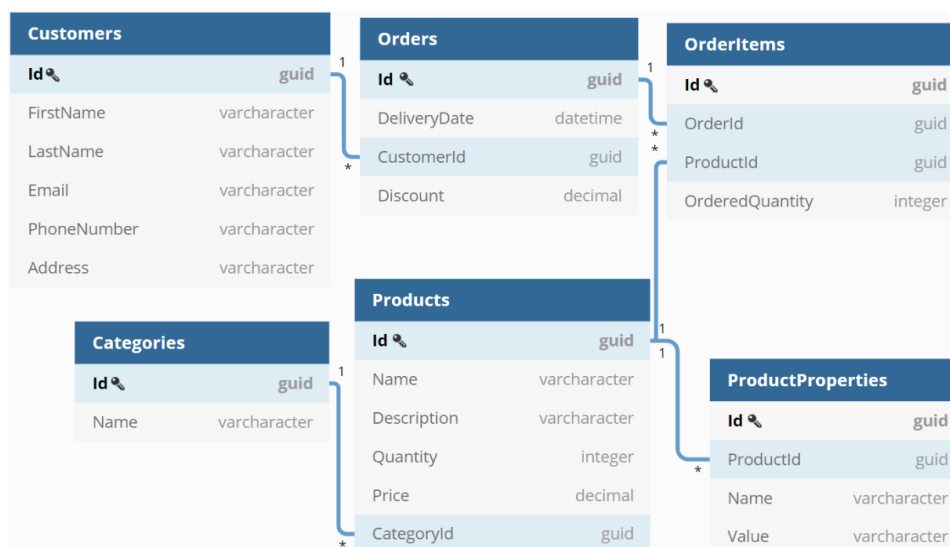


Fig. 1. Relational DB scheme

The following e-commerce business operations were selected to design queries for experiments:

- withdrawal of the most popular categories of goods;
- view and create orders;

- change in the quantity of goods in the warehouse and the price of the goods;

- adding or changing a discount for a specific order;
- adding new categories of goods and the goods themselves for them.

```

"Categories"
{
  "id": "ObjectId",
  "name": "string"
}

"Products"
{
  "id": "ObjectId",
  "name": "string",
  "description": "string",
  "quantity": "number",
  "price": "decimal",
  "category": "ObjectId",
  "properties": [{
    "name": "string",
    "value": "string"
  }],
  ...
}

"Customers"
{
  "id": "ObjectId",
  "first_name": "string",
  "last_name": "string",
  "email": "string",
  "phone_number": "string",
  "address": "string"
}

"Orders"
{
  "id": "ObjectId",
  "delivery_date": "Date",
  "customer": {
    "id": "ObjectId",
    "email": "string"
  },
  "items": [{
    "product_id": "ObjectId",
    "product_name": "string",
    "ordered_quantity": "number"
  }],
  ...
}

```

Fig. 2. BSON DB structure

For the experiment, transactions based on SQL and BSON queries for VoltDB and MongoDB, respectively, were developed for selected business processes. All transactions are implemented with a standard DBC isolation level for many DBMSs.

For the experiment, the following deployment of DB server nodes was adopted:

- measurements were made for a cluster of DB virtual server machines;
- each server runs in the Azure cloud on a B2s virtual machine with 2 CPUs, 4 GB of RAM and 8 GB of hard drive.

- Windows Server 2016 operating system.

The experimental load on the DB cluster was formed taking into account the following factors:

- the amount of data stored in the database;
- number of simultaneous connections to the database;
- the number of replica nodes in the DB cluster on which transaction results must be recorded simultaneously and consistently.

For a series of experiments, modes associated with specific discrete values for the above factors were identified (table 1).

Table 1. DB characteristics for study modes

Regime	Total entities in the database	Number of simultaneous connections	The number of replica nodes in the cluster
Basic	122 064	10	2
Basic+	568 064	30	3
Basic++	1 266 064	50	-
Medium	2 420 064	100	4
Intensive	8 050 064	300	6

The experiment is based on the idea of measuring the execution time of requests and resource consumption by gradually changing one mode to another for one factor, while the values of the other two factors will remain static. This will establish the dependence of these metrics on the

specific load factor DB. An experiment will also be performed with a gradual simultaneous change of modes of all factors to compare the most important criteria that affect the execution time of queries.

It was decided to compare all measurements not only through absolute values, but also by identifying the functions of dependence and comparing their growth rate graphically.

For research on the basis of certain business processes, a number of requests were made, namely:

- withdrawal of the three most popular categories of goods;
- withdrawal of the order and its elements by the order ID;
- transaction with the operation of inserting an order with a variable number of order elements, which will be equal to the number of elements for this mode;
- transaction with the operation of updating goods, the number of which is less than 10, namely, reducing their price by 10%;
- transaction to delete all orders, the total amount of which is on a certain segment $[x; x + 500]$, where $x \in [8,000; 13,000]$;
- complex transaction with operations of insertion of many orders with their elements, updating with increase in quantity of the goods in a warehouse which current quantity is less than 15, and also updating with transfer of date of the order in a certain range for some days forward;

- a comprehensive transaction with the insertion of new categories and products for them, the insertion of new customers and orders for them, as well as the renewal of the discount for those orders whose delivery date belongs to a certain segment.

To conduct the experiment, special software was developed, the essence of which is to automatically deploy a DB cluster with the number of nodes according to a given mode, fill it with data according to this mode and perform parallel queries to the cluster according to a given mode. The software measures the execution time of each request and constantly monitors the resources consumed.

Research results and their discussion

Let's consider the main most interesting trends in the performance of experiments to support ACID transactions for NoSQL DBMS MongoDB and NewSQL DBMS VoltDB.

Let's start with the analysis of such a resource as the DB volume. In fig. 3 shows a histogram showing for each mode the DB dimensions for both DBMSs with the same number of entities as they contain.

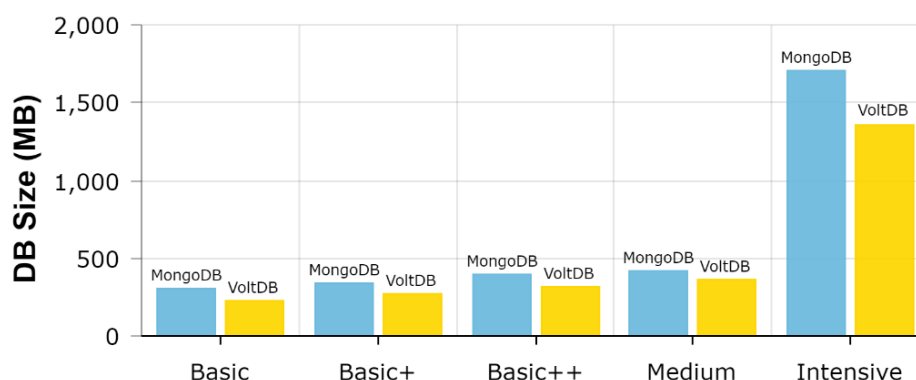


Fig. 3. Comparative diagram of the size of the database

As you can see, VoltDB requires less memory to store the same amount of information in a DB than MongoDB. As the amount of data increases, the DB gap only widens, suggesting that the DBMS VoltDB generally requires less memory to store a single entity than MongoDB does.

Consider the results of measurements of CPU time used as a percentage for both methods. During the experiments it was found that the CPU time in both cases does not depend on the number of replicas in the cluster. But interestingly, MongoDB is characterized by a more rapid growth of CPU consumption when increasing only the factor of the amount of data stored in the database, and when increasing only the number of simultaneous CPU connections, time also increases, but rather slowly and this growth is dampening. On the other hand, VoltDB, on the other hand, shows an increase of only 1% from the lowest mode to the highest when the data grows, but shows a progressive increase with the number of connections. Comparative tables with absolute values for both methods are given in table 2 and table 3.

Thus, in terms of CPU usage, it is better to use VoltDB when it is known in advance that the application

will have a large growing amount of data and a more static number of users. Conversely, it is better to use MongoDB when the system aims to attract a large number of users with a more or less fixed data set.

Table 2. The results of experiments with changing only the amount of data

Regimes	MongoDB CPU (%)	VoltDB CPU (%)
Data Basic	1.1	1
Data Basic+	3.5	1.1
Data Basic++	3.7	1.3
Data Medium	7.1	1.4
Data Intensive	7.2	2

Table 3. The results of experiments with changing only the number of simultaneous connections

Regimes	MongoDB CPU (%)	VoltDB CPU (%)
Connection Basic	1.1	1
Connection Basic+	2.5	1.4
Connection Basic++	3.6	2
Connection Medium	3.5	4.2
Connection Intensive	3.7	10

If the proportions of the amount of data and users are unknown in advance or a characteristic increase of both values is assumed, it is better to pay attention to the measurements of the CPU metric, when all loaded factors simultaneously and gradually increase (table 4).

As you can see, in this case VoltDB consumes less CPU and this consumption grows more slowly than in the case of MongoDB. That is why in the case when the application must be ready for a rapid growth of both data and users, it is still better to choose VoltDB in terms of CPU consumption.

Table 4. The results of experiments, when all load factors increase simultaneously

Regimes	MongoDB CPU (%)	VoltDB CPU (%)
Basic	1.1	1
Basic+	1.9	1.4
Basic++	6.3	2.2
Medium	10.2	4.7
Intensive	16.5	13

Let's consider the results of measurements of the used RAM consumed by the DB server during transactions in different load modes. Note that from the start, MongoDB consumes several times less RAM than VoltDB. For example, when changing the amount of data, MongoDB consumes from 91 MB of RAM for the lowest level and up to 99 MB for the highest level, and when changing the number of connections from 83 MB to 97 MB. Even in the presence of a certain statistical error, it is clear that growth, if any, is very slow. At the same time, VoltDB consumes when changing data from 218 MB to 560 MB, and when changing connections from 218 MB to 1360 MB. The corresponding histograms of RAM consumption at change of data quantity (fig. 4) and quantity of connections (fig. 5) are resulted. The histograms show that when the amount of data changes, the difference in RAM is smaller than when changing the number of simultaneous connections.

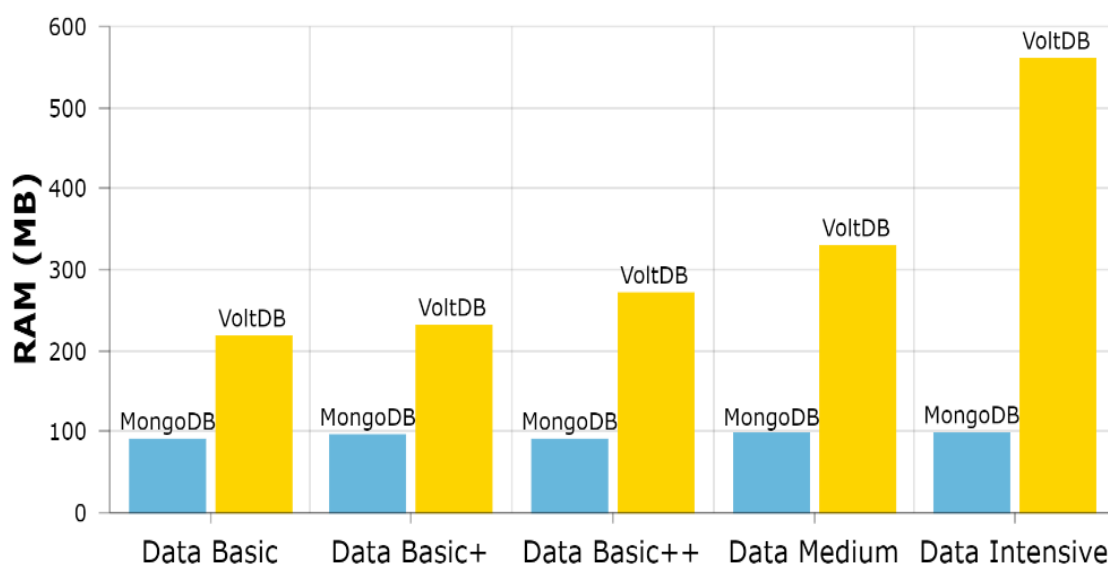


Fig. 4. Comparative histogram of RAM consumption when changing the amount of data

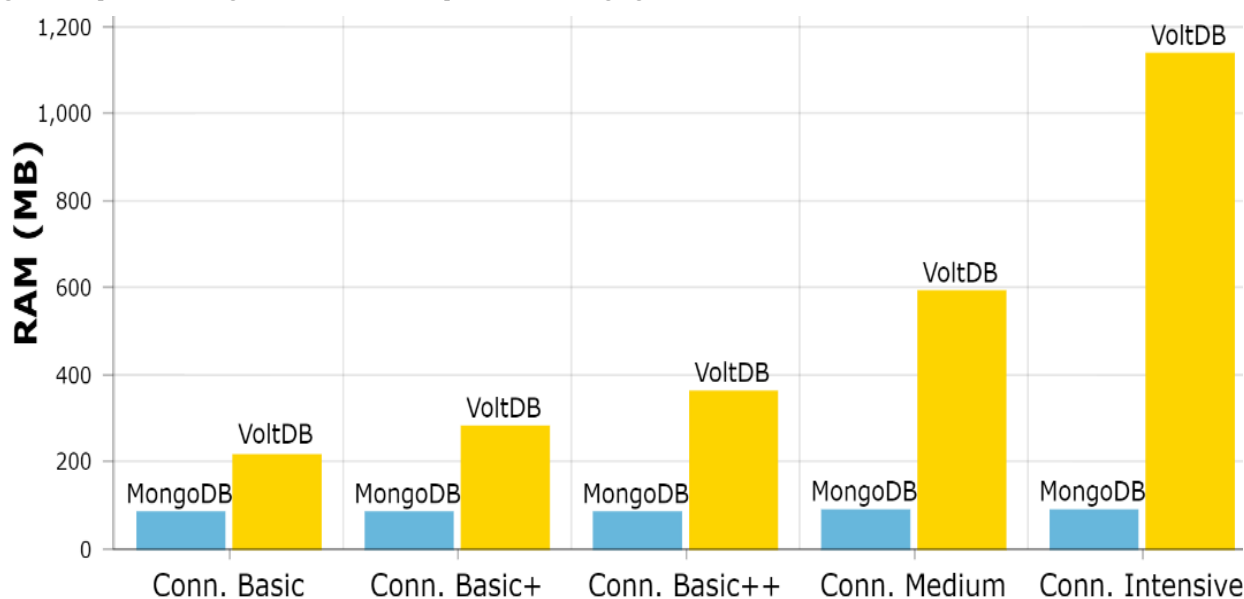


Fig. 5. Comparative histogram of RAM consumption when changing the number of connections

Also note that the amount of RAM for both methods does not actually depend on the number of replicas.

More interesting is the situation with increasing RAM consumption while increasing all load factors. And although in absolute terms MongoDB still loses VoltDB, but shows significant growth at high loaded levels (table 5).

Table 5. The results of measurements of RAM consumption while changing all factors

Regimes	MongoDB RAM (MB)	VoltDB RAM (MB)
Basic	91	218
Basic+	94	322
Basic++	97	439
Medium	182	692
Intensive	370	1369

We see that for both methods, although RAM consumption doubles between the last two modes, VoltDB still requires an order of magnitude more RAM at high load. Therefore, in terms of using the DB server RAM, it is more efficient to use MongoDB.

Further on we consider the results of measurements of the average execution time of transactions.

Let's consider the results for the operation of inserting a single order with its elements. The number of elements to be inserted will increase when the load mode is changed:

- Basic: 30 elements;
- Basic +: 40 elements;
- Basic ++: 50 elements;
- Medium: 60 items;
- Intensive: 100 items.

The experiment showed that MongoDB executes this transaction several times faster than VoltDB when changing any factor. At the same time, it was found that the data quantity factor in DB does not affect the insert transaction speed for MongoDB, but significantly affects the rate for VoltDB (fig. 6). This revealed a completely opposite situation with the factor of the number of replicas, on which there is dependence for MongoDB (fig. 7), but not for VoltDB. And although the growth is noticeable, but in fact the time changes by only 100 ms.

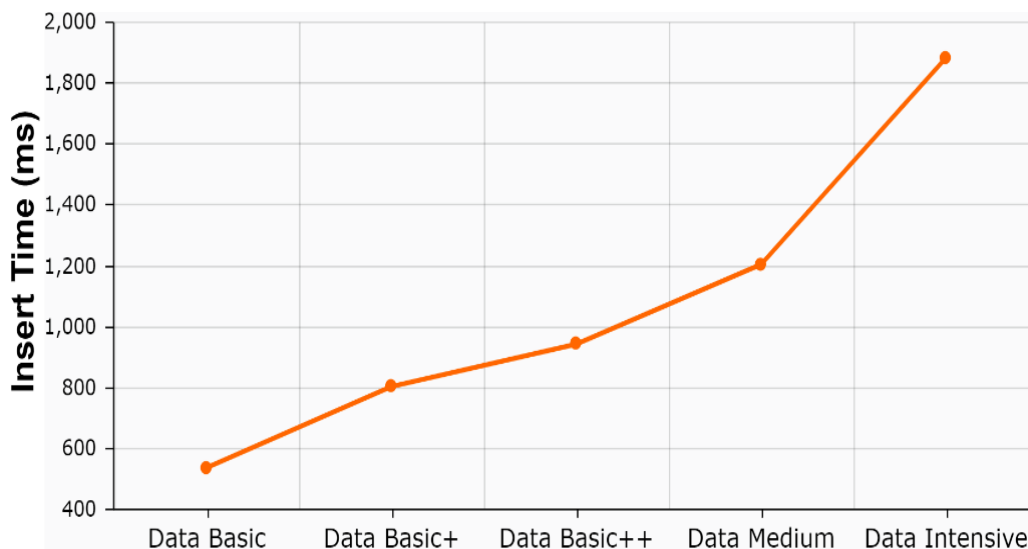


Fig 6. Graph of growth of time of execution of transaction on an insert from quantity of data in basis for VoltDB

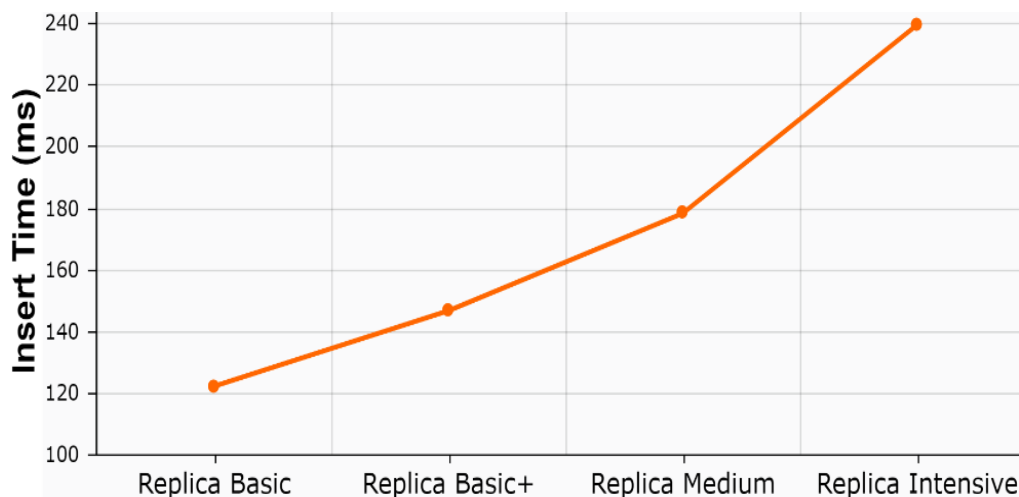


Fig. 7. Graph of growth of time of execution of transaction on an insert from quantity of data in basis for VoltDB

It was found that the insertion time for both methods depends on the number of simultaneous connections. However, MongoDB spends several times less time and this time increases several times slower than for VoltDB (fig. 8).

It was also found that with a simultaneous increase in all load factors, the execution time of the transaction on the insert increases significantly for both methods. In this way, you can find out the maximum bandwidth of the insertion operation for both methods at the highest levels of each factor, as well as at the same time the highest level of all factors simultaneously. A series of experiments

showed that MongoDB in all layouts has a higher insertion bandwidth than VoltDB.

Consider the results of experiments to perform an update transaction, the essence of which is to update the price of all goods, the number of which is less than a certain threshold. This in turn means that the DBMS will have to scan the entire table / collection to find such products. Fig.9 shows a histogram comparing both methods for this transaction in terms of maximum execution time when changing each load factor separately and together.

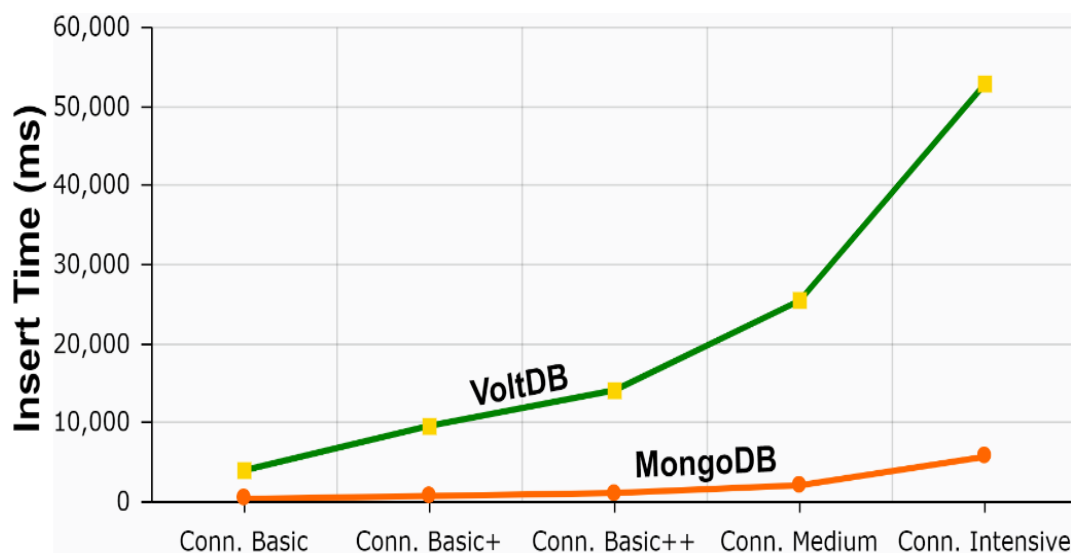


Fig 8. Graph of comparison of time of execution of insertion for both methods at a variable number of connections

It was found that for the transaction, the VoltDB update shows an order of magnitude better results both in terms of absolute values (the time difference reached 37 times) and in terms of growth. Thus, the growth rate with increasing various load factors for VoltDB increases approximately 1.5-2 times, while

in the case of MongoDB, for each higher load mode, the time can increase by an order of magnitude. The execution time for MongoDB depends on all load factors, and for VoltDB it depends only on the amount of data and the number of simultaneous connections.

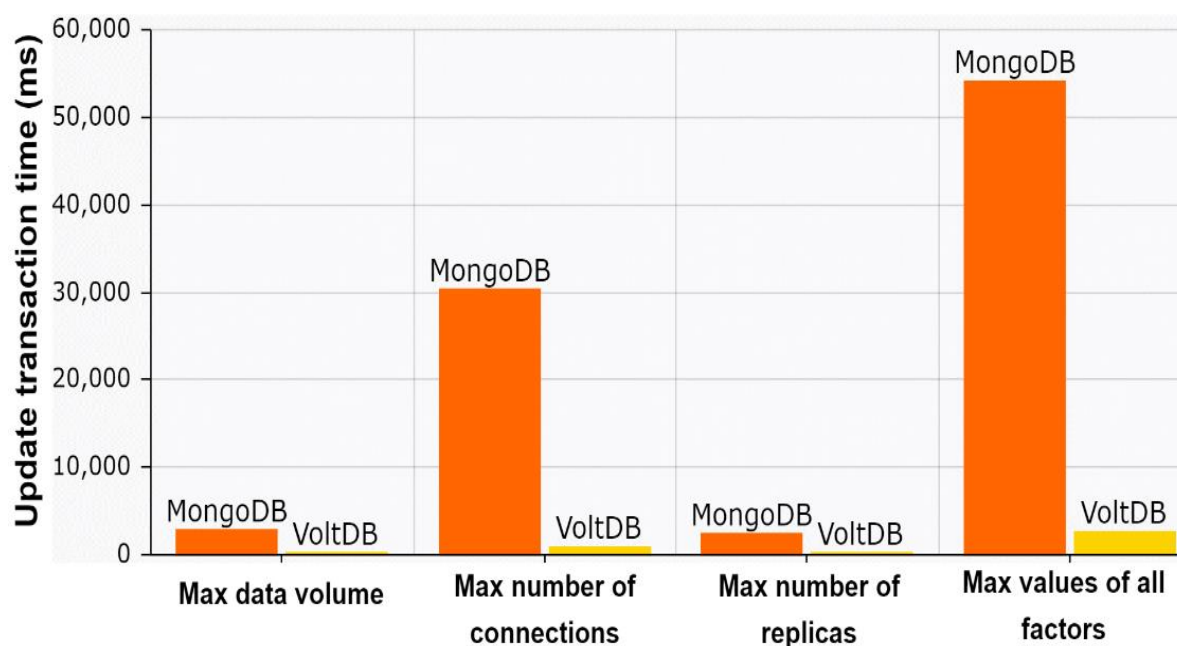


Fig. 9. Comparative histogram of the maximum execution time of the update transaction

Therefore, you can immediately see a huge difference in the execution time of this transaction for the compared DBMS. With a variable amount of data and replicas, VoltDB updates in less than 120 ms. Given that during this transaction about 10% of the total number of goods are updated, you can determine the maximum

bandwidth of each method (table 6). The table shows that VoltDB updates data much more efficiently, especially the gain compared to MongoDB is seen when increasing only the amount of data. The smallest gap between the methods is observed in the case when only the number of replicas increases.

Table 6. The detected maximum number of entities that can be updated in one second

Types of load changes	MongoDB (number of entities)	VoltDB (number of entities)
When the amount of data changes	1824	93283
When changing the number of connections	7	248
When changing the number of replicas	85	1585
When all factors change	92	1927

Next, we consider the execution of a transaction with a request to delete all orders, the amount of which is in a certain range. This transaction also requires scanning the entire table / collection and performing a grouping operation to find the order amount through the price of its items. Grouping will take place for order items by the ID of the order to which they belong. After the grouping operation, the total price of the order will be calculated as the sum of the prices of all its elements.

Experiments have shown that the deletion transaction, as for the previous request, is performed an

order of magnitude faster with VoltDB when changing any factor. Runtime for both DBMSs increases most slowly when the number of replica nodes in the cluster changes. The rate of increase of execution time when changing the amount of data and the number of connections will be better investigated by graphically displaying the corresponding linear regression functions. The following are graphs of the time dependency of the removal transaction from the amount of data (fig. 11a) and the number of simultaneous connections (fig. 10b) for both DBMSs.

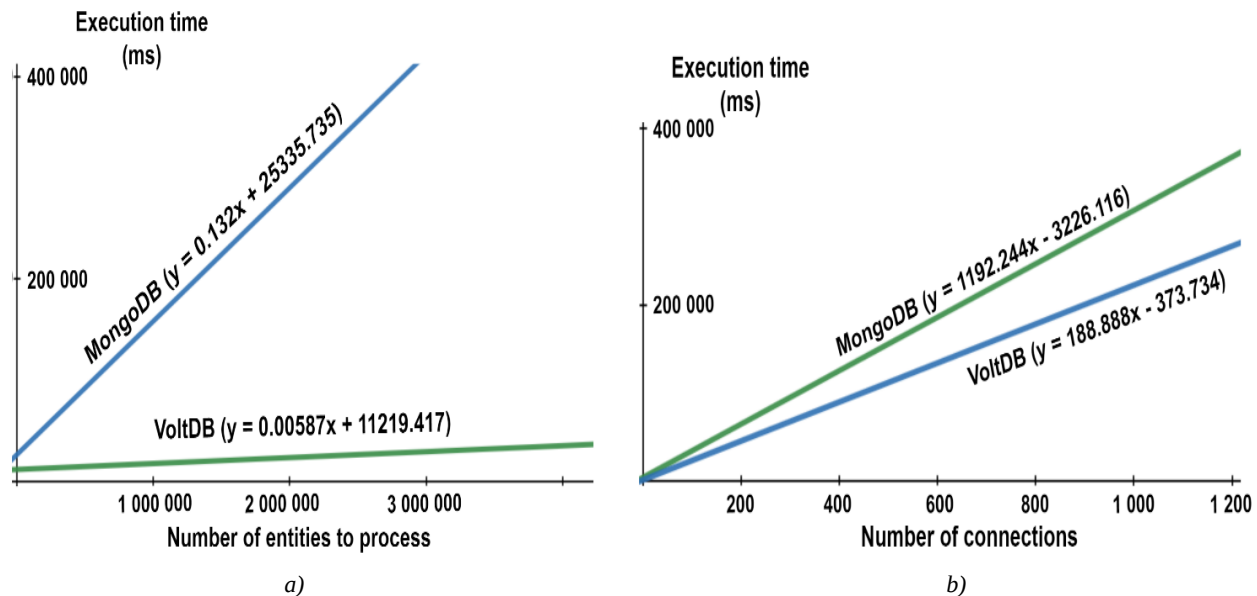


Fig. 10. Functions of growth of execution time of transaction of removal at change (a - volume of data, b - number of connections)

As you can see from both graphs, for this query, VoltDB removal works much faster at any load in absolute values, and the time increase is not as rapid as in the case of MongoDB.

A number of complex transactions were also investigated in the paper. The first of these transactions contains two insert operations and two update operations. For this transaction, MongoDB worked an order of magnitude faster than VoltDB. The following is a histogram comparing the maximum execution time of this

transaction when changing each load factor separately (fig. 11).

We see that the largest gap in time occurs when increasing the number of simultaneous connections, and the smallest when entering new nodes-replicas in the cluster. An even greater gap in execution time (almost 40 times) is observed with a simultaneous increase in the values of all load factors. Thus, for VoltDB at maximum load, the execution time is 675549.34 ms, and for MongoDB 16980.45 ms.

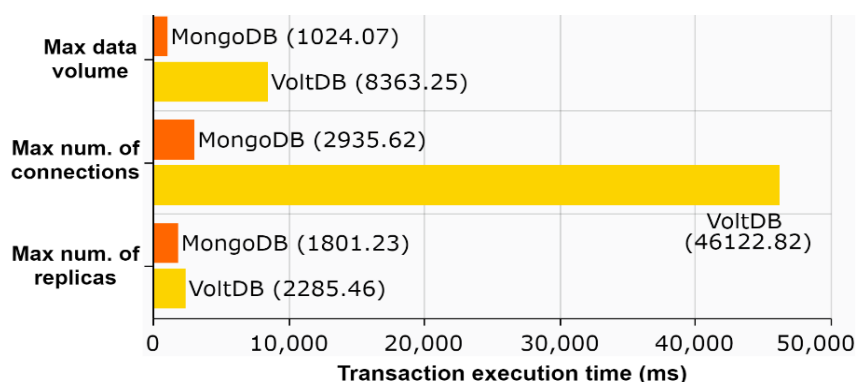


Fig. 11. Comparative histogram of the maximum execution time of transactions when changing various factors

We see that the largest gap in time occurs when increasing the number of simultaneous connections, and the smallest when entering new nodes-replicas in the cluster. An even greater gap in execution time (almost 40 times) is observed with a simultaneous increase in the values of all load factors. Thus, for VoltDB at maximum load, the execution time is 675549.34 ms, and for MongoDB 16980.45 ms.

The other complex transaction contains 6 insert operations and 1 update operation. MongoDB also

executes this transaction an order of magnitude faster than VoltDB. Moreover, the execution time for VoltDB is affected by all load factors, while for MongoDB there is no characteristic dependence on the number of simultaneous connections. Comparison of the maximum execution time of this transaction when changing each load factor separately and all at the same time are given in table 7.

Table 7. Experiments results

Load factors	MongoDB, execution time (ms)	VoltDB, execution time (ms)	Difference
Max data volume	2213.16	40693.78	18.4 times
Max number of connections	1126.16	42720.91	37.9 times
Max number of replicas	1222.05	4492.47	3.7 times
Max value of all factors	25183.41	613669.34	24.4 times

It can be seen that MongoDB executes this transaction several tens of times faster than VoltDB. Moreover, the largest time gap for DBMS is manifested at the peak values of the number of connections, and the smallest at the maximum number of replicas. In general, MongoDB more efficiently captures the ACID of a transaction with a large number of write requests in a distributed DB.

Finally, consider the performance of read requests. Although they are not part of ACID transactions, this type of operation is most common in distributed DBs and its performance can significantly influence the choice of a method.

The first read request will consider a request to receive an order with its elements by the ID of this order. For both DBMSs at the DB level, index readings will be performed to check the effectiveness of the indexed search. As expected, for both methods, the amount of data in the database does not have a strong effect on the execution time of the search, because the logarithmic function grows very slowly. But it immediately becomes clear that MongoDB reads an order of magnitude faster than VoltDB - an average of 17 ms versus 125 ms. The number of replicas in the cluster also does not affect the search speed for both methods, because in this case, the interaction still takes place with only one node. On the other hand, the query execution time for both methods depends on the number of simultaneous connections, while MongoDB reads an order of magnitude faster and

with increasing connections the time increases much more slowly than in the case of VoltDB (Table 8).

At simultaneous increase of indicators of all factors the approximately same tendency, as well as in the table above remains. Thus, it is clear that MongoDB is much more efficient at reading the index. This is primarily due to the fact that Mongo searches for an order in only one collection, and VoltDB searches the index in two tables: the order and its elements. As you can see, the difference in time differs by an order of magnitude, and for the maximum load in terms of connections, in general, by several orders of magnitude. This once again proves the stability of MongoDB with a large number of users, as well as its advantages when performing an index read operation.

Table 8. The results of measuring the execution time of the read request when changing the factor of the number of connections

Regimes	MongoDB (ms)	VoltDB (ms)
Basic	15.06	123.68
Basic+	17.87	146.38
Basic++	17.48	179.38
Medium	21.18	187.07
Intensive	25.53	10993.58

The latter we will analyze the implementation of a more complex request to obtain the three most popular categories of goods, which will include grouping, sorting and data limiting operations. When performing this query,

both methods have a characteristic increase in runtime from the amount of data and the number of simultaneous connections. As in the previous case, the measurement results immediately show that MongoDB executes this request an order of magnitude faster than VoltDB.

Below are graphs of the dependence of the query execution time for both methods on the increase in data volume (fig. 12) and the number of simultaneous connections (fig. 13).

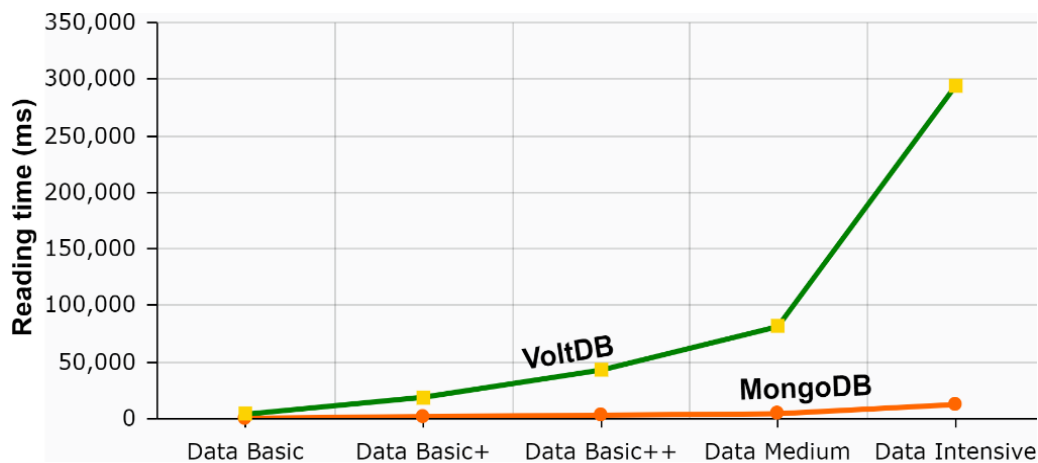


Fig. 12. Comparing of the category read time growth graphs based on data volume

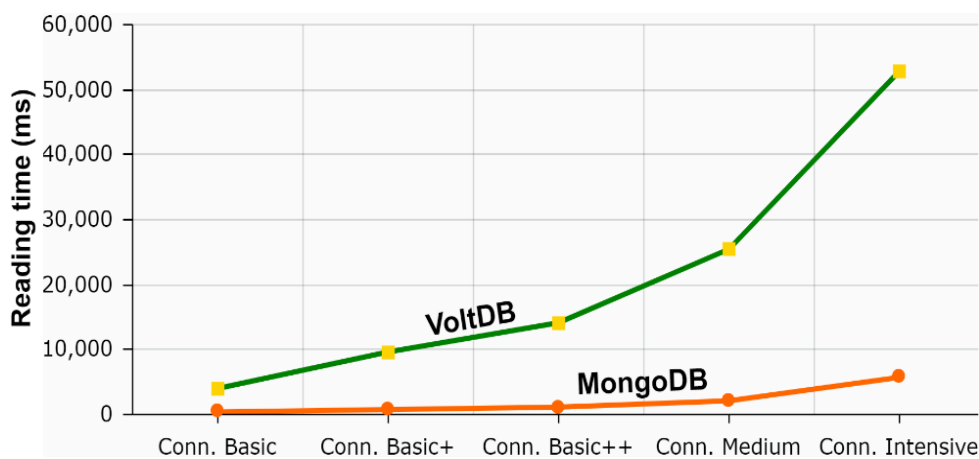


Fig. 13. Comparing of the category read time growth graphs based on number of connection

Both series of experiments give a similar result, the graphs clearly show that VoltDB executes this request much slower than MongoDB, and execution time increases many times faster. At a maximum load of all factors, VoltDB executes this request in 358923.22 ms, while MongoDB - in 80733.55 ms. That is, the difference at peak load is almost 4.5 times.

Therefore, based on the measurements made, it can be concluded that MongoDB performs a read request with grouping, sorting and limiting operations is several times more efficient than VoltDB.

As a result of the experimental study, the main trends in the performance of the compared DBMS were identified in a specific situation, which allows us to make recommendations for their application. Consider the recommendations made on the basis of the resources consumed for both methods. The amount of resources consumed directly affects the hardware of the virtual machine on which the DB server is located, and therefore the price of this machine.

Experiments show that the VoltDB consumes less storage space and requires slightly less CPU time, while in any load mode it consumes several times more RAM. Therefore, less disk space usage by VoltDB allows you to choose this DBMS in cases where you need to save on the size of the permanent media of the virtual machine, namely:

- when creating applications in which the DB must store tens of gigabytes of data and, at the same time, such data is not processed very often or intensively, so the speed of their processing is not a priority (for example, in storage systems DB backups or outdated data low probability);

- when creating applications where the same machine stores data from other databases or just other files; also the processing speed should not be a priority for the application.

Also, VoltDB's lower CPU resource consumption allows you to choose this approach when one or more applications that require CPU and multithreaded computing are deployed on the same virtual machine with

the DB server. Examples of such applications are computer vision systems, which require a lot of CPU time to solve the classification problem. With this approach, you can save on CPU resources, which are the most expensive.

On the other hand, due to less RAM consumption, it is more appropriate to use MongoDB in the following cases:

- creating applications that require a lot of RAM to run continuously, but host one or more applications on the same virtual machine (for example, in systems that use different levels of cache stored in RAM for faster response, such as web servers that cache the client's response to expedite the response);
- creating applications where other repositories that require a large amount of RAM (for example, in In-Memory DB, such as Redis or Memcached) must be located on the same virtual machine.

All this will save on RAM, which is also quite expensive to rent.

Further on let's consider the recommendations developed based on the average execution time of various queries and transactions.

Based on the results of experiments, the implementation of distributed ACID transactions using MongoDB is more appropriate in the cases:

- creation of applications where read operations take precedence over other write operations (for example, in various analytical systems, data processing systems, online stores, search engines, which use such complex queries as indexed search); because MongoDB executes both simple index read requests and complex grouping, sorting, and limiting queries an order of magnitude faster, it is therefore more performance-efficient for this type of application;

- creation of applications where insert operations prevail over update and deletion operations, which is typical of data collection systems, which are then analyzed; usually, in such situations, the initial data is processed, which no longer changes (for example, in centralized data logging systems, control systems for various environmental metrics using the Internet of Things, ticket booking systems);

- creation of applications where within the ACID transaction many entries for insertion, updating or removal should be performed (for example, in systems with complex transactions, such as, bank applications with the function of transfer of funds, applications for construction of various graphic objects and charts numerical data, as well as applications with the function of testing and automated assessment of user knowledge); because MongoDB executes and fixes transactions with several separate requests faster on all nodes, so the more of these requests, the greater the difference in the time of its processing of transactions compared to VoltDB);

- creation of applications where the speed of any data change operations under high load from users is critical (for example, in e-commerce systems where there is a peak load of users during the holidays or in online competition systems, where to participate at a certain time hundreds of users must connect at once.); because

MongoDB handles many concurrent connections very efficiently for most data change operations, MongoDB executes most of these requests faster than VoltDB; and even for such transactions, which are still faster in VoltDB, the gap with MongoDB is still smaller than for other load factors.

On the other hand, using VoltDB to implement distributed ACID transactions is more efficient in cases:

- creation of applications where update operations outperform other performance-critical and execution-critical operations (for example, in shared document editing systems, where multiple users simultaneously and continuously edit the same document, as well as systems for financial exchanges, where exchange rates and stock prices of companies are constantly updated); VoltDB, as measurements have shown, executes this type of transaction an order of magnitude faster than MongoDB;

- creation of applications where the deletion operation is performed with the same frequency as the insertion operation, or where the speed of data deletion is very important (for example, in systems of transmission of secret values through one-time pages, where they must be deleted immediately after the first reading, and in systems with the display of various data and metrics in real time, where obsolete data should be deleted as soon as possible so as not to take up disk space);

- creation of applications where a large number of replicas are expected from clusters (for example, in hotel reservation systems around the world, where DB servers are located in different geographical areas); The recommendation is due to the fact that VoltDB showed that the factor of the number of replica nodes in the cluster does not affect the speed of most queries, and if some queries are still characterized by an increase in time with increasing number of replicas, this growth is minimal and fluctuates around a few percent.

However, in situations where the method of implementing distributed ACID transactions is chosen before the start of application development and it is not known which load factor will be a priority and which types of requests will predominate in the application, a more reliable option is MongoDB. After all, for this DBMS with a simultaneous increase in all load factors, the execution time of most requests and transactions is less than for VoltDB.

Conclusions and prospects for further development

In terms of performance, a study of methods for implementing distributed ACID transactions, namely the built-in capabilities of DBMS MongoDB and VoltDB. A series of experiments was performed to measure the resources consumed and the execution time of various queries and transactions.

To perform the experiment, DB structures were designed for the relational and BSON models, as well as transactions to these databases. The experiments were performed with increasing load, which allowed to compare not only the absolute values of the metrics, but also their trends. The experiments used metrics on the

execution time of queries and the resources required to execute those queries. Based on the analysis of these metrics, the comparative advantages and disadvantages of each approach were identified; analyzed what load factors affect specific types of requests and resources used.

Thus, the study provided a complete picture of the performance of both methods during different types of workload, based on which the main recommendations for the effective use of a method for a particular type of application were formulated.

