ISSN 2522-9052

Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”

National Technical University
“Kharkiv Polytechnic Institute”

Сучасні інформаційні системи

Advanced Information Systems

Том 4, № 4

Volume 4, No. 4

Щоквартальний науково-технічний журнал

Заснований у березні 2017 року

У журналі публікуються результати досліджень з експлуатації та розробки сучасних інформаційних систем у різних проблемних галузях. Журнал призначений для наукових працівників, викладачів, докторантів, аспірантів, а також студентів старших курсів відповідних спеціальностей.

Засновник і видавець:
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”

Кафедра “Обчислювальна техніка та програмування”, вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків, Україна

Телефон:
+38 (057) 707-61-65

E-mail редколегії:
kuchuk56@ukr.net

Інформаційний сайт:
http://ais.khpi.edu.ua

Quarterly scientific and technical journal

Founded in March 2017

The journal publishes the research study from the usage and development of advanced information systems in various problem areas. The journal is intended for researchers, lecturers, doctoral students, postgraduate students, and for senior students of the corresponding specialties.

Founder and publisher:
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Department of Computer Science and Programming, 61002, Ukraine, Kharkiv, Kyrpychova str., 2

Phone:
+38 (057) 707-61-65

E-mail of the editorial board:
kuchuk56@ukr.net

Information site:
http://ais.khpi.edu.ua

Затверджений до друку Вченою Радою Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” (протокол від 13 листопада 2020 року № 6).

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 22522-12422Р від 13.01.2017 р.

Включений до “Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук” до категорії Б – наказом Міністерства освіти і науки України від 07.05.2019 № 612 (додаток 7, п. 33)

Харків • 2020

© Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”

Редакційна колегія

Головний редактор:
СОКОЛ Євген Іванович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*).

Заступник головного редактора:
СЕМЕНОВ Сергій Геннадійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*).

Члени редакційної колегії:
БАЙРАМОВ Азад Агахар огли
(*д-р фіз.-мат. наук, проф., Баку, Азербайджан*);
БЛАУНШТЕЙН Натан Шаєвич
(*д-р фіз.-мат. наук, проф., Беер-Шева. Ізраїль*);
ГНАТЮК Сергій Олександрович
(*д-р техн. наук, доц., Київ, Україна*);
ЗАЙЦЕВА Єлена
(*д-р наук, проф., Жиліна, Словаччина*);
КАРПІНСЬКИЙ Микола Петрович
(*д-р техн. наук, проф.*, *Бельсько-Бяла, Польща*);
КОВАЛЕНКО Андрій Анатолійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
КОСТЕНКО Павло Юрійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
КУЧУК Георгій Анатолійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
ЛИТВИН Василь Володимирович
(*д-р техн. наук, проф., Львів, Україна*);
ЛУКІН Володимир Васильович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
МАМУЗІЧ Ілля
(*д-р техн. наук, проф., Загреб, Хорватія*);
МИГУЩЕНКО Руслан Павлович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
МОХАММЕД Амін Саліх
(*д-р наук, доц., Ербіль, Ірак*);
ОСТАПОВ Сергій Едуардович
(*д-р фіз.-мат. наук, проф., Чернівці, Україна)*;
ПОВОРОЗНЮК Анатолій Іванович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
РАСКІН Лев Григорович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
САРАВАНА Балайі Б.
(*PhD, доц., Ербіль, Ірак*);
СЕРКОВ Олександр Анатолійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна)*;
СМІРНОВ Олексій Анатолійович
(*д-р техн. наук, проф., Кропивницький, Україна*);
СТАНКУНАС Йонас
(*д-р техн. наук, проф., Вільнюс, Литва*);
СТЕЦЬКО Юрій
(*канд. фіз.-мат. наук, Тампа, Флоріда, США*);
СУЧКОВ Григорій Михайлович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна)*;
УШЕНКО Юрій Олександрович
(*д-р фіз.-мат. наук, проф., Чернівці, Україна)*;
ФІЛАТОВА Ганна Євгенівна
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
ХАРЧЕНКО Вячеслав Сергійович
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);
ШВАЧИЧ Геннадій Григорович
(*д-р техн. наук, проф., Дніпро, Україна*);
ШИШАЦЬКИЙ Андрій Володимирович
(*канд. техн. наук, Київ, Україна*);

Відповідальний секретар:
ПОДОРОЖНЯК Андрій Олексійович
(*канд. техн. наук, доц., Харків, Україна*).

Технічний секретар:
ГРЕБЕНЮК Дарина Сергіївна
(*магістр комп. інж., Харків, Україна*).

Editorial board

Editor-in-Chief:
Yevgen SOKOL
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*).

Associate editor:
Serhii SEMENOV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*).

Editorial board members:
Azad Agalar oğlu BAYRAMOV
(*Dr. Sc. (Ph-Math.), Prof., Baku, Azerbaijan*);
Nathan BLAUNSTEIN
(*Dr. Sc. (Ph-Math.), Prof., Beer Sheva, Israel*);
Sergiy GNATYUK
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Kyiv, Ukraine*);
Elena ZAITSEVA
(*Dr. (Comp. Eng.), Prof., Zilina, Slovakia*);
Mikolay KARPINSKI
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Bielsko-Biała, Poland*);
Andrii KOVALENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Pavlo KOSTENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Heorhii KUCHUK
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Vasyl LYTVYN
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Lviv, Ukraine*);
Volodymyr LUKIN
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Ilya MAMUZIĆ
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Zagreb, Croatia*);
Ruslan MYGUSHCHENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Amin Salih MOHAMMED
(*Dr. (Comp. Eng.), Ass. Prof., Erbil, Iraq*);
Serhii OSTAPOV
(*Dr. Sc. (Ph-Math.), Prof., Chernivtsi, Ukraine*);
Anatoliy POVOROZNYUK
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Lev RASKIN
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Balasubramanian SARAVANA BALAJI
(*PhD (Comp. Eng.), Ass. Prof., Erbil, Iraq*);
Aleksandr SERKOV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Alexey SMIRNOV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kropyvnytskyi, Ukraine*);
Jonas STONKUNAS
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Vilnius, Lithuania*);
Yuri STETSKO
(*PhD (Ph-Math.), Tampa, Florida, USA*);
Hryhorii SUCHKOV
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Yuri USHENKO
(*Dr. Sc. (Ph-Math.), Prof., Chernivtsi, Ukraine*);
Hanna FILATOVA
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Viacheslav KHARCHENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Hennadii SHVACHICH
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Dnipro, Ukraine*);
Andrii SHYSHATSKYI
(*PhD (Tech.), Kyiv, Ukraine*).

Responsible secretary:
Andrii PODOROZHNIAK
(*PhD (Tech.), Ass. Prof., Kharkiv, Ukraine*).

Technical secretary:
Daryna HREBENIUK
(*MSD of Comp. Eng., Kharkiv, Ukraine*).

ЗМІСТ

ПРОБЛЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Хорошун Г. М.
Методи підтримки прийняття рішень при проведенні оптичних досліджень 5

МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Андрєєв С. М., Жилін В. А.
Методика побудови гіпсометричних картографічних моделей рельєфу за даними дистанційного зондування Землі 11

Байрамов А. А., Гасанов А. Г.
Комп'ютерне моделювання понаджароміцних властивостей $Hf_6C_3N_2$ для захисних покриттів гіперзвукових літальних апаратів (eng.) 23

Можаєв М. О.
Моделювання нелінійних елементів комп'ютерної мережі критичного застосування (eng.) 27

МЕТОДИ СИНТЕЗУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Александров Є. Є., Александрова Т. Є., Костяник І. В., Моргун Я. Ю.
До питання про побудову області дозволених значень варійованих параметрів цифрового стабілізатора рухомого об’єкта (eng.) 33

Гамзаєв Р. О., Ткачук М. В., Шевкопляс Д. О.
Знання-орієнтована інформаційна технологія для управління варіабельністю на етапі доменного аналізу у розробці програмного забезпечення (eng.) 39

Левашенко В. Г., Ляшенко О. С., Кучук Г. А.
Побудова системи підтримки прийняття рішень на основі нечітких даних (рос.) 48

Пуйденко В. О.
Алгоритм заміщення MRU: автоматна модель, синтез та оцінка апаратної реалізації 57

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Барсов В. І., Костерна О. Ю., Плахотний О. В.
Дослідження ефективності методів визначення відстані і геометричних параметрів об'єкта систем технічного зору (eng.) 64

Приставка П. О., Чолишкіна О. Г.
Порівняльний аналіз диференціальних інваріантів на основі сплайн-моделі при різних спотвореннях зображень (eng.) 70

Ручков Є. В., Харченко В. С., Коваленко А. А., Бабешко Є. В., Порошенко А. І.
Оцінювання безвідмовності резервованих структур «2-з-3» і «1-з-2» з урахуванням засобів оброблення інформації та комунікацій 77

Сидоренко Є. А., Макогон О. А., Ісаков О. В., Корда М. В., Мосійчук М. В., Клімов О. П.
Динамічний аналіз процесу технічного забезпечення угруповання сил оборони держави з використанням моделі масового обслуговування (eng.) 84

TABLE OF CONTENTS

PROBLEMS OF IDENTIFICATION IN INFORMATION SYSTEMS

Ganna Khoroshun
Decision support methods in optical research (ukr.) 5

INFORMATION SYSTEMS MODELING

Sergey Andrieiev, Volodymyr Zhilin
Methodology for constructing hypsometric cartographic relief models according to the Earth remote sensing data (ukr.) 11

Azad Agalar oğlu Bayramov, Arzuman Gardashkhan oğlu Gasanov
Computer modelling of a very heat resistant $Hf_6C_3N_2$ for cover of hypersonic flight vehicles 23

Mykhailo Mozhaiev
Modeling nonlinear elements of critical computer network 27

METHODS OF INFORMATION SYSTEMS SYNTHESIS

Eugene Aleksandrov, Tetiana Aleksandrova, Iryna Kostianyk, Yaroslav Morgun
To the question of constructing the region of allowable values of variable parameters of a digital stabilizer of a movable object 33

Rustam Gamzayev, Mykola Tkachuk, Daria Shevkoplias
Knowledge-oriented information technology to variability management at the domain analysis stage in software development 39

Vitaly Levashenko, Oleksii Liashenko, Heorhii Kuchuk
Building decision support systems based on fuzzy data (rus.) 48

Vadym Puidenko
MRU substitution algorithm: automaton model, synthesis and assessment of the hardware implementation (ukr.) 57

INFORMATION SYSTEMS RESEARCH

Valeriy Barsov, Olena Kosterna, Oleksandr Plakhotnyi
Research of the methods efficiency for determining the distance and geometric objects parameters of technical vision systems 64

Pylyp Prystavka, Olha Cholyshkina
Comparative analysis of differential invariants based on the spline model for various image distortion 70

Eugene Ruchkov, Vyacheslav Kharchenko, Andriy Kovalenko, Ievgen Babeshko, Anton Poroshenko
Reliability assessment of "2oo3" and "1oo2" redundant structures taking into account the means of information processing and communications (ukr.) 77

Yevhen Sydorenko, Helen Makogon, Oleksandr Isakov, Mykyta Korda, Mykhaylo Mosiychuk, Alexej Klimov
The technical support process dynamic analysis of the state defense forces group using of the queuing model 84

Яковлева О. В.,
Ніколаєва К. Г.
Дослідження методу нормалізації зображень на базі дескрипторів та порівняльний аналіз дескрипторів SURF, SIFT, BRISK, ORB, KAZE, AKAZE (eng.) 89

Olena Yakovleva,
Kateryna Nikolaieva
Research of descriptor based image normalization and comparative analysis of SURF, SIFT, BRISK, ORB, KAZE, AKAZE descriptors 89

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

INTELLIGENT INFORMATION SYSTEMS

Крепич С. Я.,
Співак І. Я.
Система прогнозування витрат на комунальні послуги на основі нейронної мережі (eng.) 102

Svitlana Krepych,
Iryna Spivak
Forecasting system of utilities service costs based on neural network 102

Поворознюк А. І.,
Поворознюк О. А.,
Шехна Х.
Застосування фрактальної обробки цифрових мамограм при проектуванні систем підтримки прийняття рішень в медицині (eng.) 109

Anatoly Povoroznyuk,
Oksana Povoroznyuk,
Khaled Shekhna
Application of fractal processing of digital mammograms in designing decision support systems in medicine 109

Чалий С. Ф.,
Лещинський В. О.,
Лещинська І. О.
Динамічна модель представлення пояснень для людино-машинного інтерфейсу (eng.) 114

Serhii Chalyi,
Volodymyr Leshchynskyi,
Irina Leshchynska
A dynamic explanation model for human-computer interface 114

МЕТОДИ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

METHODS OF INFORMATION SYSTEMS PROTECTION

Черниш В. І.
Модель функціональної оцінки небезпек в системі організації повітряного руху щодо реалізації загроз інформаційної безпеки (eng.) 120

Vladyslav Chernysh
Model of functional hazard assessment in air traffic management system regarding information security threats 120

ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

APPLIED PROBLEMS OF INFORMATION SYSTEMS OPERATION

Давидов В. В.,
Гребенюк Д. С.
Розробка методу прогнозування зміни навантаження ресурсів в системах хмарних обчислень (eng.) 128

Viacheslav Davydov,
Daryna Hrebeniuk
Development the resources load variation forecasting method within cloud computing systems 128

Алфавітний покажчик 136

Alphabetical index 136

За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор.

Географія статей цього номера

Азербайджан
Azerbaijan

Словаччина
Slovakia

Україна
Ukraine

Problems of identification in information systems

УДК 004.891 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.4.01**

Г. М. Хорошун

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Сєвєродонецьк, Україна

МЕТОДИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ОПТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Анотація. Розроблено методи підтримки прийняття рішень для задач з прикладної оптики, в яких необхідно прийняти рішення щодо якості зображення та його відповідності до вимог, котрі визначаються за його подальшим використанням. Обговорено вибір каліброваного теоретичного зображення за яким перевіряється правильність проведення розрахункової роботи. Наведено алгоритм, за яким покращується отримане чисельне зображення. В роботі визначені недоліки систем машинного зору, такі як дефекти елементів системи, роз'юстування системи, шуми, невдала схема експерименту, що знижують якість експериментального зображення. Для встановлення взаємозв'язків між причинами та наслідками недоліків побудовано таблицю з причинами утворення недоліків на дифракційної картині за схемою Ісікави. Якість та шляхи вдосконалення експериментального зображення встановлюється з використанням діаграми Парето. Вдосконалення відбувається ітераційно і дозволяє поступово покращити якість зображення до максимально можливого значення в експериментальній схемі. Введено два етапи прийняття рішень – перший визначає досконалість експериментального зображення, а другий – його прийнятність у якості головного результату роботу за думкою експертів. Повнота альтернатив в аналізі наведена рекомендаціями щодо подальших дій, а величина похибки завдяки комбінації двох методів: діаграми Парето та думки експертів, не перевищує 5 %.

Ключові слова: дифракційне зображення; система підтримки прийняття рішень; метод Парето.

Постановка та аналіз проблеми

На сучасному етапі проектування комп'ютерних інформаційних систем підтримки прийняття рішень [1] необхідно враховувати умови невизначеності і ризику в сфері наукомісткого високотехнологічного виробництва [2].

Оптичні дослідження охоплюють широкий клас проблем, пов'язаних з дослідженням форми сигналу [3], що пройшов крізь оптичні системи та матеріальні носії, а також зі спостереженням за об'єктами [4]. Проводять такі дослідження за допомогою систем машинного зору (СМЗ) [5]. В загальному випадку вона дозволяє отримувати, оцінювати та обробляти оптичні зображення та забезпечує найвищу точність вимірювань та надійність отриманих даних завдяки можливості ітераційного покращення фізичного та чисельного експериментів. З одного боку, СМЗ є ефективним інструментом для лабораторій, що належать науково-дослідним інститутам, університетам та підприємствам, а з іншого боку розвиток СМЗ є важливим напрямом досліджень у різних прикладних галузях науки та техніки, таких як шифрування, голографія, ідентифікація та спостерігання за об'єктами та процесами.

Система машинного зору являє собою повний набір інструментів для вирішення задач автоматизованого зору. Повністю автоматизована система коштує дуже дорого, тому багато операцій в системі виконуються вручну. Наразі, існує задача розробки системи підтримки прийняття рішення (СППР) для певної СМЗ, визначення її можливостей та помилок. Розроблення СППР необхідно завдяки наявності складності в прийнятті рішень та необхідності в оцінці різних альтернатив в задачах оптичної метрології. При прийнятті рішення необхідно враховувати експертні оцінки, відомі обмеження, якісні та кількісні характеристики зображення, а також їх придатність для подальшого застосування.