References

1. Tamer Özsu, M. (2020), *Principles of Distributed Database Systems*, Springer International Publishing, 674 p.
2. Maran, M. M., Paniavin, N. A., Poliuskhin, I. A. (2020), "Alternative Approaches to Data Storing and Processing", *V International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino)*. DOI: <https://doi.org/10.1109/inforino48376.2020.9111708>
3. Blokdik, G. (2018), *ACID Transactions Second Edition*, 5STARCOoks, 282 p.
4. Kemme, B., Peris, R. J., Patiño-Martínez, M. (2010), *Database Replication (Synthesis Lectures on Data Management)*, Morgan and Claypool Publishers, 154 p. DOI: <https://doi.org/10.2200/S00296ED1V01Y201008DTM007>
5. Moniruzzaman, A. B. M., Hossain, S. A. (2012), "NoSQL Database: New Era of Databases for Big data Analytics – Classification, Characteristics and Comparison", *International Journal of Database Theory and Application*, No. 4, P. 1.
6. Kuzochkina, A., Shirokopetleva, M., Dudar, Z. (2018), "Analyzing and Comparison of NoSQL DBMS", *International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, P. 560–564. DOI: <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2018.8632133>
7. Sahatqija, K., Ajdari, J., Zenuni, X., Raufi, B., Ismaili, F., (2018), "Comparison between relational and NOSQL databases", *41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, P. 216–221. DOI: <https://doi.org/10.23919/mipro.2018.8400041>
8. Györödi, C. A., Dumş-Burescu, D. V., Zmaranda, D. R., Györödi, R. Ş., Gabor, G. A., Pecherle, G. D. (2020), "Performance Analysis of NoSQL and Relational Databases with CouchDB and MySQL for Application's Data Storage", *Applied Sciences*, No. 10 (23), P. 8524. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10238524>
9. Sadalage, P., Fowler, M. (2012), *NoSQL Distilled: A Brief Guide to the Emerging World of Polyglot Persistence*, 1st Edition, Addison-Wesley Professional, 192 p.
10. Chodorow, K. (2016), *MongoDB: The Definitive Guide: Powerful and Scalable Data Storage*, 3rd Edition, O'Reilly Media, 514 p.
11. Palanisamy, S., Suvitha Vani P. (2020), "A survey on RDBMS and NoSQL Databases MySQL vs MongoDB", *International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*. DOI: <https://doi.org/10.1109/iccci48352.2020.9104047>
12. Pavlo, A., Aslett, M. (2016), "What's Really New with NewSQL?", *SIGMOD Record*, Vol. 45(2), P. 45–55. DOI: <https://doi.org/10.1145/3003665.3003674>
13. Astrova, I., Koschel, A., Wellermann, N., Klostermeyer, P. (2021), "Performance Benchmarking of NewSQL Databases with Yahoo Cloud Serving Benchmark", *Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC) 2020*, Vol. 2. FTC 2020. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 1289, Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63089-8_17
14. Bhiri, S., Gaaloul, K., Perrin, O., Godart, C., (2005), "Overview of Transactional Patterns: Combining Workflow Flexibility and Transactional Reliability for Composite Web Services", In: *van der Aalst W.M.P., Benatallah B., Casati F., Curbera F. (eds) Business Process Management. BPM 2005, Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 3649, Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/11538394_37
15. Priya, M., Kalpana, R. (2017), "Distributed and Parallel Processing of Location based spatial query with Approximate Transformation", *Ninth International Conference on Advanced Computing (ICoAC)*, P. 334–338. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICoAC.2017.8441297>
16. Gomes, C., Borba, E., Tavares, E., Meuse Nogueira de O. Junior (2019), "Performability Model for Assessing NoSQL DBMS Consistency", *IEEE International Systems Conference (SysCon)*. DOI: <https://doi.org/10.1109/syscon.2019.8836757>

Received 27.05.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мазурова Оксана Олексіївна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії, Харків, Україна; email: oksana.mazurova@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3715-3476>.

Мазурова Оксана Алексеевна – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры программной инженерии, Харьков, Украина.

Mazurova Oksana – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of the Department of Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Набока Артем Олександрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, магістр спеціальності 121 - Інженерія програмного забезпечення, Харків, Україна; email: artem.naboka@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2178-7984>.

Набока Артем Александрович – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, магистр специальности 121 – Инженерия программного обеспечения, Харьков, Украина.

Naboka Artem – Kharkiv National University of Radio Electronics, Master of Specialty 121 - Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Широкопетлева Марія Сергіївна – Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри програмної інженерії, Харків, Україна; email: marija.shirokopetleva@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7472-6045>.

Широкопетлева Мария Сергеевна – Харьковський національний університет радіоелектроніки, старший преподаватель кафедри програмної інженерії, Харьков, Україна.

Shirokopetleva Mariya – Kharkiv National University of Radio Electronics, Senior Lecturer of the Department of Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗПОДІЛЕНИХ ACID ТРАНЗАКЦІЙ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ РЕПЛІКАЦІЇ

Сьогодні бази даних є невід'ємною частиною більшості сучасних застосувань, призначених для зберігання великих обсягів даних та звертань від багатьох користувачів. Для рішення бізнес-задач в таких умовах бази даних масштабуються, найчастіше горизонтально на декількох фізичних серверах з використанням технології реплікування. При цьому багато бізнес-операцій потребують реалізації транзакційності з дотриманням ACID-принципів. Для реляційних СУБД, які традиційно підтримують ACID транзакції, горизонтальне масштабування не завжди ефективно через обмеження самої реляційної моделі. Отже існує прикладна проблема ефективної реалізації ACID транзакцій для горизонтально розподілених баз даних. **Предметом** дослідження є методи реалізації ACID транзакцій в розподілених базах даних, що створено за технологією реплікування. **Мета** роботи – підвищення ефективності реалізації ACID транзакцій для горизонтально розподілених баз даних. В роботі вирішуються наступні **завдання**: аналіз та вибір найбільш актуальних методів реалізації розподілених ACID транзакцій; планування та експериментальне дослідження методів реалізації ACID транзакцій на прикладі використання NoSQL СУБД MongoDB та NewSQL СУБД VoltDB; заміри метрик продуктивності використання цих методів та формування рекомендацій щодо їх ефективного використання. Використовуються такі **методи**: системний аналіз; методи проектування реляційних баз даних та їх об'єктів; методи оцінки продуктивності баз даних. Отримано наступні **результати**: проведено експериментальні виміри часу виконання типових розподілених транзакцій для предметної області електронної комерції, а також заміри кількості ресурсів, що необхідні для їх виконання; виявлено тренди продуктивності виконання таких транзакцій, сформовані рекомендації щодо методів, що досліджувалися. Отримані результати дозволили скласти функції залежності розглянутих метрик від параметрів навантаження. **Висновки**: були виявлені сильні та слабкі сторони реалізації розподілених ACID транзакцій за допомогою СУБД MongoDB і VoltDB. Запропоновано практичні рекомендації щодо ефективного використання даних систем для різних типів додатків з урахуванням споживаних ресурсів та типів запитів.

Ключові слова: розподілена база даних; транзакція; продуктивність; ACID; NOSQL; NEWSQL; MongoDB; VoltDB.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РЕАЛИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ACID ТРАНЗАКЦИЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ РЕПЛИЦИРОВАНИЯ

Сегодня базы данных являются неотъемлемой частью большинства современных приложений, предназначенных для хранения больших объемов данных и обращений от большого количество пользователей. Для решения бизнес-задач в таких условиях базы данных масштабируются, чаще всего горизонтально на нескольких физических серверах с использованием технологии репликации. При этом многие бизнес-операции требуют реализации транзакционности с соблюдением ACID-принципов. Для реляционных СУБД, которые традиционно поддерживают ACID транзакции, горизонтальное масштабирование не всегда эффективно из-за ограничений самой реляционной модели. Поэтому существует прикладная проблема эффективной реализации ACID транзакций для горизонтально распределенных баз данных. **Предметом** исследования являются методы реализации ACID транзакций в распределенных базах данных, созданных на основании технологии репликации. **Цель** работы – повышение эффективности реализации ACID транзакций для горизонтально распределенных баз данных. В работе решаются следующие **задачи**: анализ и выбор наиболее актуальных методов реализации распределенных ACID транзакций; планирование и экспериментальное исследование методов реализации ACID транзакций на примере использования NoSQL СУБД MongoDB и NewSQL СУБД VoltDB; замеры метрик производительности использования этих методов и формирование рекомендации по их эффективному использованию. Используются следующие **методы**: системный анализ; методы проектирования реляционных баз данных и их объектов; методы оценки производительности баз данных. Получены следующие **результаты**: проведены экспериментальные измерения времени выполнения типовых распределенных транзакций для предметной области электронной коммерции, а также замеры количества ресурсов, необходимых для их выполнения; определены тренды производительности выполнения таких транзакций; сформированы рекомендации по исследуемым методам. Полученные результаты позволили найти функции зависимости рассмотренных метрик от параметров нагрузки. **Выводы**: были выявлены сильные и слабые стороны реализации распределенных ACID транзакций с помощью СУБД MongoDB и VoltDB. Предложены практически рекомендации относительно целесообразности использования данных систем для различных типов приложений с учетом потребляемых ресурсов и типов запросов.

Ключевые слова: распределенная база данных; транзакция; производительность; ACID; NOSQL; NEWSQL; MongoDB; VoltDB.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Мазурова О. О., Набока А. О., Широкопетлева М. С. Дослідження методів реалізації розподілених ACID транзакцій за технологією реплікації. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 2 (16). С. 19–31. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.019>

Mazurova, O., Naboka, A., Shirokopetleva, M. (2021), "Research of ACID transaction implementation methods for distributed databases using replication technology", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (16), P. 19–31. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.019>

A. PODOROZHNIK, O. BALENKO, V. SOBOL

MODEL AND ALGORITHMS FOR DETERMINING THE LOCATION AND POSITION OF AGRICULTURAL MACHINERY DURING THE MOVEMENT

The **subject** of research is the navigation subsystem of autonomous control system to determine the location and position of agricultural machinery during the movement. The **purpose** of the work is to develop and research model and algorithms to determine the location and position of mobile agricultural machinery using a physical model. The following **tasks** are solved in the article: development of agricultural machinery physical model to collect information from sensors during movement, further development and research of applicability of algorithms for location and position determination. The following **methods** are used: methods of mathematical statistics, methods of information systems theory and data processing, methods of random signals filtration. The following **results** were obtained: during research, the agricultural machinery physical model to collect information from sensors during movement was created. The model includes a GPS receiver, an accelerometer, gyroscope and infrared encoders, to count the rotation of the wheels, as well as its own four wheelbase of agricultural machinery. The modernized GPS coordinate filtration algorithm using a geocheck algorithm is proposed, which according to several successively obtained GPS coordinates calculates the hash received coordinates; if the coordinates have the same hash, it can be argued that the vehicle is in the segment of the area that corresponds to this hash. To determine the physical model position during the movement data from the accelerometer and the gyroscope was processed using Savitzky-Golay and Madgwick filters. With the use of wheels' rotation data, the odometric algorithms for movement and location determining of the agricultural machinery physical model in motion were implemented. **Conclusions:** to improve the accuracy of estimating the location and position agricultural machinery, algorithms complexation of indicators from different navigation systems should be used to reduce the total error. Research results can be applied in the development of new and modifications of existing navigation subsystems of agricultural machinery autonomous control systems.

Keywords: autonomous control system; agricultural machinery; inertial navigation; odometry; satellite navigation.

Introduction

The task of developing and implementing autonomous control systems for aircraft, boats, trucks or cars, forklifts and agricultural transport is quite relevant in today's world. The relevance of such developments is due to human imperfection. Humans, unlike autonomous robots, need breaks for sleep and food, which leads to work stoppages, and fatigue and carelessness can lead to accidents and, as a result, to damage or loss of goods, or even death.

The development and implementation of autonomous control systems is a rather expensive and slow process, but such systems pay off in the long run by reducing net labor, increasing uptime, saving fuel and reducing accidents and product losses. An example of the usefulness of autonomous control systems is the achievements of the American startup Tu Sump. The truck under the control of the autopilot passed the route Nogales (Arizona) - Oklahoma City, with a total length of 1530 kilometers in 14 hours, while a similar route with a driver takes 24 hours [1].

The task of establishing one's own position and location is one of the main tasks facing autonomous control systems, because only knowing your location can correct traffic in case of deviation from the specified route, bypass obstacles and avoid collisions, and so on.

Autonomous control systems for different equipment can be very different from each other. This is due to various factors, among which it is possible to distinguish between the control systems of vehicles depending on the type of work for which the automation of equipment, as well as the characteristics of the environment in which the equipment operates. The environment in which the equipment operates means whether the equipment operates on land, in water or in the air, weather conditions,

as well as characteristic climatic features that may affect the clarity of sensor readings, and features of the environment that affect the choice of sensors, and navigation methods. For example, satellite navigation, which is widely used in mobile technology, works well in open space, but this type of navigation cannot be used to navigate equipment that should work indoors, because the satellite signal is not able to penetrate thick walls. Instead, it is possible to use echolocation indoors, which determines the distance to the walls and obstacles.

Agricultural machinery operates in open spaces where it is difficult to adjust traffic to visual landmarks, such as road signs and markings, or on the basis of echolocation. In some cases, the movement of machinery can be adjusted with the help of visual landmarks – plant sprouts to guide the tractor wheels between the rows. But such types of work as plowing, harrowing or sowing do not have similar guidelines. Also, agricultural machinery works in conditions of dust and dirt, which can affect the sharpness of the image.

Analysis of existing sources and setting the task of research

Existing autonomous control systems for agricultural machinery, to a greater extent, use satellite navigation to determine their location. To improve the location, additional installations are used, the location of which is known with high accuracy, and which are installed next to the field for agricultural machinery and act as an additional signal source. [2, 3].

There are developments on the integration of differential satellite navigation and fuzzy control of agricultural machinery [4, 5]

In the known works the approach to creation of

inertial-satellite navigation system of control of vehicles with use of an artificial neural network for optimization of the used structure of a vector of measurements of navigation subsystems is offered [6, 7].

It is also proposed to use promising developments in the theory of artificial intelligence for the control system of vehicles [8, 9].

Such solutions are either quite expensive, or not accurate enough, or have only theoretical estimates of their operation, so it makes sense to look for other sources to improve the assessment of the location of agricultural machinery.

Aim of the article. This article is devoted to the development and research of methods and algorithms for determining the location and position of an agricultural vehicle model. To achieve this goal, the following objectives are set: to choose methods and algorithms for determining the location and position of agricultural vehicles, select modules and sensors to create a vehicle model, create a physical model of an agricultural vehicle to collect data from modules and sensors while driving, develop and implement methods and algorithms for assessing the location and position of the model during movement, investigate the work of developed methods and algorithms.

Main part

The navigation system is a set of devices, algorithms and software that allow you to orient an object in space. The navigation complex can include both complex navigation systems (for example, a satellite navigation system) and individual instruments that allow you to determine the geographical coordinates of an object or its location by other objects.

Navigation systems carry out navigation using various instruments. Devices such as accelerometers, gyroscopes, magnetometers, echolocators, radars, lidars and other devices have acquired great use.

Today, various systems of autonomous control use such types of navigation as inertial, satellite and odometric.

Inertial navigation is a navigation method that is based on the properties of inertial bodies and is autonomous, that is, it does not require external landmarks or signals. The disadvantage of this type of navigation is that the error obtained from accelerometers and gyroscopes accumulates over time, so the position should be periodically adjusted from another type of navigation system [9, 10].

Satellite navigation is based on the calculation of the distance from the object being tracked to satellite antennas. The accuracy of satellite navigation can be affected by weather conditions, signal reflection from houses or trees, and the quality of receivers. The advantage of satellite navigation is that error does not accumulate over time [10, 11].

Odometry is a method for estimating the movement of wheeled vehicles, which is based on determining the path traveled along its left and right wheels. This method is error sensitive due to the integration of velocity measurements over time to obtain location estimates. In most cases, efficient use of the odometer requires fast and accurate data collection, as well as calibration of instruments [12, 13].

Based on the study, it was decided to conduct research on methods and algorithms for estimating the location and position of transport using satellite, inertial and odometric navigation [14].

To test the efficiency of the algorithms, it was decided to build a simplified model of a vehicle for collecting data from sensors while driving [15]. The created physical model of the agricultural vehicle includes: the NEO-6M module, for reception and processing of the GPS signal; MPU-9250 module, which includes a 3-axis accelerometer, gyroscope and magnetometer; infrared encoders, to obtain information about the rotation of the wheels of the model. The block diagram of the model is shown in fig. 1.

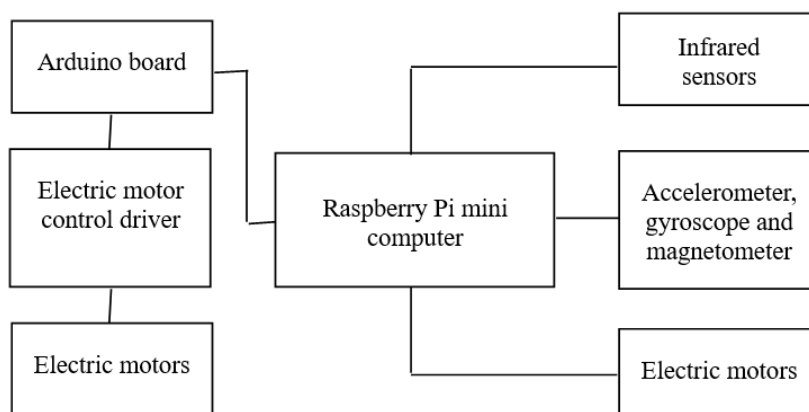


Fig. 1. Block diagram of the model

The view of the assembled physical model is shown in fig. 2.

Data collected during movement was processed on the HP Pavilion 15-n078sr computer, which has an Intel Core i5-4200U processor at 2.3 GHz.

GPS coordinates received from the module are not reliable. The real coordinates of the object being tracked are within a radius of the resulting coordinates. To quickly filter the obtained coordinates, a filter algorithm was developed that is based on the geochex hashing algorithm.

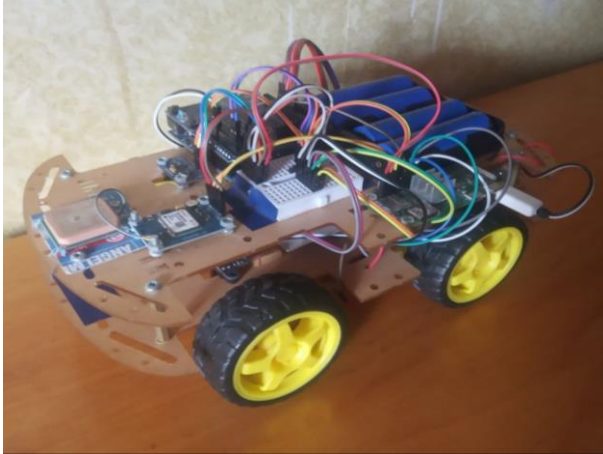


Fig. 2. View of the created physical model

Geochex is a hashing algorithm that converts the value of longitude and latitude to a hash type of a given length [16]. In conversion, each hash corresponds to the center coordinates of a hexagonal area. Thus, the coordinates included in the same area will have the same hash. As the length of the hash increases, the area of hexagonal segments decreases.

The filter algorithm works as follows: several GPS coordinates are obtained; calculating the hash of the obtained coordinates; if the coordinates have a common hash, then we can say that we are in the segment of the area of which corresponds to this hash. Successful filtering of GPS coordinates is possible when the radius of the inner circle of the hexagonal segment is greater than the radius of the GPS error, since in this case the entire drift of the coordinates will be suppressed.

This algorithm requires fewer operations than if we calculated the center of the intersection of the radius of error of the obtained coordinates.

Clarifying GPS coordinates is useful because knowing what area we are in at the moment can adjust location calculations from different sources.

To test the operation of the algorithm, a test drive was conducted in the park. The approximate route can be seen in fig. 3.

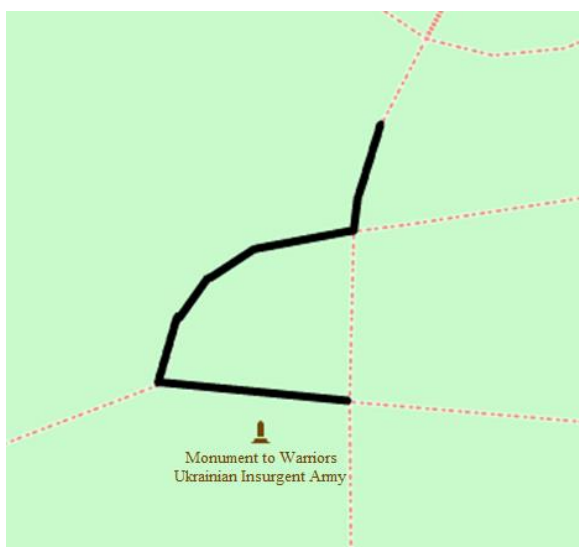


Fig. 3. Approximate route of movement on park

In 166.5 seconds of bout, 170 coordinates were collected, which is about once a second. A hash length of 13 was chosen for filtering. At this length, the radius of the inner circle of the hexagon will be approximately 0.53 meters. The radius of error of the obtained GPS coordinates in the period when the model was not moving was approximately 0.3 meters from the center point. After filtering, there were 68 points left, which belonged to 29 unique hashes. The difference between the coordinates before and after filtering is shown in fig. 4.

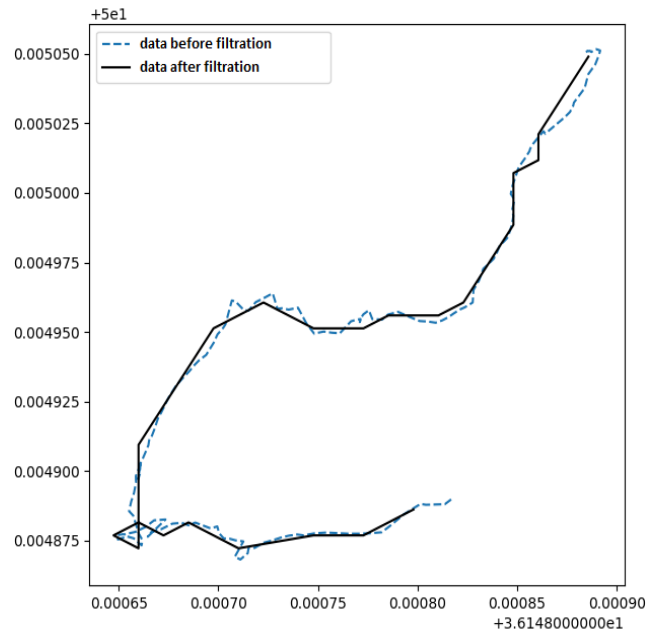


Fig. 4. The difference between the coordinates before and after filtering

Accelerometer and gyroscope data can be used to determine the position of the model. It was decided to use the Madgwick filter for this task.

The Madgwick filter is a filter developed by Sebastian Madgwick to determine the position in space from the readings of gyroscope, accelerometer and, in some implementations, magnetometer sensors. This filter calculates the position in the form of a quaternion [17]. The general idea of the Madgwick filter is to determine the position of the object by combining estimates of the position of gyroscopic measurements and the direction obtained by measuring the accelerometer. The obtained quaternion was reduced to the values of roll, pitch and yaw in the form from π to $-\pi$ radians.

When analyzing the data obtained from the accelerometer and gyroscope, it was found that during the movement of the model, the data become very constricted, which leads to a large error in the calculation of the quaternion. It was decided to use the Savitsky-Goley filter to filter the data.

The Savitsky-Goley filter is a digital filter that can be applied to a set of digital data points in order to smooth the data, i.e. to increase the accuracy of the data without distorting the signal trend [18]. This is achieved in a process known as convolution, by fitting successive subsets of adjacent data points with a low-degree polynomial by the method of linear least squares. When the data points are equidistant, you can find 26 least

squares analytical solutions in the form of a single set of "convolution coefficients" that can be applied to all subsets of data to estimate the smoothed signal (or smoothed signal derivatives) at the center point of each subset.

The Savitsky-Goley filter has two variable parameters: the length of the window and the order of the polynomial. To filter the obtained data, it was decided that the length of the window will be 21, and the order of the polynomial - 3. These numbers are due to the fact that at such values the estimate of model rotations was similar to that which was actually with clearly visible stopping moments. An example of data before and after filtering is shown in fig. 5.

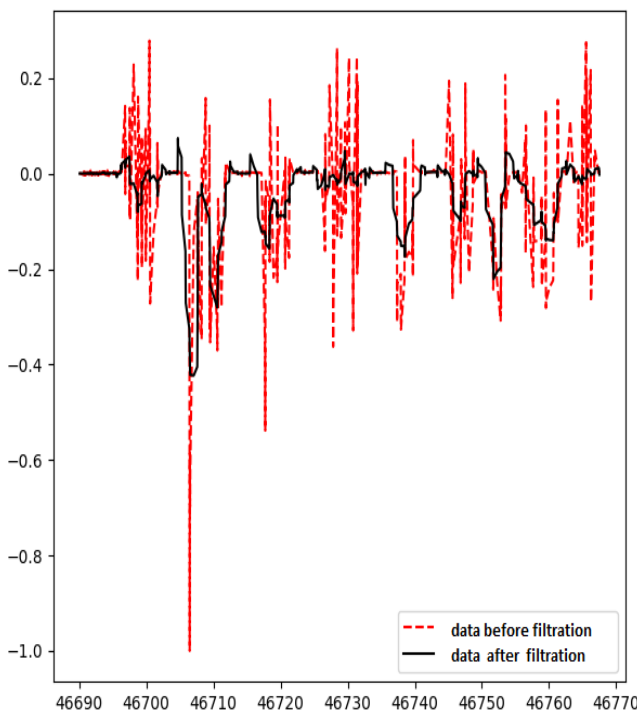


Fig. 5. Example of data from gyroscope gz before and after filtering

To assess the situation using Savitsky-Goley and Madgwick filters, a test run was performed indoors. Initially, the model moved forward and to the right. When the model turned about 90 degrees from the initial state, it stopped and began to move back and forth. Turning approximately 135 degrees from the initial state, the model stopped again and began to move forward and to the right. When the model turned almost 180 degrees from the initial state, it stopped and, passing back and to the left, returned to 180 degrees. The view of the calculated change of position during movement is shown in fig. 6.

To improve position calculations, you can use additional accelerometers and gyroscopes, which will reduce sensor error.

Information about the position of the model while driving is very useful for improving location calculations from navigation systems. For example, when moving uphill, the movement in the X and Y coordinates will be less than in a straight line. Knowing the position of the vehicle when entering the mountain, you can adjust the calculation.

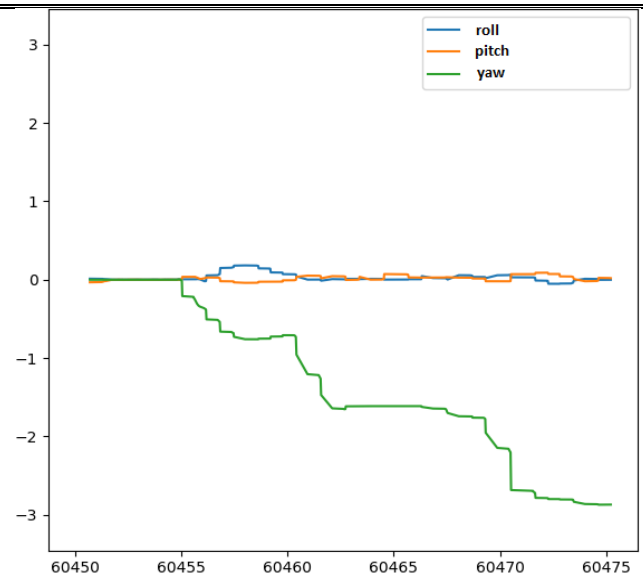


Fig. 6. The estimate of the position during the movement of the model

Odometric estimate of the model displacement is calculated on the basis of information about the distance traversed by the wheels. Infrared encoders monitor the speed of the wheels thanks to the disks with twenty holes attached to the wheels. When the hole passes the encoder, a signal is generated indicating that the wheel has made one twentieth (1/20) revolution.

The distance traversed by the wheel is calculated by the formula:

$$L = \frac{n_1 + n_2}{2N} \pi D, \quad (1)$$

where L – total path travelled by the side of the model; n_1 and n_2 – number of rear and front wheel encoder readings; N – number of slots in disk; D – wheel diameter.

The length of the traversed path in the center of the model (L_c) will be half the sum of the traversed path on the left and right sides.

Rate deviation is calculated by formula:

$$Q_{(t+1)} = Q_t + \frac{L_r + L_l}{2 \cdot W}, \quad (2)$$

where $Q(t)$ – the robot position at a time t ; L_r – distance travelled by the right side of the model; L_l – distance travelled by the left side of the model; W – the distance between the centers of the wheels of the left and right sides.

For the image of coordinates on the map it is possible to calculate Cartesian coordinates:

$$X_{(t+1)} = X_{(t)} + L_c \cdot \cos(Q_{(t+1)}), \quad (3)$$

$$Y_{(t+1)} = Y_{(t)} + L_c \cdot \sin(Q_{(t+1)}), \quad (4)$$

Data for testing the algorithm were obtained during data collection from the accelerometer and magnetometer.

In fig. 7 shows the calculated displacement of the model. The triangles show the position of the model at a given point in time. You can see that sometimes a long time passes between calculations. This behavior is due to the fact that at these times the computer resources were given to third-party processes, while information from infrared encoders was not lost, which allowed to correctly calculate the movement.

At the end of the movement, the error was about three centimeters and ten degrees.

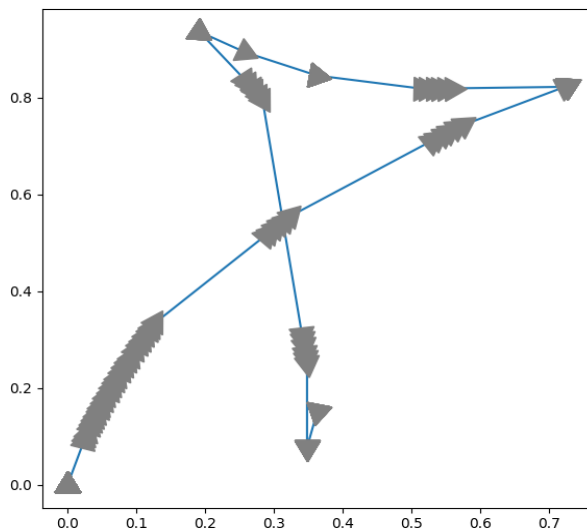


Fig. 7. The calculated trajectory of the model

Comparison of the calculation of the position by the odometric algorithm and the Madgwick filter is shown in fig. 8.

The obtained calculations of the position of the model during movement have a similar tendency, however, the calculation of the Madgwick filter is less clear due to the error that was obtained from the sensors. In the worst case, the difference between the indicators was about 20 degrees. Although the odometric calculation algorithm has clearer indicators, but this method does not take into account the slippage of the wheels, the movement of slopes and uneven roads. These shortcomings can be compensated by adjusting the results based on several different methods of position assessment and displacement.

Table 1 shows the calculations of errors from different navigation systems during the movement of the model.

Table 1. Calculations of errors of navigation systems

Errors	Deviation of the calculated indicators from the real ones
GPS error radius	≈ 0.3 m
GPS error radius after filtering	≤ 0.5 m
The difference between the actual position and the estimated odometer at the end of the path	~ 3 sm., $\sim 10^\circ$
The difference between the odometer and the Madgwick filter	$\leq 20^\circ$

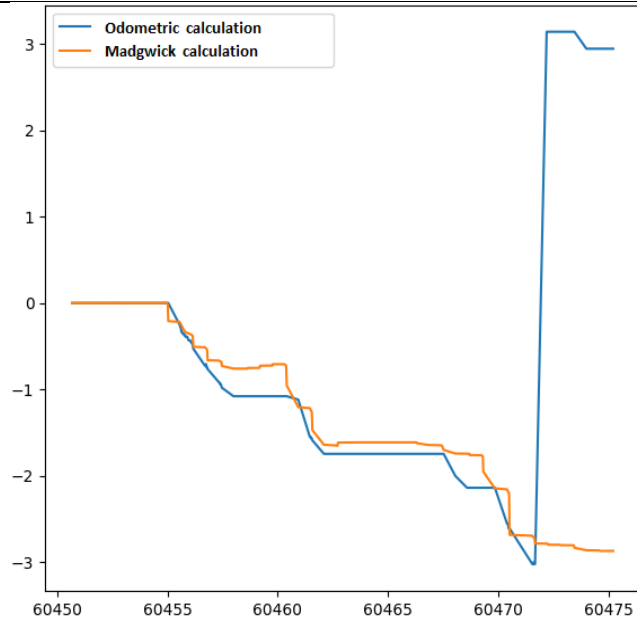


Fig. 8. The difference between odometric position calculation and Madgwick filter calculation

Conclusions

The article developed and investigated methods and algorithms for estimating the location and position of the vehicle while driving.

To test the efficiency of the methods, a physical model of an agricultural vehicle was created to obtain data from modules and sensors while driving.

An algorithm based on the geochex hashing algorithm has been developed to filter GPS coordinates obtained while moving. The filtering algorithm works as follows: several GPS-coordinates are obtained; the hash of the received coordinates of coordinates is calculated; if the coordinates have a common hash, then we can say that we are in a segment of the area to which this hash corresponds. This algorithm requires fewer operations than the standard, which calculates the center of the intersection of the radius of error of the obtained coordinates.

To determine the position of the model while driving, a Madgwick filter was used, which calculates the position on the indicators of the accelerometer and gyroscope. To improve the data obtained from accelerometers and magnetometers, a Savitsky-Goley filter was used, which is able to filter digital signals without changing their trend.

To estimate the movement of the model during movement, an odometric algorithm was used, which calculates the movement of wheeled vehicles in terms of wheel rotation.

To improve the assessment of the location and position of vehicles should use an algorithm for combining indicators from different navigation systems to reduce the total error.

The results of the study can be used in the development of new and modification of existing navigation systems of agricultural machinery.

References

1. Kolodny, L. (2021), "TuSimple says its self-driving trucks shaved 10 hours off a 24-hour run", available at : <https://www.cnbc.com/2021/05/19/tusimple-self-driving-trucks-saved-10-hours-on-24-hour-run.html> (last accessed 01.06.2021).
2. "An Introduction to GNSS", available at : <https://novatel.com/an-introduction-to-gnss/> (last accessed 01.06.2021).
3. Mihajlow, R., Demirev, V. (2018), "Application of GPS navigation in agricultural aggregates", *Annual Journal of Technical University of Varna*, Vol. 2, No. 2, P. 14–19. DOI: <https://doi.org/10.29114/ajtuv.vol2.iss2.84>
4. Li, Y., Cao, Q., Liu, F. (2020), "Design of control system for driverless tractor", *Proceedings of the MATEC Web of Conferences CSCNS2019*, Vol. 309, 04001, 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202030904001>
5. Kholodyuk, O. (2020), "Global navigation satellite systems and their role in precision agriculture technologies", *Engineering, Energy, Transport AIC*, No. 2 (109), P. 71–87. DOI: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-2-8>
6. Makarenko, V. G., Bogomolov, A. V., Rudakov, S. V., Podorozhnyak, A. A. (2007), "Technology for constructing an inertial-satellite navigation system for controlling vehicles with neuronet optimization of the composition of the measurement vector" ["Tekhnologiya postroyeniya inertial'no-sputnikovoy navigatsionnoy sistemy upravleniya transportnymi sredstvami s neyrosetevoy optimizatsiei sostava vektora izmereniy"], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, No. 1, P. 39–44, available at : <http://novtex.ru/mech/mech07/archiv01.htm> (last accessed 01.06.2021).
7. Colantoni, A., Monarca, D., Laurendi, V., Villari, M., Gambella, F., Cecchini, M. (2018), "Smart Machines, Remote Sensing, Precision Farming, Processes, Mechatronic, Materials and Policies for Safety and Health Aspects", *Agriculture*, Vol. 8, No. 4 (47), 11 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture8040047>
8. Parzhin, Y., Kosenko, V., Podorozhniak, A., Malyeyeva, O., Timofeyev, V. (2020), "Detector neural network vs connectionist ANNs", *Neurocomputing*, Vol. 414, P. 191–203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.07.025>
9. "Inertial navigation system: how it works" ["Inercial'naja navigatsionnaya sistema: kak jeto rabotaet"], available at : <https://rostec.ru/news/kak-eto-rabotaet-inercialnaya-navigatsionnaya-sistema/> (last accessed 01.06.2021).
10. Wang, H., Noguchi, N. (2021), "Real-time states estimation of a farm tractor using dynamic mode decomposition", *GPS Solutions*, No. 25:16, 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-020-01051-5>
11. "Principles of satellite navigation" ["Principy sputnikovoj navigacii"], available at : <https://www.glonass-iac.ru/guide/navfaq.php> (last accessed 01.06.2021).
12. "Odometry" ["Odometrija"], available at : <http://robocraft.ru/blog/technology/736.html> (last accessed 01.06.2021).
13. Poddar, S., Kottath, R., Karar, V. (2018), "Evolution of Visual Odometry Techniques", available at : <https://arxiv.org/abs/1804.11142> (last accessed 01.06.2021).
14. Sobol, V., Podorozhniak, A. (2021), "Inertial navigation systems of agricultural machinery" [Systemy inertialnoi navihatsii silskohospodarskoi tekhniki], available at : <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/52866> (last accessed 01.06.2021).
15. Sobol, V., Podorozhniak, A. (2020), "Automation of agricultural machinery" ["Avtomatyzatsiya roboty silskohospodarskoi tekhniki"], available at : <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/52853> (last accessed 01.06.2021).
16. "GeoHex", available at : <https://sites.google.com/site/geohexdocs/> (last accessed 01.06.2021).
17. "Madgwick Filter", available at : <https://nitinjsanket.github.io/tutorials/attitudeest/madgwick> (last accessed 01.06.2021).
18. "Savitzky-Golay Filter", available at : http://www.statistics4u.info/fundstat_eng/cc_filter_savgolay.html (last accessed 01.06.2021).

Received 27.05.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Подорожняк Андрій Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри обчислювальної техніки та програмування, Харків, Україна; email: andrii.podorozhniak@kpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6688-8407>.

Подорожняк Андрей Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", доцент кафедры вычислительной техники и программирования, Харьков, Украина.

Podorozhniak Andrii – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of the Department of Computer Engineering and Programming, Kharkiv, Ukraine.

Баленко Олексій Іванович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри обчислювальної техніки, Харків, Україна; email: oleksii.balenko@kpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2314-0984>.

Баленко Алексей Иванович – кандидат технических наук, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", доцент кафедры вычислительной техники и программирования, Харьков, Украина.

Balenko Oleksii – PhD (Engineering Sciences), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of the Department of Computer Engineering and Programming, Kharkiv, Ukraine.

Соболь Валентин Вікторович – магістр, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", студент кафедри обчислювальної техніки та програмування, Харків, Україна; email: valentyn.sobol@cit.kpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6541-4971>.

Соболь Валентин Викторович – магистр, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", студент кафедры вычислительной техники и программирования, Харьков, Украина.

Sobol Valentyn – Master of Computer Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Student of the Department of Computer Engineering and Programming, Kharkiv, Ukraine.

МОДЕЛЬ ТА АЛГОРИТМИ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ ТА ПОЛОЖЕННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ ПІД ЧАС РУХУ

Предметом дослідження є навігаційна підсистема системи автономного управління для визначення місцезнаходження та положення сільськогосподарської техніки під час руху. **Мета** роботи – розробка та дослідження моделі і алгоритмів для визначення місцезнаходження та положення мобільної сільськогосподарської техніки з використанням фізичної моделі. В статті вирішуються наступні **завдання**: розробка фізичної моделі сільськогосподарської техніки для збору інформації від датчиків під час руху, подальша розробка та дослідження застосовності алгоритмів визначення місцезнаходження та положення. Використовуються такі **методи**: методи математичної статистики, методи теорії інформаційних систем та обробки даних, методи фільтрації випадкових сигналів. Отримано наступні **результати**: під час проведених досліджень було створено фізичну модель сільськогосподарського транспортного засобу для збору інформації з датчиків під час руху. До складу моделі входять GPS-приймач, акселерометр, гіроскоп та інфрачервоні енкодери, для підрахунку обертів коліс, а також сама чотирьохколісна база транспортної техніки сільськогосподарського призначення. Було запропоновано модернізований алгоритм фільтрації GPS-координат з використанням алгоритму хешування геохеш, який за декількома послідовно отриманими GPS-координатами виконує розрахунок хешу отриманих координат; якщо координати мають спільний хеш, то можна стверджувати, що транспортний засіб знаходиться в сегменті площі, якій відповідає даний хеш. Для визначення положення фізичної моделі під час руху дані від акселерометру та гіроскопу було оброблено за допомогою фільтрів Савицького-Голея та Маджвіка. Із застосуванням даних про обертання коліс було реалізовано одометричні алгоритми визначення переміщення та місцезнаходження фізичної моделі сільськогосподарського транспортного засобу під час руху. **Висновки**: для підвищення точності оцінки місцезнаходження і положення сільськогосподарських транспортних засобів слід використовувати алгоритми комплексування показників від різних навігаційних систем для зменшення сумарної похибки. Результати дослідження можуть бути застосовані при розробці нових, та модифікації існуючих навігаційних підсистем автономних систем управління сільськогосподарської техніки.

Ключові слова: система автономного управління; сільськогосподарська техніка; інерційна навігація; одометрія; супутникова навігація.

МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ ВО ВРЕМЯ ДВИЖЕНИЯ

Предметом исследования является навигационная подсистема системы автоматизированного управления для определения местонахождения и положения сельскохозяйственной техники во время движения. **Цель** работы – разработка и исследование модели и алгоритмов для определения местонахождения и положения мобильной сельскохозяйственной техники с использованием физической модели. В статье решаются следующие **задачи**: разработка физической модели сельскохозяйственной техники для сбора информации от датчиков во время движения, дальнейшая разработка и исследование применимости алгоритмов определения местоположения и положения. Используются следующие **методы**: методы математической статистики, методы теории информационных систем и обработки данных, методы фильтрации случайных сигналов. Получены следующие **результаты**: в ходе проведенных исследований была создана физическая модель сельскохозяйственного транспортного средства для сбора информации с датчиков во время движения. В состав модели входят GPS-приемник, акселерометр, гироскоп и инфракрасные энкодеры, для подсчета оборотов колес, а также сама четырехколесная база транспортной техники сельскохозяйственного назначения. Был предложен модернизированный алгоритм фильтрации GPS-координат с использованием алгоритма хеширования геохеш, который по нескольким последовательно полученным GPS-координатами выполняет расчет хеша полученных координат; если координаты имеют общий хеш, то можно утверждать, что транспортное средство находится в сегменте площади, которой соответствует данный хеш. Для определения положения физической модели во время движения данные от акселерометра и гироскопа было обработано с помощью фильтров Савицкого-Голея и Маджвика. С применением данных об обращении колес был реализован одометрический алгоритм определения перемещения и местонахождения физической модели сельскохозяйственного транспортного средства во время движения. **Выводы**: для повышения точности оценки местонахождения и положения сельскохозяйственных транспортных средств следует использовать алгоритмы комплексирования данных от различных навигационных систем для уменьшения суммарной погрешности. Результаты исследования могут быть применены при разработке новых и модификации существующих навигационных подсистем автономных систем управления сельскохозяйственной техникой.

Ключевые слова: система автономного управления; сельскохозяйственная техника; инерционная навигация; одометрия; спутниковая навигация.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Подорожняк А. О., Баленко О. І., Соболь В. В. Модель та алгоритми визначення місцезнаходження та положення сільськогосподарської техніки під час руху. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 2 (16). С. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.032>

Podorozhniak, A., Balenko, O., Sobol, V. (2021), "Model and algorithms for determining the location and position of agricultural machinery during the movement", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (16), P. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.032>

S. CHALYI, V. LESHCHYNSKYI

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR THE INTERACTIVE CONSTRUCTION OF EXPLANATIONS IN INTELLIGENT INFORMATION SYSTEMS BASED ON THE PROBABILISTIC APPROACH

Subject: the use of the apparatus of temporal logic and probabilistic approaches to construct an explanation of the results of the work of an intelligent system in order to increase the efficiency of using the solutions and recommendations obtained. **Purpose:** development of a method for constructing explanations in intelligent systems with the ability to form and evaluate several alternative interpretations of the results of the operation of such a system. **Tasks:** justification for the use of the black box principle for interactive construction of explanations; development of a pattern explanation model that provides for probabilistic estimation; development of a method of interactive construction of explanations on the basis of the probabilistic approach. **Methods:** methods of data analysis, methods of system analysis, methods of constructing explanations, models of knowledge representation. **Results:** A model of the explanation pattern is proposed, which contains temporal regulations reflecting the sequence of user interaction with an intelligent system, which allows the formation of explanations based on a comparison of the actions of the current user and other well-known users. An interactive method for constructing explanations based on a probabilistic approach has been developed; the method uses patterns of user interaction with an intelligent system and contains phases of constructing patterns of explanations and forming explanations using the obtained patterns. The method organizes the received explanations according to the likelihood of use, which makes it possible to form target and alternative explanations for the user. **Conclusions:** The use of the black box principle for the development of a probabilistic approach to the construction of explanations in intelligent systems has been substantiated. A model of a pattern of explanations based on temporal regulations is proposed. The model reflects the sequence of user interaction with the intelligent system when receiving decisions and recommendations and contains an interaction pattern as part of temporal regulations that have weight, and also determines the likelihood of using the user interaction pattern. An interactive method for constructing explanations has been developed, considering the interaction of the user with the intelligent system. The method includes phases and stages of the formation of regulations and patterns of user interaction with the determination of the probability of their implementation, as well as the ordering of patterns according to the probability of their implementation. The implementation of the method was carried out when constructing explanations for recommender systems.

Keywords: intelligent system; explanation; pattern; explained artificial intelligence; regulations.

Introduction

Considerable attention in the field of development of intelligent systems is paid to the integration of decision-making processes and the formation of explanations to the received decisions and recommendations [1]. The problem of explanations in intelligent systems is largely a consequence of the problem of user confidence in the results of such systems. Decisions received from the intelligent system, recommendations should be implemented by the user in the process of solving his practical problems. However, the lack of understanding of the algorithms and mechanisms that allowed to obtain this solution, greatly complicates the solution of this problem. The explanation should provide the user with causal relationships between the input data and the result obtained so that the latter understands (perhaps in a simplified form) the process of forming a solution in an intelligent information system [2].

This problem has become especially relevant in recent years, with the widespread introduction of machine learning methods in the construction of intelligent systems. To solve this problem, the concept of explained artificial intelligence (XAI Explainable Artificial Intelligence) was proposed [3]. This concept assumes that the user must receive a rational explanation of the decisions, actions or recommendations of the intelligent system. This configuration of the intelligent system makes it possible to answer a number of questions that determine the possibility of using the obtained solution by the user. Key of these questions are related to the reasons for the

formation of the proposed solution and its possible alternatives. The importance of comparison with alternatives is determined by the peculiarities of human perception of explanations. Usually at least two alternatives are compared: the one proposed and the one that has not been implemented [4, 5]. The explanation should also determine the conditions of use of the obtained solution and the causes of user errors when applying the recommendations of the intelligent system. Thus, the construction of explanations involves the formation of several interpretations and the choice of one of them according to a certain criterion.

Analysis of recent research and publications

Existing approaches to the construction of explanations mainly involve the formation of a separate module of explanation, which operates in parallel with the decision-making process in the intelligent system [6], or the construction of models that are interpreted [7]. Decisions on the choice of method of constructing explanations in this case are made at the stage of designing an intelligent system. This feature limits the possibility of using these approaches in existing intelligent systems. A separate direction of construction of explanations is connected with addition of existing systems by additional functionality of explanations without disturbance of their current work. The practical advantages of this approach are related to the increased ease of use of functioning systems, such as e-commerce systems, recommendation systems, etc. However, the

existing approaches to supplementing intelligent systems with explanations are focused primarily on the selection of key elements of the solution [8] or to determine the temporal characteristics of users [9].

It should be noted that the solution of the problem of forming a set of alternative explanations and the choice of explanation for the user taking into account the given criterion is not given enough attention. This does not allow to justify the proposed solution for the user, taking into account the psychological characteristics of the perception of the explanation [4]. Alternative explanations can be arranged on the basis of criteria that take into account the properties of the subject area. However, such criteria are in most cases contradictory. Therefore, an external indicator can be used to organize the explanations, which determines their importance directly to the user. In works [10, 11] the possibility of using the probabilistic criterion for an estimation of results of a conclusion in knowledge bases, and also search results in information - search systems was proved. This indicates the importance of developing a method of constructing explanations, which would provide the possibility of constructing several versions of explanations with their subsequent probabilistic assessment.

The aim of the article is to develop a method of constructing explanations in intelligent systems with the possibility of forming and evaluating several alternative interpretations of the results of such a system.

To achieve this goal, the following tasks are solved in the work:

- justification for the use of the black box principle for interactive construction of explanations;
- development of a model of explanation pattern, which provides for probabilistic estimation;
- development of a method of interactive construction of explanations on the basis of the probabilistic approach.

Main part

In order to substantiate the interactive method of constructing explanations, we will identify the key differences in the formation of interpretations using the principles of black and white boxes. Interpretation, according to the principle of the white box, is built into the decision-making model and fully reflects the process of obtaining results in the intelligent system. Depending on the complexity of the problem, hybrid approaches are used [12-15] or simplified models that can be directly interpreted [16-18]. In the first case, the main attention is paid to the visualization and reflection of the semantics of the decision-making process. In the second case, the display of semantics is a property of models and methods of decision-making in the intelligent system.

Features of the explanation on the principle of the black box are given in table 1. The key differences, first, are to build a simplified description of the dependencies that underlie the work of the intelligent system.

Table 1. Characteristics of the concept of constructing explanations based on the principle of "black box"

Differences of the concept	Advantages	Disadvantages	Existing approaches
Explanation in addition to the basic model used in the intelligent system	Ability to supplement the existing system with an explanatory function	The process of explanation and decision-making processes in the intelligent system are performed in parallel	Formation of an explanation based on the analysis of input and output information of the intelligent system [8]
The explanation and the model work in parallel, can use different data sets	Ability to build a "plausible" explanation for the user based on a simplified description of the model or algorithm of the intelligent system	The use of simplified causal relationships can lead to misinterpretations or misperceptions	Construction of an explanation based on temporal regulations [19]

Second, only a subset of the data used by the intelligent system in forming the solution is used for explanation. Third, the possibilities of the black box explanation can be supplemented by existing intelligent systems without the need to redesign the latter. Thus, the formation of explanations on the principle of a black box provides considerable flexibility and creates conditions for clarification and improvement of explanations without direct modification of the functioning intelligent system.

A key disadvantage of such parallel to decision-making formation of explanations is the possibility of creating misinterpretations. To overcome this shortcoming, it is necessary to adjust the explanations online, taking into account information from users. These features determine the relevance of the use of the black

box principle in the development of an interactive method of forming explanations in intelligent systems.

Thus, to integrate the advantages of the proposed approaches, it is necessary to form explanations in the form of dependencies that allow to display the semantics of the result taking into account the needs of the user of the intelligent system. Such needs are usually determined during system development, and adjusted in the process of user interaction with the intelligent system. Adjustments make it possible to take into account changes in user requirements over time. To take into account the changes, it is advisable to form several possible explanations and offer the user the most acceptable option for an a priori defined indicator.

The proposed approach has the following key differences that reflect the results of the analysis:

- information on user interaction with the intelligent system is used to construct explanations;

- the complex pattern which defines an order in time of interaction of the user with intelligent system is estimated;

- assessment of the pattern of interaction with the user is based on the scales of temporal dependencies that are part of it;

- the probability of using the explanation is calculated depending on the weights of the patterns that form the specified explanation.

The first difference of the approach makes it possible to interactively adjust the explanation depending on the actions of the user of the intelligent system. The explanations take into account the simplified causal links between user actions and system response.

The second feature of the approach is related to the adaptation of the explanation to a specific subject area. The pattern of interaction with the user can be formed on the basis of expert knowledge on the tasks to be solved in the subject area. It is also possible to automatically build a pattern based on temporal knowledge. That is, the analysis of user interaction over time makes it possible to identify typical sequences of user actions on decisions or recommendations of the intelligent system. For example, when interacting with a referral system, you can select typical patterns of purchases (or waivers) after receiving the recommended list of products or services. The combination in one pattern of reactions of several users makes it possible to offer the most plausible explanation for similar consumers.

The third difference of the approach provides an opportunity to determine the weight of a complex pattern based on its basic structural elements. Object-relationship-subject triplets can be used as such elements. In the case of the "if" relationship, such threes are transformed into production regulations. When using the temporal ordering between the facts, the above three become temporal regulations [20].

The fourth feature determines the method of calculating the probabilities of explanations due to the weights of the patterns. In turn, the weights of the patterns and their components are determined by the known probabilities of the user's pattern actions.

Pattern explanation model.

Formally, information about the interaction of the intelligent system with the user can be represented as a sequence of events ordered in time:

$$E_u = \langle e_{u,1}, \dots, e_{u,i}, \dots, e_{u,|E_u|} : e_{u,i} = \{a_{u,i}\} \rangle, \quad (1)$$

where u – index of the user interacting with the intelligent system; $e_{u,n}$ – n – an event that reflects the results of user u interaction with the system; $|E_u|$ – the number of elements in an ordered set E_u ; $a_{u,i}$ – l – a variable that contains the result or characteristics of interaction with the user u in a particular aspect.

For example, for an e-commerce system, this sequence has the form:

$$E_u = \langle \text{purchase_product1}, \dots, \text{purchase_product_n}, \dots \rangle. \quad (2)$$

Characteristics of the n – events for this example contain the date and time and have the following meaning:

$$e_{u,n} = \{ \text{product_code}, \text{price}, \text{quantity}, \text{date_time} \}. \quad (3)$$

The interaction of several users with an intelligent system makes it possible to determine the set of such sequences $E = \{E_u\}$. All of these sequences are ordered in time, even if they do not have timestamps. This ordering makes it possible to compare sequences and establish common patterns of interaction for multiple users. For the given example (2) it is possible to define patterns of a choice of the same goods by several consumers. For example, consumers successively bought goods 1, 2 and 3. Or after goods 1 they bought goods 3. That is, the elements of the pattern determine the order of the consumer's actions in time. This order is set through a continuous sequence of elections or intervals between elections. In the second case, intermediate user actions are skipped.

Thus, the user selection pattern may consist of at least two basic elements that can be formalized using temporal logic operators. In [11, 20] it is proposed to represent such dependences by temporal regulations of X and F-type. The basic template of interaction with the user using the specified regulations is given in fig. 1.

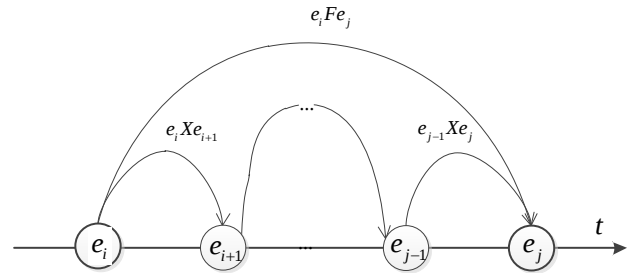


Fig. 1. Explanation pattern

The formal representation of this pattern has the form:

$$\pi = (e_i F e_j) \wedge (e_i X e_{i+1} \dots e_{j-1} X e_j), \quad (4)$$

where $e_i X e_{i+1}$ – two consecutive events e_i and e_{i+1} ; $e_i F e_j$ – two events e_i and e_j , between which there are events $e_{i+1}, \dots, e_{j-1}$; t – time line.

Events e_i are related to relevant events $e_{u,i}$ in the following way:

$$(\forall u) e_i = (e_{1,i} \vee e_{2,i} \vee \dots \vee e_{u,i}). \quad (5)$$

For the given example of sequences of events in recommendation systems, expression (5) has the following meaning: e_i is an event of purchase of a certain product by one of the users u .

The probability of interaction in the form of (4) between the user and the intelligent system is defined as the ratio of the number of patterns π to the number of all

patterns $|\Pi|$ that were used in the process of interaction with the user in forming a solution:

$$P(\pi) = \frac{n * \pi}{|\Pi|}, \quad (6)$$

where n – the number of patterns of type (4) that were used in the decision-making process; Π – the set of all patterns of interaction with the user.

Thus, the model of the pattern (4) has probabilistic characteristics. Pattern (4) consists of temporal regulations that reflect the basic aspects of the process of user interaction with the intelligent system. Therefore, such regulations may be part of different patterns. The more patterns the regulation uses, the more typical the latter is. This characteristic is set by the weight of the regulations. Accordingly, the greater the weight of the regulations in the pattern, the higher the probability of its use. That is, the probability (6) can be determined by the total weight of the regulations in the pattern. On the other hand, if the probability of a pattern is known, then we can find the weights of X and F-type regulations in its composition. The peculiarity of the calculation of weights is that the same regulations $e_i X e_{i+1}$ and $e_i F e_j$ can be used in different patterns of interaction with the user. Therefore, the relationship between probability and regulation weights is represented by the Gibbs probability distribution. When calculating the weights of the regulations for this distribution can be used one of the variants of the gradient descent method.

Thus, the model of the pattern of explanations, which is intended for interactive construction of explanations taking into account the probabilistic aspect, has the form:

$$M = \{\pi, W, P(\pi)\}, \quad (7)$$

where W – the set of weights of temporal regulations in the pattern.

It should be noted that the parallel or sequential combination of the basic pattern (4) allows you to create new patterns that define more complex processes of interaction with the user. Models of such complex patterns have the same elements as the model (7).

This model makes it possible to form two options for constructing explanations taking into account the interaction of the intelligent system with the user: the selection of the most probable pattern π of the known; construction of a new explanation of the regulations that are part of the pattern. The first option requires simple calculations and therefore can be used in the online mode of the intelligent system. The second option requires the probabilistic derivation of new patterns from known regulations and the calculation of their probability based on the weights of the regulations. Therefore, such explanations require preliminary calculations in offline mode.

Interactive method of constructing explanations.

The proposed method uses model (7) and contains the phases of construction of explanation patterns and formation of explanations.

The pattern construction phase is designed to form patterns of interaction with the user based on data about his actions. This phase contains the following steps.

Stage 1. Determination of temporal dependences of X and F-type.

Step 1.1. Forming a set of event pairs for sequences E_u .

Step 1.2. Formulation of regulations $e_i X e_{i+1}$ and $e_i F e_j$ taking into account (1) and (5).

Stage 2. Formation of patterns of interaction with the user (4).

Step 3. Calculation of the probabilities of using patterns according to (6).

Stage 4. Calculation of the weights of the regulations in the pattern.

The result of this phase is a set of pattern models (7).

The phase of formation of explanations contains stages of a choice of existing or construction of new patterns of interpretations.

Step 1. Selection of a set of patterns of explanations by condition:

$$(e_i = e_{u,i}) \wedge (e_j = e_{u,j}). \quad (8)$$

Under this condition, the existing patterns are selected, which contain similar initial and final events. The comparison of events is performed according to their characteristics, which were presented in expression (1). If the set obtained in step 1 is empty, then there is a transition to step 3.

Stage 2. Arranging patterns by probability (6).

Stage 3. Formation of a set of new patterns from the temporal regulations obtained in stage 1. Formation occurs using known methods of probabilistic inference [11]. Patterns are sorted by the total weight of the regulations in their composition.

Step 4. Presentation of the explanation on the basis of the first pattern. Other patterns are used as alternatives to justify other aspects of the decision.

The result of this phase is an explanation based on certain patterns.

Consider an example of forming an explanation using this method for users of the recommendation system. Such systems are usually part of e-commerce systems. They offer the user a personal list of goods or services that suits his interests.

The purpose of explaining the recommendations is to justify the goods or services offered to the user on the basis of changes in demand for them. The sequence of purchases in the form (2) is used as input data. The pattern of type (4) reflects the sequence of purchases of the target product by different consumers. Changing the number of purchases for events e_i and e_j reflects the dynamics of consumer demand. Therefore, the weights of the regulations in this case can be calculated simplified, based on the difference in purchases. The total weight of the regulations reflects the change in purchases due to fluctuations in intermediate events $e_{i+1} \dots e_{j-1}$. Therefore, in this case, the patterns can be sorted by the total weight of the regulations. Accordingly, the explanation interface

represents the changes in demand for this template, presented in numerical form or in the form of a bar chart. As an alternative, it is advisable to use explanations for changes in demand for similar but not offered goods. The

implementation of this approach to justify the choice of target product in the recommendation system based on data on wholesale sales in supermarkets is presented in table 2.

Table 2. Product sales explanation results for recommendation system

Name	Explanation of the current position	Alternative position 1	Alternative position 2
Sales by days	28;2;24;31	14; 18; 26; 11	2;1;4;1;2
The sum of the normalized weights of the regulations for the pattern	1,097	0,336	0,147
Aggregate increase/decrease in sales	increase	decrease	increase

Sales patterns for the current week were used in this experiment. The total sales of goods for 1 day were considered as events. The explanation pattern makes it possible to present a normalized change in weight, which reflects the aggregate change in demand for the product, taking into account fluctuations by day. The presentation in the form of a change in weights for the target product and for its two alternatives shows that over the last week the demand for the target product has increased the most by day compared to similar alternatives. This explanation provides simplified causal links that describe to the user the decision-making process in the recommendation system.

Conclusions

The substantiation of the use of the black box principle to the development of an interactive method of constructing explanations in intelligent systems is performed. The results of the substantiation showed that the application of this principle creates conditions for supplementing the functionality of existing intelligent systems with the possibility of explaining the results of their work without significant modification of such systems. This advantage is due to the fact that the explanation of this principle is formed in parallel with the decision-making process and uses a different subset of data compared to the information used in decision-making.

A model of the pattern of explanations based on temporal regulations is proposed. The model displays a fragment of the sequence of user interaction with the intelligent system in obtaining decisions and recommendations and contains a pattern of temporal regulations, taking into account the weight of these

regulations in the composition, as well as the probability of using the pattern. Explanation patterns can be formed on the basis of information about the sequence of interaction of several users with an intelligent system, which makes it possible to predict the actions of the current user and form appropriate explanations. The combination of several patterns makes it possible to describe the process of user interaction with the intelligent system as a whole.

An interactive method of constructing explanations has been developed, which takes into account the user's interaction with the intelligent system and uses the probabilistic estimation of interpretation patterns. The method contains phases of pattern construction for construction of explanations and formation of explanations. In the first phase, the regulations and patterns of interaction with the user are formed, as well as the probability of their implementation is determined. In the second phase, the existing patterns of explanations are selected and arranged according to the probability of realization. In the absence of realized patterns in this phase, new patterns are formed from the existing temporal regulations. Constructed patterns are sorted by the total weight of the regulations and used to construct explanations.

Further development of the proposed method involves the use of context-oriented patterns of user actions, which would take into account changes in the conditions in which the consumer chooses goods or services. It is planned to use temporal regulations of the "Until" type to formally describe changes in the context. Such regulations make it possible to take into account changes in individual properties of goods and situations in which the user interacts with the recommendation system.

References

1. Zhang, Y., Chen, X. (2020), "Explainable recommendation: A survey and new perspectives", *Foundations and Trends in Information Retrieval*, No. 14 (1), P. 1–101.
2. Miller T. (2019), "Explanation in artificial intelligence: Insights from the social sciences", *Artificial Intelligence*, No. 267, P. 1–38.
3. Barredo, A., Díaz-Rodríguez, N., et al. (2020), "Explainable artificial intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI", *Information Fusion*, No. 58, P. 82–115.
4. Lipton, P. (1990), "Contrastive explanation", *Royal Institute of Philosophy Supplement*, No. 27, P. 247–266.
5. Lombrozo, T. (2012), "Explanation and abductive inference", *Oxford handbook of thinking and reasoning*, P. 260–276.

6. Phillips-Wren, G. (2017), "Intelligent systems to support human decision making", *Artificial Intelligence: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*, P. 3023–3036. DOI: <http://doi.org/10.4018/978-1-5225-1759-7.ch125>
7. Wang, T., Lin, Q. (2019), "Hybrid decision making: When interpretable models collaborate with black-box models", *Journal of Machine Learning Research*, No. 1, P. 1–48.
8. Ribeiro, M., Singh, S., Guestrin, C. (2016), "Why should I trust you?": Explaining the predictions of any classifier", *Proceedings of the 2016 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Demonstrations*, P. 97–101.
9. Chalyi, S. F., Leshchynskyi, V. O. (2020), "Temporal patterns of user preferences in the tasks of forming explanations in the recommendation system" ["Temporalni paterny vpodoban korystuvachiv v zadachakh formuvannya poiasnen v rekomendatsiynii systemi"], *Bionics of Intelligence*, No. 2 (95), P. 21–27.
10. Gogate, V., Domingos, P. (2010), "Formula-Based Probabilistic Inference", *Proceedings of the Twenty-Sixth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, P. 210–219.
11. Levykin, V., Chala, O. (2018), "Development of a method for the probabilistic inference of sequences of a business process activities to support the business process management", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 5 (95), P. 16–24. DOI: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142664>
12. Zeiler, M. D., Fergus, R. (2014), "Visualizing and Understanding Convolutional Networks", *Computer Vision – ECCV 2014. Lecture Notes in Computer Science*, No. 8689, P. 818–833. DOI: http://doi.org/10.1007/978-981-10-0557-2_87
13. Gan, C., et al. (2015), "DevNet: A Deep Event Network for multimedia event detection and evidence recounting", *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, P. 2568–2577. DOI: <http://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298872>
14. LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. (2015), "Deep learning", *Nature*, No. 521, P. 436–444. DOI: <http://doi.org/10.1038/nature14539>
15. Hendricks, L. A. (2016), "Generating visual explanations", *Computer Vision – ECCV 2016. Lecture Notes in Computer Science*, No. 9908, P. 1–17. DOI: http://doi.org/10.1007/978-981-10-0557-2_87
16. Letham, B., Rudin, C., McCormick, T. H., Madigan, D. (2015), "Interpretable classifiers using rules and Bayesian analysis: Building a better stroke prediction model", *Annals of Applied Statistics*, No. 9 (3), P. 1350–1371. DOI: <http://doi.org/10.1214/15-AOAS848>
17. Lake, B. M., Salakhutdinov, R., Tenenbaum, J. B. (2015), "Human-level concept learning through probabilistic program induction", *Science*, No. 350 (6266), P. 1332–1338. DOI: <http://doi.org/10.1126/science.aab3050>
18. Maierand, M., Taylor, B., Oktay, H., Jensen, D. (2010), "Learning causal models of relational domains", *Proceedings of the Twenty-Fourth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, P. 1–8.
19. Chalyi, S. F., Leshchynskyi, V. O., Leshchynska, I. O. (2020), "Declarative-temporal approach to the construction of explanations in intelligent information systems", *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, No. 2 (4), P. 51–56. DOI: <http://doi.org/10.20998/2079-0023.2020.02.09>
20. Chala, O. (2018), "Method for detecting anomalous states of a control object in information systems based on the analysis of temporal data and knowledge", *EUREKA: Physics and Engineering*, No. 6, P. 28–35. DOI: <http://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00787>

Received 21.06.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Чалий Сергій Федорович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри інформаційних управляючих систем, Харків, Україна; email: serhii.chalyi@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9982-9091>.

Чалий Сергій Федорович – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры информационных управляющих систем, Харьков, Украина.

Chalyi Serhii – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of the Department of Information Control Systems, Kharkiv, Ukraine.

Лещинський Володимир Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії, Харків, Україна; email: volodymyr.leshchynskyi@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8690-5702>.

Лещинский Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры программной инженерии, Харьков, Украина.

Leshchynskyi Volodymyr – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of the Department of Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

РОЗРОБКА МЕТОДУ ІНТЕРАКТИВНОЇ ПОБУДОВИ ПОЯСНЕНЬ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ ЙМОВІРНІСНОГО ПІДХОДУ

Предмет: використання апарату темпоральної логіки та ймовірнісних підходів для побудови пояснення щодо результатів роботи інтелектуальної системи з тим, щоб підвищити ефективність використання отриманих рішень та рекомендацій. **Ціль:** розробка методу побудови пояснень в інтелектуальних системах з можливістю формування та

оцінки декількох альтернативних варіантів тлумачень результатів роботи такої системи. **Задачі:** обґрунтування використання принципу чорного ящика для інтерактивної побудови пояснень; розробка моделі патерну пояснення, що передбачає ймовірнісну оцінку; розробка методу інтерактивної побудови пояснень на основі ймовірнісного підходу. **Методи:** методи аналізу даних, методи системного аналізу, методи побудови пояснень, моделі представлення знань. **Результати:** Запропоновано модель патерну пояснень, що містить темпоральні правила, які відображають послідовності взаємодії користувача з інтелектуальною системою, що дає можливість формувати пояснення на основі порівняння дій поточного користувача та інших відомих користувачів. Розроблено метод інтерактивної побудови пояснень, який базується на ймовірнісному підході, використовує патерни взаємодії користувача з інтелектуальною системою та містить фази побудови патернів пояснень й формування пояснень з використанням отриманих патернів. Метод упорядковує отримані пояснення за ймовірністю використання, що дає можливість сформулювати цільове та альтернативні пояснення для користувача. **Висновки:** Обґрунтовано використання принципу чорного ящика до розробки ймовірнісного підходу до побудови пояснень в інтелектуальних системах. Запропоновано модель патерну пояснень на базі темпоральних правил. Модель відображає послідовність взаємодії користувача з інтелектуальною системою при отриманні рішень та рекомендацій та містить патерн взаємодії у складі темпоральних правил, що мають вагу, а також визначає ймовірність використання патерну взаємодії з користувачем. Розроблено метод інтерактивної побудови пояснень з урахуванням взаємодії користувача з інтелектуальною системою. Метод містить фази та етапи формування правила й патернів взаємодії з користувачем з визначенням ймовірності їх виконання, а також підбору у упорядкування патернів за ймовірністю їх реалізації. Виконано імплементацію методу при побудові пояснень для рекомендаційних систем.

Ключові слова: інтелектуальна система; пояснення; патерн; пояснюваний штучний інтелект; правила.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИНТЕРАКТИВНОГО ПОСТРОЕНИЯ ОБЪЯСНЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА

Предмет: использование аппарата темпоральной логики и вероятностных подходов для построения объяснения о результатах работы интеллектуальной системы с тем, чтобы повысить эффективность использования полученных решений и рекомендаций. **Цель:** разработка метода построения объяснений в интеллектуальных системах с возможностью формирования и оценки нескольких альтернативных вариантов толкований результатов работы такой системы. **Задачи:** обоснование использования принципа черного ящика для интерактивного построения объяснений; разработка модели паттерна объяснение, что предполагает вероятностную оценку; разработка метода интерактивного построения объяснений на основе вероятностного подхода. **Методы:** методы анализа данных, методы системного анализа, методы построения объяснений, модели представления знаний. **Результаты:** Предложена модель паттерна объяснений, содержащий темпоральные правила, отражающие последовательности взаимодействия пользователя с интеллектуальной системой, что позволяет формировать объяснения на основе сравнения действий текущего пользователя и других известных пользователей. Разработан интерактивный метод построения объяснений, основанный на вероятностном подходе; метод использует шаблон взаимодействия пользователя с интеллектуальной системой и содержит фазы построения паттернов объяснений и формирования объяснений с использованием полученных паттернов. Метод упорядочивает полученные объяснения по вероятности использования, что позволяет сформировать целевое и альтернативные объяснения для пользователя. **Выводы:** Обосновано использование принципа черного ящика к разработке вероятностного подхода к построению объяснений в интеллектуальных системах. Предложена модель паттерна объяснений на базе темпоральных правил. Модель отражает последовательность взаимодействия пользователя с интеллектуальной системой при получении решений и рекомендаций и содержит паттерн взаимодействия в составе темпоральных правил, имеющих вес, а также определяет вероятность использования паттерна взаимодействия с пользователем. Разработан интерактивный метод построения объяснений с учетом взаимодействия пользователя с интеллектуальной системой. Метод включает фазы и этапы формирования правил и паттернов взаимодействия с пользователем с определением вероятности их выполнения, а также упорядочения паттернов по вероятности их реализации. Выполнена имплементация метода при построении объяснений для рекомендательных систем.

Ключевые слова: интеллектуальная система; объяснения; паттерн; объясним искусственный интеллект; правила.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Чалий С. Ф., Лещинський В. О. Розробка методу інтерактивної побудови пояснень в інтелектуальних інформаційних системах на основі ймовірнісного підходу. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 2 (16). С. 39–45. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.039>

Chalyi, S., Leshchynskiy, V. (2021), "Development of a method for the interactive construction of explanations in intelligent information systems based on the probabilistic approach", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (16), P. 39–45. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.039>

A. VORONIN, O. GUNKO

METHODS OF COMPARATIVE STATICS AND DYNAMICS IN THE THEORY OF ECONOMIC CYCLES

The **subject** of this work is the problem of describing the dynamic behavior of the price in the market of one product. The typical balance of interaction of supply and demand functions depending on the price is considered. The dynamic model of price evolution is based on the assumption that the demand function at a given time depends on the supply function at all previous points in time, i.e. there is a process with an aftereffect. The core of the integral transformation is a characteristic of the second order, which can initiate periodic regimes in price variables. The **aim** of the work is to synthesize a mathematical model of price changes in the market of one product and study the stability of its equilibrium states with the manifestation of the structure of marginal cycles. The **task** of the study is to demonstrate the degree of connection between the problem of stability of equilibrium and the problem of obtaining fruitful results in comparative statics. This duality is the principle of conformity of P. Samuelson. The basic mathematical model of the studied process of price dynamics is a system of two nonlinear differential equations of the first order. The research **methods** are the nonlinear theory of analysis of dynamical systems, the mathematical theory of stability of systems of differential equations, the conceptual apparatus of analysis of typical bifurcations of birth (death) of the boundary cycle, known as the Andronov-Hopf bifurcation. As a **result** of a detailed analysis of the properties and parameters of self-oscillating modes, a double cycle is revealed, i.e. there is a fact of coexistence around the equilibrium state of stable and unstable limit cycles. Subsequent mathematical transformations prove that the line of demarcation of these two cycles is completely determined by the static parameters of the studied system, which illustrates the mechanism of action of the principle of conformity of P. Samuelson. **Conclusions:** on the example of the functioning of the labor market, a comprehensive analysis of the stability of two positive equilibrium states, which characterize the effects of substitution and income. Computer simulations are used to perform computational experiments that demonstrate self-oscillating modes of price changes. As a result of the analysis of the obtained numerical results, it is possible to draw a conclusion about the stability of the limit cycle in the vicinity of the equilibrium state, which corresponds to the substitution effect.

Keywords: market; demand; supply; price; dynamics; self-oscillation; bifurcation; stability; principle of conformity.

Introduction

In each problem of economic theory, some variables, such as prices and quantities, are unknown, which must be determined. Their values arise as solutions of the given set of relations for finding the necessary unknowns. The most important thing is to conduct the analysis in such a way as to determine what quantitative and qualitative changes occur with our variables when the external data shifts in the functional ratios of economic balance sheets. The usefulness of our approach arises from the fact that with the help of analytical methods we can determine the nature of the evolution of unknown variables caused by the growth of one or more parameters. This is the narrative of the method of comparative statics, which means the study of changes in the economic system in the presence of a transition from one equilibrium to another without taking into account the transition process associated with its establishment. The task of comparative statics is to study the process of determining the equilibrium points of unknown variables with known functional relations and various parameters. Thus, in the simplest market of one product, two independent ratios of supply and demand by their intersection determine the equilibrium prices and volumes.

If we consider the pricing process as dynamic, then the problem of stability of equilibrium states of economic systems and objects comes to the fore. The interaction of these conditions with the problems of comparative statics is the phenomenon which, in connection with the historical tradition, is called the principle of conformity of P. Samuelson. But the problem of stability of the equilibrium state cannot be realized without recourse to the dynamic theory of systems. That is, comparative

statistical analysis must be substantiated by dynamic considerations within the synergetic paradigm.

Analysis of previous publications

In the modern economic literature, it is reasonably believed that a significant contribution to the coverage of this issue belongs to the Nobel Laureate in Economics P. Samuelson, which is reflected in a large number of author's publications of the second half of the previous century. The most significant can be considered a series of works [1-3], which formulates the methodological principles of comparative statics and its relationship with the problem of stability of the equilibrium of the microeconomic system. The following development and the corresponding generalizations are reflected in the fundamental monograph [4], which is a classic work on this issue. It should be noted the works of Milgrom, Shannon [5], Sato, Yano [6, 7] and Savvateev, Kukushkin [8], which consider in addition to the ordinal approach to the problem of optimality and the relationship of advantage, the problem of stochastic description of models of comparative dynamics in the further development of methodology Samuelson. From domestic works it is possible to specify works of Alimpiev [9] and Matselyukh [10] who use in the researches the corresponding theoretical device.

As a result of the analysis of the considered works it can be considered that they use linearized mathematical models of economic systems, which do not take into account the cyclical nature of economic development, as well as nonlinearity, no equilibrium and multivariate evolution of complex systems. In addition, it should be noted the actual absence of scientific papers, which

consider the comparative dynamics and mathematical theory of economic cycles from the standpoint of a single formalism.

The **aim** of the work is to synthesize a mathematical model of price changes in the market of one product and study the stability of its equilibrium states with the manifestation of the structure of marginal cycles.

Research methods are focused on the conceptual apparatus of the theory of nonlinear dynamical systems and the use of the methodology of economic synergetics.

Results of the study.

The presentation of the main research results is focused on establishing a functional relationship between the principle of conformity of Samuelson and the theory of economic cycles. There are many interesting and fruitful aspects of dynamics, which are not always directly related to cyclicity, but important for understanding the processes classified within the general economic theory. The most significant among the various sectors of the dynamics was the one that examines the fluctuations of employment, income and general business activity.

In our time, the use of the terms "exogenous" and "endogenous" has become acceptable for the development of the theory of business cycles. The first term refers to theories that explain the reason for the existence of a cycle in some external non-economic phenomena with quasi-periodic changes that give rise to cyclical behavior of economic quantities. From an analytical point of view, the exogenous theory in its extreme form is similar to "forced" periodic motion, where the economic system reacts instantly to external perturbation.

On the other side is the endogenous theory of the cycle. This category includes various theories that distinguish between monetary factors, inventories, the principle of acceleration, etc. The components of the economic system are determined by dynamic equations that link different time periods with the corresponding generation of periodic fluctuations. If the cycle is realized, then the rise changes to decline, depression changes to recovery, etc. But it is important that purely endogenous theories cannot explain the exact or approximate value of the cycle amplitude other than the influence of the initial conditions. This interpretation of the parameters of the periodic process is characteristic of linear systems. An alternative to this may be to abandon the assumption of linearity, despite the associated certain mathematical difficulties. It is essential to us that only nonlinear systems lead to a theory that explains fluctuations of a fixed amplitude independent of the initial deviation. For example, a nonlinear system may have an unstable equilibrium state such that with a small deviation from the position of the stationary level, increasing oscillations begin. But instead of galloping to infinity, a constant amplitude is eventually achieved and maintained. This periodic movement can be stable in the sense that each subsequent deviation can lead to a movement that will go to the given periodic mode, either from below or from above. A classic example of such behavior is a nonlinear "web" model of a single product market.

Let's consider in more detail the dynamic model of interaction of supply and demand in the market of one product. That is, the basic variable is the price of the product $p = p(t)$, where t – is a continuous time. There are also supply $D = D(p)$ and demand $S = S(p)$ functions, depending on the price p .

The dynamics of the interaction of supply and demand functions is determined using the following functional equation:

$$D(p(t)) = \int_0^t K(t-\tau)S(p(\tau))d\tau, \quad (1)$$

where $K(t-\tau)$ is the given function of two arguments.

Equation (1) means that demand at the appropriate time depends on the weighted supply for all previous time. The function $K(t, \tau)$ has the meaning of the weight function "dynamic memory" of previous moments of time and is descending. As a weight function we choose a linear combination of two exponents, which has a representation in operator form:

$$K(\lambda) = \frac{b_1\lambda + b_0}{\lambda^2 + a_1\lambda + a_0}. \quad (2)$$

To ensure normalization conditions $\int_0^{+\infty} K(x)dx = 1$ equality $b_0 = a_0$ must be fulfilled.

Thus, all coefficients a_0, a_1, b_1 should be considered positive numbers, and the function $K(\lambda)$ is the operator form of the second-order process. If λ we can consider a differential operator, then (1) will take a form:

$$\begin{aligned} \frac{d^2(D(p(t)))}{dt^2} + a_1 \frac{d(D(p(t)))}{dt} + a_0 D(p(t)) = \\ = b_1 \frac{d(S(p(t)))}{dt} + a_0 S(p(t)). \end{aligned} \quad (3)$$

Functional relation (3) is the basis for building a mathematical model of price changes in the market of one product, if there are explicit expressions for the supply $S(p)$ and demand $D(p)$ function.

With respect to the demand function $D(p)$, we can assume that there is a linear decreasing function of the price argument $D(p) = d_0 - d_1 p$

The supply function $S(p)$ has a specific nonlinear nature of behavior in different price segments of the market and has intervals of growth and decline, which are due to the behavior of sellers (or producers) of goods. We will choose an explicit form in the form of a cubic parabola:

$$S(p) = -\frac{S_3}{6} p^3 + S_2 \frac{p^2}{2} + S_1 p - S_0, \quad (5)$$

where parameters S_0, S_1, S_2, S_3 , are also positive numbers.

Functional equation (3) has stationary solutions that can be determined by the relation:

$$D(p) = S(p).$$

If we use explicit expressions for $S(p)$ and $D(p)$, i.e. formulas (4) and (5), we obtain an algebraic cubic equation with respect to the equilibrium price:

$$S_3 \frac{p^3}{6} - S_2 \frac{p^2}{2} - (S_1 + d_1)p + S_0 + d_0 = 0. \quad (6)$$

Equation (6) can have one or three real solutions depending on the ratios between the coefficients.

To further develop the mathematical model of price evolution in the market of one product, it is advisable to introduce a new variable $\tilde{p}(t) = p(t) - p^*$, which is the

$$\ddot{\tilde{p}} + \left(a_1 + b_1 \cdot \frac{S'}{d_1} \right) \dot{\tilde{p}} + a_0 \left(1 + \frac{S'}{d_1} \right) \tilde{p} + a_0 \frac{S''}{d_1} \cdot \frac{\tilde{p}^2}{2} + b_1 \frac{S''}{d_1} \cdot \tilde{p} \cdot \dot{\tilde{p}} + a_0 \frac{S'''}{d_1} \cdot \frac{\tilde{p}^3}{6} + b_1 \frac{S'''}{d_1} \cdot \frac{\tilde{p}^2 \cdot \dot{\tilde{p}}}{2} = 0, \quad (7)$$

or

$$\ddot{\tilde{p}} + (a_1 - b_1 \cdot \eta_1) \dot{\tilde{p}} + a_0 (1 - \eta_1) \tilde{p} - a_0 \eta_2 \cdot \frac{\tilde{p}^2}{2} - b_1 \eta_2 \cdot \tilde{p} \cdot \dot{\tilde{p}} - a_0 \eta_3 \cdot \frac{\tilde{p}^3}{6} - b_1 \eta_3 \cdot \frac{\tilde{p}^2 \cdot \dot{\tilde{p}}}{2} = 0, \quad (8)$$

$$\text{where } \eta_1 = -\frac{S'}{d_1}, \quad \eta_2 = -\frac{S''}{d_1}, \quad \eta_3 = -\frac{S'''}{d_1}.$$

The parameter η_1 is essentially the relative elasticity of "supply" to "demand", and η_2 and η_3 , accordingly, its first and second derivative at price.

$$\begin{cases} \dot{p}_1 = p_2; \\ \dot{p}_2 = a_0 (\eta_1 - 1) p_1 + (b_1 \eta_1 - a_1) \cdot p_2 + a_0 \eta_2 \cdot \frac{p_1^2}{2} + b_1 \eta_2 p_1 p_2 + a_0 \eta_3 \cdot \frac{p_1^3}{6} - b_1 \eta_3 \cdot \frac{p_1^2 \cdot p_2}{2}. \end{cases} \quad (9)$$

The matrix of the linear part (9) has the form:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_0 (\eta_1 - 1) & b_1 \eta_1 - a_1 \end{pmatrix}.$$

And satisfies the characteristic equation:

$$\lambda^2 + (a_1 - b_1 \eta_1) \lambda + a_0 (1 - \eta_1) = 0. \quad (10)$$

Solutions (10) $\lambda_{1,2}$ have a really negative part under the conditions:

$$a_1 - b_1 \eta_1 > 0, \quad a_0 (1 - \eta_1) > 0.$$

In this case, we can assume that the equilibrium state p^* is stable. Equilibrium point – a stable node or focus.

Let's consider in more detail the situation when $a_1 \approx b_1 \eta_1$. Suppose, for example, that there is a connection $a_1 = b_1 \eta_1 - \mu$ where μ – is the small alternating value. Thus, the quadratic equation (10) takes the form:

$$\lambda^2 - \mu \lambda + \omega^2 = 0, \quad (11)$$

deviation of the price from its equilibrium state p^* . The value p^* is determined by the cubic equation (6). We also introduce the necessary notation of the derivatives of the supply function at the equilibrium point:

$$S'(p) = -S_3 \frac{p^{*3}}{2} + S_2 p^* + S_1, \\ S''(p^*) = -S_3 p^* + S_2, \quad S'''(p^*) = -S_3.$$

After the necessary transformations of the functional relation (3) taking into account formulas (4), (5), (6) we obtain a nonlinear differential equation of the second order with respect to the variable $\tilde{p}(t)$:

With the help of new variables $p_1 = \tilde{p}$, $p_2 = \dot{\tilde{p}}$, differential equation (8) will be transformed into a system of two first-order differential equations.

where $\omega^2 = a_0 (1 - \eta_1) > 0$.

Obviously, the state of equilibrium can be both stable and unstable focus. For the existence of a periodic regime such as a limit cycle in the vicinity of the equilibrium state p^* , it is necessary to check the conditions of Hopf's theorem [11].

At $\mu = 0$ characteristic numbers $\lambda_{1,2} = \pm i\omega$, $i^2 = -1$.

Let's find the derivative of equation (11) by parameter μ :

$$2\lambda \frac{d\lambda^*}{d\mu} - \mu \frac{d\lambda}{d\mu} - \lambda = 0.$$

$$\text{If } \mu = 0, \text{ then } \frac{d\lambda}{d\mu} = \frac{1}{2} \neq 0.$$

This means that in system (9) there may be a limit cycle in the vicinity of the equilibrium state p^* , which is a composite focus.

Before applying bifurcation formulas to determine the required properties of the limit cycle, it is necessary to bring the system of two differential

equations (9) to the form of a model system in the normal form of Poincare. To do this, use replacements $p_1 = y_1$, $p_2 = -\omega \cdot y$, $\tau = \omega \cdot t$. After the necessary transformations, the system (9) is transformed into a form:

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{d\tau} = -y_2; \\ \frac{dy_2}{d\tau} = y_1 + c_{20}y_1^2 + c_{11} \cdot y_1 \cdot y_2 + c_{30} \cdot y_1^3 + c_{21}y_1^2y_2, \end{cases} \quad (12)$$

where

$$c_{20} = \frac{2\eta_2}{\eta_1 - 1}, \quad c_{11} = \frac{b_1\eta_2}{\omega}, \quad c_{30} = \frac{2b_1\eta_3}{\eta_1 - 1}, \quad c_{21} = \frac{2b_1\eta_3}{\omega}.$$

To determine the stability conditions of the investigated limit cycle, it is necessary to find the so-called first Lyapunov quantity $l_1(0) = \frac{b_1\eta_2}{\omega}$. Using the appropriate formulas, we obtain the following [12]:

$$l_1(0) = \frac{1}{8}(c_{20} \cdot c_{11} + c_{21}). \quad (13)$$

Taking into account the existing form of coefficients, expression (13) will be transformed into a form.

$$l_1(0) = \frac{b_1}{16\omega} \left(\eta_3 + \frac{\eta_2^2}{\eta_1 - 1} \right). \quad (14)$$

From relation (14) we can draw the following conclusions: if $\eta_3 < \frac{\eta_2^2}{1 - \eta_1}$, then the limit cycle is stable in

the vicinity of the equilibrium state, otherwise $\eta_3 > \frac{\eta_2^2}{1 - \eta_1}$

– there is an unstable limit cycle.

In the first case, the mode of occurrence of self-oscillations is called "soft", and in the second - "hard" with a catastrophic loss of stability of equilibrium.

The case when $l_1(0) = 0$ or $\eta_3 = \frac{\eta_2^2}{1 - \eta_1}$ is the most interesting in terms of the diversity of the dynamic behavior of the system (9) in the vicinity of the steady state p^* . For further analysis, we need an analytical expression for the second Lyapunov quantity $l_2(0)$. From [12] we obtain:

$$l_2(0) = \frac{c_{21}}{48}(2c_{11}^2 - 11 \cdot c_{30}), \quad (15)$$

$$l_2(0) = \frac{b_1\eta_3}{96\omega} \left(\frac{2b_1^2\eta_2^2}{\omega^2} + \frac{11 \cdot \eta_2^2}{6(1 - \eta_1)^2} \right). \quad (16)$$

Suppose that $l_1 = \nu$ – is a small variable in the vicinity of zero. In expression (16) for l_2 the sign is determined by the parameter η_3 . If $\eta_3 = \frac{S_3}{d_1} > 0$, then

$l_2 > 0$ for all parameters of the formula (16).