Загальна задача проведення оптичних вимірювань

Модель надання послуг при використанні оптичної лабораторії в умовах індивідуальних потреб замовника наведена в [6] . В цій роботі визначаються та обговорюються основні критерії для оцінки роботи сервісу.

Формально замовлення в оптичній лабораторії може бути представлено кортежем:

$$Z = \left\langle \{C\}, \left\{p_l^C\right\}_{l=1}^{5}, \{B\}, \left\{p_t^B\right\}_{t=1}^{100} \{T\}, \left\{p_b^T\right\}_{b=1}^{7}, \{E\}, \left\{p_d^E\right\}_{d=1}^{8}, \{D\}, \left\{p_f^D\right\}_{f=1}^{6}, \{S\}, \left\{p_g\right\}_{g=1}^{4} \right\rangle. \quad (1)$$

Набір вхідних даних {C} від "замовника", які визначаються разом з клієнтом з зазначенням на дифракційній картині кількості топологічних об'єктів, їх виду, розташуванню та формі. Для того, щоб клієнт визначався, йому надаються теоретичні та експериментальні зразки можливих зображень, які містяться в базі даних {B}. Набір "теорія" {T} містить розрахункове зображення, його характеристики, методи отримання. Експериментальні методи, пристрої, схема та результати містяться в наборі {E}"експеримент". Аналіз даних та інформація про використані методи аналізу зберігається у відповідному наборі {D}. В цій роботі значна увага приділе-

© Хорошун Г. М., 2020

на набору {S} вихідних даних "сервіс", яка включає систему підтримки прийняття рішень.

Один із параметрів сервісу, визначеній в попередній роботі p_2^S можна завдати лінгвістичною змінною яка визначається кортежем $\langle \beta_2, T(\beta_2), X \rangle$. Для змінної β_2 "просторова якість візуалізації" можливі такі значення $T(\beta_2)$ = {"низька", "середня", "хороша", "відмінна"}; для кожної змінної $X = [X_{\min}, X_{\max}]$, де значення $X_{\min}$ і $X_{\max}$ визначаються замовником. Для практичних застосувань пропонується додати характеристику p_5^S, що визначає β_5, як основний результат з переліком значень для $T(\beta_5)$ = {"прийнятний", "неприйнятний"}. Якщо результат неприйнятний система видає рекомендацію щодо подальших дій.

Теоретичні дані

Теоретичне зображення, як правило, отримують за допомогою чисельного моделювання. На площині джерела z=0 програмуються початкові умови дифракції та форма амплітудно-фазового транспаранта. Синтезований дифракційний розподіл на деякій відстані z можна розглядати у скалярному наближенні, тобто з лінійною поляризації світла, і для розрахунку результуючого поля $A(x, y, z)$ використовувати інтеграл Кірхгофа [7]:

$$A(x, y, z) = \\ = \frac{k}{2\pi i} \oint_{S'} A_0(x', y') \exp(i\Phi_0(x', y')) \left(e^{ikr} / r \right) dx' dy', \quad (2)$$

де $k = 2\pi / \lambda$ – хвильове число, $A_0(x', y')$ – амплітуда поля на площині джерел, $\Phi_0(x', y')$ – фаза поля на площині джерел, $r = \sqrt{z^2 + (x - x')^2 + (y - y')^2}$ – зв'язок між вхідними та вихідними характеристиками.

Спостерігається дифракційна картина, як правило в поперечному перерізі пучка площиною XY для різних відстаней $z > 0$, але кутові перерізи в площинах XZ, YZ теж є поширеними прийомами дослідження. При теоретичному розрахунку інтеграла по поверхні основними недоліками зображення можуть бути:

1) характерне розбиття всього зображення на квадратні блоки з помітними кордонами,

2) розмиття дрібних деталей або повністю їх відсутність в зображенні.

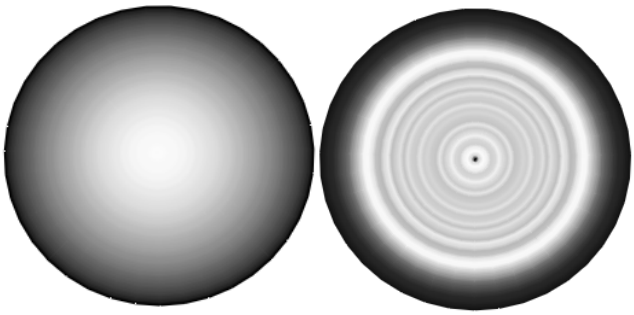
Алгоритм дій при наявності недоліків на розрахунковій дифракційної картині такі:

1) зменшити крок інтегрування на площині джерел,

2) зменшити крок візуалізації на площині спостереження,

3) зменшити кількість наближень для розрахунку дифракційного інтеграла.

Отримане теоретичне зображення порівнюють з каліброваним зображенням. Каліброване зображення має відомий розподіл інтенсивності, отримане з високою точністю і мінімальною кількістю наближень, а також збігається з експериментальним результатом, визначеним за тими ж умовами, що й теоретичне. На рис. 1 наведені можливі варіанти каліброваних зображень для відомої задачі дифракції плоскої хвилі на круглому отворі.



а б

Рис. 1. Дифракційні розподіли для задачі дифракції плоскої хвилі на круглому отворі в зоні Фраунгофера (а) в зоні Френеля (б)

Зображення на рис. 1, а містить світлу пляму, що закриває собою весь центр пучка, а зображення на рис.1б демонструє тонкі структур – зміни інтенсивності, як у центрі, так і на периферії пучку. Завдяки більш інформативній структурі зображення на рис. 1б рекомендується для використання у якості каліброваного. При наявності значущої різниці між отриманим розрахунковим зображенням та каліброваним треба покрокове удосконалювати метод розрахунку, який викладений вище.

Експериментальні дані

Експериментальні оптичні дослідження проводяться за допомогою систем машинного зору (СМЗ). В простішому випадку СМЗ для дослідження структури лазерного поля містить лазер, генеруючий елемент, оптичну систему, камеру. На першому етапі для оцінки якості отриманого зображення достатньо двох характеристик – відношення сигнал/шум та контраст. Але для відповіді на запитання чи є зображення прийнятним вони не дають остаточну відповідь, тому що вони не містять інформації про якість юстування картини, надійність кріплення та наявність артефактів на картині. Недоліки на експериментальному зображенні виникають з різних причин: дефектам елементів системи, роз ’юстуванню системи, шумам, невдалої схеми експерименту. Основні чинники проблеми виникають завдяки використанню обладнання, забезпеченню його надійної фіксації та юстуванню експериментальної схеми. Для встановлення взаємозв'язків між причинами та наслідками недоліків скористаймося схемою Ісікави записаної у вигляді табл. 1.

Розглянемо приклади експериментальних зображень на рис. 2, а, б та теоретичного (рис. 2, в) при отриманні сингулярного пучка з зарядом 1, що відповідає наявності на осі пучка нуля інтенсивності та тора максимальної інтенсивності. Основна задача це генерація сингулярного пучка з зарядом 5, що має містити на осі одну сингулярність з зарядом 5.

Розподіли експериментальної інтенсивності для генерації сингулярного пучка з зарядом 5 зі значною асиметрією поля на рис 2, г та його покращений вигляд наведено на рис. 2, д. Розподіл інтенсивності на рис. 2, д містить п’ять нулів інтенсивності, що розташовані симетрично навколо центра пучку. В теоретичному розподілі синтезований сингулярний пучок з зарядом 5 (рис. 2, е) містить одну чорна пляма - один нуль інтенсивності на осі. Стосовно розподілів на рис. 2 треба прийняти рішення щодо їх прийнятності або подальшому покращенню з зазначенням методу.

Таблиця 1 – **Причини утворення недоліків на дифракційної картині для побудови діаграми Ісікави**

Чим обумовлений / Вид недоліку	Лазер	Генеруючий елемент	Оптична система	Камера
Несиметрична вихідна пляма	резонатор	помилка завдання поля неспіввісність елементів	неспіввісність елементів	Розташування під кутом
Шум	робоче тіло система накачки	неточність виготовлення елемента	неточність виготовлення елемента	тепловий ефект
Тремтіння Картини	кріплення	кріплення	кріплення	кріплення
Наявність Артефактів	пристрій резонатора робоче тіло	Неточність виготовлення елемента	зношеність елемента	пошкоджені пікселі
Асиметрія в результуючої симетричною картині	роз'юстування	роз'юстування	роз'юстування	роз'юстування
Помилка завдання початкового поля	gараметри вихідного випромінювання	обмежена точність	неточність виготовлення елемента зношеність елемента	розміри пікселя “=” або “>” розміру топологічного об'єкта

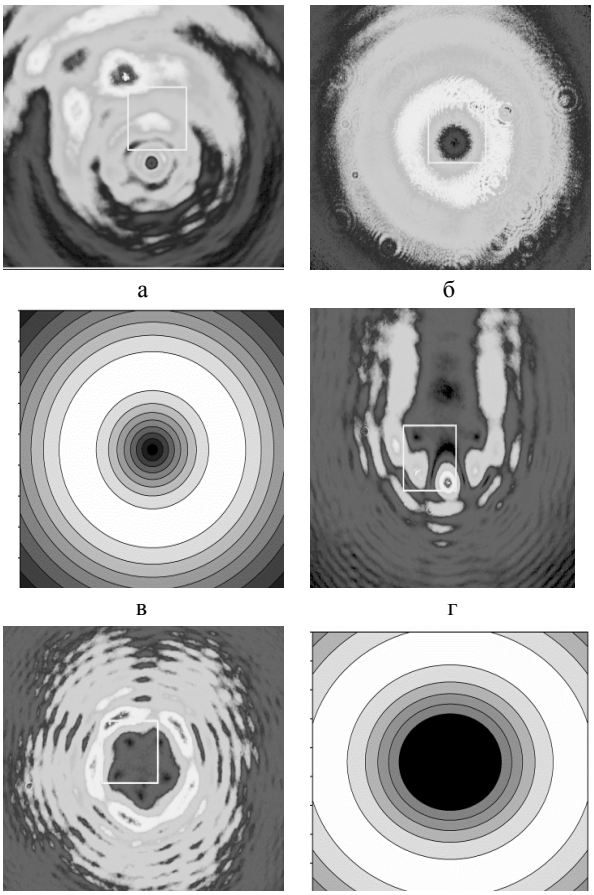


Рис. 2. Дифракційні розподіли: експериментальні (а, б, г, д) та теоретичні (в,е)

Аналіз зображень за допомогою діаграми Парето

Для того, щоб відповісти на запитання щодо якості та прийнятності експериментального зображення скористаймося діаграмою Парето, як такої що дозволяє визначати якість продукції з урахуванням дефектів, поломок, помилок, відмов та іншого [9]. Введемо два етапи порівняння зображень – перший визначає досконалість експериментального зображення та визначає рішення щодо покращення якості зображення шляхом замінити експериментальні елементи, посилити кріплення чи покращити юстування. Оцінка недоліків на дифракційних картинах (рис. 2, а та рис. 2, д) для побудови діаграми Парето наведена в табл. 2 (I – відсоток кількості дефектів за кожною ознакою до загальної суми на рис. 2, а; II – відсоток кількості дефектів за кожною ознакою до загальної суми на рис. 2, д). Після декількох ітерацій покращення зображення досягається максимально якісного розподілу. Наступає другий етап прийняття рішення, пов’язаний з відповідністю експериментального зображення розрахунковому. На це запитання можна відповісти стандартним методом – підрахунком індексу структурної подібності. Але як показано в роботі [8] критерій якості зображення визначити за цим показником досить складно: зображення, що є прийнятним може мати малий індекс структурної подібності. Цей результат призвів до необхідності розробки нового методу, який дозволяє однозначно оцінити експериментальне зображення за критеріями, що є основними на предмет його подальшого використання.

В роботі [10] розглянуто метод декомпозиції дифракційного зображення на сукупність топологічних об’єктів, а саме максимумів, мінімумів та нулів інтенсивності. Вид, розташування та форма цих об’єктів є основними для цілей використання дифракційного зображення. Співпадіння видів топологічних об’єктів, їх кількості, розташування та форми в експериментальному зображенні з вхідними даними набору {C} дає змогу прийняти рішення про затвер-

дження отриманого зображення, як такого, що відповідає вимогам замовника. Якщо кількість топологічних об’єктів не співпадає, а для замовника це є важливим фактором, то за сутністю ABC-аналізу призначимо цю відмінність до групи А - найбільш важливі, істотні проблеми, причини, дефекти. Відносний відсоток групи А в загальній кількості причин зазвичай становить від 60 до 80%, тому ми присвоюємо сам факт неспівпадіння кількості об’єктів за 60 %. Відповідно усунення причин групи А має великий пріоритет, а пов'язані з цим заходи - найвищу ефективність. Ще 8 відсотків для рис. 2, д характеризують різницю у відстані об’єктів від теоретичного (бажаного).

Таблиця 2 – **Оцінка даних за типами недоліків на дифракційный картині для побудови діаграми Парето**

Типи недоліків	I	II
Кількість топологічних об’єктів відрізняється від теорії, а також їх розташування та розмір	0	68
Асиметрія в результуючій симетричній картині	72	5
Тремтіння картини	2	2
Шум	18	18
Артефакти	5	5
Аберації	3	3
Разом	100	100

Діаграма Парето дозволяє розподілити зусилля для вирішення проблем і встановити основні фактори, з яких потрібно починати діяти з метою подолання виникаючих проблем (рис. 3). За допомогою ABC аналізу визначаємо, що саме треба змінити в зібраній експериментальній установці: замінити елемент, продовжити юстування схеми, потужніше закріпити елементи. Вдосконалювати каліброване зображення можна до якогось ліміту, який відповідає таким критеріям, як симетричність зображення та відтворюваність.

Після налагодження схеми варто перейти до другого етапу: порівнянню отриманого зображення з теоретичним зображенням. Оцінка ефективності використання методу здійснюється шляхом повторної побудови діаграми Парето після впровадження заходів. Час на прийняття рішення визначається часом на заповнення таблиці «Оцінка даних за типами недоліків на дифракційній картині» та побудові діаграми Парето.

Експертна думка

Розглянемо теоретичне дифракційне зображення на рис. 2, е, що містить на осі сингулярність з зарядом 5. Поглянемо в існуючу базу даних експериментальних дифракційних зображень. Помітимо, що не має способу отримати багатозарядовий пучок – тобто з зарядом m >= 2 таким чином щоб сингулярність не розпалась на m однозарядових вихорів. Задача симетрійна – тобто утворені сингулярності знаходяться поза центром пучка. Це означає, що при необхідності досліджувати ефекти в світловому полі, що спостерігаються на осі пучка, у зв’язку з розпадом темних плям та їх розташуванню навколо осі, ми не зможемо отримати ці осьові ефекти [11] з таким експериментальним зображенням (рис. 2, д), тому необхідно шукати новий експериментальний метод синтезу пучка.

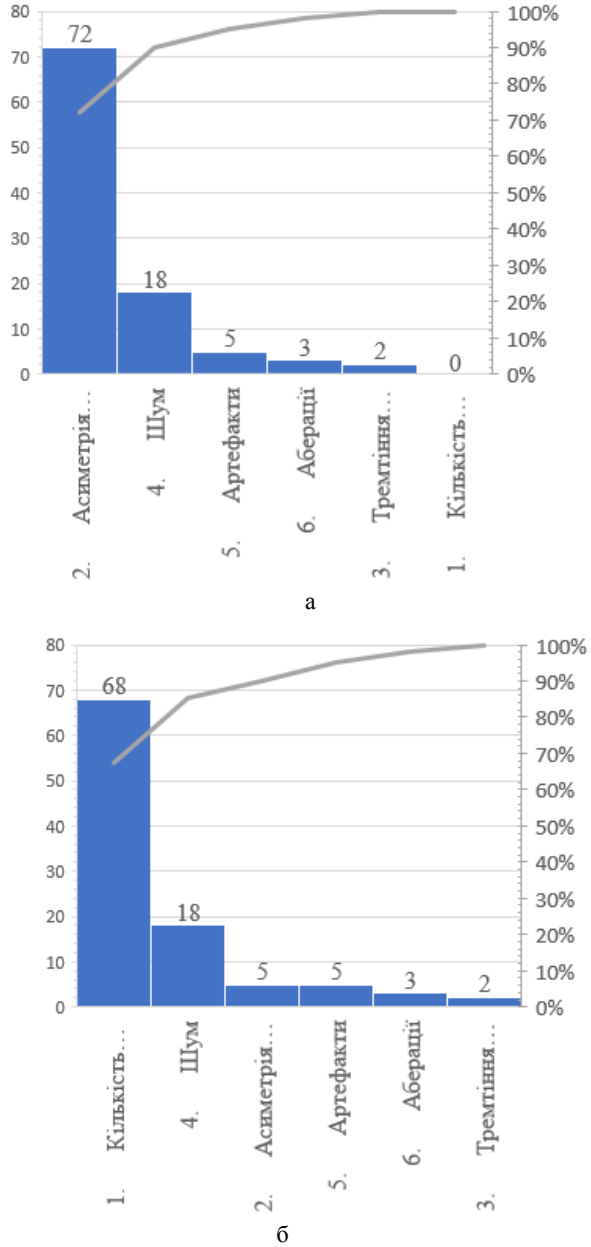


Рис. 3. Діаграма Парето вказує пріоритетність недоліків на експериментальній дифракційній картині для зображення на рис. 2, а (а) та 2. д (б)

Якщо головним для використання зображення є профіль інтенсивності та наявність нулів амплітуди, наприклад для захоплення мікрочастинок світлом у рідині [12], та такий розподіл відповідає вимогам і має бути прийнятим.

Повнота альтернатив в аналізі наводиться повним переліком можливих рекомендацій щодо подальших дій, а саме – покращити теорію, покращити експеримент, змінити метод розрахунку, змінити метод генерації поля. Урахуванням помилок першого і другого роду відбувається наступним чином: якщо метод неправильно знехтуваний, то виникає

похибка першого роду, а якщо неправильно прийнятий то похибка другого роду. Величина похибок завдяки комбінації двох методів: діаграми Парето та думки експертів не перевищує 5 %.

Висновки

Розроблені методи підтримки прийняття рішень для задач з прикладної оптики в яких необхідно прийняти рішення щодо якості зображення та його відповідності до вимог, які визначаються за його подальшим використанням. Спочатку необхідно обрати добре відоме каліброване теоретичне зображення за яким перевірити правильність проведення розрахункової роботи. У разі наявності недоліків в отриманому розподілі скористатися наведеним алгоритмом та покращити метод отримання зображення. Таку ж саму процедуру проводять для експериментального зображення – калібрують результат по відомому розподілу інтенсивності. Недоліки на експериментальному зображенні виникають з різних причин: дефекти елементів системи, роз'юстуванню системи, шумам, невдалої схеми експерименту. Основні чинники проблеми виникають завдяки використанню обладнання, забезпеченню його надійної фіксації та юстуванню експериментальної схеми. Для встановлення взаємозв'язків між причинами та наслідками недоліків побудовано таблицю з причинами утворення недоліків на дифракційної картині за схемою Ісікави.

Якість та шляхи вдосконалення експериментального зображення встановлюються з використанням діаграмою Парето, яка дозволяє ураховувати недоліки системи, виявлені за схемою Ісікави. Вдосконалення відбувається ітераційно і дозволяє поступово покращити якість зображення до максимально можливого значення в експериментальній схемі. Введено два етапи прийняття рішень – перший визначає досконалість експериментального зображення, а другий його прийнятність у якості головного результату роботу за думкою експертів.

Повнота альтернатив в аналізі наведена рекомендаціями щодо подальших дій, а саме – покращити теорію, покращити експеримент, змінити метод розрахунку, змінити метод генерації поля. Величина похибок завдяки комбінації двох методів: діаграми Парето та думки експертів не перевищує 5 %.

Список літератури

1. Бідюк П. І.; Коршевнюк Л. О. Проектування комп'ютерних інформаційних систем підтримки прийняття рішень: Навчальний посібник. К.: ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ»». 2010. 340 с.
2. Турко Д. А. Учет условий неопределенности и риска в процессе принятия решений в сфере наукоемкого высокотехнологического производства. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. 2009. Т. 43. С. 180-187.
3. Strelkova T., Lytuyga A., Kalmykov A., Khoroshun G., Riazantsev A., Ryazantsev O.. Influence of a signal description model on the calculations of the efficiency indicators of optoelectronic systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 4, No. 5 (106). P. 41-50.
4. The Development of an Application for Microparticle Counting Using a Neural Network / Ganna Khoroshun, Ruslan Luniakin, Andrii Riazantsev, Oleksandr Ryazantsev, Tetiana Skurydina, Halyna Tatarchenko // Proceedings of the 4th Int. Conf. on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2020). – Vol. I: Main Conference. – P. 1186-1195.
5. Flores-Fuentes W., Lopez M., Hernandez-Balbuena D., Sergiyenko O., Rodríguez-Quiñonez J., Rivera-Castillo J., Lindner L. & Basaca-Preciado L. Applying Optoelectronic Devices Fusion in Machine Vision: Spatial Coordinate Measurement. Natural Language Processing: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications. 2020. IGI Global. P. 184-213.
6. Хорошун, Г. Модель надання послуги з використання оптичної лабораторії в умовах індивідуальних потреб замовника. *Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Дип. 8(256). 2019. С. 118-122.
7. Матвеев А. А. Оптика. М. Мир, 1988. 445 с.
8. Statistical Optical Image Analysis for Information System / Oleksandr Ryazantsev, Ganna Khoroshun, Andrii Riazantsev, Vitalii Ivanov, Aleksandr Baturin // Proc. of 2019 7th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW), Istanbul, Turkey. – IEEE 2019. – P. 130-134. DOI: https://doi.org/10.1109/FiCloudW.2019.00036.
9. Савинков С. Закон Парето или Принцип 80/20. URL: http://www.f-abp.ru/kino.php.
10. Хорошун Г. М. Метод опису явища дифракції по сукупності топологічних об'єктів та алгоритм розрізняння мінімуму від нуля інтенсивності. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Том 4, № 3. С. 17-21. DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.3.03
11. Khoroshun A., Chernykh A., Kirichenko J., Ryazantsev O., Bekshaev A., Singular skeleton of a Laguerre–Gaussian beam transformed by the double-phase-ramp converter. 2017. *Appl. Opt*. Vol. 56, Iss. 12. C. 3428-3434.
12. Lamperska W., Masajada J., Drobczyński S., Wasylczyk P. Optical vortex torque measured with optically trapped microbarbells. 2020. *Appl. Opt*. Vol. 59. P. 4703-4707.

References

1. Bidyuk, P.I. and Korshevnyuk, L.O. (2010), *Design of computer information systems for decision support*, NTUU "KPI", Kyiv, 340 p.
2. Turko, D.A. (2009), "Taking into account the conditions of uncertainty and risk in the decision-making process in the field of high-tech production", *Open information and computer integrated technologies*, Vol. 43, pp. 180-187.
3. Strelkova, T., Lytuyga, A., Kalmykov, A., Khoroshun, G., Riazantsev, A. and Ryazantsev, O. (2020), "Influence of a signal description model on the calculations of the efficiency indicators of optoelectronic systems", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4, no. 5 (106), pp. 41-50.
4. Khoroshun, G., Luniakin, R., Riazantsev, A., Ryazantsev, O., Skurydina, T. and Tatarchenko, H. (2020), "The Development of an Application for Microparticle Counting Using a Neural Network", *Proc. of the 4th Int. Conf. on Computational Linguistics and Intelligent Systems* (COLINS), Vol. I: Main Conference, pp. 1186-1195.

5. Flores-Fuentes, W., Lopez, M., Hernandez-Balbuena, D., Sergiyenko, O., Rodríguez-Quiñonez, J., Rivera-Castillo, J., Lindner, L. & Basaca-Preciado L. (2020), "Applying Optoelectronic Devices Fusion in Machine Vision: Spatial Coordinate Measurement", *Natural Language Processing: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*. IGI Global. pp. 184-213
6. Khoroshun, G. (2019), "Model of providing services for the use of optical laboratory in the individual needs of the customer", *Bulletin of the East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl*, Vol. 8 (256), pp. 118-22.
7. Matveev, A.A. (1988), *Optics*, Mir, Moscow, 445 p.
8. Ryazantsev, O., Khoroshun, G., Riazantsev, A., Ivanov, V. and Baturin, A. (2019), "Statistical Optical Image Analysis for Information System", *Proc. of 2019 7th Int. Conf. on Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW)*, Istanbul, Turkey, IEEE 2019, pp. 130-134, DOI: https://doi.org/10.1109/FiCloudW.2019.00036.
9. Savinkov S. (2020), *Pareto Law or Principle 80/20*, available to: http://www.f-abp.ru/kino.php.
10. Ganna Khoroshun (2020), "Diffraction phenomenon description method based on by the topological objects set and the algorithm for distinguishing the minimum from zero intensity", *Advanced Information Systems*, Vol. 4, No. 3, pp. 17-21, DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.3.03
11. Khoroshun, A., Chernykh, A., Kirichenko, J., Ryazantsev, O. and Bekshaev, A. (2017), "Singular skeleton of a Laguerre–Gaussian beam transformed by the double-phase-ramp converter", *Appl. Opt.*, Vol. 56, Iss. 12, pp. 3428-3434
12. Lamperska, W., Masajada, J., Drobczyński, S. and Wasylczyk, P. (2020), "Optical vortex torque measured with optically trapped microbarbells", *Appl. Opt*., Vol. 59, pp. 4703-4707.

Received (Надійшла) 28.09.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.11.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Хорошун Ганна Миколаївна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри будівництва, урбаністики та просторового планування, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Сєвєродонецьк, Україна;
Ganna Khoroshun – PhD (Optics and Laser Physics), Associated Professor of Department of Construction, Urban and Spatial Planning, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Severodonetsk, Ukraine;
e-mail: an_khor@i.ua; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-1272-1222.

Методы поддержки принятия решений при проведении оптических исследований

Г. М. Хорошун

Аннотация. Разработаны методы поддержки принятия решений для задач прикладной оптики, в которых необходимо принять решение по качеству изображения и соответствию требованиям, которые определяются его дальнейшим использованием. Обсуждены выбор калиброванного теоретического изображения, по которому проверяется правильность проведения расчетной работы. Приведен алгоритм, по которому улучшается полученное численное изображение. В работе определены недостатки систем машинного зрения, такие как дефекты элементов системы, разъюстирование системы, шумы, неудачная схема эксперимента, которые снижают качество экспериментального изображения. Для установления взаимосвязей между причинами и последствиями недостатков построена таблица с причинами образования недостатков на дифракционной картине по схеме Исикава. Качество и пути совершенствования экспериментального изображения устанавливаются с использованием диаграммы Парето. Совершенствование происходит итерационно и позволяет постепенно улучшить качество изображения до максимально возможного значения в экспериментальной схеме. Введено два этапа принятия решений - первый определяет совершенство экспериментального изображения, а второй его приемлемость в качестве главного результата работы по мнению экспертов. Полнота альтернатив в анализе приведена рекомендациями по дальнейшим действиям, а величина погрешности, благодаря комбинации двух методов: диаграммы Парето и мнения экспертов, не превышает 5%.

Ключевые слова: дифракционное изображение; система поддержки принятия решений; метод Парето.

Decision support methods in optical research

Ganna Khoroshun

Abstract. Decision support methods are developed for the problems in applied optics in which it is necessary to make decisions about image quality and its compliance with the requirements that are determined by its further use. The choice of the calibrated theoretical image on which correctness of carrying out of settlement work is checked is discussed. An algorithm according to which the obtained numerical image is improved is given. The paper identifies the disadvantages of machine vision systems, such as defects in system elements, system debugging, noise, unsuccessful experimental scheme that reduce the quality of the experimental image. To establish the relationship between the causes and consequences of defects, a table with the causes of the defects formation in the diffraction pattern according to the scheme of Ishikawa is builded. The quality and ways to improve the experimental image are established using a Pareto diagram. Improvement occurs iteratively and allows to improve gradually the image quality to the maximum possible value in the experimental scheme. Two stages of decision-making are introduced - the first determines the perfection of the experimental image, and the second its acceptability as the main result of the work according to experts' opinion. The completeness of the alternatives in the analysis is given by the recommendations for further action, and the magnitude of the error due to a combination of two methods: Pareto diagram and experts opinion does not exceed 5 %.

Keywords: diffraction image; decision support system; Pareto method.

Information systems modeling

УДК 528.855 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.4.02**

С. М. Андрєєв, В. А. Жилін

Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

МЕТОДИКА ПОБУДОВИ ГІПСОМЕТРИЧНИХ КАРТОГРАФІЧНИХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЄФУ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Анотація. Предметом дослідження є розроблення методики побудови гіпсометричних картографічних моделей рельєфу за даними дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). **Об'єктом дослідження** є процес оперативної та достовірної візуалізації рельєфу місцевості за даними ДЗЗ для забезпечення урядових, господарчих та природозахисних закладів актуальними тематичними картами, що відображають поточний стан території держави. **Метою роботи** є підвищення інформативності візуалізації рельєфу земної поверхні за рахунок забезпечення об'ємності, наочності та читаності картографічних зображень, а також виразності та гармонійності оформлення гіпсометричних карт. **Висновки.** На підставі проведеного аналізу методологічних основ візуалізації рельєфу місцевості встановлено надзвичайну важливість цього елементу змісту географічних карт, адже саме рельєф визначає характер та розміщення компонентів ландшафту і тісно пов'язаний з усіма складовими загальногеографічних і тематичних карт. Досліджено історико-технологічні аспекти картографування рельєфу, класифікацію методів і способів його зображення, а також основні чинники впливу на вибір методів і способів відтворення рельєфу в залежності від типу створюваної карти, її масштабу, проекції, призначення, способу використання та форми представлення, а також кваліфікаційних характеристик розробників картографічних зображень. Окреслено основні вимоги до зображення рельєфу з урахуванням необхідності збереження характерного зовнішнього вигляду ландшафту, генетичних відмінностей його форм, регіональних особливостей конкретних районів і, врешті, естетичної привабливості отриманих картографічних моделей. Проаналізовано основні властивості гіпсометричних шкал для моделювання рельєфу, а також сучасні вимоги до них та принципи їх побудови з урахуванням необхідності дотримування загальної колірної гармонії та художності колірної гамми. З урахуванням принципів створення гіпсометричних шкал розроблено методику побудови гіпсометричних картографічних моделей рельєфу за даними дистанційного зондування Землі. Методика передбачає безкоштовне отримання даних радарної інтерферометричної зйомки SRTM і за рахунок їх специфічної обробки з використанням програмного пакету ArcGIS побудову гіпсометричних картографічних моделей рельєфу у межах 85% поверхні Землі із заданими розрізнювальною здатністю на місцевості та розрізненням і колірною пластикою гіпсометричних шкал. При цьому забезпечується необхідна достовірність, точність, оперативність та повнота тривимірного сприйняття змісту географічних карт рельєфу місцевості, що цікавить.

Ключові слова: геоінформаційні системи; картографічні моделі; гіпсометричні шкали; методи і способи візуалізації рельєфу.

Вступ

Серед елементів змісту географічних карт рельєф є одним з найважливіших. Він у значному ступені визначає характер та розміщення компонентів ландшафту. До того ж рельєф пов'язаний з іншими елементами змісту загальногеографічних і тематичних карт. Геоінформаційні технології явились суттєвим кроком вперед у галузі створення географічних карт, проте іноді вони не цілком здатні задовольняти сучасні вимоги до їх змістового оформлення. Географічні карти використовуються безпосередньо людиною з певними індивідуальними фізіологією, психологією та професійним досвідом. Тому слід враховувати параметри, що забезпечують досягнення необхідної достовірності, точності та повноти змісту: наочність, читаність, виразність, гармонійність оформлення [1-7]. Отже, останніми роками у зв'язку з впровадженням у картографію ГІС-технологій оформлення географічних карт виконується з використанням світлотіньового зображення рельєфу в поєднанні з гіпсометричним забарвленням [8]. При цьому ведуться активні роботи щодо автоматизації та об'єктивізації процесів аналітичної відмивки рельєфу, а також включення відомостей про рельєф у бази даних ГІС (геоінформаційних систем) різноманітного призначення.

У практичному використанні ГІС першорядне значення набуває грамотна візуалізація інформації, яка багато в чому визначає цінність та інформативність карт [9-11]. При зображенні рельєфу та його сприйнятті важливі збереження характерного зовнішнього вигляду, генетичних відмінностей форм, регіональних особливостей конкретних районів і естетична привабливість. Це досягається у великій мірі оформленням карти, неформальним застосуванням образотворчих засобів, що враховує комп'ютерні технології та класичний досвід оформлення карт. У даний час зазначений напрям входить до числа пріоритетних і актуальних областей дослідження картографів [12-15]. Сучасні гіпсометричні карти утворюють міцну науково-технічну основу для розвитку тематичної картографії взагалі і карт природи особливо.