In polar coordinates, there are two independent differential equations for the amplitude ρ and phase Ψ of cycles [12]:

$$\begin{cases} \dot{\rho} = \rho(\mu + \nu\rho^2 + l_2\rho^4), \\ \dot{\Psi} = \omega. \end{cases} \quad (17)$$

The positive stationary solutions for the first equation (17) satisfy the biquadratic equation

$$\mu + \nu\rho^2 + l_2\rho^4 = 0. \quad (18)$$

Equation (18) may have zero, one or two positive solutions for the amplitudes of the cycles.

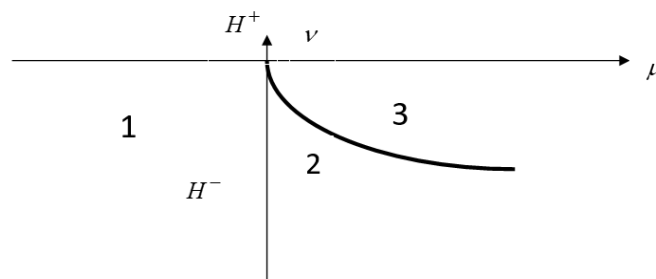


Fig. 1. Bifurcation diagram of a double cycle

Fig. 1 shows the corresponding bifurcation diagram. The line $H_1 = \{(\mu, \nu) : \mu = 0\}$ refers to a typical bifurcation of the birth (death) of the boundary cycle, known as the Andronov-Hopf bifurcation [12]. The state of equilibrium is stable at $\mu < 0$ and unstable for $\mu > 0$. If we move along the line $\mu = 0$ to the points where $\nu < 0$, then on the phase plane from the composite focus

of the second order an unstable boundary cycle (rough) will be born, and the focus itself becomes non-rough stable. When we leave, crossing the line H^- , to region 2, a stable boundary cycle is born from a stable composite focus. In region 2, two cycles coexist simultaneously: stable and unstable, which merge and disappear on the line $T = \{(\mu, \nu) : \nu^2 = 4l_2\mu, \nu < 0\}$. The T line

corresponds to the bifurcation of the double cycle. Further in region 3 boundary cycles are absent [13].

Fig. 2 shows the region of coexistence of two boundary cycles.

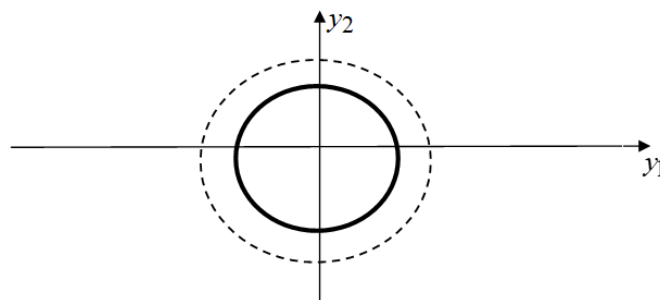


Fig. 2. Stable and unstable boundary cycles

The outer cycle is unstable and the inner cycle is stable.

Let us return to the relation that ensures the equality of zero of the first Lyapunov quantity, i.e.

$$\eta_3 = \frac{\eta_2}{1 - \eta_1}. \quad (19)$$

Using the explicit form η_1, η_2, η_3 , it is easy to obtain:

$$-S'''(S' + d_1) = (S'')^2. \quad (20)$$

Given the dependence of all derivatives of the supply function on the equilibrium price p^* , we have a quadratic algebraic equation to find p^* .

$$\left(p - \frac{S_2}{S_3}\right)^2 = \frac{1}{3} \left[\left(\frac{S_2}{S_3}\right)^2 + \frac{2(S_1 + d_1)}{S_3} \right]. \quad (21)$$

We introduce the following notation $\frac{S_2}{S_3} = \gamma, \frac{S_1 + d_1}{S_3} = \beta, \frac{S_0 + d_0}{S_3} = \alpha$. In this case, equation (21) is transformed into a form:

$$(p - \gamma)^2 = \frac{1}{3}(\gamma^2 + 2\beta), \quad (22)$$

and the cubic equation (6) is written in the form.

$$p^3 - 3\gamma p^2 - 6\beta\gamma + 6\alpha = 0. \quad (23)$$

Let $\bar{p} = p - \gamma$. Then (22) and (23) are transformed as follows:

$$\bar{p}^2 = \frac{1}{3}(\gamma^2 + 2\beta); \quad (24)$$

$$\bar{p}^3 - 3(\gamma^2 + 2\beta)\bar{p} + 2(3\alpha - 3\beta\gamma - \gamma^3) = 0. \quad (25)$$

From the two equations (24) and (25) it is quite easy to obtain an analytical solution for $\bar{p}$ and to find the relationship between the positive coefficients α, β, γ . If we put $\beta = \gamma^2$, we get the first root $\bar{p}_1^* = \gamma$ leading to the

connection $\alpha = \frac{8\gamma^3}{3}$, and equation (25) can be factorized as follows:

$$(\bar{p} - \gamma)(\bar{p}^2 + \gamma\bar{p} - 8\gamma^2) = 0. \quad (26)$$

Solutions (26) are:

$$\bar{p}_1^* = 2\gamma, \quad p_{2,3}^* = \gamma \left(\frac{-1 \pm \sqrt{33}}{2} \right). \quad (27)$$

Returning to the variable p , we have.

$$\bar{p}_1^* = 2\gamma, \quad p_{2,3}^* = \frac{\gamma(1 \pm \sqrt{33})}{2}. \quad (28)$$

Among the solution (27) there is one negative, i.e. having no economic meaning. This fact can be explained by simple formalisms in the task of the analytical structure of supply and demand functions. Thus, two positive equilibrium states remain for further consideration:

$$\bar{p}_1^* = 2\gamma, \quad p_2^* = \frac{\gamma(1 + \sqrt{33})}{2}, \quad p_1^* < p_2^*.$$

If, for example, the existence of these two stationary prices is interpreted in relation to the labor market, the following remarks should be made. For geometric reasons, it is clear that the supply function changes its behavior depending on the price $p(t)$ (in this case, the level of wages). At the first stage, wage growth initiates an increase in labor supply (the number of people willing to work increases, labor intensity increases). There is a demonstration of the so-called "substitution effect". The logic of employee behavior is as follows: the higher the price of labor, the more profitable to sell it, reducing dependence on other income. The supply line $S(p)$, after passing its maximum, changes its bow in the other direction. There is a slow decline in labor supply with a continuous increase in its price, which can be explained by the "income effect". The essence of this phenomenon is that the income received by the employee exceeds the amount needed to meet basic living needs. The demand function $D(p)$ is a "traditionally" decreasing price function, which gives two positive points of intersection

of a line D and a parabola S . That is, we have an equilibrium price $\bar{p}_1^* = 2\gamma$ that corresponds to the

"substitution effect" and a price $p_2^* = \frac{\gamma(1 \pm \sqrt{33})}{2}$, that describes the "income effect".

It is here, analyzing the line separating the two graphical cycles, we found that its description depends entirely on the static parameters of the supply and demand functions. This is a clear connection between the methodology of comparative statics and the stability of nonlinear models of economic dynamics [14, 15].

For a system of two differential equations (12) for parameter values: $c_{20} = \frac{4}{3\gamma}$, $c_{11} = -\gamma \frac{b_1}{\omega}$, $c_{30} = -\frac{1}{9\gamma^2}$,

$$c_{21} = \frac{b_1}{\omega}, \omega = \gamma, S_3 = d_1.$$

Computer calculations of transients and phase portraits of the dynamics of price changes at different values of parameters γ and b_1 were performed.

In fig. 3. a, 3.b, 3.c the values of the price, speed of change of the price and dependence of speed of change of the price on the price at parameters $\gamma = \frac{1}{2}$, $b_1 = \frac{8}{5}$ are given.

Fig. 4. a, 4.b, 4.c provide the characteristics of the limit cycle for the parameters $\gamma = \frac{1}{2}$, $b_1 = \frac{16}{5}$.

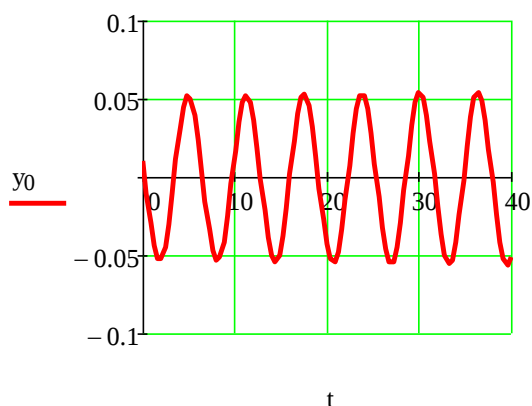


Fig. 3. a. Price fluctuations

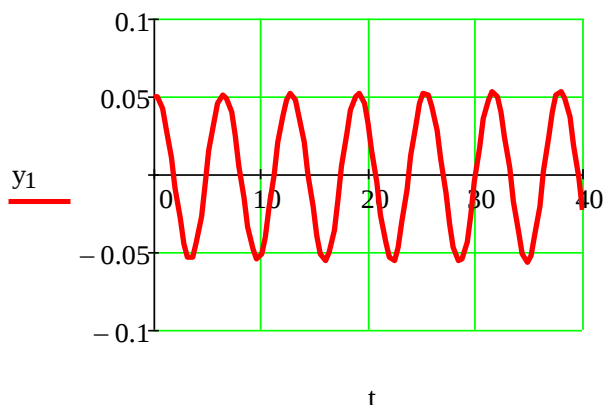


Fig. 3. b. Fluctuations in the speed of price changes

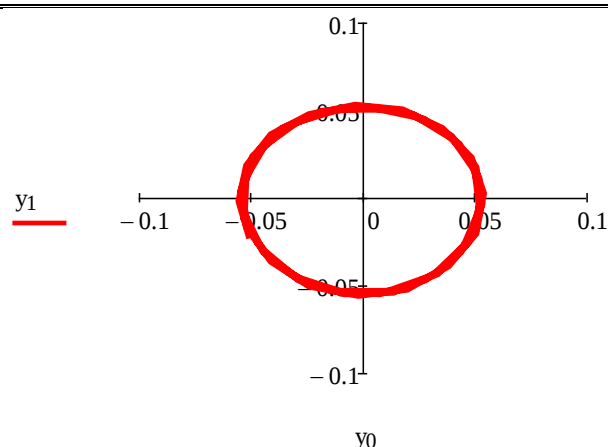


Fig. 3. c. Phase portrait of the boundary cycle

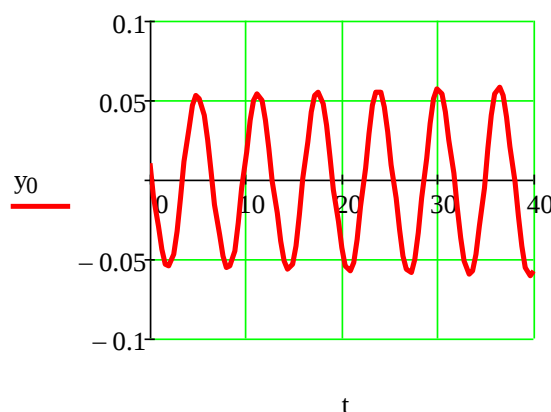


Fig. 4. a. Price fluctuations

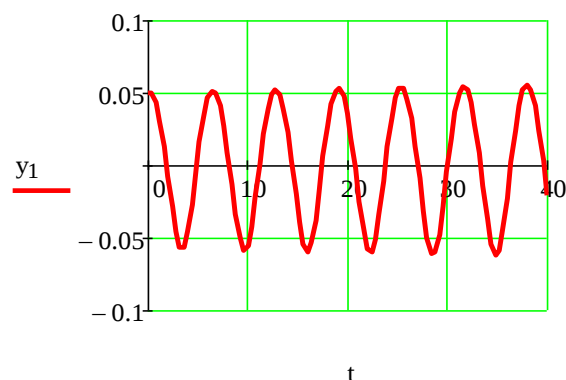


Fig. 4. b. Fluctuations in the speed of price changes

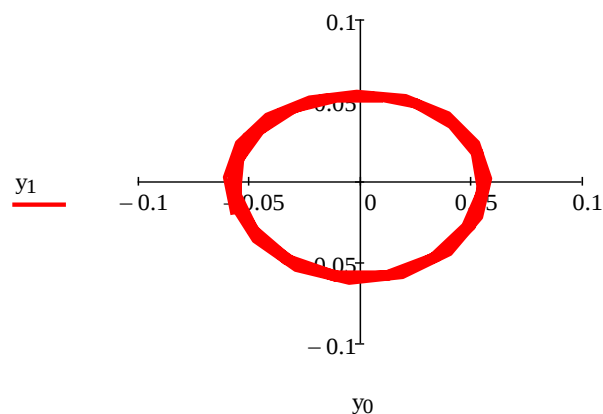


Fig. 4. c. Phase portrait of the boundary cycle

The graphical illustrations of self-oscillating modes in the vicinity of the equilibrium state, which corresponds to the substitution effect, demonstrate the stability of the observed two-fold limit cycle at different dynamic parameters.

Conclusions

Rejecting the assumption of linearity, this paper examines in detail the evolution of price changes in the market of one product within the model mechanism of "supply and demand". Using the methodology of stability analysis of nonlinear dynamical systems, the limit cycles

around the equilibrium states are identified and their basic characteristics are given. The connection between the existence of double cycles and statistical parameters of equilibrium prices is found. Appropriate computer calculations of self-oscillating modes are made.

In further research, it is advisable to introduce an autonomous component into the demand-side model, which can be a characteristic of seasonal market fluctuations. In this case, the system under study becomes nonstationary, which provides a theoretical opportunity to observe the so-called bifurcations of the doubling of the period and chaotic behavior in price evolution.

References

- Samuelson, P. (1953), "Price of Factors and Goods in General Equilibrium", *Review of Economic Studies*, Vol. 21, P. 1-20.
- Samuelson, P. (1960), "An extension of the Le Chatelier Principle", *Econometrica*, Vol. 28, P. 368-379.
- Samuelson, P. (1970), "Classical Orbital Stability Deduced for Discrete-Time Maximum Systems", *Western Economic Journal*, Vol. 8, P. 110-119.
- Samuelson, P. (1983), *Foundations of Economic Analysis*, Enlarged edition, Harvard University Press, 632 p.
- Milgram, P., Shanon, C. (1994), "Monotone Comparative Statics", *Econometrica*, Vol. 62, No. 1, P. 157-180.
- Savateyev, A., Kukushkin, N. (2009), "Ordinal Comparative Statics: Continuous Case" ["Ordinalnaya sravnitel'naya statika: nepreryvnyy sluchay"], *Ekonomika i matematicheskiye metody*, Vol. 45, No. 1, P. 95-98.
- Sato, K., Yano, M. (2012), "Comparative Dynamics in Stochastic Models with Respect to the $L^\infty - L^\infty$ Duality: A Differentials Approach", *Macroeconomic Dynamics*, Vol. 16, Issue S1, No. 4, P. 127-138.
- Yano, M., Sato, K. (2019), "Ergodic chaos for non-expansive economic models", *International Journal of Economic Theory. The International Society for Economic Theory*, Vol. 15 (3), No. 9, P. 311-320.
- Alimpiev, E. (2014), "The model of financial and monetary regulation of the economy has been dynamized" ["Dinamizovana model finansovo-monetarnogo reguluyuvannya ekonomiki"], *Efficient economy*, No. 5, available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/efec_2014_5_105 (last accessed: 16.05.2021).
- Matselyukh, N. (2015), *Theoretical and methodological foundations of prices for the market of valuable paperwork* [Teoretiko-metodologichni osnovy tsinoutvorenniya na rynku tsinnikh papiriv]: monograph, ANTs GRUP, Kyiv, 324 p.
- Hassard, B., Wan, Y. (1978), "Bifurcation formulae derived from center manifold theory", *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, Vol. 63, P. 297-312.
- Bautin, N., Leontovich, E. (1990), *Methods and techniques for the qualitative study of dynamic systems on a plane* [Metody i priemy kachestvennogo issledovaniya dinamicheskikh sistem na ploskosti]: monograph, Nauka, Moscow, 488 p.
- Voronin, A. (2006), *Cycles in problems of nonlinear macroeconomics* [Tsikly v zadachakh nelineynoy makroekonomiki]: monograph, VD "INZHEK", Kharkov, 136 p.
- Voronin, A., Gunko, O. (2017), "Labor market chaos" ["Khaos na rynke truda"], *Infrastruktura rynku*, Vol. 6, P. 254-257.
- Chow, S., Chengzhi, L., Wang, D. (1994), *Normal forms and bifurcations of planar vector fields*, Cambridge University Press, 416 p.

Received 23.05.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Воронін Анатолій Віталійович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, доцент кафедри вищої математики та економіко-математичних методів, Харків, Україна; email: voronin61@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2570-0508>.

Воронин Анатолий Витальевич – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеця, доцент кафедры высшей математики и экономико-математических методов, Харьков, Украина.

Voronin Anatolii – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economy, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics and Economic and Mathematical Methods, Kharkiv, Ukraine.

Гулько Ольга Володимирівна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, доцент кафедри вищої математики та економіко-математичних методів, Харків, Україна; email: gunko-olga@lenta.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7013-5400>.

Гулько Ольга Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент, Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеця, доцент кафедры высшей математики и экономико-математических методов, Харьков, Украина.

Gunko Olga – PhD (Physical and Mathematical Sciences), Associate Professor, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economy, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics and Economic and Mathematical Methods, Kharkiv, Ukraine.

МЕТОДИ ПОРІВНЯЛЬНОЇ СТАТИКИ І ДИНАМІКИ У ТЕОРІЇ ЕКОНОМІЧНИХ ЦИКЛІВ

Предметом наданої роботи є проблема опису динамічної поведінки ціни на ринку одного товару. Розглянуто типовий баланс взаємодії функцій попиту та пропозиції у залежності від ціни. Динамічна модель цінової еволюції базується на припущенні, що функція попиту у даний момент часу залежить від функції пропозиції в усі попередні моменти часу, тобто має місце процес з післядією. У якості ядра інтегрального перетворення вибрана характеристика другого порядку, яка може ініціювати періодичні режими у цінових змінних. **Метою** роботи є синтез математичної моделі цінових змін на ринку одного товару та дослідження стійкості її рівноважних станів з виявом структури граничних циклів. **Завданням** наступного дослідження є демонстрування ступеню зв'язку проблеми стійкості рівноваги з проблемою отримання плідних результатів у порівняльній статистиці. Ця дуальність являє собою принцип відповідності П. Самуельсона. Базовою математичною моделлю досліджуваного процесу цінової динаміки є система двох нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку. **Методами** досліджень є нелінійна теорія аналізу динамічних систем, математична теорія стійкості систем диференціальних рівнянь, понятійний апарат аналізу типових біфуркацій народження (загибелі) граничного циклу, відома як біфуркація Андронова-Хопфа. У **результаті** детального аналізу властивостей та параметрів автоколивальних режимів виявлений двохфазовий цикл, тобто є факт співіснування навколо рівноважного стану стійкого та нестійкого граничних циклів. Подальшими математичними перетвореннями доведено, що лінія розмежування цих двох циклів повністю визначається статичними параметрами досліджуваної системи, яка ілюструє механізм дії принципу відповідності П. Самуельсона. **Висновки:** на прикладі функціонування ринку праці виконаний вичерпний аналіз стійкості двох додатних рівноважних станів, які характеризують ефекти заміщення та доходу. За допомогою комп'ютерного моделювання реалізовані обчислювальні експерименти, які демонструють автоколивальні режими еволюції цінових змін. У наслідку аналізу отриманих чисельних результатів можна зробити висновок про стійкість граничного циклу у околі рівноважного стану, який відповідає ефекту заміщення.

Ключові слова: ринок; попит; пропозиція; ціна; динаміка; автоколивання; біфуркація; стійкість; принцип відповідності.

МЕТОДЫ СРАВНИТЕЛЬНОЙ СТАТИКИ И ДИНАМИКИ В ТЕОРИИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ

Предметом предоставленной работы является проблема описания динамического поведения цены на рынке одного товара. Рассмотрен типичный баланс взаимодействия функций спроса и предложения в зависимости от цены. Динамическая модель ценовой эволюции базируется на предположении, что функция спроса в данный момент времени зависит от функции предложения во все предыдущие моменты времени, то есть имеет место процесс с последствием. В качестве ядра интегрального преобразования выбрана характеристика второго порядка, которая может инициировать периодические режимы в ценовых изменениях. **Целью** работы является синтез математической модели ценовых изменений на рынке одного товара и исследования устойчивости ее равновесных состояний с определением структуры предельных циклов. **Задачей** настоящего исследования является демонстрация степени связи проблемы устойчивости равновесия с проблемой получения плодотворных результатов в сравнительной статике. Эта дуальность представляет собой принцип соответствия П. Самуельсона. Базовой математической моделью изучаемого процесса ценовой динамики является система двух нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка. **Методами** исследования является нелинейная теория анализа динамических систем, математическая теория устойчивости систем дифференциальных уравнений, понятийный аппарат анализа типичных биуркаций рождения (гибели) предельного цикла, известная как биуркация Андронова-Хопфа. В **результате** детального анализа свойств и параметров автоколебательных режимов обнаружен двукратный цикл, то есть факт сосуществования вокруг равновесного состояния устойчивого и неустойчивого предельных циклов. Последующими математическими преобразованиями доказано, что линия разграничения этих двух циклов полностью определяется статическими параметрами исследуемой системы, иллюстрирующая механизм действия принципа соответствия П. Самуельсона. **Выводы:** на примере функционирования рынка труда выполнен исчерпывающий анализ устойчивости двух положительных равновесных состояний, характеризующих эффекты замещения и дохода. С помощью компьютерного моделирования реализованы вычислительные эксперименты, демонстрирующие автоколебательные режимы эволюции ценовых изменений. В результате анализа полученных численных расчетов можно сделать вывод об устойчивости предельного цикла в окрестности равновесного состояния, которое соответствует эффекту замещения.

Ключевые слова: рынок; спрос; предложение; цена; динамика; автоколебания; биуркация; устойчивость; принцип соответствия.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Воронін А. В., Гунько О. В. Методи порівняльної статистики і динаміки у теорії економічних циклів. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 2 (16). С. 46–53. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.046>

Voronin, A., Gunko, O. (2021), "Methods of comparative statics and dynamics in the theory of economic cycles", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (16), P. 46–53. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.046>

T. MOMOT, O. FILONYCH, A. KOSIAK, O. LOBACH

BALANCED SCORECARD OF SAFETY-ORIENTED MANAGEMENT FOR THE CONSTRUCTION INDUSTRY ENTERPRISES

The article is devoted to the study of the theoretical and methodological foundations for the development of a balanced scorecard for ensuring safe-oriented management of enterprises in the construction industry. The **subject** of the research is a set of theoretical, methodological and practical aspects to ensure the formation of the balanced scorecard development to ensure safe-oriented management of enterprises in the construction industry. The **purpose** of the article is to develop theoretical and methodological provisions and substantiate practical recommendations for the formation of a model of a balanced scorecard for ensuring safe-oriented management of enterprises in the construction industry, taking into account the interests of all groups of stakeholders. **Objectives** of the work: to analyze modern trends in the development of enterprises in the construction industry in Ukraine; to generalize approaches to the definition of the concept of safety-oriented management; explore and organize the elements of safety-oriented management; to develop a model of a balanced scorecard for ensuring safe-oriented management in the corporate security system of enterprises in the construction industry. In the course of the study, the following methods were used: abstract-logical analysis, theoretical generalization and systematization, system analysis. The paper analyzes the dynamics of the development of enterprises in the construction industry in Ukraine in the context of the introduction of quarantine measures related to COVID-19. Factors constraining construction activities have been identified, which include financial constraints, insufficient demand, labor shortage, and weather conditions. Approaches to the definition of security-oriented management have been generalized and the definition of security-oriented management in the corporate security system has been improved. The elements of safety-oriented management are systematized with the specification of such components as risk assessment, development and implementation of security policy, definition of requirements, establishment of control and monitoring of the external and internal environment. A model of a balanced scorecard for ensuring safe-oriented management of enterprises in the construction industry has been developed. **Conclusions.** In the course of the study, the expediency of forming a balanced system of indicators for ensuring safe-oriented management of enterprises in the construction industry was substantiated, taking into account the dynamics of the performance of construction work during 2019-2021. The elements of the system of safe-oriented management are presented in detail and the expediency of the formation of a balanced system of indicators for ensuring the safe-oriented management of enterprises in the construction industry is substantiated. The sequence of the formation of a balanced scorecard for ensuring safety-oriented management is detailed with the specification of a scorecard for assessing strategic goals for the components of a balanced scorecard: finance, customers, internal business processes, training and development.

Keywords: safety-oriented management; corporate security; balanced scorecard; construction industry enterprises.

Introduction

With the introduction of quarantine measures related to COVID-19, the dynamics of changes in processes and phenomena increases the priority of safety issues in the construction industry. Thus, according to the State Statistics Service of Ukraine in 2020, the contribution of the construction industry to GDP is likely to increase to 2.9% compared to 2.7% in 2019. For comparison, this figure in Slovakia is 7.9%, Poland - 7.7%, Sweden - 6.8%, Romania - 6.1% [1]. Thus, the construction industry of Ukraine has significant growth potential and needs to attract additional investment resources.

The construction industry is always sensitive to the deteriorating economic situation in the country. Thus, the volume of construction work performed in 2020 increased by 4% compared to 2019, which is due only to the growth in infrastructure immediately by 14.8% to UAH 120.6 billion. and moderate dynamics in non-residential construction. The segment of housing construction according to the data of 2020 showed a drop of 18.5% at once - to UAH 28.4 billion. A clear trend of growth in the construction of infrastructure projects is associated with the introduction in March 2020 of the program "Large Construction" (fig. 1). According to the estimates of the Ukraine Economic Outlook Group, the impact of investments in "Large Construction" in the amount of UAH 136 billion. in UAH 156 billion. indirect growth of

other industries and UAH 120 billion. GDP in construction. In total, if this program falls out of domestic demand, the fall in real GDP in 2020 could reach 8-9% against the projected minus 5% [2].

According to the State Statistics Service, indicator of business confidence in construction, which is one of the components of the Economic Sentiment Indicator (ESI) in Ukraine (fig. 2), significantly deteriorated in the second quarter of 2020 (from -10.6% in the first quarter of 2019 to -48.2%) and remains low in the first quarter of 2021 (at -29.2%).

Among the factors constraining construction activity according to the results of the survey of construction companies are the following: financial constraints, insufficient demand, labor shortages, weather conditions [3].

In such conditions, the complexity of business processes in construction, associated with the implementation of a range of works for the successful and timely completion and commissioning of facilities, ensuring effective interaction and meeting the requirements of all stakeholders (developers, investors, contractors, supervisors). and regulators and others) determines the search for new safety-oriented management tools for a detailed analysis of the environment in which enterprises operate in the industry, in order to integrate the risk management system into the management system of enterprises in the construction industry.

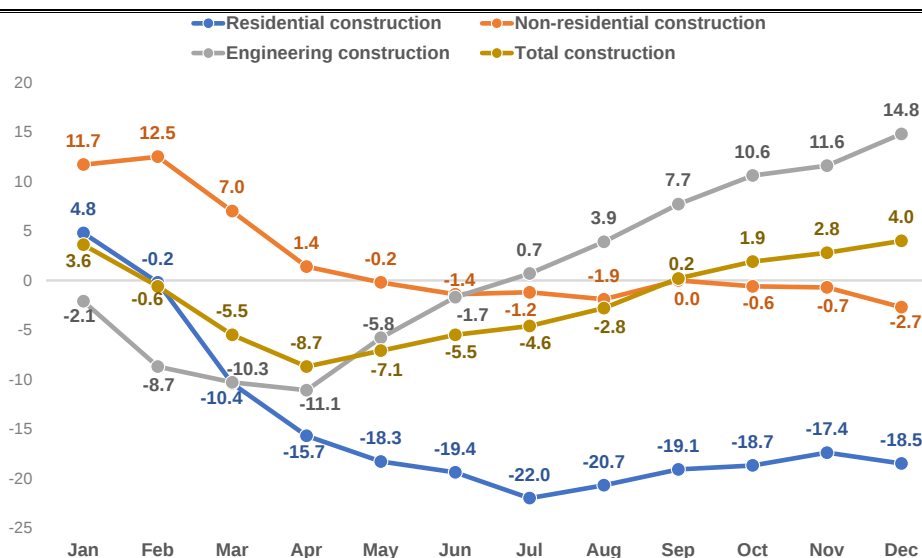


Fig. 1. Dynamics of construction production indices in 2020, % (cumulative total for the corresponding period of the previous year)

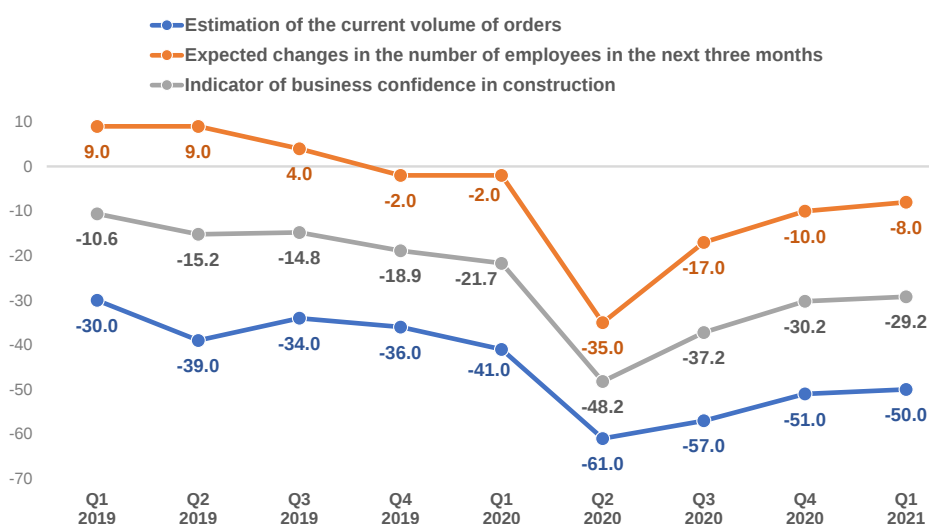


Fig. 2. Dynamics of indicators of business confidence in construction in 2019-2021, %

Analysis of recent research and publications

The problems of ensuring safe-oriented management are considered in the works of domestic scientists, such as I. A. Bashinskaya, L. A. Voloshchuk, N. I. Gavlovskaya, O. B. Zachko, V. A. Omelyanenko, I. P. Otenko, A. V. Prokopenko, L. A. Ptashchenko, E. N. Rudnichenko. Analysis of approaches to defining the concept of safety-oriented management in the research of domestic scientists shows their focus on solving problems within the existing management functions, in particular the development of methodological basis for safety-oriented management projects of complex organizational and technical systems [4]; formation of a driver for the implementation of safety-oriented management of foreign economic activity of enterprises, as a managerial innovation and formalization of the process of its implementation. [5]; development of theoretical and methodological basis and methodological provisions and recommendations for safety-oriented management by innovative development of domestic industrial enterprises [6], substantiation of the main aspects of the conceptual basis of the mechanism of

safety-oriented management of industrial enterprises [7] and safety-oriented anti-raiding [8].

Thus, according to the definition of I. A. Bashinsky, safety-oriented management is defined as management aimed, on the one hand, at minimizing the negative impact of risks, and on the other hand, at maximizing the benefit of probabilistic opportunities to obtain them. At the same time, the formation and functioning of the safety-oriented management system should be based on such principles:

- the principle of compliance (all safety-oriented measures must be legal within the legal field and must comply with the current strategy of the enterprise);
- the principle of systematization (safety orientation should be carried out on the basis of comprehensive consideration of factors, potential threats and probable risks, taking into account all elements of the system in their entirety, integrity and unity);
- the principle of continuity (security-oriented management occurs on an ongoing basis, which involves monitoring the development of events related to threats at all stages of management, including monitoring and control);

- the principle of timeliness with priority of preventive measures (this creates the maximum possible objectivity of decisions on threats, based on complete information, dynamics and assessment of the prospects of the environment of the enterprise);

- the principle of economic feasibility (it is necessary to justify safety-oriented measures when comparing the profitability and financial capabilities of the enterprise, which should exceed the level of risk of operations);

- the principle of interaction and coordination of all divisions of the enterprise with a clear differentiation of areas of responsibility and integration into the procedures of identification and evaluation of all divisions of the company and selected external partners, as well as their management;

- the principle of extending assessment and management to all hazards, even those that are outside the scope of financial and insured risks and cannot be quantified at this level of development [7].

Prokopenko A.V. and Omelyanenko V.A. also pay attention to the expediency of taking into account the principle of controllability [9]. At the same time, the authors note that taking into account the principle of manageability by safe-oriented management, in order to solve the problem of its integration into the system of management of the functioning and development of the enterprise, the theoretical basis of its research and management is the system approach, which makes it necessary to coordinate the functions of the strategic development management system with the functions of safety-oriented management, namely: evaluation and analytical, presented by analysis and evaluation, diagnosis, monitoring; planning and forecasting, which ensures the development of plans and programs; organizational which is defined by integration, coordination, coordination, support, realization, control; motivational orientation of staff on development and training, ensures its readiness to implement innovative changes.

Summarizing, it can be argued that safety-oriented management is one of the functions of corporate governance, which at an early stage allows to identify and effectively withstand events that may pose a threat to financial sustainability and the continued functioning of the enterprise.

The main elements of safety-oriented management are detailed in [5, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. As a type of management activity, safety-oriented management provides for the presence of an object and a subject of management.

Enterprise safety-oriented management objects are enterprise corporate security, accordingly, management decisions are made within such object to optimize business processes and the profitability of using enterprise resources, as well as to current and potential risks and threats to enterprise activity.

The subjects of safety-oriented management of the enterprise are its management, security personnel and all personnel.

The content of safety-oriented management is to recognize corporate security as a priority for the operation

of the enterprise in the face of the negative impact of the environment. At the same time, it is important to ensure the profitable activity of the enterprise.

As noted by Voloshchuk L.O. according to economic tools safety-oriented management is mainly preventive-indicative, where indicative methods are used mostly in the development process, and preventive and anticipative - at the peak of development, when traditional indicators of economic growth will show a high level of economic security, but at the same time signal the potential new threats to innovative development [6].

The mechanism of safety-oriented management is considered as a set of managerial, economic, organizational, legal and motivational ways to harmonize the interests of the enterprise with the interests of the environment, which, taking into account the peculiarities of the enterprise, provides a profit sufficient to ensure corporate security.

It should be noted that safety-oriented management plays many key roles in the organization of the management system, including risk management, crisis management, information security, crime detection, fraud prevention, physical security, investigation and business continuity planning.

In this context, the strategy of safety-oriented management should include strategies, mechanisms (coordination, training, regulation, conservation and protection), organizational methods, forms of strategic management of economic security, as well as methods of selection and coordination of adaptive measures that meet development guidelines. enterprises. At the same time, the classification of security-oriented development strategies determines passive and active types of strategies: passive survival, which use the available opportunities and are a typical way of action for the enterprise in a stable and predictable environment; active survival, aimed at active search and effective use of market opportunities; active impact on the environment, including actions to actively seek and create new opportunities for enterprise development through innovation, strategic competencies and knowledge [14].

To implement safety-oriented management, it is important to fulfill a group of conditions. So, in the first group of conditions, Pritis V.I. refers to the conditions that depend on the actions and decisions of the management of the enterprise, that is, at the micro level you can influence their creation and development. These conditions include: flexibility of the management system; responsiveness to negative impacts; the presence of a specialized economic security unit or individuals responsible; Defining the functional responsibilities of those responsible and clearly assigning authority; Adequate resources; a system of motivation of employees has been formed; internal control system is established in the context of the main processes and functional activities; development of the marketing component (analysis of potential markets, product promotion, other means of combating competitors); Interaction with local authorities has been established; interaction with mass media and public organizations [15].

The second group of conditions for the implementation of safety-oriented management includes

those on which the enterprise has no direct influence and is forced to perceive them in accordance with existing realities, forming adaptation mechanisms: the stability of the monetary unit in a certain range (at least within a year); stability of legislation; availability and stability of standards and product quality certification system; the possibility of sailing to form a strategy for the development of territories; the existence of regional policies for the development of both selected industries and individual enterprises; the possibility of sailing to form a strategy for the development of the industry [15].

Summing up, it is worth defining "safety-oriented management" as a type of management activity, a set of coordinated actions, measures and processes aimed at achieving the optimal level of corporate security in the process of enterprise development, the key task of which is to balance between the level of corporate security and the effectiveness of enterprise development, which leads to the formation of a balanced information and analytical support system of safety-oriented management taking into account the interests of all groups of stakeholders.

Goals and objectives of the study. The purpose of the article is to develop theoretical and methodological provisions and substantiate practical recommendations on the formation of a model of a balanced scorecard for ensuring safety-oriented management of construction industry enterprises, taking into account the interests of all stakeholder groups.

Study materials and methods

The theoretical and methodological basis of the study were the scientific works of leading economists, analytical materials of the State Statistics Service of Ukraine. The study used such methods as: abstract-logical analysis, dialectical, theoretical generalization, system and statistical analysis, cognitive modeling, system and statistical analysis, graphical method.

Study results and their discussion

Important components of the safety-oriented management system are risk assessment, development and implementation of safety policy, definition of requirements, establishment of control and monitoring of the external and internal environment. Risk assessment is performed in order to inform the top management about the potential impact on corporate security of various risks and threats that may be due to internal or external changes in the environment. Internal changes in the environment occur due to changes in goals, acquisition of new resources and changes in the management system, and so on. External changes are due to the emergence of new threats, the introduction of new laws, directives of government bodies that have jurisdiction over the organization, or the discovery of new opportunities in risk control.

The development and implementation of security policy involves the definition of restrictions on the behavior of components of the internal system, as well as

those that may be imposed on the actions of potential attackers. Based on the results of the evaluation, the existing policies, guidelines and procedures are regularly reviewed in order to update or create new ones in the absence of any. Updated or newly created policies should be reviewed interactively to fill gaps, resolve inconsistencies, and eliminate duplication. When approving, new or updated security policies should be consistent with organizational objectives. The process should involve all stakeholders of the enterprise, including management, departments involved and security professionals.

Based on the developed policies, a set of requirements for the security system is developed. These are the procedures and methods at the levels of hierarchy that are necessary to protect personnel, infrastructure and resources. Requirements should be organized in a hierarchical structure, from the highest level to the breakdown into details. The depth and breadth of requirements depends on the size of the enterprise and its mission. At the highest level of the hierarchy, the desired levels of protection of physical resources, non-physical assets and personnel are determined. Requirements specifications should take into account best security practices, specific practices in the market segment of the enterprise, laws and regulations and the unique socio-technical environment of the enterprise itself. Once defined, requirements should be agreed with a set of defined protocols and policies and revised if necessary.

Monitoring is carried out to prevent, detect and correct harmful and undesirable events. Requirements are implemented by new or modification of existing controls. If new controls are needed, then alternatives should be evaluated and a choice made.

Monitoring of the external and internal environment is considered as a stable stage of ensuring the protection of the enterprise through control procedures. With regard to the internal environment, adverse events are monitored, compliance with policies, protocols, requirements and the identification of new vulnerabilities. Violations of compliance are brought to the attention of stakeholders and recommendations are given on the application of appropriate actions. An unforeseen event will require updating the security database and initiating a risk assessment. Similarly, the external environment is monitored to identify new threats and new means of control. Environmental change goes through the same process to further modify controls, requirements and policies.

The application of these procedures within the process of organizing safety-oriented management is carried out on the basis of information and analytical support. Given that the level of corporate security of construction companies is important not only for internal stakeholders such as shareholders, managers, staff, but also for external ones such as the state (bankruptcy of large construction companies leaves the country GDP growth, leads to the need to resolve conflicts between developers and customers, requires financial resources to solve problems), competitors (identify market segments in

which competition takes place, determine its nature, identify general trends in the competitive environment, analyze the activities of competitors and the impact of their activities on the enterprise itself), suppliers is important in terms of the ability to pay for goods, services or credit resources, the ability to further receive income from joint activities), customers (safety of the enterprise is a prerequisite for the fulfillment of its obligations to the customer, ensuring the agreed quality those works, project deadlines, are a prerequisite for customer confidence in the company, and as a consequence of the volume of orders and, accordingly, the volume of profits), as information and analytical support safety-oriented management it is advisable to use a balanced scorecard taking into account the interests of all stakeholder groups..

The development of a balanced scorecard of safety-oriented management is a long-term process that covers all areas of construction companies, including financial indicators as one of the main criteria for assessing the results of the enterprise, and non-financial indicators that assess customer and shareholder satisfaction, internal business efficiency -processes, the potential of employees to ensure long-term financial success of the enterprise. The balanced scorecard essentially transforms the mission and overall management strategy of the company into a system of interrelated indicators that are more

understandable to ordinary staff and controlled by different departments of the company.

The development of a system of balanced scores always begins with the definition of the overall mission or overall strategy of the enterprise. The main strategic goal of a balanced scorecard of safety-oriented management is to ensure a sufficient level of corporate security in the process and as a result of company development in order to maximize profits, ensure the interests of all stakeholder groups, safe implementation of business projects. Taking into account the above, at the first stage for each area of a balanced scorecard, including finance, customers, training and staff development, internal business processes, formed a model of a balanced scorecard of safety-oriented management in the corporate security of construction companies with identification of sources of information (fig. 3). Within each area of a balanced scorecard of safety-oriented management, it is important to follow the mandatory stages, such as setting goals, collecting information, evaluating and streamlining, analyzing information, forming instructions on the procedure, approving the form of reports, uniform in format for all areas of activity in order to communicate to management and simplify their understanding and make further decisions for management.

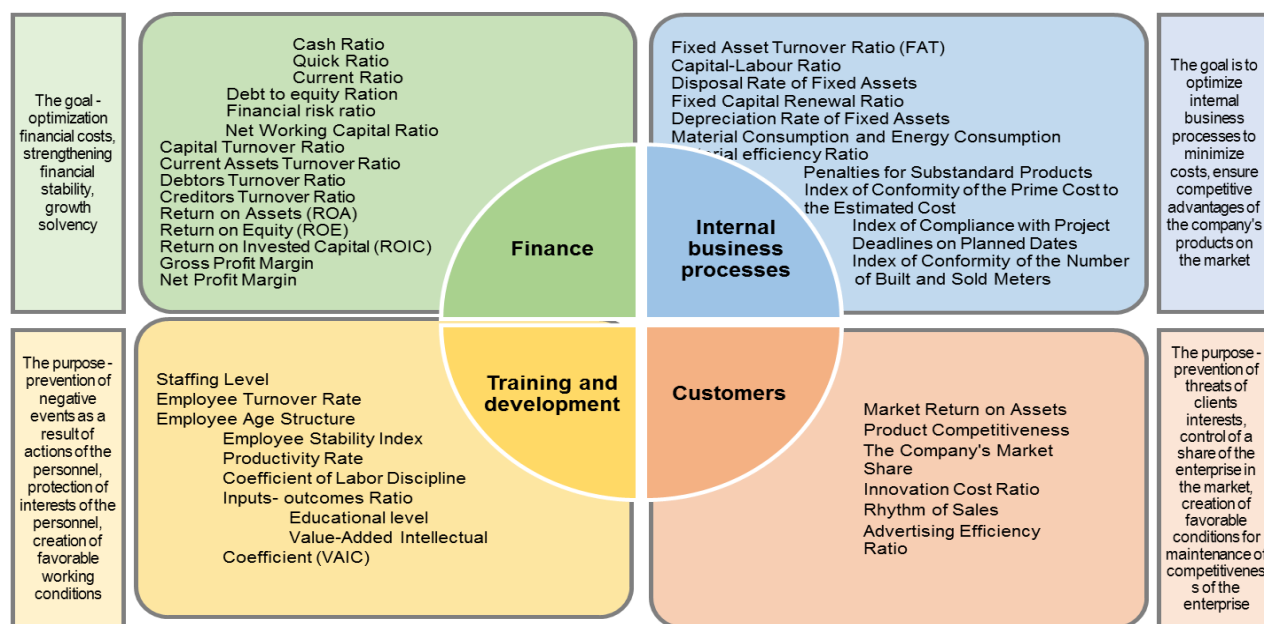


Fig. 3. Model of a balanced scorecard of safety-oriented management in the system of corporate security of construction companies

The success of solving a specific problem of further analysis depends on how well the primary information will be collected. It is important to identify a number of requirements that should be followed in determining the amount of information, namely: minimality, sufficiency and comprehensiveness. Excess information overloads the information array and leads to unjustified costs for its processing. Lack of information leads to a superficial, shallow assessment of factors. Lack of comprehensiveness leads to limited conclusions. The information collected must also be reliable, consistent and useful to achieve a specific goal. This stage of the process of developing a balanced scorecard is critical to the operation of the entire

system, as it minimizes non-productive time and money. The effectiveness of each management area largely depends on information support. The quality of information used for management decisions largely depends on the amount of financial resources, level of profitability, market value of the enterprise, alternative choices of investment projects and available financial instruments and other indicators that characterize the level of well-being of owners and staff, the pace of enterprise development.