Методологічні основи візуалізації рельєфу місцевості

Історичні аспекти візуалізації рельєфу. Рельєф (фр. relief, від лат. relevo – піднімаю) — сукупність нерівностей суші, дна океанів і морів, різноманітних по контурах, розмірах, походженні та історії геологічного розвитку. Складається з позитивних (опуклих) і негативних (увігнутих) форм.

© Андрєєв С. М., Жилін В. А., 2020

Різноманітність рельєфу Землі пояснюється взаємодією процесів, що впливають на формування земної кори. Причому одні з них створюють нерівності рельєфу, а інші — направлені на вирівнювання його. Внутрішні й зовнішні геологічні та гравітаційні сили, діючи постійно й одночасно, формують поверхню Землі (рис. 1).

Візуалізація рельєфу має задовольняти практичним потребам в інформаційному забезпеченні різноманітних областей науково-практичної діяльності людини (економіки, екології, туризму тощо) оглядовими дрібномасштабними картами, що характеризуються властивостями достовірності, наочності, легкого та доступного сприйняття, високим ступенем естетичної привабливості.

Під способом зображення рельєфу розуміють комплекс образотворчих засобів для відображення рельєфу на карті, що враховують існуючі на певний момент технології отримання та візуалізації інформації про поверхню Землі, а також задовольняють вимоги географічної відповідності.

Методом зображення рельєфу вважають сукупність способів, схожих по образотворчих засобах і результатам візуалізації.

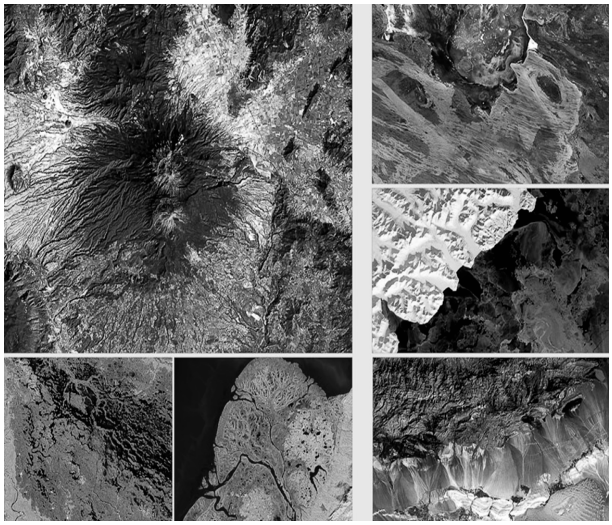


Рис. 1. Різноманітність рельєфу Землі

Вирішенням задачі підвищення наочності та виразності рельєфу на картах займалися багато учених-картографів впродовж декількох сторіч (рис. 2).

На відміну від більшості інших елементів змісту карти для рельєфу характерна тривимірність зображення, що вимагає досягнення зорового ефекту об'ємності.

Історико-технологічні аспекти застосування способів картографування рельєфу наочно передає структурна схема на рис. 3.

Класифікація методів і способів зображення рельєфу. У сучасних ГІС поверхні можна моделювати трьома способами: за допомогою ізоліній (ізогіпсів), у вигляді растру, за допомогою нерегулярної тріангуляційної мережі.

Більшість сучасних карт створюються із застосуванням комбінованого підходу до зображення рельєфу. Яскравий приклад – живописний, або ландшафтний, спосіб оформлення карт (рис. 4), при якому зображення рельєфу, виконується у градієнтній гіпсометричній шкалі з кольоровим відмиванням, доповнюється різними текстурами, що імітують ландшафт (дрібні форми рельєфу, рослинний покрив і ґрунти). Класифікацію методів і способів зображення рельєфу наведено на рис. 5.

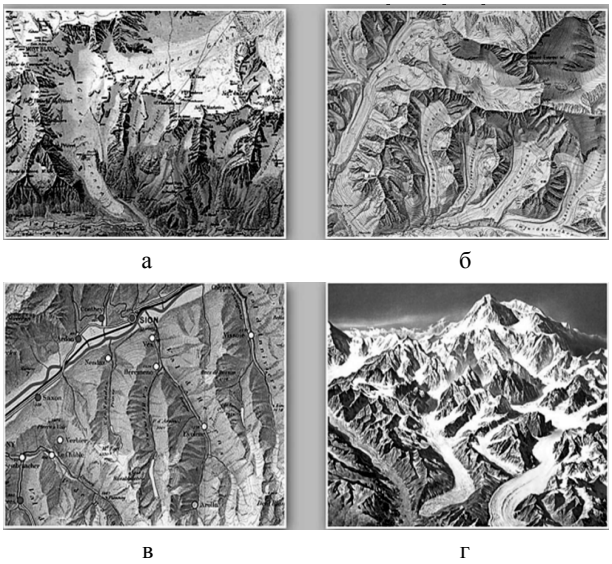


Рис. 2. Роботи видатних картографів щодо зображення рельєфу:
а – Ксавьєр Імфельд. Карта Монблана (1896 р.);
б – Едуард Імгоф. Карта Евереста (1962 р.);
в – Герман Кюммерлі. Швейцарія (1896 р.);
г – Генріх Цезар. Беранн (1986 р.)

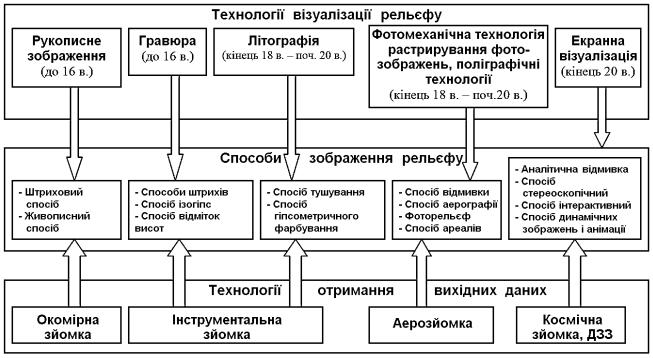


Рис. 3. Історико-технологічні аспекти картографування рельєфу

Рис. 4. Приклад реалізації живописного (ландшафтного) способу оформлення карт

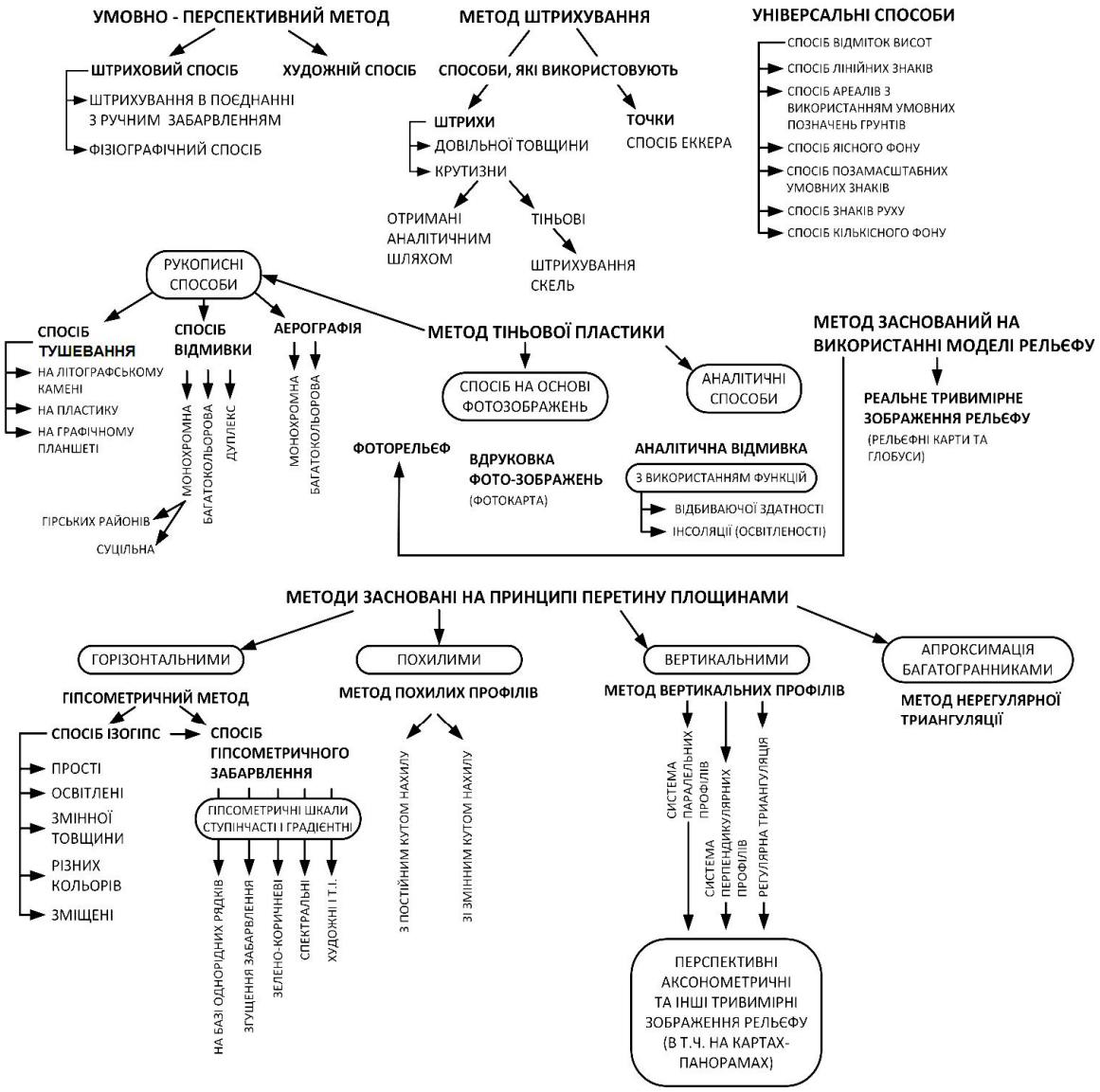


Рис. 5. Класифікація методів і способів зображення рельєфу

Чинники впливу на вибір методів і способів зображення рельєфу. Основними чинниками, що впливають на вибір методів і способів зображення рельєфу, є такі:

1) географічні — характеризують рельєф з позиції географічної правдоподібності на противагу «геометричному» підходу, який недооцінює необхідність поглибленого вивчення картографом об'єкту, що зображується;

2) картографічні — обумовлені типом створюваної карти, її масштабом, проекцією, змістом, призначенням, способом використання і формою представлення (в паперовому або електронному вигляді);

3) технологічні — визначають широкий спектр впливу технологій створення рельєфу на картографічне зображення;

4) кваліфікаційні — обумовлені науковим потенціалом та досвідом фахівців-виконувачів, їх творчими здібностями, живописною та графічною майстерністю;

5) психофізіологічні та пізнавальні — базуються на законах зорового сприйняття (Бугера-Вебера, Вебера-Фехнера), визначаються фізіологією людського зору та психофізичними особливостями сприйняття графічної інформації: кольори, форми і простори, порогова чутливість зору, цілісність і селективність сприйняття графічної інформації, зниження чутливості очних аналізаторів при розгляді малих площ, колірна пластика тощо.

Таким чином, вибір методу зображення рельєфу як сукупності образотворчих засобів обумовлений, в першу чергу, картографічними і психофізіологічними чинниками, тоді як вибір способу визначається технологічними чинниками і кваліфікацією картографа, оскільки спосіб передбачає урахування технології отримання, візуалізації та відтворення геоінформації. При цьому географічні чинники важливо враховувати незалежно від вибраного методу і способу картографування рельєфу.

При зображенні рельєфу і його сприйнятті важливі не тільки збереження характерного зовнішнього вигляду, генетичних відмінностей форм, регіональних особливостей конкретних районів, але й естетична привабливість. Це досягається у великій мірі

оформленням карти, неформальним застосуванням образотворчих засобів, що враховує комп'ютерні технології і класичний досвід оформлення карт.

Основні вимоги до зображення рельєфу такі:

– метричність зображення (забезпечує можливість отримання по карті абсолютних висот і перевищень, характеристик кутів нахилу, розчленовування місцевості);

– пластичність зображення (наочна передача нерівностей рельєфу, що формує у користувача зоровий образ місцевості);

– морфологічна відповідність зображення (виявляється у прагненні підкреслити типологічні особливості форм рельєфу та його структури).

Слід відзначити, що відомі вимоги, які пред'являються до зображення рельєфу і обумовлені географічними та психофізіологічними чинниками зазвичай ігноруються. Дослідження щодо цього є практично одиничними і часто не узгоджуються одне з одним в оцінці фізіологів, художників і картографів, тоді як в передачі зорового ефекту об'ємності зображення рельєфу такі оцінки відіграють значну роль.

Гіпсометричні шкали для моделювання рельєфу

Визначення і властивості гіпсометричних шкал. Гіпсометрія (від грецьких слів: ὕψος – висота і μετρέω – вимірюю) у широкому смислі розуміння вміщує у себе усі методи альтиметрії та нівелювання і складає окремий розділ геодезії, що займається як визначенням абсолютних та відносних висот місцевості, так і відображенням їх на планах, картах і профілях. Зазвичай же термін "гіпсометрія" використовують саме в останньому смислі, тобто відносно топографічного зображення висот місцевості. Тому в даній роботі під гіпсометрією розуміється спосіб зображення рельєфу земної поверхні за допомогою горизонталей, що сполучають крапки з однаковими висотами, залежними від характеру рельєфу, масштабу і призначення карти.

Для пошарового або гіпсометричного забарвлення використовують шкалу кольорів та їх відтінків, що змінюються, покриваючи проміжки між двома певними горизонталями одним з 58-ми відтінків шкали. Процеси складання і оформлення рельєфу нерозривно зв'язані між собою.

При створенні гіпсометричної карти певного масштабу і призначення розробляють шкалу ступенів висот і глибин з постійними або змінними інтервалами перетину рельєфу — гіпсометричну шкалу (рис. 6).

Наочність гіпсометричної карти і пластичний ефект забезпечуються застосуванням колірної пластики, на основі якої будують колірну шкалу пошарового забарвлення по ступенях висот і глибин.

Колірні гіпсометричні шкали повинні задовольняти певним умовам:

– логічна послідовність зміни колірних характеристик по ступенях висот;

– поступовість переходу кольору в ступенях;

– чітке виділення кольором якісних рубежів у рельєфі (висотних зон суші або зон глибин океану);

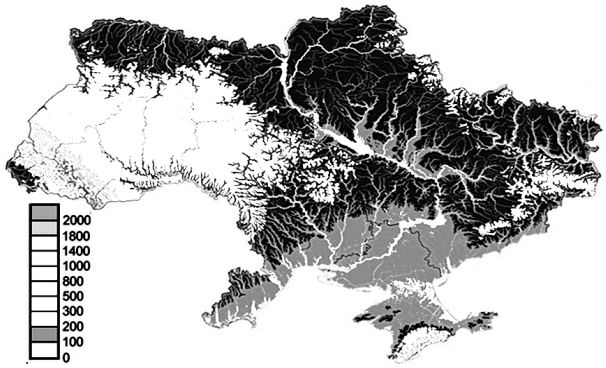


Рис. 6. Гіпсометрична карта України

– загальна колірна гармонія шкали, що створює враження цілісності, єдиній поверхні рельєфу;

– художність, естетичність колірної гамми;

– прозорість кольорів, що зберігає читаність інших елементів змісту карти.

Загальний колірний лад шкали, використання жовто-коричнево-червоної (на великих висотах) колірної гамми обумовлює сприйняття єдності і цілісності рельєфу зображуваної території.

Колірна шкала відзначається достатньою прозорістю, коли для її більшої частини (за винятком високогірних районів від 4000 м) прийнята світла гамма тонів. У художньому відношенні колірний ряд представляє гармонійне поєднання тональних переходів. Особливий колорит полягає у використанні спокійних зеленувато-сірих тонів для рівнин.

Вибір колірної гамми гіпсометричних шкал конкретних карт залежить від ряду основних чинників: масштаб, призначення і тип карт, особливості рельєфу території, площа обхвату території, характер використання карт.

З масштабом, призначенням і типом карти зазвичай зв'язані детальність гіпсометричної шкали, число інтервалів перетину, застосування шкал з постійною або змінною висотою перетину, що у багато чому визначає загальний колірний лад шкали, вибір прийомів побудови колірного ряду, характер зміни колірних параметрів у шкалі. Ступінь складності побудови колірного ряду залежить від кількості вибраних гіпсометричних шарів, від їх співвідношення за розмірами (вузькі, широкі) на різних висотах, від загального діапазону висот.

На загальних географічних картах, призначених для навчальних закладів, інтервали перетину зазвичай розріджені і в більшості випадків їх число співпадає з числом колірних шарів, і воно, як правило, невелике.

На загально географічних картах науково-довідкового призначення, а також гіпсометричних картах шкали перетину рельєфу будують достатньо докладними, але для забезпечення наочності пошарового забарвлення число колірних ступенів у порівнянні із загальною кількістю ступенів у шкалі приймається значно меншим (табл. 1).

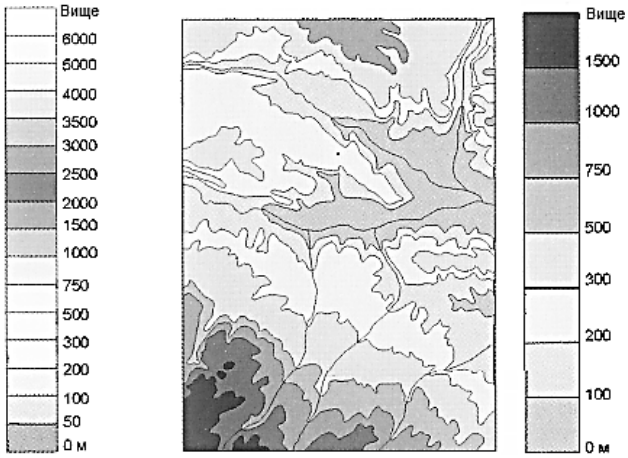
При докладній гіпсометричній шкалі дуже важливо правильно вибрати межі ступенів пошарового забарвлення. Дослідами встановлено, що оптимальна кількість ступенів пошарового забарвлення,

яка дозволяє виконати гармонійне поєднання колірних переходів і достатню розрізнюваність ступенів між собою, забезпечити єдність зображення рельєфу, читаність і пластичність сприйняття, не повинна перевищувати 16-18.

Таблиця 1 – **Співвідношення загального числа інтервалів перетину рельєфу і колірних ступенів гіпсометричних шкал**

Масштаби гіпсометричних карт	Кількість інтервалів перетинів шкали	Кількість колірних ступенів
1: 1 000 000	40	15
1: 2 500 000	32	16
1: 5 000 000	13	7
1: 10 000 000	16	9

На вибір колірних шкал впливають особливості рельєфу території та площа її обхвату. Колірна шкала, побудована за принципом збільшення світлоти з висотою, найбільш ефективна для рельєфу гірських районів (рис. 7, а). Для районів з рівнинним і середньогірським рельєфом, а також територій значного обхвату з великою різноманітністю висотних зон доцільні шкали, що будуються за принципом зростання насиченості і теплоти кольору з висотою (рис. 7, б).



а б

Рис. 7. Гіпсометричні шкали

Характер використання карти (настільна або стінна) визначає специфіку оформлення колірної шкали. В основному вона виявляється в застосуванні яскравих насичених тонів для стінних карт і, навпаки, м'яких колірних переходів зі значно більшою пороговою чутливістю відтінків одного кольору для настільних карт.

Розвиток гіпсометричного методу зображення рельєфу та створення дрібномасштабних гіпсометричних карт стали з перших років розвитку картографії одними з найважливіших науково-практичних задач, вирішення яких спричинило розроблення багатообразних колірних шкал, заснованих на різноманітних принципах їх побудови.

Таким чином, будь-яка гіпсометрична шкала є колірним рядом, побудованим за певними принципами. Всі колірні шкали підрозділяються на шкали однорідних та змішаних колірних рядів.

Постановка задачі дослідження

Отже, із проведеного вище аналізу особливостей методологічних основ візуалізації рельєфу місцевості, історико-технологічних аспектів та класифікації методів і способів його картографування, а також особливостей формування для цього гіпсометричних шкал, виникає актуальна задача розвитку методів і способів якісного відтворення рельєфу місцевості як одного з найважливіших елементів змісту географічних карт.

Звідси об'єктом дослідження є процес оперативної та достовірної візуалізації рельєфу місцевості за даними ДЗЗ для забезпечення урядових, господарчих та природозахисних закладів актуальними тематичними картами, що відображають поточний стан території держави. Відповідно, предметом дослідження є розроблення методики побудови гіпсометричних картографічних моделей рельєфу за даними ДЗЗ. Метою роботи є підвищення інформативності візуалізації рельєфу земної поверхні за рахунок надання зображенням об'ємності, наочності, читаності, виразності та гармонійності оформлення гіпсометричних карт.

У якості програмного забезпечення для виконання поставлених завдань використовувався програмний пакет геоінформаційної системи ArcGIS 10.5 компанії ESRI (США) із залученням спеціальних модулів Spatial Analyst та 3D Analyst.

Методика побудови гіпсометричних картографічних моделей рельєфу за даними ДЗЗ

З урахуванням принципів створення гіпсометричних шкал розроблено методику побудови гіпсометричних картографічних моделей, що візуалізують рельєф місцевості за даними ДЗЗ (рис. 8).

Рис. 8. Структурна схема методики створення гіпсометричних карт рельєфу

Розроблена методика для побудови рельєфу передбачає використання даних SRTM (Shuttle radar topographic mission).

Характеристика даних SRTM. Вперше місія SRTM була виконана у 2000 році з борту космічного корабля багаторазового використання "Space Shuttle" з використанням радарної інтерферометричної зйомки поверхні Землі. Ця зйомка була проведена майже на всій території суші, а також океанів, між 54° південної широти та 60° північної широти за допомогою двох радіолокаційних сенсорів SIR-C та X-SAR, встановлених на борту.

Результатом зйомки стала цифрова модель рельєфу 85% поверхні Землі. Всього в результаті зйомки отримано 12 TBt радіолокаційних даних, які протягом 2 років проходили обробку фахівцями NASA. Дані SRTM існують в декількох версіях: попередні (Версія-1 2003 р.) та остаточна (Версія-2 2005 р.). Остаточна версія пройшла додаткову обробку, виділення берегових ліній і водних об'єктів, фільтрацію помилкових значень.

Дані поширюються у вигляді сітки з розміром комірки 1" та сітки з розміром комірки 3". Односекундні дані (SRTM1) доступні на території США, на решту поверхні Землі доступні тільки трисекундні дані (SRTM3). Файли даних являють собою матрицю з 1201x1201 (або 3601x3601 для односекундної версії) значень, яка може бути імпортована в різні програми для побудови карт та геоінформаційні системи.

Отримання даних SRTM. Існує дві версії даних: попередня (unfinished, версія 1) та остаточна (finished, версія 2). Остаточна версія пройшла додаткову обробку, виділення берегових ліній і водних об'єктів, фільтрацію помилкових значень.

Спочатку планувалося поширення даних Level-2 з максимальною роздільною здатністю — 30 м (1"), але у зв'язку із загрозою тероризму було прийнято рішення поширювати генералізовані дані Level-1 із розрізненням 90 м (3") на всю зняту територію, крім території США, на яку дані поширюються з максимальною роздільною здатністю. На деякі території в США (загальною площею 50000 кв. км) зйомка взагалі не проводилася, що мабуть також пов'язано з питаннями національної безпеки. Дані є простим 16-бітовим растром (без заголовку). Значення пікселя є висотою над рівнем моря в даній точці. Значення пікселя також може приймати значення –32768, що відповідає значенню no data (немає даних). При цьому використовується референц-еліпсоїд даних WGS84.

Назва квадрата відповідає координатам його лівого нижнього кута. Наприклад: N45E136 відповідає 45° північної широти та 136° східної довготи.

Більша частина даних доступна безкоштовно через HTTP:

Версія-1 — http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version1/ ;
Версія-2 — http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/.

Схема покриття даними SRTM території України міститься в проекті ArcMap SRTM.mxd у папці SRTM_Download.

Для завантаження даних SRTM згідно заданої території необхідно знати координати лівого нижнього кута квадрата, що покриває дану територію. Наприклад, для південного берега Криму покриття даними SRTM відповідає квадратам N44E033, N44E034 (рис. 9).

Для завантаження (отримання) квадратів N44E033, N44E034 треба перейти за посиланням http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/ (рис. 10).

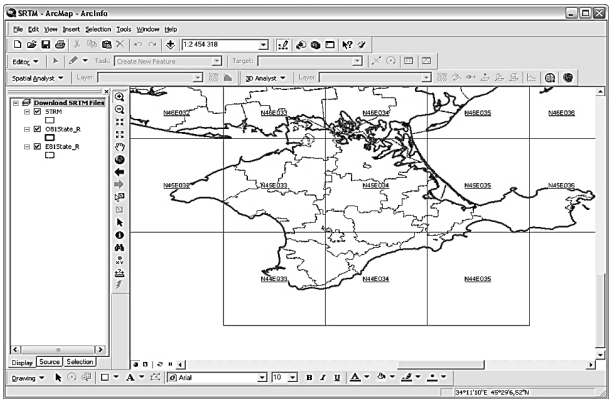


Рис. 9. Покриття даними SRTM південного берега Криму (інтерфейс програми ArcMap)

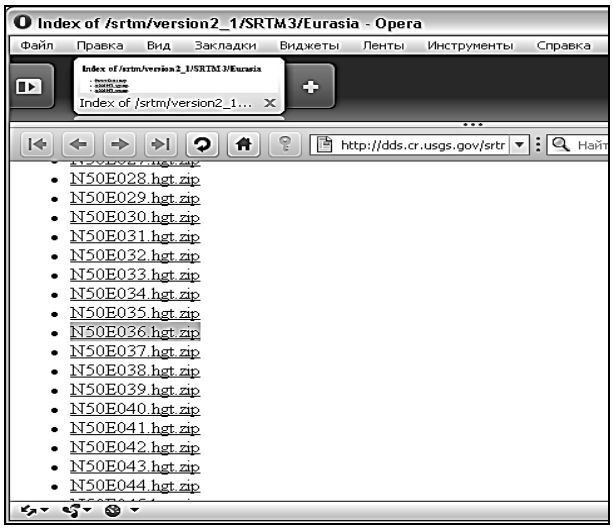


Рис. 10. Завантаження (отримання) даних SRTM

Перетворення даних SRTM. Для перетворення даних SRTM з метою автоматичного імпорту в ArcMap доцільно використовувати спеціальну утиліту Process-srtm (рис. 11).

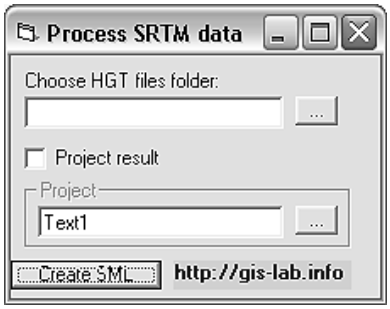


Рис. 11. Вікно програми Process-srtm

В процесі роботи ця програма реалізує такі кроки:

1) перейменовує матриці HGT у BIL;

2) розраховує координати кутів і створює для кожної матриці файл заголовку HDR;

3) створю файл пакетної обробки для програми ArcInfo з пакету ArcGIS.

Для перетворення даних необхідно помістити завантажені (отримані) дані у папку і запустити файл Process-SRTM.exe, вказавши шлях до створеної цільової папки та натиснувши кнопку "Create SML". У цільовій директорії буде створено файли з розширенням .hdr та .bil.

Завантаження даних рельєфу в програму ArcMap. Додання карті, яку готували до публікації у пресі або Internet, рельєфного вигляду вельми підвищує її естетичну привабливість. Програма ArcView з пакету ArcGIS при наявності модулів Spatial Analyst та 3D Analyst має розширені можливості для створення подібних карт.

Для додання зображенню видимого об'єму необхідна наявність шару, що представляє безперервне поле значень висот. Якщо робота з цим шаром йде в Arcview \ ArcInfo, то цей шар, швидше за все, буде представлений спеціальним форматом GRID.

Для початку потрібно отримати базовий шар GRID, на основі якого будуть отримані інші шари, що нададуть рельєфу об'ємності.

Отже, для створених растрових шарів даних SRTM після запуску програми ArcCatalog слід обрати (призначити) систему координат GCS_WGS_1984 (рис. 12).

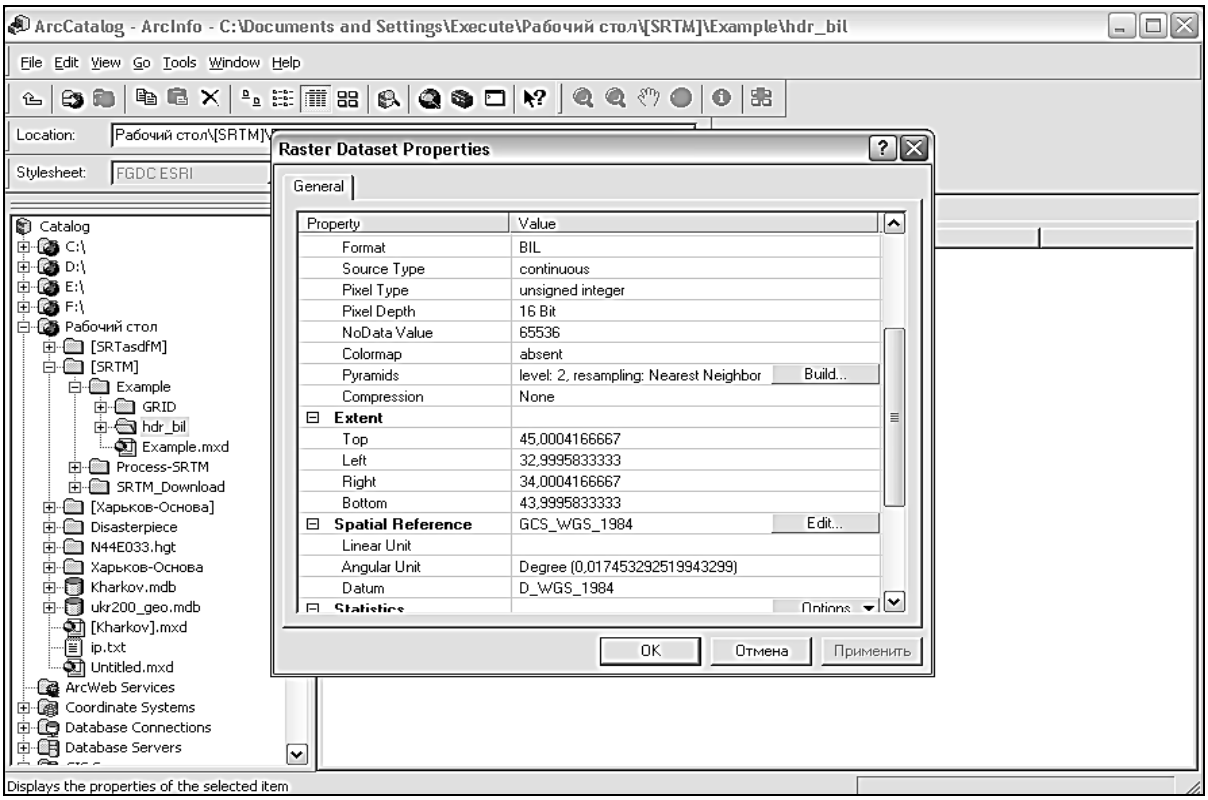


Рис. 12. Призначання завантажуваним даним SRTM системи координат GCS_WGS_1984

Для створення моделі GRID слід обрати опцію Export / Raster To Different Formats в контекстному меню растрових шарів даних SRTM.

Далі після запуску ArcMap і призначення системи координат GCS_WGS_1984 слід додати в проект ArcMap створені квадрати моделі GRID натиснувши на кнопку і обравши необхідні шари, що визначають контур області (рис. 13). Після цього слід завантажити програмні модулі Spatial Analyst та 3D Analyst (використовуючи меню Tools\Extensions).

Створення карт тіньового рельєфу. Після підготовки вихідних даних починаємо процес вибору кольорової палітри для забарвлення рельєфу. Для початку слід "перефарбувати" GRID в кольори, відповідні загально прийнятним нормам відмивання рельєфу. Далі треба відредагувати легенду GRID (рис. 14) подвійним натисканням на назві GRID-теми задля виклику її властивості та переходу на вкладку Symbology

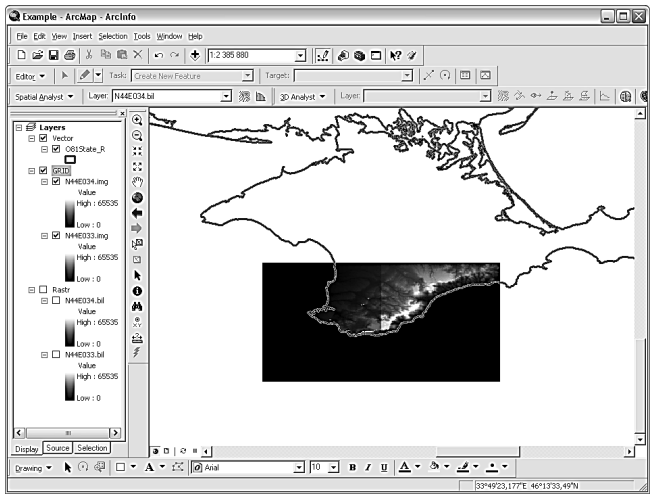


Рис. 13. Завантаження даних SRTM та векторного шару в програму ArcMap

При цьому можна також змінити класифікацію (за замовчуванням виставляється 9 класів) та ввести вручну значення висот з правильним інтервалом (50-100).