The information management system of the company's management is a continuous and purposeful selection of relevant information indicators that are

necessary for the analysis, planning and preparation of effective management decisions in the field of safety-oriented management in all areas of the enterprise. At this stage, it is important to clearly define the timing of information collection. It is not allowed to collect information prematurely, when the conditions for revealing the fact or change of circumstances have not yet appeared, or to receive it late. Of great importance for the proper collection of information is the knowledge of the sources from which the information needed for analysis can be obtained. The range of sources of information largely depends on the purpose of the study, the direction of the analysis, the department in whose interests it was carried out. The information is selected from all available sources, but taking into account the specifics, so as not to expand the range of sources to infinity. On certain issues, the collection of information may be carried out in secret using the intelligence capabilities of the security service of the enterprise.

The information system of safety-oriented management should provide the necessary information not only to the management staff and owners of the enterprise, but also to satisfy the interests of a wide range of external stakeholders. At this stage, for each of the identified areas, a list of scores is developed, which should be calculated within its limits, which should be set benchmarks as normative values, the procedure for analyzing deviations of actual values from normative, development of measures to improve indicators to increase safety. enterprises. It is also important to divide the structural departments of the enterprise, relating to each of these areas. For each department it is necessary to establish for calculation and estimation, achievement of result of which indicators it corresponds, how it is motivated to watch and provide their standard level for the given enterprise.

According to research, the purpose of the financial sector of the enterprise is to optimize financial costs, strengthen financial stability, increase solvency, increase profitability. To ensure the achievement of the goal of this area, the following indicators are defined: absolute, fast and total liquidity ratio, financial independence ratio, financial risk, maneuverability ratio of own current assets, turnover of all enterprise capital, turnover of enterprise assets, turnover of receivables and payables, ratio, equity, products, sales. To work on indicators in this area can be attributed to such structural departments of the enterprise as accounting, economics and finance. The analysis of financial indicators is usually based on retrospective data, but it is possible to assess the results of the enterprise, determine the effectiveness of activities and redistribution of internal resources of the company to increase financial results, increase value and business security. The information base of this area is primarily financial statements, data from the company's accounting registers, data from statistical sites, internal management reporting of the company.

The purpose of the structures responsible for the field of training and development of staff is to prevent and prevent negative events due to the actions of staff, protect the interests of staff, create favorable working conditions. To ensure the achievement of the goal in this area, the

following list of indicators is defined: staffing ratio, staff turnover, age structure of staff, staff stability, labor productivity, labor discipline ratio, wage motivation, educational level and intellectual level of employees. To work on indicators in this area can be attributed to such structural departments of the enterprise as the department of selection and hiring of personnel. This area of activity should provide not only the calculation and analysis of the above indicators, but also cover the processes of staff training, creating a system of work motivation, creating standards for the characterization of work not only production but also administrative staff. The information base of this area is the data of accounting and personnel registers of the enterprise, data of statistical sites, internal tables on personnel information, identity cards of employees. It is also important to note that there is a direct relationship between such indicators of the company as the quality of internal service, employee satisfaction, employee retention, quality of external service, customer satisfaction, customer retention, profit. Staff satisfaction affects the quality of services provided; satisfied staff is more loyal to the company and makes a greater contribution to its development; a satisfied employee is unlikely to resign. In order for employees to take care of their customers, management needs to create comfortable working conditions. Thus, the field of staff training and development is directly related to the field of clients.

The purpose of the client's structures is to prevent threats to the interests of customers, control the company's market share, create favorable conditions to ensure the competitiveness of the enterprise. This structure should assess the risks both inside the company and outside. In this area, the creation of the information base is mostly "experienced", i.e. by means of surveying competitors directly on the spot. To analyze the external factors influencing the consumer of the enterprise, it is recommended to use the method of "mystery shopper", which allows you to get information about how a competitor builds a policy of interaction with customers (communication by phone and in person). Analysis of pricing policies and methods of sales promotion can be done by analyzing the price lists of competitors and information posted on websites and in the media. Analysis of advertising activity requires tracking of sources of information in which information about competing firms can be placed, in particular sites <http://www.novostroy.info>; <http://stroyobzor.ua/kharkov>; <http://proconsul.com.ua>. Knowing the means of advertising and the cost of ad units, you can calculate the advertising budgets of competitors. An important way to obtain information is to conduct a survey of buyers, in order to identify problem areas in the company's projects, the attitude of buyers to the quality of products, identify its shortcomings. The indicators of this area include the coefficient of market return on assets, product competitiveness, market share, the coefficient of innovation costs, the rhythm of sales, the coefficient of advertising efficiency. In this area, the priority areas of the enterprise are also determined, taking into account the interests of consumers in accordance with the prices at which they are willing to purchase the company's

products. It is also important to study the image of the competitor in the market, the number of consumers, the breadth of the product range, the level of competitiveness of the main groups of goods, the level of prices for goods and the quality of the communication system, the level of customer service. Marketing and sales departments can be assigned to work on indicators of this area. It was established that this area is aimed at achieving the following goals: to focus on the market needs of consumers, to timely fulfill contractual obligations to them, to improve the quality of products, current and after sales service, to ensure a high rate of expansion of the enterprise, to fully use the property, financial, personnel and other resources of the company, to ensure flexibility of operations in accordance with constantly changing conditions.

The sphere of internal business processes is the most unique for each enterprise, as it depends on the ways of organization and specifics of the enterprise, the class of consumers on which the company is focused. The generalized indicators of this area include: return on fixed assets, capital adequacy, the rate of disposal of fixed assets, the rate of renewal of fixed capital, depreciation of fixed assets, material consumption, energy consumption, efficiency of materials, fines for substandard products. The paper also proposes the use in this area of the index of conformity of the cost to the estimated cost, the index of compliance with the project deadlines to the planned dates, the index of conformity of the number of built and sold meters. The sphere of internal business processes covers the activities of more divisions of the enterprise than the previous ones, in particular it can include the production department, budget department, labor protection department, economic and financial department, legal department, technical construction supervision department. The information base, for the most part, is the internal reporting of each unit, the centers of responsibility for each individual project and the enterprise as a whole.

The next step in creating a balanced scorecard of safety-oriented management is to evaluate and stimulate the work of the workers involved in its implementation. To do this, each employee must write a job description, not formally, but with a detailed description of tasks, competencies, functions, powers and responsibilities; consider existing methods of evaluation and incentives, compare them; try to sample existing methodologies for each position; analyze the results and accept or reject the tested options.

For the successful implementation of the proposed model of safety-oriented management in the corporate security system of construction companies, it is advisable to use different methods of assessing the effectiveness of a

balanced scorecard, in particular: assessment by coefficients (coefficients are developed directly at each enterprise); expert assessment. The essence of the method is that the company allocates a group of specialists (usually TOP managers), in one way or another related to the work of units involved in creating a balanced scorecard. They become experts who evaluate the work of the relevant unit. At the end of the reporting period, each of the experts evaluates the work of the unit on a certain conditional scale. After that there is an average indicator which is an estimation of work of division for such period and depending on it make decisions on a level of competence, efficiency, and accordingly awarding).

When developing and implementing a balanced safety-oriented management system, it is important to ensure that each area of business understands not only its own functions, goals and objectives, but also the functions of other areas to quickly delegate and receive feedback as needed.

Conclusions

Thus, according to the study, safety-oriented management is defined as a type of management activity, a set of coordinated actions, activities and processes aimed at achieving the optimal level of corporate security in enterprise development, the key task of which is to balance corporate security and enterprise development, which determines the formation of a balanced system of information and analytical support for safety-oriented management, taking into account the interests of all groups of stakeholders.

The sequence has been established for procedures in the system of security-oriented management, including risk assessment, development and implementation of security policy, definition of requirements, control and monitoring of external and internal environment and the feasibility of information-analytical support of security-oriented management with a balanced system model indicators.

The introduction of a model of a balanced scorecard of safety-oriented management of construction companies allows to systematically present the overall strategy of the company with specification of tasks for each unit, using specific qualitative and quantitative indicators, which promotes consistency from the lowest levels of production (construction worker) to TOP managers, and accordingly, allows to increase the efficiency of internal business processes, personnel qualification, and as a result ensure maximization of profit, preservation of interests of employees and customers, safe implementation of business projects.

References

1. "Development of the Construction Industry and De-shadowing of the Labor Market in Construction", available at : <https://www.minregion.gov.ua/press/news/rozvitok-budivelnnoy-galuzi-ta-detinizatsiya-rinku-pratsi-u-budivnitstvi> (last accesses 21.05.2021)
2. "Road Clearance: Due to Which Construction Developed in 2020", available at : <https://gmcenter/en/posts/dorozhnij-prosvit-za-rahunok-chogo-rozvalosya-budivnictvo-u-2020-roci/> (last accesses 21.05.2021)
3. "The State of Business Activity of Construction Companies" available at : https://ukrstat.org/en/operativ/operativ2021/fin/rp/bud/bud_I%D0%86kv_2021_u.pdf (last accesses 15.05.2021)

4. Zachko, O. B. (2015), "Methodological Basis of Security-oriented Management of Projects for the Development of Complex Systems", *Management of complex systems development*, No. 23 (1), P. 51–55.
5. Rudnichenko, Ye. M., Havlovska, N. I., Yadukha, S. Y. (2018), "Implementation of Managerial Innovations in the System of Providing Economic Security for Subjects of Foreign Economic Activity", *Scientific Bulletin of Polissya*, No. 1 (13), Ch. 1, P. 88–94.
6. Voloshchuk, L. O. (2016), *Theoretical and Methodological Principles of Safety-oriented Management of Innovative Development of an Industrial Enterprise* : dis. ... Dr. of Science in Economics: special. 08.00.04 - Economics and management. of enterprises, Odessa nat. Polytechnic un-t, 605 p.
7. Bashinskaya, I. O. (2019), "The Mechanism of Ensuring Safety-oriented Management of an Industrial Enterprise", *Problems of System Approach in Economics: Book of Proceedings*, No. 6 (74), P. 21–26.
8. Ptashchenko, L. O. (2019), "Anti-raider Security-oriented Enterprise Management", *Economic Security: State, Region, Enterprise* : Monograph in 3 vol. / for the general. ed. V. O. Onishchenko and G. V. Kozachenko, Poltava : PolNTU, Vol. 3, P. 229–247.
9. Prokopenko, O., Omelyanenko, V. (2020), "Security-oriented Change Management in the Business Processes of an Industrial Enterprise", *International Scientific Journal "Internauka". Series: "Economic Sciences"*, No. 4. DOI: <https://doi.org/10.25313/2520-2294-2020-4-5927>
10. Gavlovskaya, N. I. (2016), "A Security-Oriented Environment for the Operation of Enterprises-subjects of Foreign Economic Activity", *Economy and Region*, No. 3, P. 80–85.
11. Gavlovskaya, N. I. (2016), *Economic Security of Foreign Economic Activity of Industrial Enterprises: Evaluation, Modeling, Support Mechanism* : Monograph, Khmelnytsky : FOP Melnyk A. A., 480 p.
12. Zachko, O. B. (2015), *Methodology of Security-oriented Project Management of Complex Systems (on the example of civil protection)* : dis. ... Dr. Tech. Science: 05.13.22. Lviv State University of Life Safety, Lviv, 342 p.
13. Rudnichenko, Ye., Krymchak, L., Franchuk, V., Havlovska, N., Melnyk, S. (2020), "Justification Of Management Decisions On Assessing The State Of Economic Security Based On Financial Indicators", *International Journal of Scientific & Technology Research*, Vol. 9 (7), P. 44–49.
14. Otenko I.P., Komarkov, D. V., Shkreben, R. P. (2018), "Strategic Tools of Security-oriented Enterprise Development", *Problems of Economy*, No. 2, P. 235–241.
15. Pritis, V. I. (2020), "Conditions for the Implementation of Security-oriented Management of Enterprises, Taking into Account Existing Threats", *Business Inform*, No. 3, P. 453–459.

Received 13.05.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Момот Тетяна Валеріївна – доктор економічних наук, професор, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, завідувач кафедри фінансово-економічної безпеки, обліку і аудиту, Харків, Україна; email: tvmomot@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7397-3565>.

Момот Татьяна Валерьевна – доктор экономических наук, профессор, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, заведующая кафедры финансово-экономической безопасности, учета и аудита, Харьков, Украина.

Momot Tetiana – Doctor of Sciences (Economics), O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Head of the Department of Financial and Economic Security, Accounting and Auditing, Kharkiv, Ukraine.

Філоніч Олена Миколаївна – кандидат економічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, докторант кафедри фінансово-економічної безпеки, обліку і аудиту, м. Харків, Україна; email: lenyaciaglbuh@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5428-6794>.

Филонич Елена Николаевна – кандидат экономических наук, доцент, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, докторант кафедры финансово-экономической безопасности, учета и аудита, Харьков, Украина.

Filonych Olena – PhD (Economics Sciences), O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Doctoral Student of the Department of Financial and Economic Security, Accounting and Auditing, Kharkiv, Ukraine.

Косяк Антоніна Петрівна – кандидат економічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, доцент кафедри фінансово-економічної безпеки, обліку і аудиту, Харків, Україна; email: zimaant@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1009-4082>.

Косяк Antonina Petrovna – кандидат экономических наук, доцент, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, доцент кафедры финансово-экономической безопасности, учета и аудита, Харьков, Украина.

Kosiak Antonina – PhD (Economics Sciences), O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Associate Professor of the Department of Financial and Economic Security, Accounting and Auditing, Kharkiv, Ukraine.

Лобач Олена Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри стратегічного управління, Харків, Україна; email: e.v.lobach@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7494-9997>.

Лобач Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", доцент кафедры стратегического управления, Харьков, Украина.

Lobach Olena – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of the Department of Strategic Management, Kharkiv, Ukraine.

ЗБАЛАНСОВАНА СИСТЕМА ПОКАЗНИКІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКООРІЄНТОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ПІДПРИЄМСТВ БУДІВЕЛЬНОЇ ГАЛУЗІ

Стаття присвячена дослідженню теоретико-методичних засад розробки збалансованої системи показників забезпечення безпекоорієнтованого управління підприємств будівельної галузі. **Предметом** дослідження є сукупність теоретичних, методичних і практичних аспектів щодо забезпечення формування розробки збалансованої системи показників забезпечення безпекоорієнтованого управління підприємств будівельної галузі. **Метою** статті є розробка теоретико-методичних положень

та обґрунтування практичних рекомендацій щодо формування моделі збалансованої системи показників забезпечення безпекоорієнтованого управління підприємств будівельної галузі із врахуванням інтересів усіх груп стейкхолдерів. **Завдання** роботи: проаналізувати сучасні тенденції розвитку підприємств будівельної галузі України; узагальнити підходи до визначення поняття безпекоорієнтованого управління; дослідити та систематизувати елементи безпекоорієнтованого управління; розробити модель збалансованої системи показників забезпечення безпекоорієнтованого управління в системі корпоративної безпеки підприємств будівельної галузі. У ході дослідження використано **методи**: абстрактно-логічний аналіз, теоретичного узагальнення та систематизації, системний аналіз. В роботі проаналізовано динаміку розвитку підприємств будівельної галузі України в умовах запровадження карантинних заходів, пов'язаних з COVID-19. Встановлено фактори, що стримують будівельну діяльність, до яких віднесено фінансові обмеження, недостатній попит, нестача робочої сили, погодні умови. Узагальнено підходи до визначення безпекоорієнтованого управління та удосконалено визначення безпекоорієнтованого управління в системі корпоративної безпеки. Систематизовано елементи безпекоорієнтованого управління із конкретизацією таких складових як оцінка ризиків, розробка та впровадження політики безпеки, визначення вимог, встановлення контролю та моніторинг зовнішнього та внутрішнього середовища. Розроблено модель збалансованої системи показників забезпечення безпекоорієнтованого управління підприємств будівельної галузі. **Висновки**. В процесі дослідження обґрунтовано доцільність формування збалансованої системи показників забезпечення безпекоорієнтованого управління підприємств будівельної галузі із врахуванням динаміки виконання будівельних робіт протягом 2019-2021 рр. Детально представлені елементи системи безпекоорієнтованого управління та обґрунтовано доцільність формування збалансованої системи показників забезпечення безпекоорієнтованого управління підприємств будівельної галузі. Деталізовано послідовність формування збалансованої системи показників забезпечення безпекоорієнтованого управління із конкретизацією системи показників для оцінки стратегічних цілей за складовими збалансованої системи показників: фінанси, клієнти, внутрішні бізнес-процеси, навчання та розвиток.

Ключові слова: безпекоорієнтоване управління, корпоративна безпека, збалансована система показників, підприємства будівельної галузі.

СБАЛАНСИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

Статья посвящена исследованию теоретико-методических основ разработки сбалансированной системы показателей обеспечения безопасно-ориентированного управления предприятий строительной отрасли. **Предметом** исследования является совокупность теоретических, методических и практических аспектов по обеспечению формирования разработки сбалансированной системы показателей обеспечения безопасно-ориентированного управления предприятий строительной отрасли. **Целью** статьи является разработка теоретико-методических положений и обоснование практических рекомендаций по формированию модели сбалансированной системы показателей обеспечения безопасно-ориентированного управления предприятий строительной отрасли с учетом интересов всех групп стейкхолдеров. **Задачи** работы: проанализировать современные тенденции развития предприятий строительной отрасли Украины; обобщить подходы к определению понятия безопасно-ориентированного управления; исследовать и систематизировать элементы безопасно-ориентированного управления; разработать модель сбалансированной системы показателей обеспечения безопасно-ориентированного управления в системе корпоративной безопасности предприятий строительной отрасли. В ходе исследования использованы **методы**: абстрактно-логический анализ, теоретического обобщения и систематизации, системный анализ. В работе проанализирована динамика развития предприятий строительной отрасли Украины в условиях введения карантинных мероприятий, связанных с COVID-19. Установлены факторы, сдерживающие строительную деятельность, к которым отнесены финансовые ограничения, недостаточный спрос, нехватка рабочей силы, погодные условия. Обобщены подходы к определению безопасно-ориентированного управления и усовершенствована определения безопасно-ориентированного управления в системе корпоративной безопасности. Систематизированы элементы безопасно-ориентированного управления с конкретизацией таких составляющих как оценка рисков, разработка и внедрение политики безопасности, определения требований, установления контроля и мониторинг внешней и внутренней среды. Разработана модель сбалансированной системы показателей обеспечения безопасно-ориентированного управления предприятий строительной отрасли. **Выводы**. В процессе исследования обоснована целесообразность формирования сбалансированной системы показателей обеспечения безопасно-ориентированного управления предприятий строительной отрасли с учетом динамики выполнения строительных работ в течение 2019-2021 гг. Подробно представлены элементы системы безопасно-ориентированного управления и обоснована целесообразность формирования сбалансированной системы показателей обеспечения безопасно-ориентированного управления предприятий строительной отрасли. Детализировано последовательность формирования сбалансированной системы показателей обеспечения безопасно-ориентированного управления с конкретизацией системы показателей для оценки стратегических целей по составляющим сбалансированной системы показателей: финансы, клиенты, внутренние бизнес-процессы, обучение и развитие.

Ключевые слова: безопасно-ориентированное управление, корпоративная безопасность, сбалансированная система показателей, предприятия строительной отрасли.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Момот Т. В., Філонич О. М., Косяк А. П., Лобач О. В. Збалансована система показників забезпечення безпекоорієнтованого управління підприємств будівельної галузі. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 2 (16). С. 54–62. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.054>

Momot, T., Filonych, O., Kosiak, A., Lobach, O. (2021), "Balanced scorecard of safety-oriented management for the construction industry enterprises", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (16), P. 54–62. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.054>

O. AVRUNIN, A. TRUBITCIN, V. KLYMENKO

THE METHOD FOR PREDICTIVE ASSESSMENT OF THE CONDITION OF PATIENTS WITH ATOPIC DERMATITIS AT DIFFERENT STAGES OF THE DISEASE

The **subject** of the research is the development of a method for prognostic assessment of the condition of patients with atopic dermatitis at different stages of the disease. The **goal** of the work is to study the informativeness of immunological indicators and data from dermatoscopic examinations in order to expand the possibilities of prognostic objectification of methods for assessing the condition of patients with atopic dermatitis with varying degrees of severity of the disease. The **task** of the work includes objectifying the blurring of assessment standards when analyzing the transition from one stage of the disease to another. **Methods.** The solution to this problem is possible when assessing the possibility of using models of parametric recognition (discrimination) using indicators of immunoglobulins in blood serum and indicators of immunograms, as well as color characteristics of skin areas based on the analysis of dermatoscopic images at various degrees of severity of the disease. **Result.** In the course of the study, the analysis of the color characteristics of the skin showed that when immunological blood parameters are added to the discrimination model, the probability of an error in making prognostic decisions significantly decreases. Predictive assessment of the condition of a patient with atopic dermatitis only by the color characteristics of the skin makes it possible to control this pathology with a higher degree of probability, which makes it possible to use the digital dermatoscopy method independently for express objectification of the condition of a patient with atopic dermatitis without waiting for the data of immunological analyzes. When a new patient appears, the above indicators are calculated for him and the normalized Euclidean distances to the center of the clusters corresponding to the studied pathologies are calculated. The calculated distances can be ranked and the probabilities of correspondence of the given case to specific pathologies can be determined. **Conclusions.** The prospect of further work is to substantiate the metrological characteristics of the method to eliminate possible systematic errors associated with the method of obtaining optical information.

Keywords: atopy; dermatitis; luminance channel; dermatoscopy; discrimination pattern.

Formulation of the problem

Atopic dermatitis (AD) is a chronic inflammatory skin disease fig. 1, which is most common in childhood. Being an important medical and social problem, AD is characterized by a very early manifestation, extensive skin lesions, accompanied by intense itching. Often with AD, secondary infection of the skin with various bacteria and fungi occurs, which is an additional aggravating factor in the patient's condition. In some cases, AD can be the cause of the development of bronchial asthma [1-4].

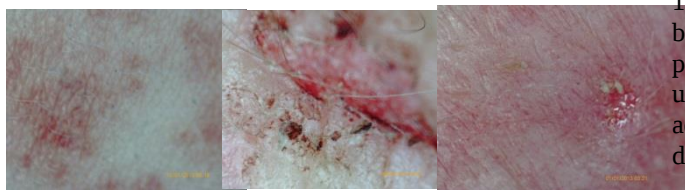


Fig. 1. External manifestations of atopic dermatitis

When objectifying the condition of a patient with AD, instrumental methods for studying the external manifestations of the disease play an important role. Currently, in assessing skin lesions caused by AD, one of the most informative is the dermatoscopy method. Visual analysis of the medical image obtained by dermatoscopy allows the doctor to make a preliminary conclusion about the state of the skin during a specific period of the disease.

The modern dermatoscope market is represented by a wide selection of samples that differ in their functionality and price range.

The VEOS DS3 dermatoscope is a portable digital dermatoscope with a touch-sensitive display, an improved lighting system that allows skin, subcutaneous structures

and vascular pattern studies. Dermatoscopy can be performed by contact and non-contact methods (non-polarization and polarization methods). You can adjust the focus in both manual and automatic modes. The design features of the optical system make it possible to avoid optical aberrations, as well as to conduct high-quality focusing and scaling. The device is equipped with 2 contact boards (immersion and cross-polarized).

Dermatoscope (trichoscope) irefly DE330T has an optical increase to 165x; digital up to 495x. Allows you to take pictures with a maximum resolution of 2 mPs (1600 x 1200). Equipped with three-layer glass - 650 nm. and a built-in polarizer with 12 gradations. Video recording is possible. Illumination is represented by a system of 8 ultra-bright LEDs with the possibility of brightness adjustment. The device has dimensions of 13x3.6 cm. The diameter of the chamber is 4 cm.

The DELTA 20 dermatoscope has a chrominance coefficient PRI > 87. the color transmission system is represented by 4 LEDs. Two LEDs can be turned off for side lighting. The optics of the device allows you to make 10-16 times the increase; undistorted over the entire plane. The adjustable eyepiece has individual focus with a correction range from -6 to + 6 dpt.

The Eurolight D30 dermatoscope has a contact glass with a diameter of 25 mm, a lighting system with a lighting intensity (12,000 Lux) with a service life of up to 50,000 hours, a focusing range: from -6 to + 3.5 D, ten times optical magnification, a scale for early detection of pigmentation changes in the skin [5 – 9].

As a recording device during the examination of patients, a video thermoscope UM039 fig. 2 was chosen, having the following characteristics: the possibility of optical magnification up to 200 times, the resolution of the sensing matrix 5 mPs (2880 × 1800 pixels). The device is

equipped with a built-in adjustable LED lighting unit, a tripod and a 3-inch rotary display.



Fig. 2. Digital video dermatoscope UM039

The effectiveness of solving problems of monitoring the states of objects with random properties, as a rule, depends on the correct selection of the most informative system of parameters (features) that are sensitive to changes in the characteristics of the object. Any control formally implements a test procedure, the effectiveness of the result of which is determined by reliability - the probability of making a correct decision [10]. This approach is complicated by the fact that with the uncertainty of the properties of the object of study, the task of selecting informative parameters becomes problematic. Especially, if metrological support of information transformations in the structure of the control system is difficult when objectification of the patient's condition with AD is carried out by the attending specialist.

Selection of the optimal (by the criterion of maximum reliability) system of informative signs for assessment of patient's condition with AD is the classical task of statistical synthesis in conditions of a priori uncertainty [11, 12]. Characteristics are ranked by information value by value of control validity index [11], or probability of errors [12]. The features of the processing steps [13, 14] and segmentation [15-17] of medical images also lead to errors in the selection of informative features. Also, the fuzziness of evaluation standards in the analysis of the transition from one stage of the disease to another leads to a decrease in prognostic objectification of the severity of the disease.

The solution to the problem is possible when assessing the possibility of using parametric recognition (discrimination) models using serum immunoglobulin indices and immunogram indices, as well as color characteristics of skin areas based on analysis of dermatoscopic images at different degrees of severity of AD.

The purpose of the work is to study the informativity of immunological indicators and dermatoscopic examination data in order to expand the possibilities of predictive objectification of methods for

assessing the condition of patients with AD with varying severity.

Materials and methods

The examination of children with AD was carried out on the basis of the Department of Pediatrics Propedeutics No. 2, KhNMU. All patients and their parents gave voluntary consent to participate in the study.

During the examination, anamnesis was collected and the initial dermatological status of the patients was described. The dynamics of the skin process was assessed on the 3rd, 14th, 17th and 28th day of treatment.

The patients received systemic therapy, which included taking antihistamines. Outwardly, we used basic emollient therapy and anti-inflammatory therapy with corticosteroids. The condition of the patients against the background of the therapy was assessed: as clinical recovery - complete resolution of the skin inflammatory process; significant improvement - reduction of the SCORAD index by 75% compared to the initial data; improvement - a decrease in the SCORAD index by 25-50%; no change - decrease in SCORAD index by less than 25%.

Images were recorded using a UM039 digital video dermatoscope. The images were captured onto a microSD card with subsequent transfer of data to a database on a computer.

Construction of a discrimination model to determine informative features

Consider a linear discrimination model. An informative parameter X used to obtain information about a priori undefined properties of an object of control can be considered as a random variable. The latter, in the case of two states of the object (Θ_0 – norm, Θ_1 – deviation from the norm) is characterized by conditional probability distribution densities

$$X \approx f(X/\Theta_0), \text{ if } \Theta \in \Theta_0,$$

$$X \approx f(X/\Theta_1), \text{ if } \Theta \in \Theta_1.$$

If $m^{(0)}, m^{(1)}, \delta^{(0)^2}, \delta^{(1)^2}$ are mean and dispersions of value X for conditions $\Theta \in \Theta_0$, and $\Theta \in \Theta_1$ accordingly, then under normal (Gaussian) distributions $f(X/\Theta_0), f(X/\Theta_1)$, the probability of decision error in the form of object states is determined under dispersions $\delta^{(0)^2}, \delta^{(1)^2}$ through the probability integral $\Phi(\delta/2)$ [10]

$$P_{er} = 1 - \Phi(\delta/2), \quad (1)$$

where

$$\delta = \left| \frac{m^{(0)} - m^{(1)}}{\delta} \right|. \quad (2)$$

The mean and standard deviation included in equation (2), respectively, are determined by the formulas below

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m_i)^2},$$

where n – number of measurements of the studied indicator.

If $\delta^{(0)^2} \neq \delta^{(1)^2}$, then the boundary for P_{er} can be estimated by the inequality

$$P_{er} \leq 1 - \Phi(\delta/2). \quad (3)$$

In multivariable monitoring, when the number of informative parameters $X_1, \dots, X_n$ is more than one ($n \geq 2$) variable δ is described by the equation

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{m_i^{(0)} - m_i^{(1)}}{\delta_i} \right)^2}, \quad (4)$$

where δ_i – standard deviation of the i -th indicator, which is determined by the formula

$$\delta_i = \max(\delta_i^{(0)}, \delta_i^{(1)}). \quad (5)$$

The square of the value δ from the equation (4)

$$\delta^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{m_i^{(0)} - m_i^{(1)}}{\delta_i} \right)^2. \quad (6)$$

is called the quadratic normalized Euclidean distance between the controlled states (between the vectors of the state averages Θ_0 и Θ_1) [11, 12].

The control object in this case is a vector-column of measured values

$$\bar{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix},$$

with conditional n -dimensional normal distribution density.

Expression (6) assumes the mutual independence of the vector components in the linear discrimination model [10-12].

The probability of error is less, the greater is, that is δ , the larger the variance-normalized square of the distance between the mean vectors.

A schematic illustration of the distribution of the measured value at two states $\Theta^{(0)}$ and $\Theta^{(1)}$ of the object under study is given in fig. 3.

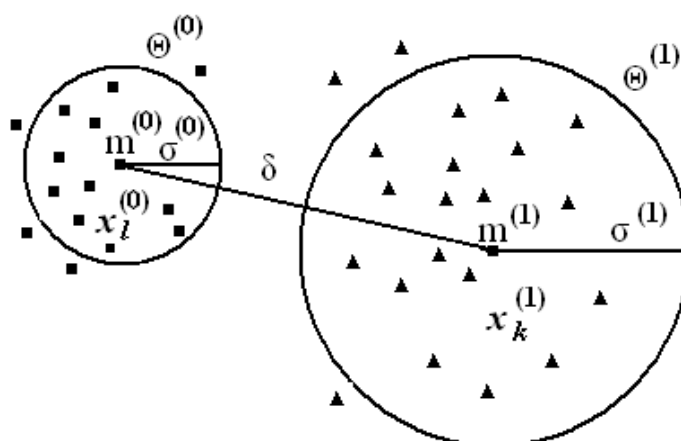


Fig. 3. Schematic illustration of the distribution of the measured value at two states $\Theta^{(0)}$ and $\Theta^{(1)}$ of the object under study

Thus, the variables δ (or δ^2) according to equations (5 and 6) make it possible to quantitatively compare not only single informative diagnostic indicators, but also subsets (systems) of indicators by discriminating ability (in fact, by informativity).

At the same time, for each group of patients the statistical indicators were found: mean values $m_i^{(0)}$ and $m_i^{(1)}$ – standard deviations of the corresponding indicators, and for calculation by formula (5) the maximum standard deviation was chosen according to the formula (6).

In calculations to determine the parameters of prognostic objectification of the assessment of the patient's condition with a severe form of AD, 10 informative parameters $X_i (i = \overline{1, 10})$ were used, which were displayed in ascending order of numbering:

- X_1 – serum immunoglobulin IgE, MOd/ml;
- X_2 – serum immunoglobulin IgG, g/l;
- X_3 – serum immunoglobulin IgA, g/l%;
- X_4 – serum immunoglobulin IgM, g/l;
- X_5 – cytotoxic lymphocytes CD8+, %;
- X_6 – T-helper lymphocytes CD4+, %;
- X_7 – natural killers CD16+, %;
- X_8 – Color tone of the skin area H (Hue) in the HSV system;
- X_9 – Color saturation of the skin area S (Saturation) in the HSV system;
- X_{10} – Color intensity of the skin area V (Volume) in the HSV system.

For simplicity, in the tables and graphs below, only the number of the informative parameter is indicated.

The first 7 were obtained from laboratory diagnostics data. The last 3 were obtained using dermatoscopy methods.

Patients were divided into two groups - patients with AD in the acute stage and conditional norm (control group).

The results of discriminant analysis when comparing the main indicators of serum immunoglobulins and these immunograms in these groups are given in table. 1. The graphs of the increase in the corresponding normalized Euclidean distance when adding parameters to the discrimination model and the change in the probability of an error in making a prognostic decision when controlling AD in the acute stage with the norm are shown in fig. 4-5, respectively.

Table 1. Comparison (control) of the effect of serum immunoglobulin indices and immunogram indices in the conditional norm and acute stage of AD

Method type	Conditional norm		Atopic dermatitis, acute stage		Normalized Euclidean distance	Normalized Euclidean distance with accumulation
Indicator Parameter	m	δ_m	m	δ_m	δ	δ_Σ
1. IgE, MOd / ml	65,2	27,3	201,61	73,31	1,86	1,86
2. IgG, g/l	13,60	7,86	4,44	2,35	1,17	2,19
3. IgA, g/l	1,90	1,25	0,74	0,37	0,93	2,39
4. IgM, g/l	1,45	0,96	0,81	0,45	0,65	2,47
5. CD8+, %	23,40	4,01	20,20	3,76	0,80	2,59
6. CD4+, %	39,01	5,03	38,26	3,61	0,15	2,60
7. CD16+, %	14,41	5,98	13,98	2,42	0,07	2,60
$P_{\Sigma error}$	0,19					

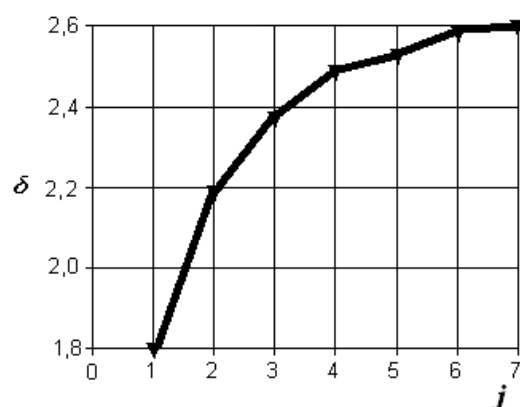


Fig. 4. A graph of the increase in the normalized Euclidean distance when adding parameters (indicators of serum immunoglobulins and immunogram data) to the discrimination model $\delta = F(j)$ when controlling AD in the acute stage and at a conditional norm ($j = 7$ is the dimension of the space of informative parameters)

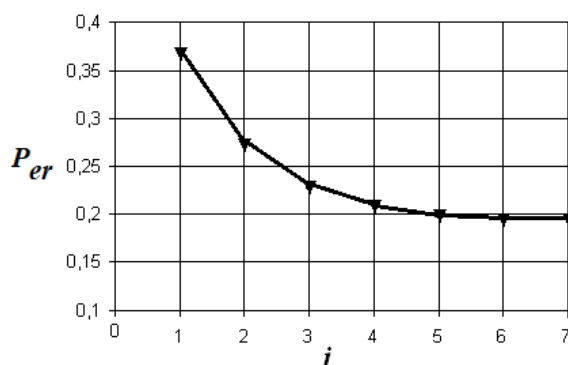


Fig. 5. A graph of the decrease in the error of making a prognostic decision when adding parameters (indicators of serum immunoglobulins and immunogram data) to the discrimination model $P_{er} = f(j)$ when controlling AD in the acute stage and at a conditional norm ($j = 7$ is the dimension of the space of informative parameters)

It can be seen from these graphs that the greatest contribution to the increase in the normalized Euclidean distance and, accordingly, to the decrease in the probability of error is made by the parameters of immunoglobulin in the blood serum (ranked in descending order of influence), the parameters of the immunogram (except, possibly, CD8 +) practically do not reduce the probability of an error in the assessment the patient's condition and they can be ignored. The total control error when taking into account data only on indicators of serum immunoglobulins and immunograms is 0.19.

If, in addition to the immunological parameters in the discrimination model, take into account the data of digital video dermatoscopy (color characteristics of the skin in the HSV system) (the results are given in table 2), then according to the graphs in fig. 5-6, it can be seen that the greatest contribution to the assessment of the patient's condition is made by a change in the color tone of the skin (reducing the error probability to 0.09) and then changing the saturation (reducing the error probability to 0.07).

Table 2. Comparison (control) of the total effect of serum immunoglobulin indices and immunogram indices, as well as the color characteristics of skin areas in the conditional norm and in the acute stage of AD

Method type	Conditional norm		Atopic dermatitis, acute stage		Normalized Euclidean distance	Normalized Euclidean distance with accumulation
Indicator Parameter	m	δ_m	m	δ_m	δ	δ_Σ
Im Σ ,					2,60	2,60
H	18°	10,52°	355°	7,26°	2,17	3,38
S	50,14	8,43	40,11	6,95	1,19	3,59
V	98,52	9,30	93,49	8,93	0,54	3,63
$P_{\Sigma error}$	0,07					

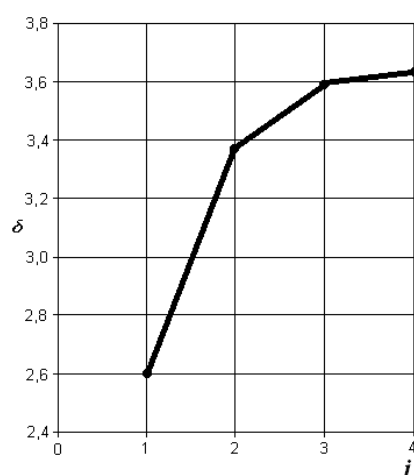


Fig. 6. The graph of the increase in the normalized Euclidean distance when adding parameters (indicators of serum immunoglobulins and immunogram data) and data from digital skin dermatoscopy in the HSV system into the discrimination model $\delta = F(j)$ for AD control in the acute stage and conditional norm ($j = 4$ is the dimension of the space of informative parameters, the first parameter takes into account the integral contribution of immunological data)

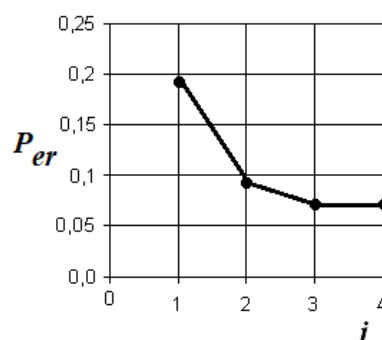


Fig. 7. A graph of the decrease in the error of making a prognostic decision when adding parameters (indicators of serum immunoglobulins and immunogram data) and data from digital skin dermatoscopy in the HSV system into the discrimination model $P_{er} = f(j)$ for AD control in the acute stage with the norm ($j = 4$ is the dimension of the space of informative parameters, the first parameter takes into account the integral contribution of immunological data)

Analysis of the color characteristics of the skin in the HSV table 2, which are separately shown in table 3-4, demonstrates the possibility of using the digital dermatoscopy method for predictive rapid assessment of the condition of patients with AD. So, in fig. 8–9 show an

increase in the normalized Euclidean distance and a change in the probability of a decision-making error by the attending specialist when comparing different pathologies with the norm.

Table 3. Comparison (control) of the influence of indices of color characteristics of skin areas in normal and acute stages of AD

Method type	Conditional norm		Atopic dermatitis, acute stage		Normalized Euclidean distance	Normalized Euclidean distance with accumulation
Indicator Parameter	m	δ_m	m	δ_m	δ	δ_Σ
H	18°	10,52°	355°	7,26°	2,17	2,17
S	50,14	8,43	40,11	6,95	1,19	2,47
V	98,52	9,30	93,49	8,93	0,54	2,54
$P_\Sigma error$	0,2					

Table 4. Comparison (control) of the effect of serum immunoglobulin indices and immunogram indices in normal and acute stages in AD

Method type	Conditional norm		Atopic dermatitis, acute stage		Normalized Euclidean distance	Normalized Euclidean distance with accumulation
Indicator Parameter	m	δ_m	m	δ_m	δ	δ_Σ
1. IgE, Mod/ml	65,2	27,3	201,61	73,31	1,86	1,86
2. IgG, g/l	13,60	7,86	4,44	2,35	1,17	2,19
3. IgA, g/l	1,90	1,25	0,74	0,37	0,93	2,39
4. IgM, g/l	1,45	0,96	0,81	0,45	0,65	2,47
5. CD8+, %	23,40	4,01	20,20	3,76	0,80	2,59
6. CD4+, %	39,01	5,03	38,26	3,61	0,15	2,60
7. CD16+, %	14,41	5,98	13,98	2,42	0,07	2,60
8. H	18°	10,52°	355°	7,26°	2,17	3,38
9. S	50,14	8,43	40,11	6,95	1,19	3,59
10. V	98,52	9,30	93,49	8,93	0,54	3,63
$P_\Sigma error$	0,07					



Fig. 8. A graph of the increase in the normalized Euclidean distance when adding color characteristics of the skin in the HSV system to the discrimination model $\delta = F(j)$ when comparing AD in the acute stage with the conditional norm ($j = 3$ is the dimension of the space of informative parameters)

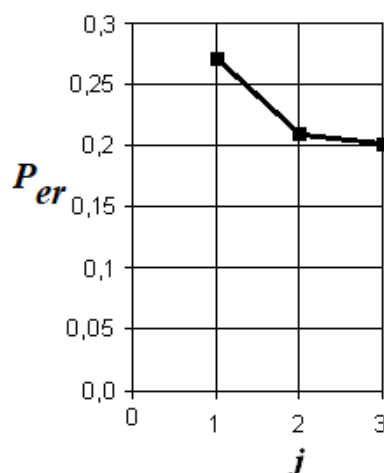


Fig. 9. A graph of the decrease in the error of making a prognostic decision when adding color characteristics of the skin in the HSV system to the discrimination model $P_{er} = f(j)$ when comparing a patient with AD in the acute stage with a conditional norm ($j = 3$ is the dimension of the space of informative parameters)

From the analysis of the graphs in fig. 8 and 9, it is obvious that when comparing AD in the acute stage with the norm, the most significant indicators of immunoglobulin in blood serum (the first 4, ranked in descending order of contribution to the discrimination model) and the indicator of the CD8 + immunogram. The rest of the immunological parameters do not make significant changes in the discrimination model and can be ignored. The total probability of a decision error is 0.19.

Conclusions

Analysis of the color characteristics of the skin in the HSV system showed that when immunological blood parameters are added to the discrimination model, the probability of an error in making prognostic decisions by the attending specialist significantly decreases from 0.19 to 0.07.

Predictive assessment of the condition of a patient with AD only by the color characteristics of the skin in the HSV system makes it possible to control this pathology with an error probability of 0.2. This allows using the digital dermatoscopy method independently for express objectification of the condition of an AD patient without waiting for the data of immunological analyzes.

When a new patient appears, the above indicators are calculated for him and the normalized Euclidean distances to the center of the clusters corresponding to the studied pathologies are calculated. The smallest distance to the center of one of the clusters will correspond to the most probable state of control (norm, or pathology). Also, these distances can be ranked and the probabilities of the correspondence of the given case to specific pathologies can be determined.

The prospect of the work is to substantiate the metrological characteristics of the method to eliminate possible systematic errors associated with the method of obtaining optical information.