Надалі треба відтінити рельєф, додати йому тіней (зробити відмивання рельєфу). Виконання відмивання рельєфу за даними висот та додавання прозорості нададуть якісну картину рельєфу і значно поліпшать зовнішній вигляд карти. Робимо тему базового рельєфу активною в Spatial Analyst і вибираємо опцію Surface Analysis \ Hillshade. У діалоговому вікні буде запропоновано вказати азимут (azimuth) на "джерело освітлення", від якого залежатимуть напрями тіней, а також "висоту Сонця" (altitude) над горизонтом (рис. 15). Результат з настроюваннями за замовчуванням (тема з назвою Hillshade of GRID) можна й не чіпати. Тема сама по собі досить інформативна завдяки градієнтному переходу від чорного до білого (рис. 16).

Проте можливо її використовувати як базовий шар для отримання не просто тіньового рельєфу, а ще й розфарбованого за кольорами. Для цього слід помістити шар GRID-моделей над шарами Hillshade. Далі у властивостях шару GRID (рис. 17) в закладці *Display* експериментально обираються параметри прозорості, яскравості та контрастності.

Результатом буде карта з відтіненим рельєфом, розфарбованим за висотною зональністю (рис. 18).

Для остаточно завершення побудови гіпсометричної картографічної моделі рельєфу слід перейти до меню *View/ Layout View.* В настроюваннях друку (*File/Page and Print Setup*) встановити формат аркуша (наприклад, А4) та бажану (наприклад, альбомну) орієнтацію аркуша. З використанням стандартних інструментів програми ArcMap (через меню *Insert*) врешті отримуємо гіпсометричну картографічну модель рельєфу південного берегу Криму (ПБК) (рис. 19).

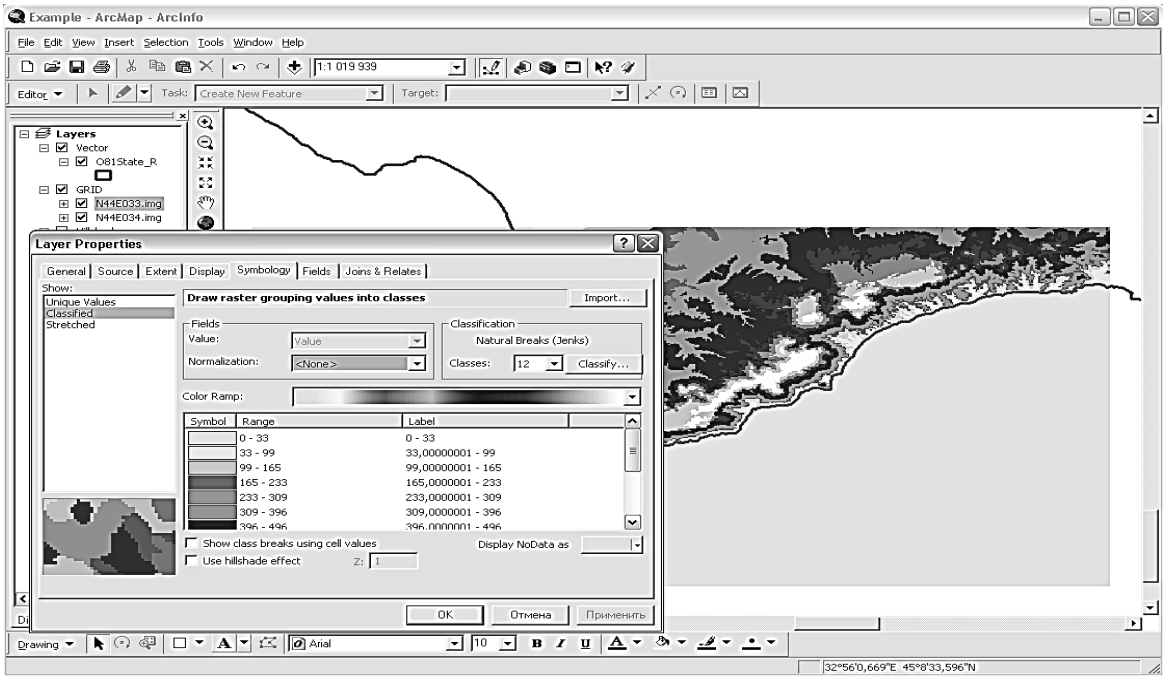


Рис. 14. Редагування легенди GRID

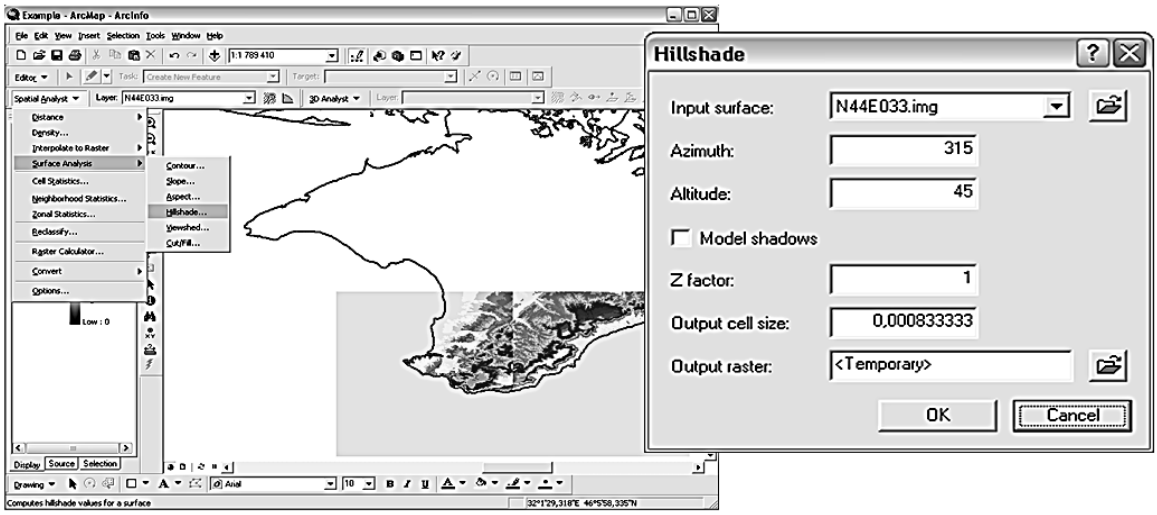


Рис. 15. Виконання відмивання рельєфу

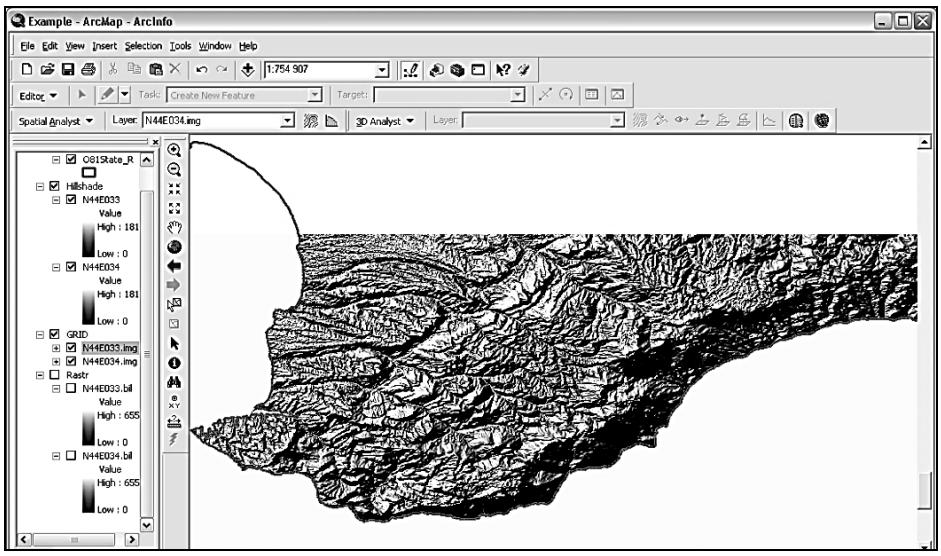


Рис. 16. Результат відмивання базового шару GRID

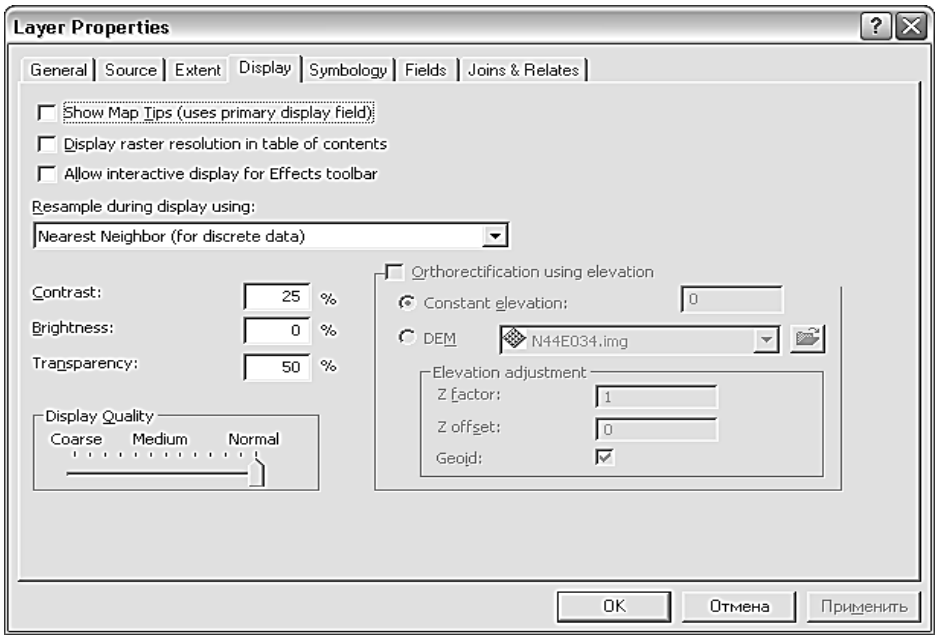


Рис. 17. Редагування параметрів шару GRID

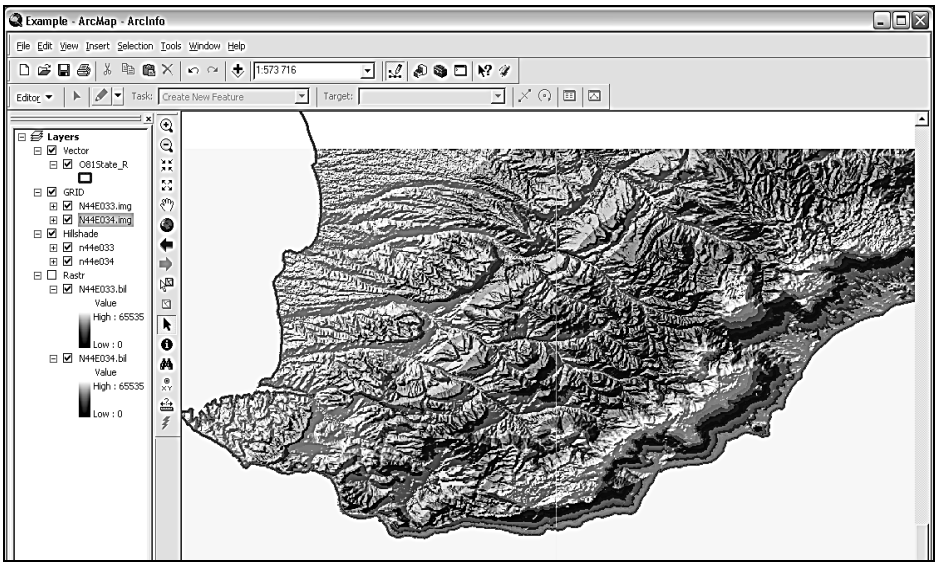


Рис. 18. Карта тіньового рельєфу, розфарбованого за висотами (інтерфейс програми ArcMap)

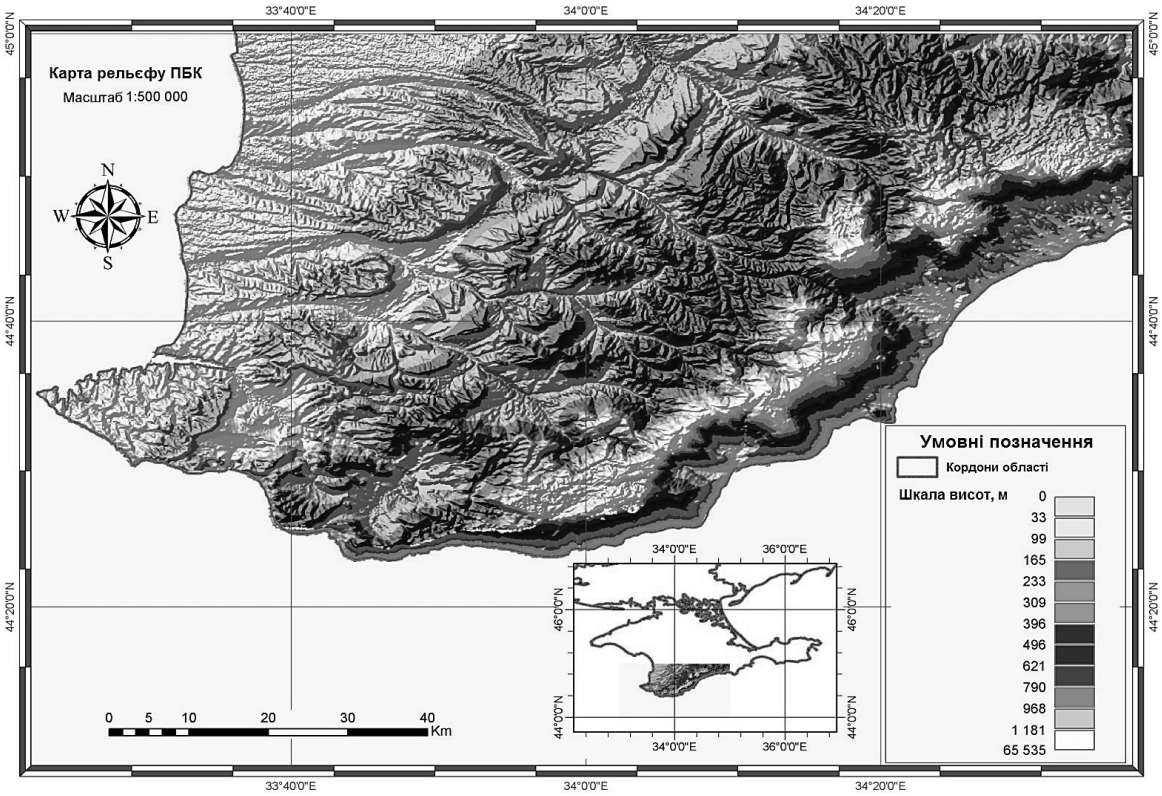


Рис. 19. Гіпсометрична картографічна модель рельєфу південного берегу Криму

Запропонована методика є універсальною і придатна для створення гіпсометричних картографічних моделей рельєфу 85% поверхні Землі із заданими розрізнювальною здатністю на місцевості та розрізненням і колірною пластикою гіпсометричних шкал, що забезпечує досягнення необхідної достовірності, точності, оперативності та повноти тривимірного сприйняття змісту географічних карт, а також їх естетичної привабливості.

Висновки

На підставі проведеного аналізу методологічних основ візуалізації рельєфу місцевості встановлено надзвичайну важливість цього елементу змісту географічних карт, адже саме рельєф визначає характер та розміщення компонентів ландшафту і тісно пов'язаний з усіма складовими загальногеографічних і тематичних карт.

Досліджено історико-технологічні аспекти картографування рельєфу, класифікацію методів і способів його зображення, а також основні чинники впливу на вибір методів і способів відтворення рельєфу в залежності від типу створюваної карти, її масштабу, проекції, призначення, способу використання та форми представлення, а також кваліфікаційних характеристик розробників картографічних зображень. Окреслено основні вимоги до зображення рельєфу з урахуванням необхідності збереження характерного зовнішнього вигляду ландшафту, генетичних відмінностей його форм, регіональних особливостей конкретних районів і, врешті, естетичної привабливості отриманих картографічних моделей.

Проаналізовано основні властивості гіпсометричних шкал для моделювання рельєфу, а також сучасні вимоги до них та принципи їх побудови з урахуванням необхідності дотримування загальної колірної гармонії та художності колірної гамми.

З урахуванням принципів створення гіпсометричних шкал розроблено методику побудови гіпсометричних картографічних моделей рельєфу за даними дистанційного зондування Землі. Методика передбачає безкоштовне отримання даних радарної інтерферометричної зйомки SRTM і за рахунок їх специфічної обробки з використанням програмного пакету ArcGIS побудови гіпсометричних картографічних моделей рельєфу у межах 85% поверхні Землі із заданими розрізнювальною здатністю на місцевості та розрізненням і колірною пластикою гіпсометричних шкал. При цьому забезпечується необхідна достовірність, точність, оперативність та повнота тривимірного сприйняття змісту географічних карт рельєфу місцевості, що цікавить.

Список літератури

1. Андрєєв С. М., Жилін В. А. Методика побудови гідрологічних картографічних моделей за даними дистанційного зондування землі. *Сучасні інформаційні системи*: Щоквартальний науково-технічний журнал. Харків: НТУ "ХПІ", 2020. Т. 4, № 3. С. 22-40. DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.3.04
2. Андрєєв С. М., Жилін В. А., Мельник А. П. Застосування анаморфозних картографічних моделей для аналізу геоданих. *Сучасні інформаційні системи*: Щоквартальний науково-технічний журнал. Харків: НТУ "ХПІ", 2019. Т. 3, № 3. 142 с. С. 5-16. DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.3.01

3. Андрєєв С. М., Жилін В. А. Застосування даних аерофотозйомки з безпілотних літальних апаратів для побудови 3D-моделей місцевості. *Системи управління, навігації та зв'язку*: збірник наукових праць. Полтава: Полтавський НТУ ім. Юрія Кондратюка, 2019. Вип. 1(53). С. 3-16. DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.1.003
4. Берлянт А. М. Геоинформационное картографирование. М.: Астрея, 1997. 64 с.
5. Ковалева О. В. Оформление карт: традиции и современность. *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2010. № 5. С. 60-63.
6. Жукова О. Ю., Ковалева О. В., Золотарева Т. Г. Колориметрическая оценка качества гипсометрических шкал для оформления карт. *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2010. № 6. С. 81-89.
7. Жукова О. Ю., Ковалева О. В. Об использовании цветовой пластики (пространственного воздействия цвета) в оформлении карт. *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2012. № 1. С. 46–54.
8. Ковалева О. В. Психофизический и физиологический аспекты восприятия графической информации применительно к изображению рельефа на картах. *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2012. № 3. С. 75-80.
9. Берлянт А. М. Теория геоизображений. М.: ГЕОС, 2006. 262 с.
10. Башенина Н.В. Формирование современного рельефа земной поверхности. М.: Высшая школа, 1967 388 с.
11. Берлянт А. М. Картография: учебник для вузов. 2-е изд., исправленное и дополненное. М.: КДУ, 2010. 238 с.
12. Востокова А. В., Кошель С. М., Ушакова Л. А. Оформление карт. Компьютерный дизайн: Учебник для вузов. М.: Аспект Пресс, 2002. 288 с.
13. Лурье И. К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков: Учебник для вузов. 2-е изд. М.: КДУ, 2010. 424 с.
14. Лурье И. К., Самсонов Т. Е. Структура и содержание базы пространственных данных для мультимасштабного картографирования. *Геодезия и картография*. 2010, № 11. С. 17-23.
15. Самсонов Т. Е. Мультимасштабные базы геоданных для электронных карт. Пространственные данные. 2009. № 4. С. 46-51.

References

1. Andrieiev, S.M. and Zhilin, V.A. (2020), "Methods of construction of hydrological cartographic models according to remote sensing of the Earth data", *Advanced Information Systems*, Vol. 4, No. 3, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, pp. 22-40, DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.3.04
2. Andrieiev, S.M., Zhilin, V.A. and Melnyk, A.P. (2019), "The use of anamorphosis cartographic models for geodata analysis", *Advanced Information Systems*, Vol. 3, No. 3, Quarterly scientific and technical journal, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, pp. 5-16, DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.3.01
3. Andreev, S. and Zhilin, V. (2019), "Application of aerophotic data with unmanned aircraft for developing 3D models of terrain", *Control, navigation and communication systems*: collection of scientific works, No. 1(53), Poltava NTU Yuri Kondratyuk, Poltava, pp. 3-16. DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.1.003
4. Berlant, A. M. (1997), *Geoinformation mapping,* Astreya, Moscow, 64 p.
5. Kovaleva, O. V. (2010), "Design of maps: traditions and modernity", *Izv. universities. Geodesy and aerial photography*, No. 5, pp. 60-63.
6. Zhukova, O. Yu., Kovaleva, O. V. and Zolotareva, T. G. (2010), "Colorimetric assessment of the quality of hypsometric scales for drawing cards", *Izv. universities. Geodesy and aerial photography*, No. 6, pp. 81-89.
7. Zhukova, O. Yu. and Kovaleva, O. V. (2012), "About the use of color plastics (spatial influence of color) in the design of maps", *Izv. universities. Geodesy and aerial photography*, No. 1, pp. 46-54.
8. Kovaleva, O. V. (2012), "Psychophysical and physiological aspects of the perception of graphic information as applied to the image of the relief on the maps", *Izv. Universities. Geodesy and aerial photography*, No. 3, pp. 75-80.
9. Berlant, A. M. (2006), *Theory of geoimages*, GEOS, Moscow, 262 p.
10. Bashenina, N. V. (1967), *Formation of the modern relief of the earth's surface*, Higher school, Moscow, 388 p.
11. Berlant, A. M. (2010), *Cartography: a textbook for universities. 2nd edition, revised and enlarged,* KDU, Moscow, 238 p.
12. Vostokova, A.V., Koshel, S. M. and Ushakova, L. A. (2002), *Card design. Computer design*: Textbook for universities, Aspect Press, Moscow, 288 p.
13. Lurie, I. K. (2010), *Geoinformation mapping. Methods of geoinformatics and digital processing of space images*: Textbook for universities. 2nd ed., KDU, Moscow, 424 p.
14. Lurie, I. K. and Samsonov, T. E. (2010), "The structure and content of the spatial database for multiscale mapping", *Geodesy and Cartography*, No. 11, pp. 17-23.
15. Samsonov, T. E. (2009), "Multiscale geodatabase for electronic maps", *Spatial data*, No. 4, pp. 46-51.

Received (Надійшла) 27.08.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.10.2020

Відомості про авторів / About the Authors

Андрєєв Сергій Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна;

Sergey Andrieiev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Geoinformation Technologies and Space Monitoring of the Earth Department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovskiy "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: AndreevSM@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-4256-2637

Жилін Володимир Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна;

Volodymyr Zhilin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Geoinformation Technologies and Space Monitoring of the Earth Department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovskiy "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: v.zhilin@khai.edu; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-7342-3456

Методика построения гипсометрических картографических моделей рельефа по данным дистанционного зондирования Земли

С. М. Андреев, В. А. Жилин

Аннотация. Предметом исследования является разработка методики построения гипсометрических картографических моделей рельефа по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). **Объектом исследования** является процесс оперативной и достоверной визуализации рельефа местности по данным ДЗЗ для обеспечения правительственных, хозяйственных и природоохранных учреждений актуальными тематическими картами, отражающими текущее состояние территории государства. **Целью работы** является повышение информативности визуализации рельефа земной поверхности за счет обеспечения объемности, наглядности и читабельности картографических изображений, а также выразительности и гармоничности оформления гипсометрических карт. **Выводы.** На основании проведенного анализа методологических основ визуализации рельефа местности установлено чрезвычайную важность этого элемента содержания географических карт, ведь именно рельеф определяет характер и размещение компонентов ландшафта и тесно связан со всеми составляющими общегеографических и тематических карт. Исследованы историко-технологические аспекты картографирования рельефа, классификация методов и способов его изображения, а также основные факторы влияния на выбор методов и способов воспроизведения рельефа в зависимости от типа создаваемой карты, ее масштаба, проекции, назначения, способа использования и формы представления, а также квалификационных характеристик разработчиков картографических изображений. Определены основные требования к изображению рельефа с учетом необходимости сохранения характерного внешнего вида ландшафта, генетических различий его форм, региональных особенностей конкретных районов и, наконец, эстетической привлекательности полученных картографических моделей. Проанализированы основные свойства гипсометрических шкал для моделирования рельефа, а также современные требования к ним и принципы их построения с учетом необходимости соблюдения общей цветовой гармонии и художественности цветовой гаммы. С учетом принципов создания гипсометрических шкал разработана методика построения гипсометрических картографических моделей рельефа по данным дистанционного зондирования Земли. Методика предусматривает бесплатное получение данных радарной интерферометрической съемки SRTM и за счет их специфической обработки с использованием программного пакета ArcGIS построение гипсометрических картографических моделей рельефа в пределах 85% поверхности Земли с заданной разрешающей способностью на местности, а также с заданными разрешением и цветовой пластикой гипсометрических шкал. При этом обеспечивается необходимая достоверность, точность, оперативность и полнота трехмерного восприятия содержания географических карт рельефа интересующей местности.

Ключевые слова: геоинформационные системы; картографические модели; гипсометрические шкалы; методы и способы визуализации рельефа.

Methodology for constructing hypsometric cartographic relief models according to the Earth remote sensing data

Sergey Andrieiev, Volodymyr Zhilin

Abstract. The subject of this research is the development of a methodology for constructing hypsometric cartographic relief models based on Earth remote sensing (ERS) data. **The object of the research** is the process of operative and reliable visualization of the terrain according to remote sensing data to provide government, economic and environmental institutions with relevant thematic maps reflecting the current state of the country territory. **The objective of the work** is to increase the informativeness of the visualization of the earth's surface relief by providing the volume, clarity and readability of cartographic images, as well as the expressiveness and harmony of the design of hypsometric maps. **Conclusions.** Based on the analysis of the methodological foundations for visualization of the terrain, it has been established that this element of the geographical maps content is extremely important because it is the relief that determines the nature and location of landscape components and is closely related to all components of general geographical and thematic maps. The historical and technological aspects of relief mapping, the classification of methods and methods of its representation, as well as the main factors of influence on the choice of methodologies and methods of reproducing the relief, depending on the type of the created map, its scale, projection, purpose, method of use and form of presentation, as well as qualification characteristics of the developers of cartographic images. The basic requirements for the image of the relief are determined, taking into account the need to preserve the characteristic appearance of the landscape, the genetic differences in its forms, the regional characteristics of specific areas and, finally, the aesthetic appeal of the resulting cartographic models. The main properties of hypsometric scales for modeling the relief, as well as modern requirements for them and the principles of their construction, considering the need to comply with the general color harmony and artistry of the color range, have been analyzed. Considering the principles of creating hypsometric scales, a method for constructing hypsometric cartographic relief models based on data from remote sensing of the Earth, has been developed. The methodology provides for the free acquisition of SRTM radar interferometric survey data and, due to their specific processing using the ArcGIS software package, the construction of hypsometric cartographic relief models within 85% of the Earth's surface with a given resolution on the ground, as well as with a given resolution and color plastics of hypsometric scales. At the same time, the necessary reliability, accuracy, efficiency and completeness of three-dimensional perception of the content of geographic relief maps of the area of interest are provided.

Keywords: geographic information systems; cartographic models; hypsometric scales; methods and techniques for visualizing the relief.

UDC 004.9 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.4.03**

Azad Agalar oğlu Bayramov [1, 2], Arzuman Gardashkhan oğlu Gasanov [1]

[1] War College of Armed Forces of the Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan
[2] Control Systems Institute of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

COMPUTER MODELLING OF A VERY HEAT RESISTANT $Hf_6C_3N_2$ FOR COVER OF HYPERSONIC FLIGHT VEHICLES

Abstract. The creation of a very heat resistant cover for returnable orbiters and for hypersonic flying aircrafts is an actual problem in modern science and technics. Therefore, computer modelling and investigations molecular structure of various multicomponent compounds are important tasks. In the paper, based on the computer model the molecular structure and a very heat resistant of carbonitride hafnium $Hf_6C_3N_2$ have been investigated by using of the semiempirical quantum mechanical method PM3. Some mechanical, electrical, optical and thermodynamic parameters of this material have been researched. Debye temperature and melting temperature have been calculated. The found theoretical value of melting temperature of carbonitride hafnium $Hf_6C_3N_2$ is approximated to obtained experimental results. The block diagram of carried out investigations has been presented. The results of investigations indicate that these materials can be applied as a very heat resistant cover for hypersonic flight vehicles and returnable orbiter.

Keywords: very heat resistant cover; molecular structure; carbonitride hafnium; melting temperature; quantum mechanical method.

Introduction

It is known, that a growth of airspace industry imposes strict technical demands to flight vehicles: they must to possess a high-speed quality, abrasion-proof and oxidation-resistant, pass a high temperature test and withstand temperature up to 4000K when penetration of atmosphere and can be used many times. During penetration of atmosphere the temperature on the surface of aircraft's wings can be reach up to 2000°C and on the end of parts of wings can be reach up to 4000°C and higher. Therefore, when creation such flight vehicles it should be to solve problems to make very heat resistant materials possessing high strength properties. Possessing the melting temperature higher 4000°C such materials can be used in forebodes of aircrafts, in jet engines, in end parts of wings of aircrafts and space vehicles.

At present, in many counties there have been carried out intensive experimental and theoretical investigations solid compounds based on niobium, tantalum and carbonitride hafnium [1,2]. In particular, the much progress had been reached for the triple system of (HfC_xN_y). In accordance with recent publication [2], the scientists could obtain the $HfC_{0.5}N_{0.35}$ compound. This compound is a very closed to theoretical calculated one and has a melting temperature of ~4200°C and hardness of 21,3 GPa.

The goal of this paper is a construction of the computer model of molecular structure of carbonitride hafnium $Hf_6C_3N_2$ and by applied semiempirical method PM3 (Parametrical Model 3) to calculate the values of some mechanical, optical and thermodynamic parameters of this material.

The algorithm of carbonitride hafnium research

Let us consider the algorithm of research of the properties of carbonitride hafnium $Hf_6C_3N_2$. In the first stage, by using the free evaluate version HyperChem Professional v7.5 program the computer model of molecular structure of the carbonitride hafnium $HfC_{0.5}N_{0.35}$ triple compound is constructed. The chemical structure of the material having $HfC_{0.5}N_{0.35}$ composition is expressed formula of $Hf_6C_3N_2$.

In the second stage, as result of construction of computer model of the carbonitride hafnium $Hf_6C_3N_2$ the Cartesian coordinates of each atom are determined (see table 1). Then, based on Cartesian coordinates of the carbonitride hafnium $Hf_6C_3N_2$ by using of quantum mechanical method PM3 the energy parameters of this material are determined.

In the next stage, some mechanical and thermodynamic parameters including melting temperature of carbonitride hafnium are calculated. At last, the criterion of T_m > 4000K is checked. If this criterion is not satisfied then the composition (chemical formula) of carbonitride hafnium is corrected and then calculation process is started again.

Table 1 – **Cartesian coordinates of carbonitride hafnium $Hf_6C_3N_2$.**

Atom	Cartesian coordinates, in angstroms, Å		
	x	y	z
Hf	0.91582	-1.19132	0.88673
Hf	-1.28284	0.50067	1.03908
Hf	-0.94183	-1.13788	-1.17881
Hf	1.24649	1.87595	-3.06892
Hf	3.10415	1.82251	-1.00338
Hf	0.90548	3.51450	-0.85102
N	2.72778	3.74814	-2.48388
N	-1.41203	-1.95333	1.09177
C	0.37996	0.60694	-1.48097
C	0.19250	1.50771	-0.26172
C	1.40118	0.57756	-0.34548

Molecular structure model of Hf6C3N2. Calculation methodology

Fig. 1 shows calculated visual model of carbonitride hafnium $Hf_6C_3N_2$ having similar chemical structure as theoretical calculated $HfC_{0.5}N_{0.35}$.