References

1. Ishcheikin, K. E. (2012), "Results of application of advanced complex therapy of treatment of atopic dermatitis at the child of 6 years" ["Rezultaty zastosuvannya vdoskonalenoj kompleksnoyi terapiyi likuvannya atopichnoho dermatytu u dytyny 6 rokiv"], *The world of medicine and biology*, No. 3. P. 86–89.
2. Besh, L. V., Matsyura, O. I., Lishchuk-Yakimovich, H. O., Pukalyak, R. M., Lugovsky, S. V. (2018), "Difficulties in the differential diagnosis of atopic dermatitis in children" ["Trudnoshchi dyferentsial'noyi diahnozyky atopichnoho dermatytu v ditey"], *Clinical pediatrics*, Vol. 13, No. 6, P. 570–575.
3. Nyankovsky, S. L., Nyankovskaya, O. S., Gorodilovska, M. I., et al. (2019), "Evaluation of the effectiveness of probiotics in atopic dermatitis on the background of food allergies in children" ["Otsinka efektyvnosti zastosuvannya probiotykyv pry atopichnomu dermatyti na foni kharchovoyi alerhiyi v ditey"], *Clinical pediatrics*, Vol. 14, No. 6, P. 356–365.
4. Ishcheikin, K. E. (2012), "Artificial feeding as a provoking factor of atopic dermatitis in children" ["Shtuchne vyhodovuvannya yak provokuyuchy faktor atopichnoho dermatytu u ditey"], *Problems of ecology and medicine*, Vol. 16, No. 5-6, P. 3–7.
5. Trubitsyn, A. A., Isaeva, O. A., Klimenko, V. A., Avrunin, O. G. (2019), "Instrumental methods for assessing the condition of the skin in atopic dermatitis" ["Instrumental'nyye metody otsenki sostoyaniya kozhi pri atopicheskom dermatite"], *Science and technology*, No. 20, P. 180–187.
6. Avrunin, O., Klymenko, V., Trubitcin, A., Isaeva, O. (2019), "Development of Automated System for Video Intermetoscopy", *Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference International Trends in Science and Technology*, Vol. 2, January 31, 2019, Warsaw, Poland, P. 6–9.

7. Avrunin, O., Trubitsin, A., Isaeva, O., Klymenko, V. (2020), "Possibilities for assessing the effectiveness of treatment of atopic dermatitis based on analysis of color characteristics of video dermatoscopic images", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (12), P. 127–133. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.12.127>
8. Krylova, E. V., Krylov, A. V. (2013), "Assessment of the functional state of the skin using autofluorescence dermoscopy" ["Otsenka funktsional'nogo sostoyaiya kozhi s pomoshch'yu autofluorescentnoy dermatoskopii"], *Scientific notes of St. acad. I.P. Pavlova*, Vol. 20, No. 1, P. 62–65.
9. Khismatullina, Z. R., Chebotaryov, V. V., Babenko, E. A. (2020), "Dermatoscopy in Dermato-Oncology: Current State and Perspectives", *Creative Surgery and Oncology*, Vol. 10, No. 3, P. 241–248. DOI: <https://doi.org/10.24060/2076-3093-2020-10-3-241-24>
10. Gavriluk, O. V., Litus, M. O., Litvinenko, B. V., Litus, I. O. (2017), "Improvement of screening systems of observation and remote methods of diagnostics of oncoproliferative skin diseases under modern conditions" ["Udoskonalennya skryninhovykh system sposterezheniya ta dystantsiynykh metodiv diahnozyky onkoproliferatyvnykh zakhvoryuvan' shkiry za suchasnykh umov"], *Dermatovenereology. Cosmetology. Sexopathology*, No. 4, P. 132–135.
11. Avrunin, O. G., Shchapov, P. F. (2011), *Increasing the reliability of control and diagnostics of objects in conditions of uncertainty* [Povysheniye dostovernosti kontrolya i diagnostiki ob'yektov v usloviyakh neopredelennosti]: monograph, Kharkiv : KhNADU, 192 p.
12. Selivanova, K. G., Avrunin, O. G., Zlepko, S. M., et al. (2016), "Quality improvement of diagnosis of the electromyography data based on statistical characteristics of the measured signals", *Proc. of SPIE 10031*.
13. Avrunin, O. G., Bodyansky, E. V., Kalashnik, M. V., Semenets, V. V., Filatov, V. O. (2018), *Modern intellectual technologies of functional medical diagnostics* [Suchasni intelektual'ni tekhnolohiyi funktsional'noyi medychnoyi diahnozyky]: monograph. Kharkiv : NURE, 248 p.
14. Avrunin, O., Shushlyapina, N., Nosova, Ya., Surtel, W., Burlibay, A., Zhas-sandykzy, M. (2015), "Method of expression of certain bacterial microflora mucosaol factory area", *Proc. SPIE 9816, Optical Fibers and Their Applications*, 98161L. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2229074>
15. Shchapov, P. F., Avrunin, O. G. (2011), "Obtaining information redundancy in the systems of measuring control and diagnostics of measuring objects" ["Polucheneye informatsionnoy izbytochnosti v sistemakh izmeritel'nogo kontrolya i diagnostiki izmeritel'nykh ob'yektov"], *Ukrainian metrological journal*, No. 1, P. 47–50.
16. Tymkovich, M., Avrunin, O., Farouk, H. (2014), "Reconstruction method of the intact surface of surgical accesses", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Information and Controlling System*, Vol. 4, No. 9 (70), P. 37–41.
17. Tymkovich, M., Avrunin, O., Paliy, V., et al. (2017), "Automated method for structural segmentation of nasal airways based on cone beam computed tomography", *Proc. SPIE*, 10445, P. 446–453.
18. Avrunin, O. G., et al. (2017), "Using a priori data for segmentation anatomical structures of the brain", *Przeglad Elektrotechniczny*, Vol. 93-5, P. 102–105. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2017.05.20>

Received 31.05.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Аврунін Олег Григорович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри біомедицинської інженерії, Харків, Україна; email: oleh.avrunin@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6312-687X>.

Аврунін Олег Григорьевич – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, заведующий кафедры биомедицинской инженерии, Харьков, Украина.

Avrunin Oleg – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Head of the Department of Biomedical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Трубіцин Олексій Олексійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри біомедицинської інженерії, Харків, Україна; email: altr287@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7581-1700>.

Трубицин Алексей Алексеевич – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирант кафедры биомедицинской инженерии, Харьков, Украина.

Trubitsin Alexey – Kharkov National University of Radio Electronics, Postgraduate Student of the Department of Biomedical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Клименко Вікторія Анатоліївна – доктор медичних наук, професор, Харківський національний медичний університет, завідувач кафедрою пропедевтики педіатрії №2, Харків, Україна, email: klymenkoviktoriiia@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6762-9650>.

Клименко Виктория Анатольевна – доктор медицинских наук, профессор, Харьковский национальный медицинский университет, заведующая кафедрой пропедевтики педиатрии №2, Харьков, Украина.

Klymenko Viktoriia – MD, Professor, Kharkiv National Medical University, Head of Department Department of Fundamentals of Pediatrics No. 2, Kharkiv, Ukraine.

МЕТОД ПРОГНОСТИЧНОЇ ОЦІНКИ СТАНУ ХВОРИХ НА АТОПІЧНИЙ ДЕРМАТИТ НА РІЗНИХ СТАДІЯХ ЗАХВОРЮВАННЯ

Предметом дослідження є розробка методу прогностичної оцінки стану хворих на atopічний дерматит на різних стадіях захворювання. **Метою** роботи є дослідження інформативності імунологічних показників і даних дематоскопічних обстежень з метою розширення можливостей прогностичної об'єктивізації методів оцінки стану хворих на atopічний дерматит з різним ступенем тяжкості захворювання. До **завдань** дослідження входить об'єктивізація розмитості еталонів оцінки при аналізі переходу від однієї стадії захворювання до іншої. В якості **методу** рішення поставленої проблеми можливе використання моделей параметричного розпізнавання (дискримінації) з використанням показників імуноглобулінів в сироватці крові і показників імунограмм, а також кольорних характеристик ділянок шкіри на основі аналізу дерматоскопічних зображень при оцінці можливості виникнення різних стадій тяжкості захворювання. До **результатів** дослідження можна віднести те, що в ході дослідження аналіз кольорних характеристик шкіри показав, що при додаванні в модель дискримінації імунологічних показників крові ймовірність помилки в прийнятті прогностичних рішень істотно зменшується. Прогностична оцінка стану хворого на atopічний дерматит тільки за кольоровими характеристиками шкіри дозволяє здійснювати контроль даної патології з більш високою часткою ймовірності, що дозволяє використовувати метод цифрової дерматоскопії самостійно для експрес об'єктивізації стану хворого на atopічний дерматит не чекаючи даних імунологічних аналізів. При появі нового пацієнта під час обстежень в умовах стаціонару для нього розраховуються наведені вище показники і обчислюються нормовані евклідової відстані до центру кластерів, відповідних досліджуваним патологіям. Розраховані відстані можна ранжувати і визначати ймовірності відповідності наведеного випадку конкретним патологіям. **Висновки.** Перспективою подальшої роботи є обґрунтування метрологічних характеристик методу для виключення можливих систематичних похибок, пов'язаних з методом отримання оптичної інформації.

Ключові слова: atopія; дерматит; канал яскравості; дерматоскопія; модель дискримінації.

МЕТОД ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ БОЛЬНЫХ АТОПИЧЕСКИМ ДЕРМАТИТОМ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ЗАБОЛЕВАНИЯ

Предметом исследования является разработка метода прогностической оценки состояния больных с atopическим дерматитом на разных стадиях заболевания. **Целью** работы является исследование информативности иммунологических показателей и данных дематоскопических обследований с целью расширения возможностей прогностической объективизации методов оценки состояния больных atopическим дерматитом с различной степенью тяжести заболевания. В **задачи** исследования входит объективизация размытости эталонов оценки при анализе перехода от одной стадии заболевания к другой. **Методы.** Решение поставленной проблемы возможно при оценке возможности использования моделей параметрического распознавания (дискриминации) с использованием показателей иммуноглобулинов в сыворотке крови и показателей иммунограмм, а также цветовых характеристик участков кожи на основе анализа дерматоскопических изображений при различных степенях тяжести заболевания. **Результат.** В ходе исследования анализ цветовых характеристик кожи показал, что при добавлении в модель дискриминации иммунологических показателей крови вероятность ошибки в принятии прогностических решений существенно уменьшается. Прогностическая оценка состояния больного с atopическим дерматитом только по цветовым характеристикам кожи позволяет осуществлять контроль данной патологии с более высокой долей вероятности, что позволяет использовать метод цифровой дерматоскопии самостоятельно для экспресс объективизации состояния больного atopическим дерматитом не дожидаясь данных иммунологических анализов. При появлении нового пациента для него рассчитываются приведенные выше показатели и вычисляются нормированные Евклидовы расстояния до центра кластеров, соответствующих изучаемым патологиям. Рассчитанные расстояния можно ранжировать и определять вероятности соответствия приведенного случая конкретным патологиям. **Выводы.** Перспективой дальнейшей работы является обоснование метрологических характеристик метода для исключения возможных систематических погрешностей, связанных с методом получения оптической информации.

Ключевые слова: atopія; дерматит; канал яркости; дерматоскопия; модель дискриминации.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Аврунін О. Г., Трубіцин О. О., Клименко В. А. Метод прогностичної оцінки стану хворих на atopічний дерматит на різних стадіях захворювання. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 2 (16). С. 63–71. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.063>

Avrunin, O., Trubitsin, A., Klymenko, V. (2021), "The method for predictive assessment of the condition of patients with atopіc dermatitis at different stages of the disease", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (16), P. 63–71. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.063>

І. С. БОНДАРЕНКО, О. Г. АВРУНІН

ПРО АКУСТО-МАГНІТНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ АКУСТИЧНОГО ОПОРУ ЛОКАЛЬНИХ ДІЛЯНОК БІОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

Предметом вивчення в статті є акустичний опір локальних ділянок біологічного середовища *in vivo*, залежний від їх патології. **Метою** роботи є розробка кількісного методу вимірювання акустичного опору локальних ділянок біологічного середовища, розташованих у середині організму людини. У статті вирішуються наступні **завдання**: розробка акусто-магнітного методу вимірювання акустичного опору локальних ділянок біологічного середовища; розробка дистанційного способу вимірювання електричної напруги на поверхні шкіри пацієнта, викликаної акусто-магнітним впливом на локальні ділянки середовища і визначеною величиною акустичного опору; розрахунок співвідношень, що пов'язують величину акустичного опору локальних ділянок середовища з електричною напругою на вимірювальних зондах на шкірі пацієнта, значеннями потужності акустичного випромінювання і зовнішнього постійного магнітного поля, а також з відстанню між зондами і локальним ділянкою біологічного середовища; верифікація розрахункових співвідношень за допомогою експериментального визначення акустичного опору локальної ділянки модельного біологічного середовища. Були використані наступні **методи**: фізичне моделювання біологічного середовища, фізико-математичне моделювання електричних властивостей локальної ділянки біологічного середовища, розрахунок електромагнітних і акустичних параметрів середовища, експериментальне вимірювання напруженості електричного поля, що збуджується в локальній ділянці біологічного середовища, верифікація розрахункових співвідношень шляхом їх порівняння з результатами експериментів. Наступні **результати** були отримані: розроблено дистанційний спосіб вимірювання електричної напруги на поверхні шкіри пацієнта, викликаної акусто-магнітним впливом на локальні ділянки середовища та яка визначається величиною акустичного опору; розраховані співвідношення, що зв'язують величину акустичного опору локальних ділянок середовища з електричною напругою на вимірювальних зондах на шкірі пацієнта, значеннями потужності акустичного випромінювання і зовнішнього постійного магнітного поля, а також з відстанню між зондами і локальним ділянкою біологічного середовища; виконана верифікація розрахункових співвідношень за допомогою експериментального визначення акустичного опору локальної ділянки модельного біологічного середовища. **Висновки**: розроблено дистанційний акусто-магнітний метод високоточного вимірювання величини акустичного опору локальних ділянок біологічної тканини людини, підтверджений експериментально на модельних зразках тканини. Метод може дозволити виявити з високою точністю функціональний зв'язок вимірюваного локального значення акустичного опору з патологічними змінами тканини. При цьому виключається вплив людського фактора на інтерпретацію реєстрованих значень акустичного опору, характерного для традиційного в основному якісного, а не кількісного ультразвукового методу, підвищується інформативність і достовірність акустичної діагностики.

Ключові слова: акустичний опір; біологічне середовище; акусто-магнітний метод; електрична напруга; ультразвук.

Вступ

Використання акустичних методів для діагностики захворювань має багаторічну історію [1, 2]. Актуальним завданням медицини є підвищення інформативності та достовірності діагностики захворювань за допомогою акустичної локації організму людини. Акустичне випромінювання формується в навколишньому матеріальному середовищі (крім вакууму) в основному за допомогою твердотільних генераторів ультразвукового випромінювання (УЗВ) на основі фізичних явищ магнітострикції феромагнетиків або зворотного п'єзоефекту в сегнетоелектриках. Поширення акустичної хвилі від генератора УЗВ до звукопроводу, що знаходиться в контакті з середовищем і далі через середовище визначаються однорідністю акустичного опору (R_C) середовища.

При цьому

$$R_C = \rho \cdot c, \quad (1)$$

де ρ , c – відповідно, щільність середовища і швидкість звуку в ній.

Традиційним способом визначення R_C було досі незалежне вимірювання щільності і швидкості звуку окремо. Щільність середовища вимірюється шляхом

зважування зразка середовища і вимірювання його об'єму. Швидкість звуку визначається в зразках на спеціалізованих установках. Ці методи визначення акустичного опору практично не придатні в разі дослідження *in vivo* тканин людини.

При наявності неоднорідностей акустичного опору УЗВ з частотою f відбивається від них і в середовищі можуть встановлюватися стоячі хвилі звуку при виконанні умови

$$L_i = n \lambda / 2, \quad (2)$$

де L_i – відстань від звуководом до неоднорідності, $n = 1, 2, 3, \dots$, $\lambda = c / f$. Величина відбитої потужності залежить від відношення акустичного опору неоднорідності R_n до акустичного опору середовища R_C . Чим більше це відношення, тим більша потужність відбивається від неоднорідності. Зокрема, при введенні УЗВ в посудину з рідиною у напрямку до його дна відбуватиметься практично повне віддзеркалення звуку від дна посудини.

Застосування ультразвуку зробило переворот в діагностиці багатьох захворювань. Це сталося завдяки різко поліпшеній роздільній здатності УЗВ апаратів. З урахуванням повної безпеки УЗВ, вони серйозно потіснили рентгенівські методи діагностики і на сьогодні разом з рентгеном і МРТ складають основну

тріаду дистанційних методів діагностики, що застосовуються в сучасних поліклініках і лікарнях. Поширений в даний час метод ехо-локації організму людини при УЗВ діагностиці інтегрально реєструє не тільки відмінності в щільності біологічної тканини, а й численні відображення УЗВ від областей з різними невідомими априорі значеннями акустичного опору. В результаті ультразвукові чорно-білі зображення внутрішніх тканин організму на екрані ультразвукового сканера залишаються досить складними для існуючої візуальної розшифровки і є в основному якісними, а не кількісними. Якість розшифровки обмежується індивідуальним досвідом і здатністю ока лікаря розрізняти численні чорно-білі півтони ехо-віддзеркалень ультразвукового випромінювання, відповідальні за індивідуальні особливості патологічних ділянок організму людини. Це знижує об'єктивність та інформативність УЗВ - методу.

Однією з можливостей досягти більшої об'єктивності та інформативності методів діагностики біологічного середовища (БС) в медицині з використанням УЗВ є розробка пропонованого нами акусто-магнітного методу (АММ). В його основі лежить спільна дія на БС ультразвуку і постійного магнітного поля. Цей метод ґрунтується не на візуальній якійсь розшифровці УЗВ зображень, а на кількісному вимірі з високою точністю величини РС локального ділянки БС, яка може бути різною в зв'язку з тим чи іншим захворюванням людини (пухлини різного походження, тромбоутворення в судинах і т.п.).

Метою статті є обґрунтування акусто-магнітного методу вимірювання РС локальних ділянок БС.

Завданнями статті є розробка схем вимірювальних систем, розрахунок співвідношень, що пов'язують величину акустичного опору з параметрами вимірювальних систем, а також верифікація отриманих співвідношень за допомогою експериментальних досліджень модельного зразка БС.

Наукові основи застосування АММ для вимірювання акустичного опору локальних ділянок біологічного середовища

В останні роки стали розвиватися методи, які використовують комбінування акустичного випромінювання і постійного магнітного поля. У даній роботі для створення УЗВ використовувався магнітострикційний генератор, що створює в модельному зразку біологічного середовища плоску акустичну хвилю. Основними параметрами плоскої хвилі є частота f , інтенсивність P (потужність), діаметр d (або поперечний переріз) "променя" УЗВ и його спрямованість в просторі. Модельний зразок БС являв собою слабкий розчин NaCl у воді, поміщений в вертикально розташовану скляну посудину циліндричної форми. Звукопровід генератора УЗВ вводився в розчин через отвір в посудині таким чином, щоб в ньому встановлювалася стояча хвиля через велику різницю акустичного опору розчину і скляного дна посудини. В реальній ситуації проведення діагностичної процедури з пацієнтом подібна стояча хвиля може бути сформована всередині тіла пацієнта, тому що існує помітна різниця в акустичних опорах розчину і шкіряним покривом пацієнта (рис. 1).

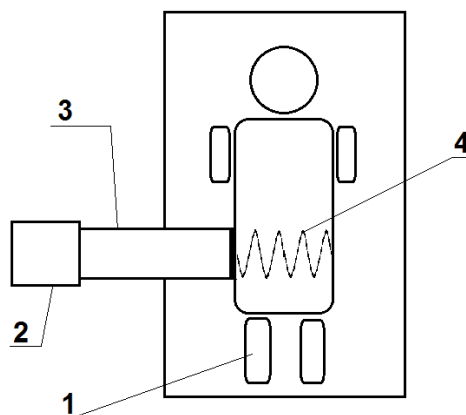


Рис. 1. Схема утворення стоячої хвилі ультразвукового випромінювання всередині гіпотетичного, тобто абсолютно однорідного, тіла пацієнта, 1-пацієнт, 2-генератор ультразвуку, 3-звуковод, 4-стояча хвиля швидкості (V) переміщення однорідного біологічного середовища під дією ультразвуку

Акусто-магнітний метод (АММ) передбачає здійснення одночасного дії на БС акустичного випромінювання і постійного магнітного поля [4,5]. В результаті такої дії в електропровідному середовищі, яким є БС, виникає внаслідок магніто-гідродинамічного ефекту (МГД-ефект) змінне електричне поле з напруженістю E [6,7]:

$$E = V \times B, \quad (3)$$

де V , B – відповідно, вектори швидкості переміщення БС і постійного магнітного поля.

Величина МГД-ефекту, тобто модуля вектора E , досягає максимуму, коли вектора V і B взаємно перпендикулярні, і дорівнює нулю, коли вони паралельні. При цьому коливальні переміщення БС зі швидкістю V порушується акустичним випромінюванням з частотою f , що дорівнює частоті звуку. У нашій статті під акустичним

випромінюванням мається на увазі ультразвукове випромінювання (УЗВ), існуюче при частотах понад 20 кГц. У вільному матеріальному просторі УЗВ поширюється від джерела (звукова) у вигляді акустичної хвилі. В обмеженому просторі (судини з рідиною, тіло людини і т.п.), як вказувалося у вступі, можуть виникати стоячі хвилі швидкості і відповідно напруженості E електричного поля. Як відомо [8,9], максимальне значення швидкості (V_m) переміщення рідкого середовища (і близькою до рідини біологічного середовища) під дією УЗВ описується формулою:

$$V_m = \left(\frac{2P}{\rho c} \right)^{0.5} = \left(\frac{2P}{R_c} \right)^{0.5}. \quad (4)$$

З формул (3), (4) випливає, що максимальне значення напруженості (E_m) електричного поля рівне:

$$E_m = V_m \cdot B = \left(\frac{2P}{R_c} \right)^{0.5} \cdot B. \quad (5)$$

З формули (5) видно, що в результаті вимірювання напруженості електричного поля E_m при заданих значеннях P і B стає можливим відразу обчислити величину акустичного опору середовища, в якому існує УЗВ та постійне магнітне поле з індукцією B :

$$R_c = 2P \left(\frac{B}{E_m} \right)^2. \quad (6)$$

Розрахунок величини R_c має цінність для діагностичних цілей, якщо вдасться визначити локальну ділянку БС, де може бути виміряна напруженість електричного поля. Для цього, були розроблені [4, 5] способи формування однієї локальної ділянки БС, розташованої вздовж променя УЗВ, де існує електричне поле. Ця ділянка приблизно має вигляд циліндра, що має протяжність уздовж променя УЗВ, який дорівнює половині довжини стоячої хвилі УЗВ, і діаметр, рівний діаметру променя УЗВ. Для формування єдиної на довжині променя УЗВ локальної ділянки з електричним полем необхідно, щоб постійне магнітне поле з індукцією B було в основному локалізовано саме в цій ділянці. Для локалізації постійного магнітного поля його силові лінії повинні займати об'єм у вигляді циліндра з діаметром, близьким до величини півхвилі УЗВ. Для вимірювання E_m безпосередньо у зазначеній локальній області необхідно розташувати в ній два електричних зонда з відстанню s між ними, рівному не більше, ніж половина довжини хвилі УЗВ. Зонди потрібні для вимірювання на них різниці потенціалів U_m :

$$U_m = E_m \cdot s. \quad (7)$$

З (7) випливає, що

$$E_m = \frac{U_m}{s}. \quad (8)$$

Підставивши (8) в (6), отримуємо для величини акустичного опору локальної ділянки БС з порушеною в ньому за допомогою АММ електричним полем:

$$R_c = 2P \left(\frac{B \cdot s}{U_m} \right)^2. \quad (9)$$

В реальній ситуації діагностики пацієнта за допомогою вимірювання локальної величини R_c на підставі формули (9) зонди необхідно розміщувати безпосередньо в його м'язи. Це є досить складною і небезпечною процедурою навіть, якби їх впровадження проводилося з використанням мало травматичних способів (лапороскопічних або шляхом введення зондів через великі судини). Тому подібні ендометричні схеми діагностичних процедур допустимі тільки в крайніх випадках, коли інші методи діагностики або недоступні, або неінформативні. Найбільш привабливим може бути дистанційний (екстраметричний) спосіб вимірювання напруженості збуджуваного в БС за допомогою АММ електричного поля. Цей спосіб передбачає вимірювання напруженості електричного поля розсіювання, що існує поза джерела цього поля подібно до того, як виникає і вимірюється за допомогою зондів на шкірі пацієнта електричне поле розсіювання серця при електрокардіографії. При цьому в області розташування вимірювальних зондів відсутнє УЗВ і магнітне поле B . Цей спосіб розглядається в наступному розділі статті.

Дистанційний спосіб вимірювання акустичного опору локальної ділянки БС

Фізико-математичною моделлю локального джерела змінного електричного поля, яким є збуджена за допомогою АММ ділянка БС, може бути електричний диполь, що складається з двох рівних за величиною (q) точкових різнойменних зарядів, що знаходяться на відстані " s " один від одного і мінливих місцями з частотою УЗВ (рис. 2).

На рис. 2 показаний розподіл силових ліній електричного поля диполя всередині і поза ним. Останні є силовими лініями поля розсіювання. Крім того, показані дві пари вимірювальних зондів 1, 2 в двох різних позиціях (поздовжньої - I і поперечної - II) відносно електричної осі диполя. Для проведення дистанційних вимірювань електричного поля диполя можуть бути використані кілька схем просторового розташування зондів і напрямків УЗВ і магнітного поля. Одна з можливих схем показана на рис.3. Відповідно до цієї схеми досліджувана ділянка тіла пацієнта повинна мати протяжність уздовж променя УЗВ, який дорівнює довжині напівхвилі електричного поля. При цьому магнітне поле, перпендикулярне променю УЗВ, має проходити тільки через цю ділянку тіла. Для цього ділянка тіла розташовується між двома циліндричними постійними магнітами (або

електромагнітами) з діаметром, також рівним довжині стоячої півхвилі електричного поля.

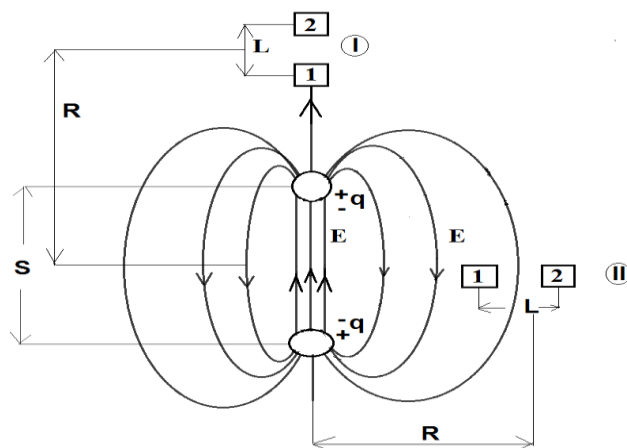


Рис. 2. Схема електричного диполя, що складається з двох точкових зарядів q з відстанню s між ними, що моделює локальний ділянку середовища зі збуджуванням в ньому за допомогою АММ змінним електричним полем (напрямок силових ліній електричного поля E диполя показано для наочності для одного з двох можливих знаків заряду)

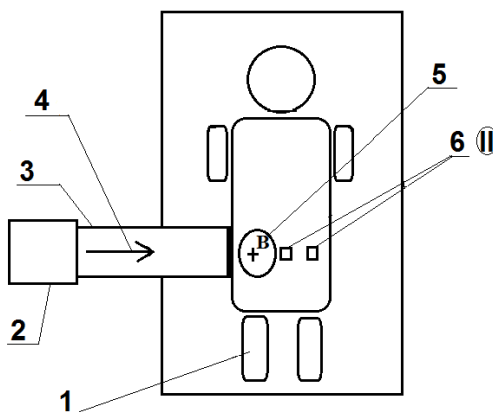


Рис. 3. Одна з можливих схем просторового положення "променя" УЗВ, області з магнітним полем B і вимірювальних зондів по відношенню до тіла пацієнта під час діагностичної процедури вимірювання напруги на зондах, 1 - пацієнт, 2 - генератори УЗВ, 3 - звукопровід, 4 - напрямок акустичного випромінювання, 5 - розташування локального (в межах однієї стоячій півхвилі напруженості електричного поля) магнітного поля з індукцією B через тіло пацієнта, 6 - розташування електричних зондів на тілі пацієнта в позиції II

За умови, коли відстань R між диполем і місцем розташування зондів багато більше розміру диполя s , рівного довжині стоячої півхвилі електричного поля, для двох основних позицій розташування зондів щодо модельованого електричного диполя (поздовжньої по відношенню до напрямку електричного моменту p диполя і поперечної по відношенню до цього напрямку) величина напруженості електричного поля розсіювання розраховується за найбільш простими формулами [10]. Електричний диполь характеризується величиною дипольного моменту $p = q \cdot s$. Напруженість електричного поля (E_s) в точці розташування пари зондів в положенні I розраховується за формулою:

$$E_{sI} = \frac{p}{2\pi\epsilon_0\epsilon R^3} = \frac{q \cdot s}{2\pi\epsilon_0\epsilon R^3}, \quad (10)$$

а в позиції II – за формулою:

$$E_{sII} = \frac{p}{4\pi\epsilon_0\epsilon R^3} = \frac{q \cdot s}{4\pi\epsilon_0\epsilon R^3}, \quad (11)$$

де ϵ_0 , ϵ – відповідно, діелектрична проникність вакууму і відносна діелектрична проникність досліджуваного середовища.

Оцінимо величину заряду q модельного диполя. Це можна зробити, якщо врахувати, що напруженість електричного поля точкового заряду в центрі диполя, тобто на відстані $s/2$ від нього, дорівнює [10]:

$$E = \frac{q}{\pi\epsilon_0\epsilon s^2}, \quad (12)$$

а від двох зарядів в центрі диполя:

$$E = \frac{2q}{\pi\epsilon_0\epsilon s^2}. \quad (13)$$

Прирівнюючи це значення до величини напруженості поля, що збуджується за допомогою АММ, отримуємо:

$$V_m B \approx \frac{2q}{\pi \varepsilon_0 \varepsilon s^2}. \quad (14)$$

З формули (14) отримуємо величину зарядів модельного диполя:

$$q \approx \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon s^2 V_m B}{2}. \quad (15)$$

Підставимо в формули (12, 13) значення заряду q з формули (15) і отримаємо максимальну величину напруженості електричного поля розсіювання для двох основних позицій вимірювальних зондів:

$$E_{m\text{I}} \approx \frac{0,25 V_m B}{(R/s)^3}, \quad (16)$$

$$E_{m\text{II}} \approx \frac{0,12 V_m B}{(R/s)^3}. \quad (17)$$

З цих формул видно, що величина вимірюваного поля не залежить від діелектричних властивостей середовища і швидко зменшується зі збільшенням відносини R/s . Наприклад, при $R/s = 10$ напруженість поля в області розташування зондів зменшиться в тисячу разів при незмінних величинах V_m і B . З огляду на значення величини V_m (4), з формул (16, 17) отримуємо для варіанту $R \gg s$ для двох основних позицій розташування зондів:

$$E_{m\text{I}} \approx \frac{0,25 B (2P/\rho c)_I^{0,5}}{(R/s)^3}. \quad (18)$$

$$E_{m\text{II}} \approx \frac{0,12 B (2P/\rho c)_{II}^{0,5}}{(R/s)^3}. \quad (19)$$

Електрична напруга на зондах дорівнює при цьому:

$$U_{m\text{I}} \approx E_{m\text{I}} \cdot L = \frac{0,25 B L (2P/\rho c)_I^{0,5}}{(R/s)^3}, \quad (20)$$

$$U_{m\text{II}} \approx E_{m\text{II}} \cdot L = \frac{0,12 B L (2P/\rho c)_{II}^{0,5}}{(R/s)^3}. \quad (21)$$

З рівнянь (20, 21) слід, що для двох основних позицій зондів щодо осі модельного диполя акустичний опір локального ділянки БС може бути розрахований за формулами:

$$(\rho c)_I = R_{c1} \approx \frac{0,12 P \cdot B^2 \cdot L^2}{[(R/s)^6 U_{m\text{I}}^2]}, \quad (22)$$

$$(\rho c)_{II} = R_{c2} \approx \frac{0,03 P \cdot B^2 \cdot L^2}{[(R/s)^6 U_{m\text{II}}^2]}. \quad (23)$$

Діагностика захворювань за допомогою вимірювання акустичного опору може бути тим ефективніше, чим меншу його частку можна зареєструвати існуючими вимірювальними засобами.

В даному випадку це відноситься до точності вимірювання електричної напруги, що виникає на зондах, що знаходяться на шкірі пацієнта. Для оцінки необхідної точності вимірювань U_m спочатку визначимо за допомогою формули (21) найменше можливу очікувану напругу, яка з'являється на зовнішніх зондах в разі реально можливих значень потужності УЗВ, індукції постійного магнітного поля, відстані між зондами і відношення R/s . Виходячи з характерних розмірів тіла людини і необхідності отримання інформації, в тому числі, від глибоко розташованих ділянок тканини пацієнта, а також з наявного у нас досвіду роботи з модельними зразками БС при частоті УЗВ, рівній 22кГц (11, 12, 13), представляється обґрунтованим вибрати для розрахунків відношення $R/s = 5$ і $L = 0,3$ м. В якості орієнтовної величини акустичного опору виберемо його рівним опору води, тобто середовища, що становить основну масу людського організму ($R_{c2} = 1,5 \times 10^6$ кг / м²с). Розрахунок виконується для величини локального магнітного поля $B=0,4$ Т, що може бути забезпечено або сучасними постійними магнітами, зокрема, підковоподібними, або соленоїдами малого діаметра, що живляться постійним струмом, зокрема, надпровідними. Для підвищення потужності УЗВ рекомендується його застосовувати в імпульсному режимі, що дозволяє використовувати імпульсну потужність, рівну 100 Вт/см² при тривалості імпульсу 0,5 мс і частоті повторення близько 1000 Гц [3]. Крім того, напруга на зондах може бути збільшена приблизно в 100 разів за допомогою підвищувального трансформатора між зондами і мікровольтметром, що реєструє. Розрахунок показав, що для наведених значень параметрів вимірювальної схеми величина максимальної напруги на реєстраторі становить близько 10 мВ. При цьому, як показує аналіз формули (21), для реєстрації змін акустичного опору на 1% необхідно, щоб чутливість реєстратора була не гірше 20 мкВ. Це цілком реально при використанні сучасних електронних засобів вимірювання. Слід зазначити, що в публікаціях [14, 15, 16, 17, 18] повідомляється, що при деяких захворюваннях величина R_c може змінюватися на десять і більше відсотків. Тому точність вимірювань в 1% є цілком достатньою для докладної реєстрації акустичного опору і його зміни у зв'язку з можливим захворюванням.

Верифікація розрахункових співвідношень за допомогою модельних експериментів

Співвідношенням, що лежить в основі всіх вище отриманих формул (20-23) є формула $E = (2P/\rho \cdot c)^{0,5}$, що зв'язує напруженість електричного поля, що збуджується в локальній ділянці БС за допомогою АММ, з параметрами УЗВ, магнітного поля і акустичним опором БС. Верифікацію цієї формули можна виконати на основі використання експериментальних результатів

вимірювань напруги на зондах [13]. У цих вимірах використовувалося УЗВ з частотою близько 22 кГц (довжина стоячий півхвилі 35мм) з потужністю 3×10^{-2} Вт / см². Безпосередньо всередині імітованої БС на зондах, розташованих на відстані $L = 1$ см, було виміряно напруга U_z близько 10-4В при величині постійного магнітного поля близько 0,4 Т. Напруженість електричного поля, що збуджується за допомогою АММ в БС при цьому становить:

$$E = \frac{U_z}{L} \approx \frac{10^{-4}[B]}{10^{-2}[m]} = 10^{-2}[B/m]. \quad (24)$$

Відповідно до теорії магнітної гідродинаміки напруженість поля в БС дається формулою:

$$E = V_m \cdot B = \left(\frac{2I}{\rho c}\right)^{0.5} B. \quad (25)$$

З цієї формули випливає, що акустичний опір БС дорівнює:

$$(\rho c) = \frac{2P \cdot B^2}{E^2}. \quad (26)$$

Підставляючи в цю формулу експериментальні значення потужності УЗВ, магнітного поля і напруженості електричного поля, отримуємо:

$$(\rho c) = R_c = \frac{2 \cdot 3 \cdot 10^2 \left[\frac{Bm}{m^2} \right] \cdot 0,16 [T^2]}{10^{-4} [(B/m)^2]} \approx 10^6 \left[\frac{kg}{m^2 s} \right]. \quad (27)$$

Моделюючи БС розчин в наших експериментах являв собою одновідсотковий розчин NaCl у воді, тобто практично був водою. Для води відомо [3], що $(\rho c) = 1,5 \times 10^6$ [кг / м² с]. Таким чином, експериментально отримане за допомогою АММ значення акустичного опору дуже близько до його величини, отриманої з інших, в тому числі акустичних, вимірювань. Достовірність основної формули для розрахунку акустичного опору БС підтверджує достовірність інших, отриманих на її основі формул (20-23). Різниця між експериментально отриманими значеннями акустичного опору і табличними його значеннями може бути пояснена існуючої точністю наших аналогових вимірювань інтенсивності УЗВ і магнітного поля. Ця точність при необхідності може бути істотно підвищена. Зокрема, при вимірюванні акустичного опору з точністю до

одного відсотка необхідно використовувати цифрові перетворювачі напруги.

Висновки

1. Розроблено наукові основи дистанційного акусто-магнітного методу високоточного вимірювання величини акустичного опору локальних ділянок біологічної тканини людини, підтверджено експериментально на модельних зразках тканини. Метод може дозволити виявити з високою точністю функціональний зв'язок вимірюваного локального значення акустичного опору з патологічними змінами тканини. При цьому виключається вплив людського фактора на інтерпретацію реєстрованих значень акустичного опору, характерного для традиційного в основному якісного, а не кількісного ультразвукового методу, підвищується інформативність і достовірність акустичної діагностики.

2. Отримано розрахункові співвідношення, що зв'язують електрична напруга на вимірювальних зондах, що знаходяться в електричному контакті з поверхнею шкіри пацієнта, з величинами акустичного опору внутрішніх локальних ділянок біологічних тканин, потужності УЗВ і постійного магнітного поля, а також з відстанню між вимірювальними зонами і локальними ділянками тканин.

3. Виконано верифікацію розрахункових співвідношень за допомогою їх зіставлення з експериментальними даними, отриманими на модельних зразках біологічного середовища.

4. Виконана оцінка чутливості вимірювання напруги на зондах, необхідна для вимірювання акустичного опору з точністю близько 1%.

5. Перевагами пропонованого акусто-магнітного методу визначення акустичного опору середовища в порівнянні з традиційним, заснованому на роздільному вимірі щільності середовища і швидкості звуку в ній, є:

- безпосередній (прямий) вимір електричним способом добутку щільності середовища на швидкість звуку в ньому, тобто акустичного опору,

- можливість високоточного вимірювання акустичного опору локальних ділянок досліджуваної середовища,

- можливість дистанційних вимірювань in vivo локальних значень акустичного опору біологічного середовища.

References

1. Oleinik, V. P. (2006), *Fundamentals of Interaction of Physical Fields with Biological Objects* [Osnovy vzaimodeystviya fizicheskikh poley s biologicheskimi ob'yektami], National Aerospace University – Kharkov Aviation Institute, 61 p.
2. Wang Shigang, Zhang Shunqi, Ma Ren, Yin Tao, Liu Zhipeng (2014), "A study of acoustic source generation mechanism of Magnetoacoustic Tomography", *Computerized Medical Imaging and Graphics*, No. 38, P. 42–48.
3. Elpiner, I. E. (1963), *Ultrasound. Physicochemical and biological action* [Ul'trazvuk. Fiziko-khimicheskoye i biologicheskoye deystviye], Moscow : Fizmatgiz, 420 p.
4. Bondarenko, I. S. (2017), "Magnetic hydrodynamics of the biological environment" ["Mahnytnaya hydrodynamika byolohicheskoy sredy"], *Promising directions of modern electronics, information and computer systems (MEICS-2017). Abstracts of reports at the II All-Ukrainian scientific-practical conference: November 22-24, 2017, Dnipro*, P. 222–223.
5. Bondarenko, I. S., Avrunin, O. G., Bondarenko, S. I., Krevsun, A. V., Sorochan, E. N. (2018), "Experience and Prospects of Researching the Combined Action of Magnetic Field and Acoustic Radiation on Model and Real Biological Objects" ["Opyt i perspektivy issledovaniya sovmestnogo deystviya magnitnogo polya i akusticheskogo izlucheniya na model'nyye i real'nyye

- biologicheskoye ob'yekty"], *Science and Technology: Mizhvuz. topics. zb. sciences. ave. VIP. 19 / DVNZ PDTU, Mariupol, PDTU*, P. 138–150.
6. Landau, L. D., Lifshits, E. M. (1982), *Continuous media electrodynamics [Elektrostatika i elektrodinamika sploshnykh sred]*, Moscow, The science, Main editorial office of physical and mathematical literature, 616 p.
 7. Kizimova, N. N. (1991), "Magnetohydrodynamic effects during blood movement" ["Magnitogidrodinamicheskiye efekty pri dvizhenii krovi"], *Biophysics*, Vol. 36, No. 1, P. 147.
 8. Bondarenko, I., Avrunin, O., Gryshkov, O., Glasmacher, B. (2018), "Possibilities of joint application of acoustic radiation and direct magnetic field for biomedical research", *International Journal of Bioelectromagnetism, Proceedings of the 11th International Conference on Bioelectromagnetism, 23-25 May 2018, Aachen, Germany*, Vol. 20, No. 1, P. 66.
 9. Avrunin, O. G., Bondarenko, I. S., Bondarenko, S. I., Kuzmenko, Y. V., Pinaieva, O. Yu., Kisała, P., Teleshova, A., Luganskaya, S. (2019), "Acoustic excitation of electric field in water solution NaCl", *Przegląd elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 95 NR 4, P. 158–161.
 10. Yavorskiy, B. M., Detlaf, A. A. (1985), *Physics Handbook [Spravochnik po fizike]*, Moscow, Nauka, Main Edition of Physics and Mathematics Literature.
 11. Bondarenko, I. S., Avrunin, O. G., Rakhimova, M. V., Bondarenko, S. I., Krevsun, A. V., Kulish, S. M. (2019), "Acoustomagnetic Registration of Magnetic Nanoparticles in a Liquid Medium", *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 78 (8), P. 707–714.
 12. Bondarenko, S. I., Avrunin, O. G., Bondarenko, I. S., Krevsun, A. V., Kovrya, V. P., Rakhimova, M. V. (2020), "On the measurements of magnetic nanoparticle concentration in a biological medium using a superconducting quantum magnetometer", *Low Temperature Physics/Fizika Nizkikh Temperatur*, Vol. 46, No. 11, P. 1287–1291.
 13. Bondarenko, I., Avrunin, O. (2021), "On the excitation of local electric current in the biological environment", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 106–112. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.106>
 14. Elpiner, I. E. (1956), "Ultraacoustic parameters of organs and tissues and their importance in biology and medicine" ["Ul'traakusticheskiye parametry organov i tkaney i ikh znachenie v biologii i meditsine"], *Advances in modern biology*, P. 143.
 15. Frank, G. A. (2004), "Problems of morphological classification in the diagnosis of soft tissue neoplasms of the limbs and trunk" ["Problemy morfologicheskoy klassifikatsii v diagnostike novoobrazovaniy myagkikh tkaney konechnostey i tulovishcha"], *Practical Oncology*, Vol. 5, No. 4, P. 231–236.
 16. Dolgushin, B. I., Kosyrev, V. Yu., Sinyukova, G. T. (2004), "Complex diagnostics of tumors of the biliopancreatoduodenal zone" ["Kompleksnaya diagnostika opukholey biliopankreatoduodenal'noy zony"], *Practical Oncology*, Vol. 4, No. 2, P. 77–84.
 17. Poddubny, B. K., Gubin, A. N., Sholokhov, V. N., Vakurova, E. S. (2003), "Possibilities of laparoscopic intracavitary ultrasound (VUS) in a patient with stomach cancer" ["Vozmozhnosti laparoskopicheskogo vnutripolostnogo ultrazvukovogo issledovaniya (VUZI) u bol'nogo rakom zheludka"], *Opportunities of modern oncologists in the diagnosis and treatment of malignant diseases*, Moscow, P. 43.
 18. Glybachko, P. V., Chekhonatskaya, M. L., Priezzheva, V. N. (2007), "Transrectal ultrasound examination with the use of Doppler mapping in prostate cancer" ["Transrektal'noye ultrazvukovoye issledovaniye s primeneniym dopplerovskogo kartirovaniya pri rake predstatel'noy zhelezy"], *Topical issues of urology and nephrology, Sat. scientific works*, Engels, P. 82–84.

Надійшла (Received) 13.05.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бондаренко Ігор Станіславович – Харківський національний університет радіоелектроніки, асистент кафедри біомедицинської інженерії, Харків, Україна; email: igor.bondarenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2925-3020>.

Бондаренко Игорь Станиславович – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, ассистент кафедры биомедицинской инженерии, Харьков, Украина.

Bondarenko Igor – Kharkiv National University of Radio Electronics, Assistant of the Department of Biomedical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Аврунін Олег Григорович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри біомедицинської інженерії, Харків, Україна; email: oleh.avrunin@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6312-687X>.

Аврунин Олег Григорьевич – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, заведующий кафедрой биомедицинской инженерии, Харьков, Украина.

Avrunin Oleg – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Head of the Department of Biomedical Engineering, Kharkiv, Ukraine.

ПРО АКУСТО-МАГНИТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ УЧАСТКОВ БИОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Предметом изучения в статье является акустическое сопротивление локальных участков биологической среды *in vivo*, зависящее от их патологии. **Цель** работы есть разработка количественного метода измерения акустического сопротивления локальных участков биологической среды, расположенных внутри организма человека. В статье решаются следующие **задачи**: разработка научных основ акусто-магнитного метода измерения акустического сопротивления локальных участков биологической среды; разработка дистанционного способа измерения электрического напряжения на поверхности кожи пациента, вызванного акусто-магнитным воздействием на локальные участки среды и определяемым величиной акустического сопротивления; расчет соотношений, связывающих величину акустического сопротивления локальных участков среды с электрическим напряжением на измерительных зондах на коже пациента, значениями мощности акустического излучения и внешнего постоянного магнитного поля, а также с расстоянием между зондами и локальным

участком биологической среды; верификация расчетных соотношений с помощью экспериментального определения акустического сопротивления локального участка модельной биологической среды. Были использованы следующие **методы**: физическое моделирование биологической среды, физико-математическое моделирование электрических свойств локального участка биологической среды, расчет электромагнитных и акустических параметров среды, экспериментальное измерение напряженности электрического поля, которое возбуждается в локальном участке биологической среды, верификация расчетных соотношений путем их сравнения с результатами экспериментов. Следующие **результаты** были получены: разработаны научные основы акусто-магнитного метода количественного измерения акустического сопротивления локальных участков биологической среды; разработан дистанционный способ измерения электрического напряжения на поверхности кожи пациента, вызванного акусто-магнитным воздействием на локальные участки среды и определяемым величиной акустического сопротивления; рассчитаны соотношения, связывающие величину акустического сопротивления локальных участков среды с электрическим напряжением на измерительных зондах на коже пациента, значениями мощности акустического излучения и внешнего постоянного магнитного поля, а также с расстоянием между зондами и локальным участком биологической среды; выполнена верификация расчетных соотношений с помощью экспериментального определения акустического сопротивления локального участка модельной биологической среды.

Выводы: Разработаны научные основы дистанционного акусто - магнитного метода высокоточного измерения величины акустического сопротивления локальных участков биологической ткани человека, подтвержденного экспериментально на модельных образцах ткани. Метод может позволить выявить с высокой точностью функциональную связь измеряемого локального значения акустического сопротивления с патологическими изменениями ткани. При этом исключается влияние человеческого фактора на интерпретацию регистрируемых значений акустического сопротивления, характерного для традиционного в основном качественного, а не количественного ультразвукового метода, повышается информативность и достоверность акустической диагностики.

Ключевые слова: акустическое сопротивление; биологическая среда; акусто-магнитный метод; электрическое напряжение; ультразвук.

ON THE ACOUSTO-MAGNETIC METHOD OF MEASURING THE ACOUSTIC RESISTANCE OF LOCAL AREAS OF THE BIOLOGICAL TISSUE

The **subject** of study in the article is the acoustic resistance of local areas of the biological tissues in vivo, depending on their pathology. The **aim** of the work is to develop a quantitative method for measuring the acoustic resistance of local areas of the biological tissue (substance) located inside the human body. The following **tasks** are solved in the article: development of scientific foundations of the acousto-magnetic method for measuring the acoustic resistance of local areas of the biological tissue; development of a remote method for measuring electrical voltage on the surface of the patient's skin, caused by acousto-magnetic impact on local areas of the tissue and determined by the value of acoustic resistance; calculation of the ratios binding the value of the acoustic resistance of the local areas of the tissue with the electric voltage on the measuring probes on the patient's skin, the values of the acoustic radiation power and the external constant magnetic field, as well as with the distance between the probes and the local area of the biological tissue; verification of the calculated ratios using the experimental determination of the acoustic resistance of the local area of the model biological tissue. The following **methods** were used: physical modeling of the biological tissue, physical and mathematical modeling of electrical properties of the local part of the biological tissue, calculation of electromagnetic and acoustic parameters of the tissue, experimental measurement of electric field strength excited in the local part of the biological tissue, verification of calculated relations by comparing them with experimental results. The following **results** were obtained: the scientific foundations of the acousto-magnetic method for the quantitative measurement of the acoustic resistance of local areas of the biological tissue were developed; a remote method for measuring the electric voltage on the surface of the patient's skin caused by the acousto-magnetic effect on local areas of the tissue and the determined value of the acoustic impedance was developed; relations were calculated connecting the value of the acoustic impedance of local areas of the tissue with the electric voltage on the measuring probes on the patient's skin, the values of the acoustic radiation power and external constant magnetic field, as well as the distance between the probes and the local area of the biological tissue; verification of the calculated ratios was carried out using the experimental determination of the acoustic resistance of the local area of the model biological tissue. **Conclusions:** The scientific foundations of the remote acousto-magnetic method of high-precision measurement of the acoustic resistance of local areas of human biological tissue, confirmed experimentally on model tissue samples, have been developed. The method can make it possible to reveal with high accuracy the functional relations of the measured local value of acoustic resistance with pathological changes in the tissue. At the same time, the influence of the human factor on the interpretation of the recorded values of acoustic resistance (which is characteristic of the traditional, mainly qualitative, rather than quantitative ultrasound method) is excluded, the information content and reliability of acoustic diagnostics are increased.

Keywords: acoustic resistance; biological tissue; acousto-magnetic method; electric voltage; ultrasound.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Бондаренко І. С., Аврунін О. Г. Про акусто-магнітний метод вимірювання акустичного опору локальних ділянок біологічного середовища. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 2 (16). С. 72–79. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.072>

Bondarenko, I., Avrunin, O. (2021), "On the acousto-magnetic method of measuring the acoustic resistance of local areas of the biological tissue", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (16), P. 72–79. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.072>

L. RASKIN, YU. PARFENIUK, L. SUKHOMLYN, M. KRAVTSOV, L. SURKOV

A METHOD FOR SOLVING THE CANONICAL PROBLEM OF TRANSPORT LOGISTICS IN CONDITIONS OF UNCERTAINTY

Subject. The canonical task of transport logistics in the distributed system "suppliers - consumers" is considered. **Goal.** Development of an accurate algorithm for solving this problem according to the probabilistic criterion in the assumption of the random nature of transportation costs has been done. **Tasks.** 1. Development of an exact method for solving the problem of finding a plan that minimizes the total cost of transportation in conditions when their costs are given by their distribution densities. 2. Development of a method for solving the problem when the distribution density of the cost of transportation is not known. **Methods.** A computational scheme for solving the problem is proposed, which is implemented by an iterative procedure for sequential improvement of the transportation plan. The convergence of this procedure is proved. In order to accelerate the convergence of the computational procedure to the exact solution, an alternative method is proposed based on the solution of a nontrivial problem of fractional nonlinear programming. The method reduces the original complex problem to solving a sequence of simpler problems. The original problem is supplemented by considering a situation that is important for practice when, in the conditions of a small sample of initial data, there is no possibility of obtaining adequate analytical descriptions for the distribution densities of the random costs of transportation. To solve the problem in this case, a minimax method is proposed for finding the best transportation plan in the most unfavorable situation, when the distribution densities of the random cost of transportation are the worst. To find such densities, the modern mathematical apparatus of continuous linear programming was used. **Results.** A mathematical model and a method for solving the problem of transport logistics in conditions of uncertainty of the initial data are proposed. The desired plan is achieved using the solution of the fractional nonlinear programming problem. **Conclusions:** The problem of forming a transportation plan is considered, provided that their costs are random values. Also, a method for solving the problem of optimization of transportation for a situation where the density of distribution of random cost cannot be correctly determined is considered.

Keywords: transport linear programming problem; random cost of transportation; fractional nonlinear optimization.

Introduction

In the totality of management tasks of the logistics complex "production – delivery - consumption", transport tasks take the central place [1-3].

The transport linear programming problem is traditionally formulated as follows [1-3]. There are m suppliers of a homogeneous product and n consumers of this product. A vector $A = (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_i \ \dots \ a_m)$ is known, the components of which fix the capabilities of suppliers, a vector $B = (b_1 \ b_2 \ \dots \ b_j \ \dots \ b_n)$, the components of which determine the demand of consumers, as well as a matrix $C = (c_{ij})$ that specifies the cost of delivering a unit of a product from suppliers to consumers. It is required to find a non-negative matrix $X = (x_{ij})$ that specifies a plan for the transportation of a product from suppliers to consumers, minimizing the total cost of transportation

$$L_1(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

and satisfying the constraints

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i, \ i = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq b_j, \ j = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0, \ i = 1, 2, \dots, m, \ j = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Methods and materials. Methods for solving this problem are well known and implemented in widely used mathematical packages (Mathcad, Excel, etc.)

It should be noted that the given model of the transport problem does not fully satisfy the natural requirements for the level of its adequacy. The point is that in real conditions the parameters of this problem are not deterministic values. In practice, the possibilities of suppliers, the needs of consumers, and the cost of transportation are random. It is clear that in this case the solution of the problem by traditional methods that do not take into account its probabilistic nature cannot be accurate [4-8]. In this regard, the above canonical mathematical model of the transport problem should be properly modernized. The obvious applied nature of the problem determines the relevance of the study.

Methods and materials

Methods for solving problems, the parameters of which are random, are combined into a specific subclass of general methods of mathematical programming, called stochastic programming [9-13]. The technology for solving such problems consists in constructing for each of them a corresponding deterministic analogue using further standard methods of mathematical programming. At the same time, the mathematical expectation or variance of the random value of the total cost of transportation is usually used as an objective function in such problems [11-13].

The solution to this problem using a more informative objective function was proposed in [14]. In this case, it was assumed that the cost of transportation are

random values. Further, it is assumed that there is enough real data to formulate plausible hypotheses about the distribution laws of these quantities. At the same time, since a large number of various factors independently affect the cost of transporting goods, it is usually believed that their joint influence, in accordance with the central limit theorem of the theory of probability, leads to the normality of the resulting random variables. In this regard, a set of densities is introduced

$$\phi_{ij}(c_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \exp \left\{ -\frac{(c_{ij} - m_{ij})^2}{2\sigma_{ij}^2} \right\},$$

$$i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

Of random values c_{ij} . Therefore, the distribution density of the random total cost of transportation

$$R = L(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \text{ has the form}$$

$$P(R \geq R_n) = \int_{R_{\Pi}}^{\infty} f(R) dR = \int_{R_{\Pi}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Sigma}} \exp \left\{ -\frac{(R - m_{\Sigma})^2}{2\sigma_{\Sigma}^2} \right\} dR = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{R_{\Pi} - m_{\Sigma}}{\sigma_{\Sigma}} = u}^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du. \quad (5)$$

Thus, the original problem is transformed to the following: find a transportation plan satisfying the constraints X , minimizing (5), or maximizing the lower limit in this integral, which is equal to

$$R(X) = \frac{R_{\Pi} - m_{\Sigma}}{\sigma_{\Sigma}} = \frac{R_{\Pi} - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n m_{ij} x_{ij}}{\left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^2 x_{ij}^2 \right)^{\frac{1}{2}}}. \quad (6)$$

If the transportation plan X satisfies constraints (2) as equalities, then (6) can be transformed to the form

$$R(X) = \frac{\frac{R_n}{A} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n m_{ij} x_{ij}}{\left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^2 x_{ij}^2 \right)^{\frac{1}{2}}} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{R_n}{A} - m_{ij} \right) x_{ij}}{\left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^2 x_{ij}^2 \right)^{\frac{1}{2}}} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij}}{\left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^2 x_{ij}^2 \right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (7)$$

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

The maximization problem (7) while satisfying (2) - (4) is a complex problem of fractional nonlinear programming. An approximate solution to this problem can be obtained as follows.

As

$$\left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^2 x_{ij}^2 \right)^{\frac{1}{2}} < \left[\left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} x_{ij} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} x_{ij},$$

then

where

$$m_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n m_{ij} x_{ij}, \quad \sigma_{\Sigma}^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^2 x_{ij}^2.$$

The problem now consists in finding a set $X = (x_{ij})$ that delivers the extreme value of some naturally chosen function of density $f(R)$ and satisfies constraints (2) - (4). For example, a certain threshold value R_{Π} of the total cost of transportation is set, the excess of which is regarded as a sign of inefficiency of the corresponding transportation plan. As the objective function of the problem, it is natural to choose the probability that the total cost of transportation will exceed the threshold. This probability is equal to

$$R(X) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij}}{\left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^2 x_{ij}^2 \right)^{\frac{1}{2}}} > \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} x_{ij}} = T(X). \quad (8)$$

At the same time, the task is reduced to finding a plan X that satisfies restrictions and maximizes $T(X)$. To solve the problem, it is proposed to use the following iterative procedure.

A random plan $X^{(0)}$ is chosen that satisfies constraints (2) - (4). If this plan does not maximize $T(X)$, then there must be some other plan $X^{(1)}$ for which

$$T(X^{(1)}) - T(X^{(0)}) > 0. \quad (9)$$

Since $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} x_{ij} > 0$ in any task plan, it follows from (9) that

$$\begin{aligned} & \left(T(X^{(1)}) - T(X^{(0)}) \right) \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} x_{ij}^{(1)} \right) = \\ & = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij}^{(1)} - T(X^{(0)}) \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} x_{ij}^{(1)} = \\ & = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(d_{ij} - T(X^{(0)}) \sigma_{ij} \right) x_{ij}^{(1)} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij}^{(1)} x_{ij}^{(1)} > 0. \end{aligned}$$

Now the task is to find a plan $X^{(1)}$, that maximizes

$$S(X^{(1)}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij}^{(1)} x_{ij}^{(1)} \quad (10)$$

and satisfies constraints (2) - (4). An ordinary transport linear programming problem is obtained. If the plan $X^{(1)}$ calculated as a result of its solution does not maximize $T(X)$, then there must be a new plan $X^{(2)}$ for which $T(X^{(2)}) - T(X^{(1)}) > 0$.

The computational procedure is naturally to stop when the inequality $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |x_{ij}^{(k+1)} - x_{ij}^{(k)}| < \varepsilon$ is completed, where ε is a small number.

A brief analysis of publications on the problem of solving transport problems in conditions of uncertainty allows us to draw the following conclusion.

In the problem of finding a transportation plan under conditions of their random cost, there is no method for obtaining an exact solution. The quality of the approximate solution obtained using (8) and the rate of its convergence cannot be estimated.

The purpose of the article is to develop mathematical models and effective methods for solving transport problems in conditions of uncertainty. To achieve the goal, it is necessary to solve the following tasks.

1. Development of effective (accurate and fast) methods for solving transport problems with a probabilistic description of the cost of transportation;
2. Development of a method for solving transport problems for the case when the distribution density of the random cost of transportation is not known.

Thus, the mathematical model of the transport problem under uncertainty has a canonical representation (1) - (5). The corresponding optimization problem is formulated as follows: find a plan X that maximizes the fractional - quadratic function (11) and satisfies constraints (2) - (4).

Main result

Methods for solving transport problems in the context of a probabilistic description of the cost of transportation.

Any exact solution to problem (8), (2) - (4) can be obtained by solving a recurrent sequence of nonlinear programming problems as follows. It is clear that the maximum $R(X)$ is reached on the same set as the maximum $R^2(X)$. In accordance with this, we introduce

$$F(X) = R^2(X) = \frac{\left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \right)^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^2 x_{ij}^2}. \quad (11)$$

Thus, the problem is reduced to the following: to find a plan X that maximizes the fractional-quadratic function (11) and satisfies constraints (2) - (4). This problem is proposed to be solved as follows.

Let's introduce columns $\bar{C}, X$ and a matrix G

$$\bar{C} = \begin{pmatrix} d_{11} \\ d_{12} \\ \dots \\ d_{1n} \\ d_{21} \\ \vdots \\ d_{mn} \end{pmatrix}; \quad X = \begin{pmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ \dots \\ x_{1n} \\ x_{21} \\ \vdots \\ x_{mn} \end{pmatrix};$$

$$G = \begin{pmatrix} G_{11}^2 & & & & \\ & G_{12}^2 & & & \\ & & \ddots & & 0 \\ & & & G_{1n}^2 & \\ & & & & G_{21}^2 \\ & 0 & & & & \ddots \\ & & & & & & G_{mn}^2 \end{pmatrix}.$$

Then relation (11) takes the form

$$L(X) = \frac{X^T \bar{C} \cdot \bar{C}^T X}{X^T G X} = \frac{X^T C X}{X^T G X}, \quad C = \bar{C} \bar{C}^T. \quad (12)$$

Now the problem is reduced to finding a set X that maximizes (12) and satisfies

$$AX = B, \quad (13)$$

where (13) is a matrix analogue (2) – (4).

$$X \geq 0. \quad (14)$$

The solution to this problem is achieved by implementing an iterative procedure similar to that described above. An arbitrary vector $X^{(0)}$ is chosen that is a solution to the system of equations $AX = B$ and satisfies the constraint $X \geq 0$. If this vector is not a solution to the problem, that is, does not maximize (12), then there must be some other vector $X^{(1)}$ for which

$$L(X^{(1)}) - L(X^{(0)}) > 0. \quad (15)$$

Since $X^T DX > 0$, it follows from (15) that

$$\begin{aligned} (L(X^{(1)}) - L(X^{(0)}))X^{(1)T}GX^{(1)} = \\ = X^{(1)T}CX^{(1)} - X^{(1)T}GX^{(1)}L(X^{(0)}) \geq 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Taking into account (16), the problem is reduced to finding a vector $X^{(1)}$ satisfying (13) - (14) and maximizing

$$R(X^{(1)}) = X^{(1)T}(C - L(X^{(0)})G)X^{(1)}.$$

Thus, the original problem is reduced to an iterative procedure for finding a sequence of vectors satisfying (13) - (14)

$$X^{*(1)}, X^{*(2)}, \dots, X^{*(k)}, X^{*(k+1)},$$

for which recurrence ratio is performed

$$\begin{aligned} X^{*(k+1)T}CX^{*(k+1)} - X^{*(k+1)T}GX^{*(k+1)}L(X^{*(k)}) = \\ = \max_{X^{(k+1)}} \left[X^{(k+1)T}CX^{(k+1)} - X^{(k+1)T}GX^{(k+1)}L(X^{*(k)}) \right] = \\ = \max_{X^{(k+1)}} X^{(k+1)T}(C - GL(X^{*(k)}))X^{(k+1)} = \\ = \max_{X^{(k+1)}} X^{(k+1)T}G_k X^{k+1}. \end{aligned} \quad (17)$$

It is natural to stop the computational procedure when the inequality $\|X^{(k+1)} - X^{(k)}\| < \varepsilon$ is completed $\|X^{(k+1)} - X^{(k)}\| < \varepsilon$, where ε is some fairly small number. This ensures the required accuracy of solving the problem.

Each of the sequence of problems (17) is easier than the original problem, since here the maximization of the fractional-quadratic functional (12) is replaced by the

optimization of the usual quadratic functional (17). In this case, at each iteration, it is necessary to solve problems of the form: find a vector X that maximizes

$$f(x) = X^T GX \quad (18)$$

And satisfies

$$AX = B, \quad (19)$$

$$X \geq 0. \quad (20)$$

Lagrange function is generated:

$$F(X, \Lambda) = f(x) - \Lambda^T (AX - B) = X^T GX - \Lambda^T (AX - B). \quad (21)$$

As it is known, if X^* is the optimal solution of the problem (18) - (21), then there must be a vector Λ^* such that X^* and Λ^* satisfy the relations

$$\left. \frac{dF(X, \Lambda)}{dX} \right|_{\substack{X=X^* \\ \Lambda=\Lambda^*}} = 2(X^*)^T G - \Lambda^{*T} A \leq 0, \quad (22)$$

$$\frac{dF(X^*, \Lambda^*)}{dX} X^* = 0, \quad (23)$$

$$\frac{dF(X^*, \Lambda^*)}{d\Lambda} X^* = B - AX = 0. \quad (24)$$

Transposing (22), we get

$$2GX^* - A^T \Lambda \leq 0 \quad (25)$$

or

$$A^T \Lambda - 2GX^* \geq 0.$$

Enter vector $V^* = A^T \Lambda - 2GX^* \geq 0$.

Then, taking into account (25),

$$2GX^* - A^T \Lambda + V^* = 0. \quad (26)$$

Further, we write (23) as follows

$$(V^*)^T X^* = 0$$

or

$$(X^*)^T V^* = 0. \quad (27)$$

Thus, if X^* is a solution to the problem, then there are $V^* \geq 0$ and Λ^* such that relations (24), (26), (27) are satisfied. On the other hand, if there exist $X \geq 0$, $V^* \geq 0$, Λ which satisfy the conditions

$$AX = B, \quad 2GX - A^T \Lambda + V = 0, \quad X^T V = 0, \quad (28)$$

then the vector X is the optimal solution to the problem (18) - (20).

A significant drawback of this technique is the slow convergence of the procedure for finding a sequence of

solutions $X^{*(1)}, X^{*(2)}, \dots, X^{*(k)}$ in problem (15) - (17).

This noted feature is explained by the fact that at each iteration of the procedure for sequential improvement of the objective function (12), it is necessary to solve a quadratic programming problem, which is difficult in itself. In this case, only an approximate estimate of the number of iterations required to obtain an admissible solution in terms of accuracy is possible. In this regard, let's consider another method for solving the problem.

It is convenient to replace the problem of maximizing function (11) by the equivalent problem of minimizing the function

$$G(x) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^2 x_{ij}^2}{\left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \right)^2}. \quad (29)$$

To solve the fractional-quadratic programming problem obtained in this form, we introduce a new variable

$$y_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij}},$$

whence

$$y_0 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} = 1. \quad (30)$$

Let us formulate a new set of variables

$$\Phi(y) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^2 y_{ij}^2 - \sum_{i=1}^m \lambda_i \left(\sum_{j=1}^n y_{ij} - y_0 a_i \right) - \sum_{j=1}^{n-1} \mu_j \left(\sum_{i=1}^m y_{ij} - y_0 b_j \right) - \nu \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} y_{ij} - 1 \right) \quad (37)$$

Further

$$\frac{d\Phi(y)}{dy_{ij}} = 2\sigma_{ij}^2 y_{ij} - \lambda_i - \mu_j - \nu d_{ij} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

$$y_{ij} = \frac{1}{2\sigma_{ij}^2} (\lambda_i + \mu_j + \nu d_{ij}), \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (38)$$

Substituting (38) into (33) - (36), we have

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{d_{ij}}{2\sigma_{ij}^2} (\lambda_i + \mu_j + \nu d_{ij}) = 1,$$

$$\sum_{j=1}^n \frac{1}{2\sigma_{ij}^2} (\lambda_i + \mu_j + \nu d_{ij}) = y_0 a_i, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\sum_{i=1}^m \frac{1}{2\sigma_{ij}^2} (\lambda_i + \mu_j + \nu d_{ij}) = y_0 b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n-1.$$

$$y_{ij} = y_0 x_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (31)$$

In this case, relations (2) - (4), (29), (30) take the form

$$G(y) = \frac{1}{y_0^2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^2 \cdot \frac{y_{ij}^2}{y_0^2} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^2 y_{ij}^2, \quad (32)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} y_{ij} = 1, \quad (33)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = \frac{1}{y_0} \sum_{j=1}^n y_{ij} = a_i, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = \frac{1}{y_0} \sum_{i=1}^m y_{ij} = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n-1, \quad (34)$$

whence

$$\sum_{j=1}^n y_{ij} = y_0 a_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (35)$$

$$\sum_{i=1}^m y_{ij} = y_0 b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n-1. \quad (36)$$

Now the original problem has been reduced to the form: find a set $Y = (y_{ij})$, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$, minimizing (32) and satisfying constraints (33) - (36). Let's solve the resulting quadratic programming problem.

Let's introduce the Lagrange function

Solving the resulting system of linear algebraic equations, we obtain expressions for $\{\lambda_i\}$, $\{\mu_j\}$, ν through y_0 and the initial data $\{a_i\}$, $\{b_j\}$. Substituting these expressions in (38), we obtain the relations for y_{ij} through y_0 . Now we find the value y_0 from (32). Finally, we calculate the values of the initial variables x_{ij} using (31). Problem is solved.

The fundamental advantage of the proposed method for solving a transport problem in conditions of uncertainty is the ability to obtain an accurate and fast

result due to a single solution of the fractional – quadratic programming problem.

The real complication of the problem arises if the statistical data for an adequate reconstruction of the distribution density of the random costs of transportation is not enough, but a correct statistical estimate of the mathematical expectations and variances of these random variables is possible. Let's consider a method for solving the original problem under these conditions. Let m_{ij} and σ_{ij}^2 – statistical estimates of the mathematical expectation and variance of the random cost of transporting a unit of a product from the i -th supplier to the j -th consumer. To solve the problem, the following two-stage procedure is proposed.

At the first stage, we will find a transportation plan X that minimizes the average total cost of transportation

$$L(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^2 x_{ij}^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_{ij}^{(0)})^2 + \sum_{i=1}^m \lambda_i \left(\sum_{j=1}^n x_{ij} - a_i \right) + \sum_{j=1}^{n-1} \mu_j \left(\sum_{i=1}^m x_{ij} - b_j \right). \quad (40)$$

Further

$$\frac{dL(x)}{dx_{ij}} = 2\sigma_{ij}^2 x_{ij} + 2(x_{ij} - x_{ij}^{(0)}) + \lambda_i + \mu_j = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n-1.$$

Hence

$$x_{ij} = \frac{2x_{ij}^{(0)} - \lambda_i - \mu_j}{2(\sigma_{ij}^2 + 1)}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n-1. \quad (41)$$

Substituting (41) into (2) - (3), we obtain the system of equations

$$\sum_{j=1}^{n-1} \frac{2x_{ij}^{(0)} - \lambda_i - \mu_j}{2(\sigma_{ij}^2 + 1)} = a_i, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\sum_{i=1}^m \frac{2x_{ij}^{(0)} - \lambda_i - \mu_j}{2(\sigma_{ij}^2 + 1)} = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n-1.$$

The solution to this system of linear algebraic equations defines the sets $\{\lambda_i\}$, $i = 1, 2, \dots, m$, $\{\mu_j\}$, $j = 1, 2, \dots, n-1$. Substitution of these sets in (41) gives the desired solution to the problem.

We now make an important remark. The results of solving the original problem naturally depend on the nature of the distribution density of the random variables c_{ij} , $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$. The set (x_{ij}) obtained in problem (39), (40), (2), (3) corresponds to the hypothesis that this distribution is Gaussian with parameters (m_{ij}, σ_{ij}^2) . The real distribution can be very different from the Gaussian one. Therefore, it is advisable to consider the solution of this problem under the assumption of the worst distribution density of the random cost of transportation, having previously found this worst

and satisfying constraints (2) - (4). This is a common transportation problem and let $X^{(0)}$ be the solutions.

At the second stage, we will set the task of finding a plan that minimizes the compromise criterion made up of four terms. The first term determines the variance of the total cost of transportation, the second – a measure of deviation of the desired plan from the plan $X^{(0)}$, the third term provides a solution satisfying (2), the fourth – satisfying (3). Thus, the composite criterion has the form

distribution. The problem of finding the worst distribution is solved under the condition that, based on the results of statistical processing of the available data for each "supplier – consumer" pair (i, j) , estimates of the mathematical expectation and variance of the corresponding random value c_{ij} are obtained. Let us assume that the worst density corresponds to the maximum probability that a random value of the cost c_{ij} will exceed a given acceptable threshold c_n . Thus, this problem can be formulated as follows: find the distribution density of the random value $f(c_{ij})$ that maximizes

$$p(c_{ij} > c_n) = \int_{c_n}^{\infty} f(c_{ij}) dc_{ij} \quad (42)$$

and satisfies the accepted constraints

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(c_{ij}) dc_{ij} = 1, \quad (43)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} c_{ij} f(c) dc = m_{ij}, \quad (44)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} c^2 f(c) dc = \sigma_{ij}^2 + m_{ij}^2. \quad (45)$$

The resulting problem is a special case of the continuous linear programming problem, the general methods of solving which are presented in [15]. It is shown that the solution to problem (42) - (45) must be sought in the form of a linear combination δ of the Dirac functions. The solution procedure is iterative and consists

in the sequential calculation of the components $(x_1, x_2, \dots, x_m)$, $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$, the basic plan – function

$$f(\theta) = \sum_{j=1}^m x_j \delta(\theta - \theta_j). \quad (46)$$

The plan-function defined on each iteration is checked for optimality. If the sign of optimality formulated in [15] is not fulfilled, then another step is taken to improve the solution. This procedure will result in a function for task (42) - (45)

$$f(\theta) = \frac{(c_n - m_{ij})^2}{\sigma^2 + (c_n - m_{ij})^2} \delta\left(\theta - \frac{m_{ij}^2 + \sigma^2 - m_{ij}c_n}{c_n - m_{ij}}\right) + \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + (c_n - m_{ij})^2} \delta(\theta - c_n), \quad (47)$$

moreover, the probability of getting into critical area $c > c_n$ is equal to coefficient at second term in expression (47). Thus

$$P(c > c_n) = \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + (c_n - m_{ij})^2}. \quad (48)$$

Now, using (48), an additive criterion of efficiency (expediency) of a transportation plan X can be formed, taking into account the worst conditions for its implementation, which has the form

$$L(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{\sigma_{ij}^2}{\sigma_{ij}^2 + (c_n - m_{ij})^2} x_{ij}. \quad (49)$$

The directions of further research are associated with the development of methods for solving the considered problems for cases that are deeper than the theoretical and probabilistic uncertainty of the initial data. This uncertainty in the context of small samples of observations can be described in terms of fuzzy [16 - 18] or imprecise [19 - 20] mathematics. Possible solutions in this case can be obtained using the methods proposed in [21].

Conclusions

1. Considered the problem of forming a transportation plan in the "supplier - consumers" system in conditions when the values of the cost of transportation are random values. An exact method is proposed for solving this problem according to the criterion - the probability that the random total cost of implementing the plan will exceed the threshold, acceptable value. The solution is achieved using an iterative procedure, at each step of which a quadratic programming problem is solved.

In order to speed up this procedure, an alternative method is proposed based on a single solution of the fractional - quadratic programming problem.

2. A method for solving the problem of optimization of transportation for a situation where the density of distribution of a random cost cannot be correctly determined is considered. In this case, the solution to the problem was obtained under the assumption of the worst distribution density of the random cost of transportation. The solution is implemented using the theory of continuous linear programming.

3. The theoretical and applied significance of the results obtained is determined by the everyday nature of the optimization problems arising in practice, the parameters of which are not precisely determined.

References

1. Birman, I. Ya. (1962), *Transport Problem of Linear Programming* [Transportnaya zadacha lineynogo programmirovaniya], Moscow : Ed. eq. lit., 262 p.
2. Nesterov, E. P. (1962), *Transport Problem of Linear Programming* [Transportnaya zadacha lineynogo programmirovaniya], Moscow : Ed. Ministry of Railways, 189 p.
3. Yudin, D. B., Golstein, E. G. (1969), *Transport-type linear programming problems* [Zadachi lineynogo programmirovaniya transportnogo tipa], Moscow : "Sov. radio", 382 p.
4. Chumakov, V. B. (2006), "Solving the problems of organizing road transport in the context of the uncertainty of the state of regional transport systems" ["Resheniye zadach organizatsii avtomobil'nykh perevozok v usloviyakh neopredelennosti sostoyaniya regional'nykh transportnykh sistem"], Novocherkassk : SKSTU, P. 22–26.
5. Malakhov, V. P., Kondratenko, G. V. (2002), "Simulation models and algorithms for forming routes and trajectories based on fuzzy logic" ["Imitatsiyni modeli ta alhorytmy formuvannya marshrutiv i trayektoriy na osnovi nechitkoyi lohiky"], *Proceedings of the OPU*, Issue 1 (17), P. 1–10.
6. Ryan, G. (2005), "Rosandich. Quantification on Uncertainty in Transportation Infrastructure Projects", *Santiago: Economics planning*, P. 5–14.
7. Borisova, E. A., Finaev, V. I. (2006), "Triaxial distribution problem with fuzzy parameters" ["Triaksial'naya raspredelitel'naya zadacha s nechitkimi parametrami"], *Izvestia TRTU, Issue "Intelligent CAD"*, No. 8, P. 17–21.

8. Borisova, E. A., Finaev, V. I. (2007), *Three-index distribution problems with fuzzy parameters* [Trekhindeksnyye raspredelitel'nyye zadachi s nechetkimi parametrami], Taganrog : TTI SFU, 190 p.
9. Ermoliev, Yu. M. (1976), *Stochastic programming methods* [Metody stokhasticheskogo programmirovaniya], Moscow : Nauka, 239 p.
10. Kaplinsky, A. I., Poznyak, A. S., Propoy, A. I. (1971), "On some methods for solving stochastic programming problems" ["O nekotorykh metodakh resheniya zadach stokhasticheskogo programmirovaniya"], *Automation and Remote Control*, No. 10, P. 87–94.
11. Porotsky, S. M. (1977), "Stochastic problems of transport type" ["Stokhasticheskiye zadachi transportnogo tipa"], *Izv. Academy of Sciences of the USSR. Tech. Cybernetics*, No. 6, P. 34–39.
12. Yudin, D. B., Yudin, A. D. (2009), *Extreme models in economics* [Ekstremal'nyye modeli v ekonomike], Moscow : LIBROKOM, 312 p.
13. Yudin, D. B. (1979), *Problems and methods of stochastic programming* [Zadachi i metody stokhasticheskogo programmirovaniya], Moscow : "Sov. radio", 385 p.
14. Seraya, O. V. *Multidimensional models of logistics in conditions of uncertainty* [Mnogomernyye modeli logistiki v usloviyakh neopredelennosti], Kharkiv : VOP Stetsenko, 512 p.
15. Raskin, L. G., Kirichenko, I. O. (2005), *Continuous linear programming* [Kontinual'noye lineynoye programmirovaniye], Kharkiv : VIVV, 175 p.
16. Zadeh, L. (1965), "Fuzzy Sets", *Information and Control*, Vol. 8, P. 338–353.
17. Dubois, D., Prade, A. (1990), *Theory of Opportunities. Application to the representation of knowledge in computer science* [Teoriya vozmozhnostey. Prilozheniye k predstavleniyu znaniy v informatike]: Per. from French, Moscow : Radio and communication, 286 p.
18. Raskin, L. G., Gray, O. V. (2008), *Fuzzy mathematics* [Nechetkaya matematika], Kharkiv : Parus, 352 p.
19. Pawlak, Z. (1982), "Rough sets", *International Journal of Information and Computer Sciences*, Vol. 11, No. 5, P. 341–356.
20. Pawlak, Z. (1991), *Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning about Data*, Dordrecht : Kluwer Academic Publisher, 284 p.
21. Raskin, L., Sira, O. (2016), "Method of solving fuzzy problems of mathematical programming", *Eastern-european journal of enterprise technologies*, Vol. 5, No. 4 (83). DOI: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2016.81292>

Received 31.05.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Раскін Лев Григорович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри розподілених інформаційних систем і хмарних технологій, Харків, Україна; email: topology@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9015-4016>.

Раскин Лев Григорьевич – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", профессор кафедры распределенных информационных систем и облачных технологий, Харьков, Украина.

Raskin Lev – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of Distributed Information Systems and Cloud Technologies, Kharkiv, Ukraine.

Парфенюк Юрій Леонідович – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", аспірант кафедри розподілених інформаційних систем і хмарних технологій, Харків, Україна; email: parfuriy.l@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5357-1868>.

Парфенюк Юрий Леонидович – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", аспирант кафедры распределенных информационных систем и облачных технологий, Харьков, Украина.

Parfeniuk Yuri – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Postgraduate Student of the Department of Distributed Information Systems and Cloud Technologies, Kharkiv, Ukraine.

Сухомлин Лариса Вадимівна – кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, кафедра менеджменту, Кременчук, Україна; email: lar.sukhomlyn@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9511-5932>.

Сухомлин Лариса Вадимовна – кандидат технических наук, доцент, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, кафедра менеджмента, Кременчуг, Украина.

Sukhomlyn Larysa – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Department of Management, Kremenchuk, Ukraine.

Кравцов Михайло Олегович – магістр, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", кафедра розподілених інформаційних систем і хмарних технологій, Харків, Україна; email: mesha0511@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1211-7786>.

Кравцов Михаил Олегович – магистр, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", кафедра распределенных информационных систем и облачных технологий, Харьков, Украина.

Kravtsov Mykhailo – Master, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Department of Distributed Information Systems and Cloud Technologies, Kharkiv, Ukraine.

Сурков Леонід Ярославович – магістр, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", кафедра розподілених інформаційних систем і хмарних технологій, Харків, Україна; email: trimmided@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8581-2811>.

Сурков Леонид Ярославович – магистр, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", кафедра распределенных информационных систем и облачных технологий, Харьков, Украина.

Surkov Leonid – Master, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Department of Distributed Information Systems and Cloud Technologies, Kharkiv, Ukraine.

МЕТОД ВИРІШЕННЯ КАНОНІЧНОЇ ЗАДАЧІ ТРАНСПОРТНОЇ ЛОГІСТИКИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Предмет. Розглянуто канонічну задачу транспортної логістики у розгалуженій системі "постачальники – споживачі". **Ціль.** Розробка точного алгоритму вирішення цієї задачі за імовірнісним критерієм в припущенні про випадковий характер вартостей транспортувань. **Задачі.** 1. Розробка точного методу вирішення задачі відшукування плану, мінімізуючого сумарну вартість транспортувань в умовах, коли їх вартості задані власною щільністю розподілу. 2. Розробка методу вирішення задачі, коли щільності розподілу вартості перевезень невідомі. **Методи.** Запропоновано обчислювальну схему вирішення задачі, яка реалізується ітераційною процедурою послідовного покращення плану транспортувань. Збіжність цієї процедури доведено. З ціллю прискорення збіжності обчислювальної процедури до точного рішення запропоновано альтернативний метод, заснований на рішенні нетривіальної задачі дробно-нелінійного програмування. Метод зводить вихідну складну задачу до рішення послідовності більш простих задач. Вихідна задача доповнена розглядом важливої для практики ситуації, коли в умовах малої вибірки похідних даних відсутня можливість отримання адекватних аналітичних описів для щільностей розподілення випадкових вартостей транспортувань. Для рішення задачі в такому випадку запропоновано мінімаксний метод відшукування найкращого плану транспортувань у найбільш несприятливій ситуації, коли щільності розподілу випадкової вартості транспортувань будуть найгіршими. Для відшукування таких щільностей використано сучасний математичний апарат континуального лінійного програмування. **Результати.** Запропоновані математична модель та метод рішення задачі транспортної логістики в умовах невизначеності похідних даних. Шуканий план досягається з використанням рішення задачі дробно-нелінійного програмування. **Висновки:** Розглянуто задачу формування плану транспортувань за умови, що їх вартості – випадкові величини. Також розглянуто метод вирішення задачі оптимізації транспортувань для випадку, у якому щільність розподілення випадкової вартості не може бути коректно визначена.

Ключові слова: транспортна задача лінійного програмування; випадкова вартість транспортувань; дробно-нелінійна оптимізація.

МЕТОД РЕШЕНИЯ КАНОНИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Предмет. Рассмотрена каноническая задача транспортной логистики в распределенной системе "поставщики – потребители". **Цель.** Разработка точного алгоритма решения этой задачи по вероятностному критерию в предположении о случайном характере стоимостей транспортировок. **Задачи.** 1. Разработка точного метода решения задачи отыскания плана, минимизирующего суммарную стоимость транспортировок в условиях, когда их стоимости заданы своими плотностями распределения. 2. Разработка метода решения задачи, когда плотности распределения стоимости перевозок не известны. **Методы.** Предложена вычислительная схема решения задачи, которая реализуется итерационной процедурой последовательного улучшения плана транспортировок. Сходимость этой процедуры доказана. С целью ускорения сходимости вычислительной процедуры к точному решению предложен альтернативный метод, основанный на решении нетрививальной задачи дробно-нелинейного программирования. Метод сводит исходную сложную задачу к решению последовательности более простых задач. Исходная задача дополнена рассмотрением важной для практики ситуации, когда в условиях малой выборки исходных данных отсутствует возможность получения адекватных аналитических описаний для плотностей распределения случайных стоимостей транспортировок. Для решения задачи в этом случае предложен минимаксный метод отыскания наилучшего плана транспортировок в наиболее неблагоприятной ситуации, когда плотности распределения случайной стоимости транспортировок являются наихудшими. Для отыскания таких плотностей использован современный математический аппарат континуального линейного программирования. **Результаты.** Предложены математическая модель и метод решения задачи транспортной логистики в условиях неопределенности исходных данных. Искомый план достигается с использованием решения задачи дробно-нелинейного программирования. **Выводы:** Рассмотрена задача формирования плана транспортировок при условии, что их стоимости - случайные величины. Также рассмотрен метод решения задачи оптимизации транспортировок для ситуации, когда плотность распределения случайной стоимости не может быть корректно определена.

Ключевые слова: транспортная задача линейного программирования; случайная стоимость транспортировок; дробно-нелинейная оптимизация.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Раскін Л. Г., Парфенюк Ю. Л., Сухомлин Л. В., Кравцов М. О., Сурков Л. Я. Метод вирішення канонічної задачі транспортної логістики в умовах невизначеності. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 2 (16). С. 80–88. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.080>

Raskin, L., Parfeniuk, Yu., Sukhomlyn, L., Kravtsov, M., Surkov, L. (2021), "A method for solving the canonical problem of transport logistics in conditions of uncertainty", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (16), P. 80–88. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.080>

УДК 621.3.006.357

DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.089>

К. А. Селиванов, Б. П. Муляр, Ю. Ю. Коляденко, Н. В. Москалец

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ ПРИ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ЧАСТОТНОГО РЕСУРСА В ГРУППИРОВКЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ СЕТИ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ 5G

Предмет: модели взаимодействия и фазовые состояния при распределении частотного ресурса в группировке радиоэлектронных средств сети мобильной связи 5G. **Цель:** разработка динамической модели множественных взаимодействий n-элементов сложной системы мобильной связи 5G, в которой учтены характер межэлементных связей и фазовых состояний при групповом использовании частотного ресурса. **Задачи:** на основе сложной модели n-элементной системы с множественными взаимодействиями разработать математическую модель описания электромагнитной обстановки группировки радиоэлектронных средств в пространстве состояний при групповом использовании частотного ресурса; провести анализ фазовых состояний взаимодействия элементов системы группировки радиоэлектронных средств системы мобильной связи при которых они смогут функционировать без ухудшения качественных показателей, которые отражают суммарный уровень группового влияния излучающих элементов на приемные устройства, в условиях оптимального распределения частотного ресурса; провести анализ фазовых состояний взаимодействия элементов системы группировки радиоэлектронных средств системы мобильной связи при которых они смогут функционировать без ухудшения качественных показателей в условиях оптимального распределения частотного ресурса. **Методы:** математический метод пространства состояний системы, описывающей нелинейный характер и фазовые состояния системы с учетом интенсивности взаимодействия её элементов. **Результаты:** Разработана математическая модель электромагнитной обстановки группировки радиоэлектронных средств, характеризующая нелинейный характер взаимодействий при групповом использовании частотного ресурса. Получено рекуррентное выражение для моделирования оценки совокупного характера электромагнитных взаимодействий в группировке радиоэлектронных средств. Проведено моделирование динамики взаимодействий и фазовых состояний группировки радиоэлектронных средств при групповом использовании частотного ресурса. **Выводы:** Показано, что с помощью модели, моделирующий динамику взаимодействий группировки РЭС, можно анализировать ее состояние в будущем. Данная модель позволяет выполнять анализ группировки радиоэлектронных средств при различных, конкретных параметрах отдельных типов радиоэлектронных средств, характер и интенсивности их взаимодействия в группировке при действующем распределении ресурсов.

Ключові слова: динамическая модель; множественные взаимодействия; электромагнитная обстановка; распределение ресурсов; распределение частот.

Введение (постановка задачи)

В последние десятилетия во всем мире стремительно развиваются инфокоммуникационные технологии, которые непосредственно влияют на развитие экономики, образования, науки, здравоохранения, культуры и образа жизни человека. По данным Международного Союза Электросвязи (ITU–International Telecommunication Union) (МСЭ) уже в 2012 году Интернетом пользовался каждый третий житель Земли, и число пользователей неуклонно растет. Инфокоммуникационные технологии (ИКТ) и услуги на базе широкополосного доступа год от года становятся все более доступными для населения, в том числе и по стоимости.

Сети мобильной связи пятого поколения призваны обеспечить все возрастающие потребности в получении современных информационных услуг мобильных пользователей [1-9]. Сети 5G играют ключевую роль в превращении городов в разумные города, что позволит гражданам и обществу в целом, получить социально-экономические выгоды, которые дает передовая цифровая экономика с интенсивным использованием данных [10]. Технология нового поколения 5G / IMT-2020, как и любая новая технология, привносит свои специфические особенности во все аспекты, касающиеся практики ее применения. Одним из таких особо важных аспектов

является электромагнитная совместимость (ЭМС). На этапе подготовки к внедрению радиосетей технологии 5G, названной NewRadio (NR), необходимо заблаговременно позаботиться о принятии мер по эффективной оценке условий ЭМС для этих сетей на основе тщательного анализа особенностей технологии 5G, а правильно и точно оценив эти условия – успешно обеспечить электромагнитную совместимость радиосредств новых сетей.

Для внедрения 5G кабинет министров Украины утвердил план использования радиочастотного ресурса до 2025 года. Эти изменения позволят пользователям получать более стабильные и высокие скорости передачи информации.

МСЭ с 1995 года стал международным координатором работ по электросвязи, направленных на создание глобального информационного общества. Создав Регламент радиосвязи [11] и разделив поверхность Земли на три региона, МСЭ организовал определенный порядок в частотном пользовании. Однако частотный ресурс, принадлежит всему человечеству, исключительно активно используется и по сей день частотные диапазоны ниже 5 ГГц практически перегружены. Присвоение радиочастот и радиочастотных каналов для радиоэлектронных средств в этих диапазонах осуществляется по технологиям частотно-территориального планирования (ЧТП) [12-14] с обязательным расчетом ЭМС радиосредств.

Ключевыми решениями и технологическими компонентами [1-4] сети радиодоступа 5G NR являются:

1) использование новых форм сигнала, получивших название Non-Orthogonal Waveform и дающих выигрыш в спектральной эффективности по отношению к OFDM;

2) применение полного дуплекса FD - одновременной передачи и приема в общей полосе частот, преимущественно в коротких соединениях "точка-точка" (D2D, V2V);

3) применение многомерных антенн MIMO, в которых эффективно реализуется режим динамического формирования направленных лучей для передачи (3D / Beamforming), что позволяет увеличить энергетический выигрыш в ожидаемых высоких диапазонах частот и улучшить покрытие и спектральную эффективность в ультра-плотных малых сотах;

4) применение малых сот Small Cellco со сверхплотным распределением (один передатчик на каждого пользователя), разгружая макросотами сети с разделением сред передачи команд управления и пользовательского трафика между макро- и Small-сотах в различных полосах частот (концепция "PhantomCell").

Радиочастоты для сетей 5G – это одна из главных компонент, оказывает существенное влияние на ЭМС [6, 9, 12].

На Всемирной конференции радиосвязи ВКР-15 были определены новые диапазоны радиочастот для 5G, в том числе диапазоны сантиметровых и миллиметровых волн [12]. В целом этот радиочастотный спектр размещен в трех областях: ниже 1 ГГц, от 1 ГГц до 6 ГГц и выше 6 ГГц (до 100 ГГц).

В качестве главных особенностей этого спектра с точки зрения ЭМС можно выделить следующее: возможность использования широкой непрерывной полосы канала (суммарно до 1-2 ГГц), малые зоны обслуживания (дальность излучения) в малых (Small) и ультра-малых (UltraSmall) сотах; возможность использования малогабаритных многоэлементных антенн MIMO с узкими лучами как в базовых станциях, так и в абонентских устройствах; различный характер потерь при распространении сигнала, в частности, значительное влияние на уровень потерь дополнительных ранее неизвестных в сотовой связи факторов [15-18].

Учитывая особенности сетей 5G актуальной научной задачей, является разработка модели взаимодействия в группировке радиоэлектронных средств при распределении частотного ресурса в сетях мобильной связи.

Анализ последних достижений и публикаций

В 5G-NR используются OFDM поднесущие с различной шириной спектра – 15кГц, 30кГц, 60кГц, 120кГц и 240кГц (табл. 1) [19].

Таблица 1. Нумерология стандарта 5G-NR

u (нумерология)	$\Delta F=2^u \cdot 15$ [кГц]	Циклический префикс
0	15 (соответствует LTE)	Normal
1	30	Normal
2	60	Normal, Extended
3	120	Normal
4	240	Normal

Использование различных нумерологий открывает широкие возможности для гибкой настройки поведения сети при предоставлении тех или иных услуг, например, для приложений критичных к уровню задержек, уместно использовать поднесущие с широким спектром при меньшей длительности символа, и наоборот, при передаче трафика широкополосного доступа в Интернет и низкоскоростного трафика Интернета вещей – использовать "узкие" поднесущие [20].

В 5G-NR передача данных в восходящем (Uplink – UL) и нисходящем (Downlink – DL) направлениях организуется на основе фреймов, длительностью $T_f = 10$ мс. Каждый фрейм делится на 10 субфреймов, длительностью $T_{sf} = 1$ мс каждый. Также каждый субфрейм делится на два полуфрейма (half-frame 0 и half-frame 1). Каждый субфрейм делится на слоты; количество слотов определяется шириной спектра поднесущей и составляет 1, 2, 4, 8 или 16 слотов (в отличие от сетей LTE-FDD, где используется единая структура с двумя слотами на каждый субфрейм) [21].

В 5G-NR количество OFDM символов, приходящихся на один слот, не зависит от нумерологии и, по аналогии с сетями 4G-LTE, определяется только типом циклического префикса: 14 символов для нормального и 12 – для расширенного префикса. На рис. 1 приведена диаграмма OFDM-символов на сетке координат "частота"- "время" [22,23].

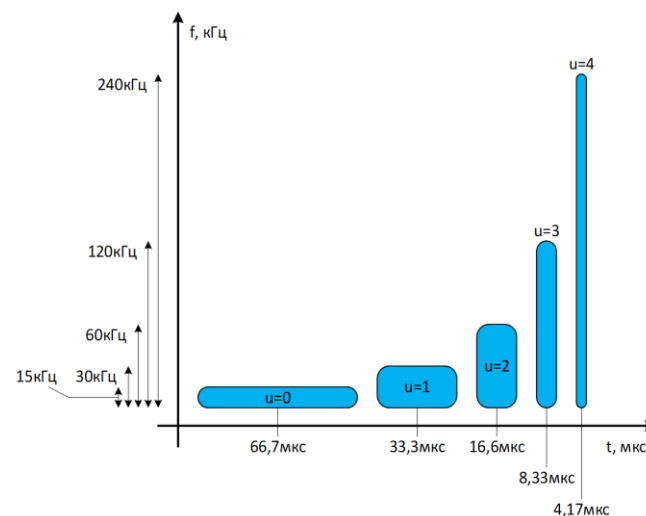


Рис. 1. OFDM символы

По аналогии с 4G-LTE единицей частотно-временного ресурса в сетях 5G-NR является

ресурсный блок – RB (Resource Block). Каждому абонентскому терминалу на определенный период времени для приема/передачи данных выделяется некоторое, определенное планировщиком системы, количество ресурсных блоков. Каждый ресурсный блок в частотной области содержит 12 смежных поднесущих частот. Ширина полосы частот одного ресурсного блока зависит от используемой нумерологии. В рамках одного радиоканала может использоваться несколько нумерологий [22].

Назначение частотно-временных блоков для передачи сигналов АС происходит в результате процедуры планирования (распределения) физических ресурсов. Цель этой процедуры заключается в выделении базовой станцией (БС) поднесущих каждого доступного частотно-временного блока АС, для которых достигается наибольшее значение некоторой метрики (целевой функции) на данной группе поднесущих. В качестве такой метрики может выступать значения отношения мощности сигнала к мощности помехи и шума (ОСПШ) в канале для i -й

АС, отношение мгновенной скорости передачи данных i -й АС к средней пропускной способности, рассчитанное для некоторого временного интервала.

Для повышения спектральной эффективности MIMO-OFDMA системы связи один и тот же частотно-временной блок может использоваться для обслуживания нескольких АС. В этом случае между сигналами АС появляются взаимные помехи.

В данном случае диспетчер контролирует, для каждого момента времени, каким АС нужно распределить части совместно используемого ресурса. Диспетчер также определяет скорость передачи данных, которая должна применяться для каждой АС. Диспетчер определяет производительность всей системы, особенно в очень загруженной сети. Как нисходящая, так восходящая линии связи 5G-NR подвергаются плотному (компактному) планированию [24]. Диспетчер для каждого временного момента и частотной области выбирает АС с наилучшим состоянием канала, как показано на рис. 2.

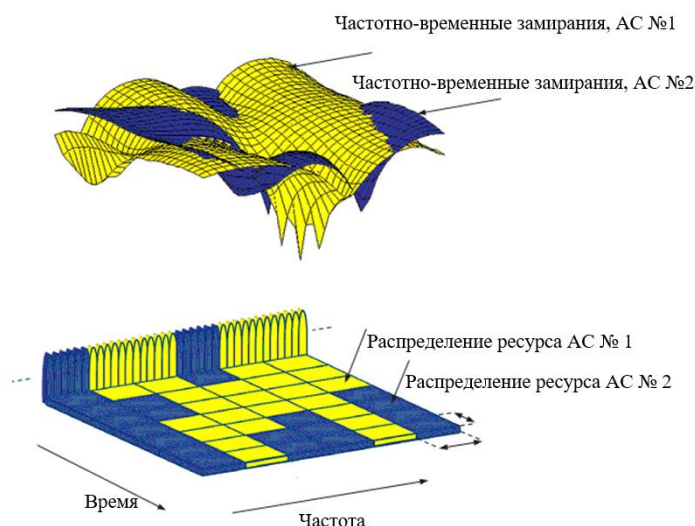


Рис. 2. Распределение ресурсов между АС

Для решения вопроса о нарушении условий электромагнитной совместимости необходимо установить характер влияния помех и оценить результаты этого влияния на качество функционирования радиоэлектронных средств (РЭС) в рассматриваемой группировке. Выбор конкретной модели определяется методом анализа, требованиями к его точности, свойствами и достоверностью исходных данных. Например, при высокой степени взаимодействия элементов в группировке РЭС наступает неравновесное состояние системы, что приводит к потере ее устойчивости. С точки зрения радиофизического тракта такое состояние может наступить при множественном помеховом воздействии в группировке РЭС систем мобильной связи и в том числе в условиях неоптимального распределения частотного ресурса.

Анализ ЭМС в группировке радиоэлектронных средств базируется на результатах исследования электромагнитной обстановки и параметров, влияющих на ЭМС на качественном и

количественном уровнях. Поэтому целесообразно нахождения уровней предельных множественных воздействий, при которых наступает неравновесное состояние группировки РЭС системы мобильной связи, при котором становится невозможным функционирование системы по показателям качества.

В связи с этим актуальной задачей является разработка математической модели взаимодействий и фазовых состояний при распределении частотного ресурса в группировке радиоэлектронных средств сети мобильной связи 5G при групповом использовании частотного ресурса, основанная на динамической модели множественных взаимодействий n -элементов сложной системы.

Разработка такой модели позволит основательно проводить анализ группировки РЭС мобильных систем связи 5G при решении задачи оптимального распределения частотного ресурса группировки радиоэлектронных средств в условиях нелинейных электромагнитных воздействий.

Анализ взаимодействия РЭС NR и их ЭМС можно представить в виде теоретико-игровой модели. Игра – это математическая модель коллективного поведения: несколько участников влияют на ситуацию, причем их интересы (выигрыши или потери при различных возможных ситуациях) различны. При таком представлении во взаимодействии динамических систем возможны три характерные стратегии поведения. В применении к процессу электромагнитных взаимодействий между РЭС NR эти стратегии могут быть классифицированы следующим образом:

1) антагонистическая стратегия, когда участники имеют противоположные интересы. Она применима в случае создания преднамеренных помех. Эта стратегия не характерна для проблематики ЭМС;

2) кооперативная стратегия, когда у всех игроков есть общая цель и их стратегии согласованы. Данная стратегия наиболее благоприятна в сложной СПО, поскольку она предполагает наличие управляемых элементов, формирующих ЭМО, т.е. управление всей системой в целом;

3) стратегия равнодушия или игра с природой, когда стратегия j -го игрока не зависит от стратегии i -го игрока. Данная стратегия – поиск свободного ресурса, она характерна при децентрализованных методах управления элементами связи.

Известны и другие типы стратегий, которые используются в задачах ЭМС – чистые или смешанные. Игра в чистых стратегиях предполагает детерминистский подход, и как следует из теории игр, редко когда приводит к равновесным решениям. В противоположность этому, для игр в смешанных стратегиях, при стохастическом подходе круг равновесных решений значительно расширяется.

Решение задачи коллективом игроков сводится к выбору стратегии и к задаче многокритериальной оптимизации. При небольших отклонениях в информации об априорных данных поведение системы можно представить моделью взаимодействий и фазовых состояний группировок излучающих элементов.

Целью исследования является разработка динамической модели множественных взаимодействий n -элементов сложной системы мобильной связи 5G, в которой учтены характер межэлементных связей и фазовых состояний при групповом использовании частотных ресурсов.

Материалы и методы

В группировке РЭС NR основные параметры самих средств $\vec{x}(t)$ обычно известны, детерминированы. Состояние же всей группировки – случайно. Это объясняется влиянием множества неопределенных, случайных условий, формируемых характеристиками распространения радиоволн (РРВ). В результате случайных взаимодействий $s_{ij}(t)$,

$i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, n}$, где n – число РЭС, в самих параметрах РЭС происходят изменения. В группировке РЭС имеются соответствующие динамические взаимодействия, которые проявляются в результате измерений и наблюдений и характеризуются вектором распределения частотного ресурса $\vec{y}(t)$. Динамика изменений параметров описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{d\vec{x}(t)}{dt} = F(t)\vec{x}(t) + B(t)\vec{u}(t) + G(t)\vec{\xi}(t), \quad (1)$$

где $\vec{x}(t)$ – вектор состояний, $F(t)$ – матрица состояния, $\vec{u}(t)$ – вектор управления, $B(t)$ – матрица управления, $\vec{\xi}(t)$ – случайные возмущения, $G(t)$ – матрица случайных входных возмущений.

Или в более общем случае

$$\frac{d\vec{x}(t)}{dt} = f[\vec{x}(t), \vec{y}(t)]. \quad (2)$$

Успешность решения задачи электромагнитной совместимости рассматриваемой группировки зависит от наличных ресурсов $\vec{g}_m = \vec{g}_m(\vec{x}(t), t)$, $m \in \overline{1, M}$, а также от известных априорных вероятностей распределения p_i , $i \in \overline{1, n}$ и параметров c_{ijm} , определяющих характеристики связи между i -м и j -м РЭС и m -м ресурсом.

Наличные ресурсы $\vec{g}_m$ определяются суммой частотно-территориальных, временных, поляризационных, энергетических и других параметров РЭС и линий связи. Их можно представить в виде:

$$\vec{g}_m(\vec{x}(t), t) = \sum_{i,j=1}^n c_{ijm} s_{ij}. \quad (3)$$

В системе группировки РЭС в процессе ее функционирования реализуется соответствующее перераспределение ресурсов $\vec{y}(t)$, определяемое моделями стационарных состояний, которые описываются задачами максимизации энтропии системы [25]

$$H(y) = \sum_{i=1}^n p_i \ln \frac{y_i}{p_i} \rightarrow \max. \quad (4)$$

при соответствующих ограничениях на ресурсы.

Динамика состояния распределительного процесса определяется решением $\vec{y}(t)$ задачи (2), которое, как следует из (3) и (4), зависит от ее параметров p_i , c_{ijm} и $\vec{g}_m$.

Таким образом, модель динамики неравновесных состояний NR приобретает следующий вид:

$$\vec{y}(\vec{x}(t), t) = \arg \max \left[H(y) \mid g_k(\vec{x}(t), t) \right].$$

Рассмотрим структурную схему макросистемы, образованную группировкой РЭС (рис.3). Электромагнитные взаимодействия $s_{ij}(t)$ происходят между элементами $x_i(t)$ и $x_j(t)$, соответственно: источниками и рецепторами.

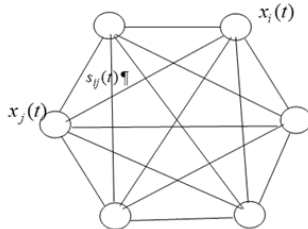


Рис. 3. Структурная схема взаимодействий s_{ij} в NR

Взаимодействующие связи между элементами определяются матрицами $C_m = [c_{ijm}; i, j \in \overline{1, n}]$, которые состоят из 0 и 1 и определяют наличие или отсутствие такой связи.

Очевидно, в такой неравновесной системе отмечается 2 основных процесса (потока): восстановления и распределения. Такой процесс мы наблюдаем в системах мобильной связи, когда абонентские станции (АС) потребляют и освобождают ресурс базовых станций (БС), т.е. происходит распределение и восстановление ресурса NR.

Обозначим через $\Phi[\vec{x}(t), \vec{y}(t)]$ поток восстановления и через $Q[\vec{x}(t), \vec{y}(t)]$ поток распределения. Эти потоки зависят от состояния $\vec{x}(t)$ – процесса восстановления и состояния $\vec{y}(t)$ – процесса распределения.

В рамках предположений о том, что время восстановления на много больше времени распределения [25], можно записать следующую, в общем случае нелинейную систему уравнений:

$$\frac{d\vec{x}(t)}{dt} = \Phi[\vec{x}(t), \vec{y}(x(t), t)], \quad (5)$$

$$\varepsilon \frac{d\vec{y}(t)}{dt} = Q[\vec{x}(t), \vec{y}(x(t), t)], \quad (6)$$

где ε – диагональная матрица малых параметров, определяющая интенсивность радиоэлектронных взаимодействий в рассматриваемой системе.

Формирование модели вида (6) для распределительного процесса с ограничениями и разнотипными ресурсами пока остается нерешенной задачей [25]. Такую модель удалось построить лишь для тех случаев, когда динамика распределительного

процесса – марковская, для ограничений балансового типа. В рассматриваемом случае можно предположить, что динамика распределительного процесса – марковская [25], поскольку не имеет значения, когда и как NR перешла в текущее состояние, а существенно лишь то, какой ресурс система использует на данный момент времени – частотный, поляризационный, временной или пространственный.

Проанализируем динамику состояния группировки РЭС NR. Для этого необходимо описать структуру ресурсов и их распределение между РЭС. Будем рассматривать группировку РЭС, состоящую из множества передатчиков и приемников. Все они являются потребителями ресурса. Если потребители ресурса состоят из n РЭС, то количество ресурса B является функцией численности РЭС $B = B(y_1, \dots, y_n)$. При отсутствии потребителей ($y_1 = \dots = y_n = 0$) имеем максимальный ресурс $B(0)$. При очень большом их количестве ($y_1 \rightarrow \infty, \dots, y_n \rightarrow \infty$) ресурс стремится к нулю $B(\infty) = 0$.

Для этого распределительного процесса можно указать некоторую априорную характеристику. Для каждого типа РЭС обычно известно нормативное количество ресурса a_i . Определим величину

$$p_i = \frac{a_i y_i}{\sum_{i=1}^n a_i y_i}; \quad p_i = \frac{a_i y_i}{\sum_{l=1}^n a_l y_l}; \quad 0 \leq p_i \leq 1; \quad \sum_{i=1}^n p_i = 1. \quad (7)$$

Тогда процесс случайного распределения ресурса по типам РЭС эквивалентен случайному и независимому распределению m каналов по n РЭС с априорной вероятностью распределения $P = \{p_1, \dots, p_n\}$.

Подставив выражение (8) в (6), получим нелинейную систему Вольтерра, распределения частотного ресурса в группировке РЭС:

$$\frac{dy_i(t)}{dt} = p_i y_i(t) (\varepsilon_i - \sum_{s=1}^n p_s y_s - \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^n p_s y_s p_j y_j). \quad (8)$$

Преобразует данное дифференциальное выражение к разностному. Обозначим t_k – дискретное время.

$$\frac{dy_i(t_{k+1}) - dy_i(t_k)}{t_{k+1} - t_k} = p_i y_i(t_k) (\varepsilon_i - \sum_{s=1}^n p_s y_s(t_k) - \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^n p_s y_s(t_k) p_j y_j(t_k)) \quad (9)$$

где $t_{k+1} - t_k = T_d$ – интервал дискретизации, время предоставления частотного ресурса относительно времени наблюдения. Обозначив дискретное время $t_k = k$ получим разностное уравнение:

$$y_i(k+1) = T_d y_i(k) + T_d [p_i y_i(k)(\varepsilon_i - \sum_{s=1}^n p_s y_s(k) - \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^n p_s y_s(k) p_j y_j(k))] \quad (10)$$

Данная модель позволяет выполнять анализ при различных конкретных параметрах и электромагнитных взаимодействий.

Результаты исследования и их обсуждение

В качестве примера рассмотрим динамику состояния двух РЭС NR ($n = 2$) при различных значениях ε , учитывающих интенсивность взаимодействия РЭС. Формализация данного показателя носит самостоятельный характер и решается в зависимости от решаемой задачи. В показатель интенсивности взаимодействия может входить рост численности РЭС, частотно-энергетический ресурс, потребляемый одним типом РЭС, адаптируемость сети к сигнально-помеховой обстановке и др., а определение данного показателя является задачей многокритериальной оптимизации.

Частотно-энергетический ресурс на начальный момент составляет: $y_1(k=0) = 0,0833$ ресурсного блока – для первого РЭС и $y_2(k=0) = 0,1667$ – для второго РЭС. Априорные вероятности $\nu_1 = 0,3024$ $\nu_2 = 0,6976$. Интервал дискретизации $T_d = 1$.

На рис. 4 показано перераспределение частотно-энергетического ресурса во времени при одинаковой интенсивности взаимодействия РЭС, а именно $\varepsilon_1 = 0,5$; $\varepsilon_2 = 0,5$. Номера кривых соответствуют номеру сети. Как видно из рис. 2 при малых и одинаковых значениях ε зависимость перераспределения ресурса между РЭС практически линейно возрастает во времени и при дальнейшем рост прекращается. Различие состоит в начальном используемом ресурсе и в априорной вероятности распределения. Такая тенденция, очевидно, характерна для сосуществования двух РЭС при неантагонистическом характере их функционирования.

При значениях $\varepsilon_1 = 1,35$, $\varepsilon_2 = 1,3$ (рис. 5) отмечается 3 характерные области графиков. Начальная область, где отмечается плавное увеличение потребляемого ресурса как для одного РЭС, так и для другого. При этом для первого РЭС потребляемый ресурс увеличивается медленнее по сравнению со вторым за счет меньшего начального значения частотного ресурса. Вторая область – стационарная, равновесная часть. Далее наблюдается увеличение потребления ресурса первым РЭС за счет большего показателя ε_1 по сравнению с ε_2 и спад потребления ресурса вторым РЭС, вследствие подавления его первым РЭС.

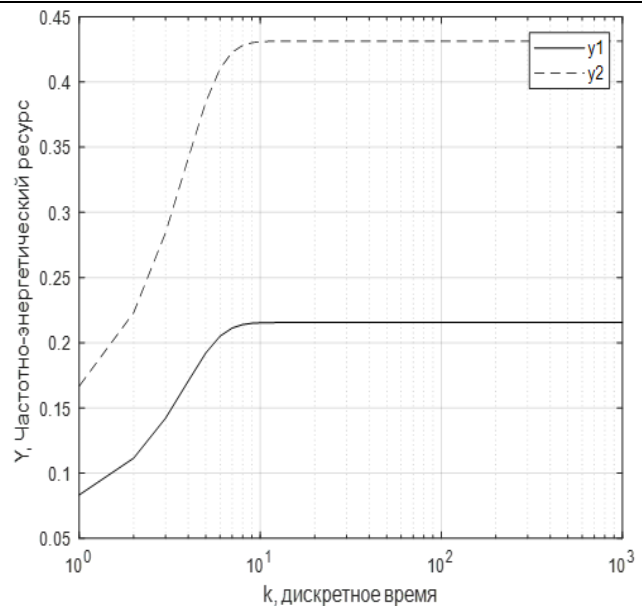


Рис. 4. Зависимость распределения частотного ресурса при слабой интенсивности взаимодействий

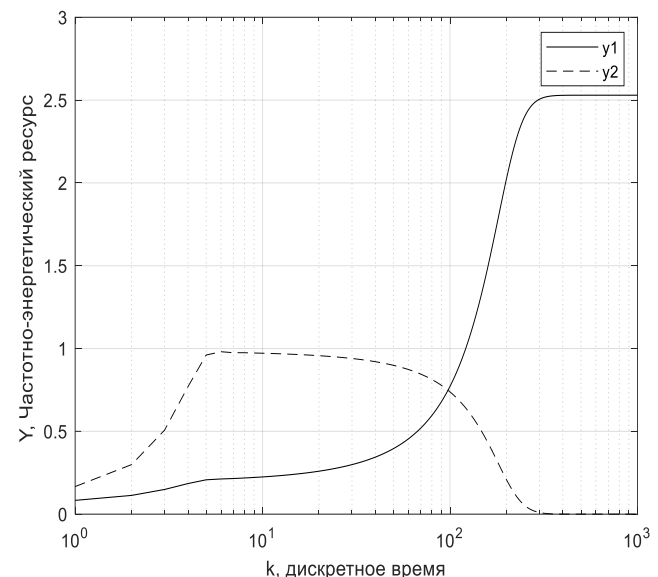


Рис. 5. Зависимость распределения частотного ресурса при средней интенсивности взаимодействий

При значениях $\varepsilon_1 = 1,6$; $\varepsilon_2 = 1,6$; (рис. 6) отмечаются 2 области. Начальная область, с ростом увеличения потребляемого ресурса (переходной режим), затем наблюдаются скачкообразные изменения потребления ресурса, связанные с достижением критических значений по насыщению системы, с ограничением наличного ресурса. Можно сказать, что система в данном случае имеет неустойчивый режим работы.

Как видно из приведенных рисунков перераспределение ресурсов в значительной мере зависит от параметра интенсивности взаимодействий РЭС. Проведен анализ и построена зависимость распределения ресурсов в установившемся режиме от параметра интенсивности ε (рис. 7).

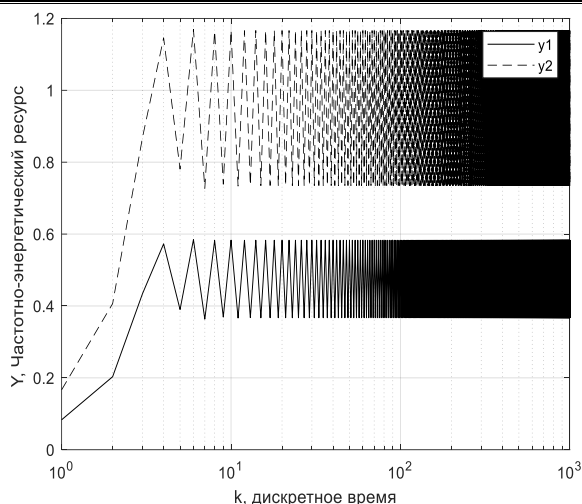


Рис. 6. Зависимость распределения ресурсов при критической интенсивности взаимодействий

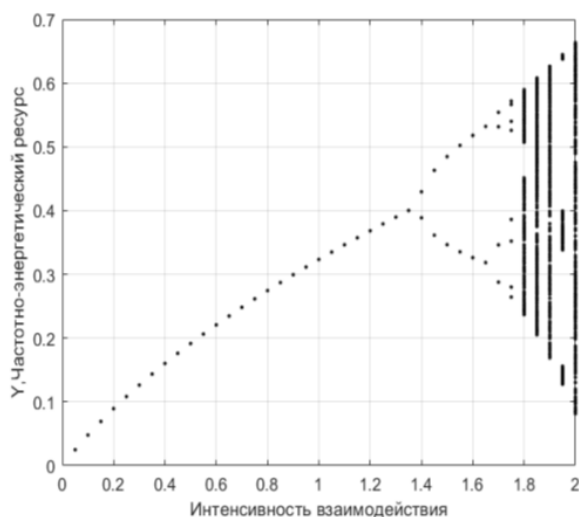


Рис. 7. Фазовый портрет. Зависимость распределения ресурсов Y от интенсивности взаимодействий ε при интервале дискретизации $T_d = 1$

Как видно из приведенного графика, критическим числом ε , при котором система еще не теряет устойчивости, является $\varepsilon \approx 1,4$. Из графика (рис. 7) следует, что в области $\varepsilon > 1,4$ наступают раздвоения траекторий (бифуркация состояния).

Очевидно, в области $\varepsilon \geq 1,4$ изменения состояния наблюдаемой системы могут оказаться значительными и неоднозначными при незначительных входных воздействиях. Такое состояние в теории управления трактуется как неустойчивое [25].

Устойчивость в данном случае понимается в классическом варианте: чтобы малые изменения управляющих параметров в области $\varepsilon < 1,4$ не приводили бы к большим изменениям состояния системы.

Получен фазовый портрет при интервале дискретизации $T_d = 2$ (рис. 8) и с теми же исходными

данными, что и для предыдущего примера.

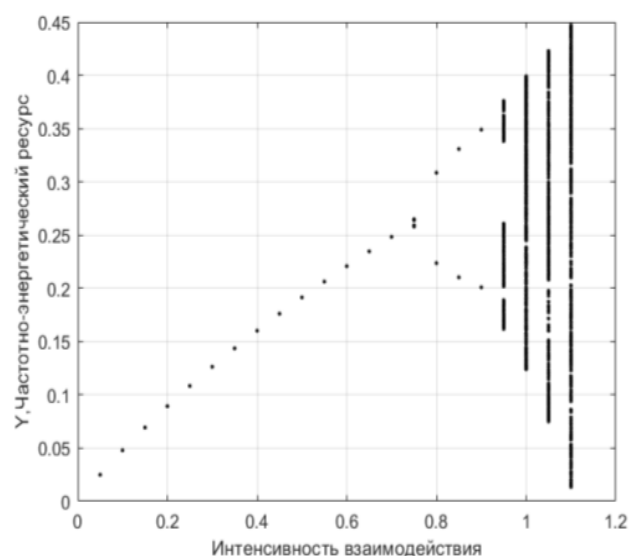


Рис. 8. Фазовый портрет. Зависимость распределения ресурсов Y от интенсивности взаимодействий ε при интервале дискретизации $T_d = 2$

Как видно из рис.8 бифуркация траекторий наблюдается в области $\varepsilon \approx 0,75$, т.е. при гораздо меньших интенсивностях взаимодействий.

Аналогичное неустойчивое поведение может наступить и в равновесной системе (1), когда при добавлении незначительного количества радиосредств в группировку РЭС такое равновесное состояние уже не наступает.

Близкие по состоянию неравновесные условия могут возникать и в других системах связи, с которыми взаимодействуют мобильные системы связи. Так попытка внедрения методов динамической маршрутизации привела к появлению проблемы "биения маршрутов"; в САРД, функционирующих по протоколу IEEE 802.11a возникают "взрывы фрагментов", когда из-за нерационального выбора параметров система загружается повторными передачами фрагментов.

Выводы

Рассмотрена модель динамики неравновесных состояний при анализе электромагнитных взаимодействиях в группировке радиоэлектронных средств сети мобильной связи 5G. На конкретном примере было показано, как с помощью нелинейной системы уравнений, моделирующей динамику взаимодействий группировки РЭС, можно анализировать ее состояние в будущем. Данная модель позволяет выполнять анализ при различных, конкретных параметрах отдельных типов РЭС, их взаимодействий и распределения ресурсов. Данные исследования позволяют дать рекомендации при планировании, проектировании, частотно-территориальном планировании и эксплуатации сетей мобильной связи.

References

1. 3GPP TR 22.891, "Feasibility Study on New Services and Markets Technology Enablers," Ver. 14.2.0, Sep. 2016.
2. 3GPP TR 38.913, "Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies," Ver. 14.3.0, June 2017.
3. 3GPP TS 28.554. Management and orchestration; 5G end to end Key Performance Indicators (KPI). Ver. 2.0.0, release 15, September 2018.
4. 5G PPP Architecture Working Group white paper, "View on 5G Architecture", July 2016.
5. Abuarqoub, A., Hammoudeh, M. H. (2016), "Behaviour Profiling in Healthcare Applications Using the Internet of Things Technology", *Proceedings of Fourth International Conference on Advances in Information Processing and Communication Technology*, P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.15224/978-1-63248-099-6-25>
6. Agiwal, M., Roy, A., Saxena, N. (2016), "Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, No. 18 (3), P. 1617–1655. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2532458>
7. Aijaz, A., Dohler, M., Aghvami, A. H., Friderikos, V., Frodigh, M. (2017), "Realizing the Tactile Internet: Haptic Communications over Next Generation 5G Cellular Networks", *IEEE Wireless Comm*, No. 24 (2), P. 82–89. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.1500157RP>
8. Aijaz, A., Simsek, M., Dohler M., Fettweis, G (2017), "Shaping 5G for the Tactile Internet", *5G Mobile Communications*, Springer International Publishing, P. 677–691. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-34208-5_25
9. Aijaz, A. (2016), "Towards 5G-enabled tactile internet: Radio resource allocation for haptic communications", *In Proceedings of the 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Doha, Qatar, 3–6 April 2016, P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/WCNC.2016.7564661>
10. Raza, U., Kulkarni, P., Sooriyabandara, M. (2017), "Low Power Wide Area Networks: An Overview", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 19, P. 855–873. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>
11. (2016), *Radio Regulations*, Ed. ITU, in 4 volumes.
12. Resolution COM 6/20 (WRC-15) Studies on frequency-related matters for International Mobile Telecommunications identification including possible additional allocations to the mobile services on a primary basis in portion(s) of the frequency range between 24.25 and 86 GHz for the future development of International Mobile Telecommunications for 2020 and beyond.
13. Mokrov, E., Ponomarenko-Timofeev, A., Gudkova, I., et al. (2018), "Modeling Transmit Power Reduction for a Typical Cell with Licensed Shared Access Capabilities", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2799141>
14. Markova, E., Gudkova, I., Ometov, A., et al. (2017), "Flexible Spectrum Management in a Smart City within Licensed Shared Access Framework", *IEEE Access*, Vol. 5, P. 22252–22261. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2758840>
15. Talwar, S., Choudhury, D., Dimou, K., et al. (2014), "Enabling technologies and architectures for 5G wireless", *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, Tampa, FL, USA, P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2014.6848639>
16. Kurakova, T., Valdburger, M. (2013), "How ITU can help develop future networks", *ITU News*, No. 1, P. 38–41. DOI: <https://doi.org/10.1525/aft.2013.41.3.38>
17. Galinina, O., Andreev, S., Komarov, M., et al. (2017), "Leveraging heterogeneous device connectivity in a converged 5G-IoT ecosystem", *Computer Networks*, Vol. 128, P. 123–132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.04.051>
18. Kremenetska Ya. A., Markov S. Yu., Gradoboeva N. V., Kharchenko Ye. M. (2019), "Analysis of limiting and compensating factors when calculating the energy efficiency of radio systems in the millimeter range", *Telecommunication and Information Technologies*, No. 1, P. 12–21. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2019.011221>
19. 3GPP TS 38.104. NR; Base Station (BS) radio transmission and reception.
20. 3GPP TS 38.211. NR; Physical channels and modulation.
21. 3GPP TS 38.212. NR; Multiplexing and channel coding.
22. 3GPP TS 38.213. NR; Physical layer procedures for control.
23. 3GPP TS 38.300. NR; NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2.
24. Yan, M., Feng, G., Zhou, J., Sun, Y., Liang, Y. -C. (2019), "Intelligent Resource Scheduling for 5G Radio Access Network Slicing", *in IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 68, No. 8, P. 7691–7703. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2922668>
25. Koliadenko, Yu., Glushko, A., Voronin, O. (2018), "A mathematical model of attacks and defenses in Software-Defined Networks", *Problemi telekomunikacij*, No. 1 (22), P. 56–66. DOI: <https://doi.org/10.30837/pt.2018.1.04>

Надійшло (Received) 14.06.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сєліванов Костянтин Олександрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, здобувач кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В. В. Поповського, Харків, Україна, email: sunright@yandex.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1631-9986>.

Сєліванов Константин Александрович – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, соискатель кафедры инфокоммуникационной инженерии имени В. В. Поповского, Харьков, Украина.

Selivanov Konstantyn – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate V. V. Popovskyy Department of Infocommunication Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Муляр Богдан Петрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В. В. Поповського, Харків, Україна; email: bohdan.muliar@nure.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1631-9986>.

Муляр Богдан Петрович – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирант кафедры инфокоммуникационной инженерии имени В. В. Поповского, Харьков, Украина.

Muliar Bohdan – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate V. V. Popovskyy Department of Infocommunication Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Коляденко Юлія Юріївна – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В. В. Поповського, Харків, Україна; email: yuliia.koliadenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0247-2736>.

Коляденко Юлия Юрьевна – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры инфокоммуникационной инженерии имени В. В. Поповского, Харьков, Украина.

Kolyadenko Yulia – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of V. V. Popovskyy Department of Infocommunication Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Москалець Микола Вадимович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В. В. Поповського, Харків, Україна, email: mykola.moskalets@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1726-1250>.

Москалец Николай Вадимович – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры инфокоммуникационной инженерии имени В. В. Поповского, Харьков, Украина.

Moskalets Mykola – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of V. V. Popovskyy Department of Infocommunication Engineering, Kharkiv, Ukraine.

МОДЕЛЬ ВЗАЄМОДІЙ І ФАЗОВИХ СТАНІВ ПРИ РОЗПОДІЛІ ЧАСТОТНОГО РЕСУРСУ В УГРУПОВАННІ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 5G

Предмет: моделі взаємодії і фазові стани при розподілі частотного ресурсу в угрупованні радіоелектронних засобів мережі мобільного зв'язку 5G. **Мета:** розробка динамічної моделі множинних взаємодій n -елементів складної системи мобільного зв'язку 5G, в якій враховані характер межелементних зв'язків і фазових станів при груповому використанні частотного ресурсу. **Задачі:** на основі складної моделі n -елементної системи з множинними взаємодіями розробити математичну модель опису електромагнітної обстановки угруповання радіоелектронних засобів в просторі станів при груповому використанні частотного ресурсу; провести аналіз фазових станів взаємодії елементів системи угруповання радіоелектронних засобів системи мобільного зв'язку при яких вони зможуть функціонувати без погіршення якісних показників, які відображають сумарний рівень групового впливу випромінюючих елементів на приймальні пристрої, в умовах оптимального розподілу частотного ресурсу. **Методи:** математичний метод простору станів системи, яка описує нелінійний характер і фазові стани системи з урахуванням інтенсивності взаємодії її елементів. **Результати:** Розроблено математичну модель електромагнітної обстановки угруповання радіоелектронних засобів, що характеризує нелінійний характер взаємодій при груповому використанні частотного ресурсу. Отримано рекуррентне вираз для моделювання оцінки сукупного характеру електромагнітних взаємодій в угрупованні радіоелектронних засобів. Проведено моделювання динаміки взаємодії та фазових станів угруповання радіоелектронних засобів при груповому використанні частотного ресурсу. **Висновки:** показано, що за допомогою моделі, що моделює динаміку взаємодій угруповання РЕЗ, можна аналізувати її стан в майбутньому. Дана модель дозволяє виконувати аналіз угруповання радіоелектронних засобів при різних, конкретних параметрах окремих типів РЕЗ, характер і інтенсивності їх взаємодії в угрупованні при чинному розподілі ресурсів.

Ключові слова: динамічна модель; множинні взаємодії; електромагнітна обстановка; розподіл ресурсів; розподіл частот.

MODEL OF INTERACTIONS AND PHASE STATES IN THE DISTRIBUTION OF THE FREQUENCY RESOURCE IN THE GROUPING OF RADIO ELECTRONIC MEANS OF A 5G MOBILE COMMUNICATION NETWORK

Subject: interaction models and phase states in the distribution of the frequency resource in the grouping of radio electronic means of the 5G mobile communication network. **Purpose:** development of a dynamic model of multiple interactions of n -elements of a complex 5G mobile communication system, which takes into account the nature of inter-element connections and phase states in the group use of the frequency resource. **Tasks:** on the basis of a complex model of an n -element system with multiple interactions, to develop a mathematical model for describing the electromagnetic environment of a grouping of radio electronic means in a state space with a group use of a frequency resource; to analyze the phase states of interaction of the elements of the grouping system of radio-electronic means of the mobile communication system in which they can function without deteriorating the quality indicators, which reflect the total level of the group influence of the emitting elements on the receiving devices, under conditions of optimal distribution of the frequency resource. **Methods:** mathematical method of the state space of the system, which describes the nonlinear nature and phase states of the system, taking into account the intensity of the interaction of its elements. **Results:** A mathematical model of the electromagnetic environment of a grouping of radio-electronic devices based on the Volterra model has been developed, which characterizes their nonlinear nature of interactions in the group use of the frequency resource. A recurrent expression is obtained for modeling the assessment of the aggregate nature of electromagnetic interactions in a group of radio-electronic means. Modeling of the dynamics of interaction and phase states of the grouping of radioelectronic devices in the group use of the frequency resource has been carried out. **Conclusions:** It is shown that using a model that simulates the dynamics of interactions of a group of radioelectronic, it is possible to analyze its state in the future. This model makes it possible to analyze the grouping of radio-electronic means with different, specific parameters of individual types of radio electronic devices, the nature and intensity of their interaction in the grouping with the current distribution of resources.

Keywords: dynamic model; multiple interactions; electromagnetic environment; resource allocation; frequency allocation.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Селіванов К. О., Муляр Б. П., Коляденко Ю. Ю., Москалець М. В. Модель взаємодій і фазових станів при розподілі частотного ресурсу в угрупованні радіоелектронних засобів мережі мобільного зв'язку 5G. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 2 (16). С. 89–97. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.089>

Sielivanov, K., Muliar, B., Kolyadenko, Yu., Moskalets, M. (2021), "Model of interactions and phase states in the distribution of the frequency resource in the grouping of radio electronic means of a 5G mobile communication network", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (16), P. 89–97. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.089>

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Аврунін О. Г.	63, 72
Баленко О. І.	32
Бондаренко І. С.	72
Бутко І. М.	5
Воронін А. В.	46
Гунько О. В.	46
Золотарьов Д. О.	12
Клименко В. А.	63
Коляденко Ю. Ю.	89
Косяк А. П.	54
Кравцов М. О.	80
Лещинський В. О.	39
Лобач О.В.	54
Мазурова О. О.	19
Момот Т. В.	54
Москалець М. В.	89
Муляр Б. П.	89
Набока А. О.	19
Парфенюк Ю. Л.	80
Подорожняк А. О.	32
Раскін Л. Г.	80
Селіванов К. О.	89
Соболь В. В.	32
Сурков Л. Я.	80
Сухомлин Л. В.	80
Трубіщин О. О.	63
Філонич О. М.	54
Чалий С. Ф.	39
Широкопетлева М. С.	19

ALPHABETICAL INDEX

Avrunin Oleg	63, 72
Balenko Oleksii	32
Bondarenko Igor	72
Butko Ihor	5
Voronin Anatolii	46
Gunko Olga	46
Zolotariov Denis	12
Klymenko Viktoriia	63
Kolyadenko Yulia	89
Kosiak Antonina	54
Kravtsov Mykhailo	80
Leshchynskyi Volodymyr	39
Lobach Olena	54
Mazurova Oksana	19
Momot Tetiana	54
Moskalets Mykola	89
Muliar Bohdan	89
Naboka Artem	19
Parfeniuk Yurii	80
Podorozhniak Andrii	32
Raskin Lev	80
Sielivanov Konstantyn	89
Sobol Valentyn	32
Surkov Leonid	80
Sukhomlyn Larysa	80
Trubitsin Alexey	63
Filonych Olena	54
Chalyi Serhii	39
Shirokopetleva Mariya	19