© Bayramov A. A., Gasanov A. G., 2020

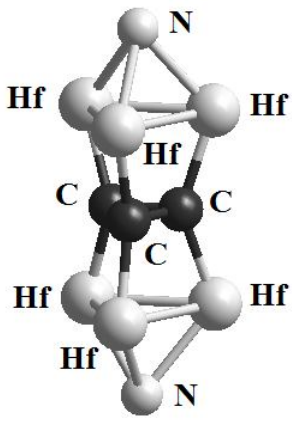


Fig. 1. Visual model of carbonitride hafnium $Hf_6C_3N_2$.

Based on the quantum mechanical method PM3, the properties of carbonitride hafnium with chemical structure $Hf_6C_3N_2$ were investigated. The state of an electron in a molecule is described by a one-electron wave function termed molecular orbital [3]. These functions are multicentered.

Thus, their description includes the electron distances from atomic nuclei. There are various options to find molecular orbitals. One of them, the method of finding molecular orbital wave function U_i, as a linear combination of atomic orbitals χ_q of the atoms composing the molecule:

$$U_i = \sum_{q=1}^{n} c_{qi} \cdot \chi_q \ . \qquad (1)$$

Here: c_{qi} are the coefficients, χ_q are atomic orbitals chosen as basic functions, n is a number of orbitals. In this study, the Gaussian functions were used as atomic orbitals [3]:

$$\chi_{nlm}(\mu, r, \theta, \phi) = r^{n-1} e^{-\mu r^2} Y_{lm}(\theta, \phi) \times \\ \times \sqrt{\left(2^{2n}(n-1)!/(2n-1)!\right) \cdot \sqrt{(2\mu)^{2n+1}/\pi}} . \qquad (2)$$

Here: μ is a parameter of variation, r, θ, φ are spherical coordinates of electron, $Y_{im}(\theta,\varphi)$ are complex spherical functions, m is a number of atom orbitals chosen as a basic functions, c_{qi} are values of unknown coefficients which are determined by solving of the below equations of molecular orbitals

$$\sum_q \left(H_{pq} - \varepsilon_i S_{pq}\right) c_{qi} = 0 \qquad (3)$$

or

$$\begin{cases} (H_{11} - \varepsilon S_{11}) c_1 + \ldots + (H_{1m} - \varepsilon S_{1m}) c_m = 0; \\ (H_{21} - \varepsilon S_{21}) c_1 + \ldots + (H_{2m} - \varepsilon S_{2m}) c_m = 0; \\ ---------- \\ (H_{m1} - \varepsilon S_{m1}) c_1 + \ldots + (H_{mm} - \varepsilon S_{mm}) c_m = 0. \end{cases}$$

Here: H_{pq} are the matrix elements of Hamiltonian for an electron moving in a certain effective field of the molecule irrespective of other electrons, they are calculated in the Wolfsberg-Helmholtz approximation [3], S_{pq} are overlapping integrals of atomic orbitals χp and χq, they are calculated based on the Gaussian functions.

(3) equations are linear homogeneous equations concerning c_{qi}. In order that these equations have non-zero solutions, based on the coefficients of unknown quantities the constructed determinant must equal 0. That is,

$$\begin{vmatrix} H_{11} - \varepsilon S_{11} & H_{12} - \varepsilon S_{12} \ldots H_{1m} - \varepsilon S_{1m} \\ H_{21} - \varepsilon S_{21} & H_{22} - \varepsilon S_{22} \ldots H_{2m} - \varepsilon S_{2m} \\ ---------- \\ H_{m1} - \varepsilon S_{m1} & H_{m2} - \varepsilon S_{m2} \ldots H_{mm} - \varepsilon S_{mm} \end{vmatrix} = 0 .$$

When this determinant is opened then m degree of equation has been obtained relatively ε quantity:

$$\varepsilon^m + a_1 \varepsilon^{m-1} + a_2 \varepsilon^{m-2} + \ldots + a_0 = 0 . \qquad (4)$$

In (4) a_0, a_1, etc. quantities are determined by using S_{pq} and H_{pq} matrix elements. By solving (4) equation, m number $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \ldots, \varepsilon_m$ roots are obtained. These roots are molecule orbital energies.

By including each ε_m in (3) equations' system, unknown c_{qi} coefficients are determined. By using ε_1 root determined the coefficients define I-st molecular orbital, by using ε_2 root determined the coefficients define II-nd molecular orbital, etc.

Calculation of energy, mechanic and thermodynamic parameters

For each object, electrons are adjusted by two on energy levels starting from lowest level.

ε_{HOMO} and ε_{LUMO} have been determined as top-most molecular orbit's energy and lowest empty molecular orbit's energy, respectively, trapped by electrons.

Ionization potential $I_p = -\varepsilon_{LUMO}$ has been calculated by using band gap $E_g = \varepsilon_{LUMO} - \varepsilon_{HOMO}$ and strength $\eta = E_g/2$.

The wavelength of radiated photon of this material is calculated by formula

$$\lambda = \left(c \cdot h / \left(1{,}6 \cdot E_g\right)\right) \cdot 10^{28} \ nm .$$

Here: h is Planck constant; c is the speed of light in vacuum. When λ is calculated then the values of E_g in eV are used. It is considered that when $\eta < 1$ eV the material is soft and when $\eta > 1$ eV one is solid.

The stability of material is calculated by next formula

$$\Delta E = E - \sum_A E_A .$$

Here: E is the total energy of the system, E_A is total energy of A atom in the system and ΔE is a parameter characterizing the stability of system. It is considered that when $\Delta E > 0$ the material is unstable and when $\Delta E < 0$ one is stable.

Table 1 shows calculated energy parameters of carbonitride hafnium $Hf_6C_3N_2$ based on the semiempirical quantum mechanical method PM3.

Table 1 – **Energy parameters of carbonitride hafnium $Hf_6C_3N_2$**

ε_{HOMO}, eV	ε_{LUMO}, eV	Total energy, E (amu.)	Stability parameter ΔE (amu.)	Ionization potential, I_p (eV)	Band gap, E_g (eV)	Strength parameter η (eV)	Wave length of emitted photon, λ (nm)
-6,89	-2,30	-48,42	-4,48	6,89	4,59	2,30	271

Based on these calculated parameters, some properties of carbonitride hafnium $Hf_6C_3N_2$ can be analyzed.

If binding energy E_b of carbonitride hafnium $Hf_6C_3N_2$, cross-section area S and inter atoms bonding r are known the Young modulus can be calculated:

$$Y = F/S = E_b/(r \cdot S), \quad F \approx E_b/r \tag{4}$$

If the Young modulus is known, then a rigidity parameter k, a modulus of deformation σ, a shear modulus G, a bulk elasticity modulus K, and a hardness modulus HN [3] can be calculated [3]:

$$k \approx Y \cdot S/D, \quad \sigma = Y \cdot r/D, \quad G = Y/(2(1+\nu)),$$
$$K = Y/(3(1-2\nu)), \quad HN = G \cdot A \cdot e^{-B \cdot T}. \tag{5}$$

Here: ν is the Poisson ratio, A = 0.83699, B = = $2.204 \cdot 10^{-3}$ K^{-1}, T = 300 K. Based on data presented in tables 1 and 2, some mechanical parameters of carbonitride hafnium $Hf_6C_3N_2$ have been calculated (table 3). The calculation of Debye temperature is important stage because if the values of mechanical parameters and Debye temperature are known then the melting temperature of material can be determined.

Table 2 – **Some data of sample of carbonitride hafnium $Hf_6C_3N_2$**

The sample size, D (nm)	Inter atoms bonding, r (nm)	Cross-section area, S (m^2)	binding energy, E_b (amu)	Material breaking force, F (N)	Poisson ratio
0.79	0.22	$5 \cdot 10^{-19}$	3.37	$6.546 \cdot 10^{-8}$	0.348

Table 3 – **Calculated mechanical parameters of carbonitride hafnium $Hf_6C_3N_2$**

Rigidity parameter, N/m	Modulus of deformation, (GPa)	Shear modulus, (GPa)	Bulk elasticity modulus, (GPa)	Young modulus, (GPa)	Hardness modulus, (GPa)
82.651415	37.63	49.3	145.3	132.9	21.3

Let us use below formula for calculation of Debye temperature [5]:

$$\theta_D = \frac{h}{k_B} \cdot \left[\frac{3n}{4\pi} \left(\frac{N_A \rho}{M} \right) \right]^{1/3} V_m. \tag{6}$$

Here: h is the Planck constant, k_B is the Boltzmann constant, n is a number of atoms, ρ is a mass density, M is a molar mass, V_m is an average velocity of sound in given material. An average velocity of sound can be determined from formula [6]:

$$V_m = \left[\left(2/V_t^3 + 1/V_l^3 \right) / 3 \right]^{-1/3}. \tag{7}$$

Here: V_t and V_t are transverse and longitudinal velocities of elastic wave in the material, respectively:

$$V_t = \sqrt{G/\rho}, \quad V_l = \sqrt{(3K + 4G)/(3\rho)}. \tag{8}$$

If the Debye temperature is known then a temperature of melting is determined by below formula [6]:

$$T_m = 2\pi M C a^2 \theta_D^2 k_B / h^2, \tag{9}$$

Here: C = 0.050 is the constant found from experiment [2]. By using of (6)-(9) the Debye temperature and melting temperature are calculated for carbonitride hafnium $Hf_6C_3N_2$, respectively: θ_D = 304K и T_m = = 4414K (4141°C).

Fig. 2 shows the block diagram of the above-described algorithm of computer modelling and investigation of properties of the carbonitride hafnium $Hf_6C_3N_2$. More detailed this algorithm is described in above part.

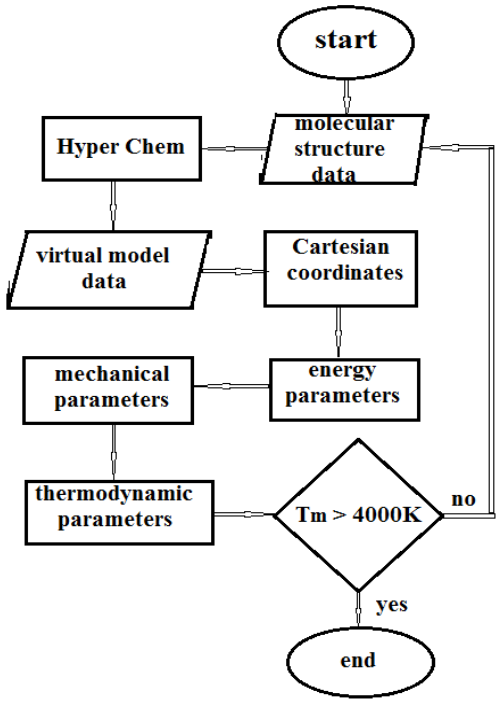


Fig. 2. The block diagram of the investigation algorithm of carbonitride hafnium $Hf_6C_3N_2$.

Conclusion

By using of the semiempirical quantum mechanical method PM3 the electronic structure of carbonitride hafnium $Hf_6C_3N_2$ have been investigated. Based on the constructed visual computer model, orbital energy, ionization potential, total energy of electrons, also, some mechanical, electrical, optical and

thermodynamic parameters have been calculated. Obtained results shows that given material is stable and possess super high melting temperature T_m = 4141°C. This material can be applied for very heat resistant cover for hypersonic flight vehicles and returnable orbiter. The found theoretical value of melting temperature of carbonitride hafnium $Hf_6C_3N_2$ is approximated to obtained experimental results.

References

1. Córdoba, J.M., Sayagués, M.J., Alcalá, M.D. and Gotor, F.J. (2007), "Monophasic Nanostructured Powders of Niobium, Tantalum, and Hafnium Carbonitrides Synthesized by a Mechanically Induced Self Propagating Reaction", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 90, pp. 381–387, DOI: https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01395.x
2. Buinevich, V.S., Nepapushev, A.A., Moskovskikh, D.O., Trusov, G.V., Kuskov, K.V., Vadchenko, S.G. and Rogachev, A.S. (2020), "Fabrication of ultra-high-temperature nonstoichiometric hafnium carbonitride via combustion synthesis and spark plasma sintering", *Ceramics Int.*, Vol. 46, No. 10, pp. 16068-16073, DOI: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.158
3. Gasanov, A.G. and Bairamov, A.A. (2019), "Simulation of the Electronic Structure of Graphene-Polyvinylidene Fluoride Composite Material", *Physics of the Solid State*, Vol. 61, No. 1, pp. 56–61.
4. Blatov, V.A., Shevchenko, A.P. and Peresipkina, E.V. (2005), *Semiempirical calculated method of quantum chemistry*, Univers-group, Samara, 2005, 32 p.
5. Dan, Guo, Guoxin, Xie and Jianbin Luo (2014), *J. Phys. D: Appl. Phys*, 47 013001, 25 p.
6. Chernyaeva, T.P., Grishina, V.M., Michaylov, E.A. and Ostapov, A.V. (2009), *The problems of atomic science and Technology*, No. 4-2. Radiation damage physics and radiation material science (94), pp. 206-217.

Received (Надійшла) 21.08.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 07.10.2020

About the authors / Відомості про авторів

Байрамов Азад Агалар огли– доктор фізико-математичних наук, професор, професор-консультант, Військова Академія Збройних Сил Азербайджанської Республіки, Інститут систем управління Азербайджанської НАН, Баку, Азербайджан;
Azad Agalar oğlu Bayramov – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, National War College of Armed Forces of the Azerbaijan Republic; Control Systems Institute of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan;
e-mail: azad.bayramov@yahoo.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6672-2338

Гасанов Арзуман Гардашхан огли – кандидат фізико-математичних наук, доцент, професор-консультант, Військова Академія Збройних Сил Азербайджанської Республіки, Баку, Азербайджан,
Arzuman Gardashkhan oğlu Gasanov – Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, National War College of Armed Forces of the Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan;
e-mail: gasanovarzuman@mail.ru; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-3642-1689

Комп'ютерне моделювання понаджароміцних властивостей $Hf_6C_3N_2$ для захисних покриттів гіперзвукових літальних апаратів

А. А. Байрамов, А. Г. Гасанов

Анотація. Створення понаджароміцних покриттів для космічних кораблів, які повернуться на Землю, а також для літальних апаратів, що рухаються в атмосфері з гіперзвуковими швидкостями, є актуальною проблемою сучасної науки і техніки. Тому для створення таких матеріалів важливим завданням є дослідження і комп'ютерне моделювання молекулярної структури різних багатокомпонентних сполук. У даній статті, на основі побудованої комп'ютерної моделі молекулярної структури матеріалу карбонітриду гафнію з хімічною формулою $Hf_6C_3N_2$, застосувавши напівемпіричний квантовомеханічний метод PM3, обчислений ряд значень механічних, електричних, оптичних і термодинамічних параметрів цього матеріалу. Обчислені температура Дебая і температура плавлення матеріалу. Знайдені теоретичні значення температури плавлення збігаються з раніше визначеними з експериментів. Результати досліджень показують, що ці матеріали можна використовувати в якості жароміцного покриття при створенні гіперзвукових літальних апаратів, а також космічних апаратів, що повертаються на Землю.

Ключові слова: понаджароміцне покриття; молекулярна структура; карбонітрид гафнію; температура плавлення; квантово-механічний метод.

Компьютерное моделирование сверхжаропрочных свойств $Hf_6C_3N_2$ для защитных покрытий гиперзвуковых летательных аппаратов

А. А. Байрамов, А. Г. Гасанов

Аннотация. Создание сверхжаропрочных покрытий для космических кораблей, возвращаемых на Землю, а также для летательных аппаратов, движущихся в атмосфере с гиперзвуковыми скоростями, является актуальной проблемой современной науки и техники. Поэтому, для создания таких материалов важной задачей является исследование и компьютерное моделирование молекулярной структуры различных многокомпонентных соединений. В данной статье, на основе построенной компьютерной модели молекулярной структуры материала карбонитрида гафния с химической формулой $Hf_6C_3N_2$, применив полуэмпирический квантовомеханический метод PM3, вычислен ряд значений механических, электрических, оптических и термодинамических параметров этого материала. Вычислены температура Дебая и температура плавления материала. Найденные теоретические значения температуры плавления совпадают с ранее определенными из экспериментов. Результаты исследований показывают, что эти материалы можно использовать в качестве жаропрочного покрытия при создании гиперзвуковых летательных аппаратов, а также космических аппаратов, возвращаемых на Землю.

Ключевые слова: сверхжаропрочное покрытие; молекулярная структура; карбонитрид гафния; температура плавления; квантовомеханический метод.

UDC 004.9 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.4.04**

Mykhailo Mozhaiev

Hon. Prof. M.S. Bokarius Kharkiv Research Institute of Forensic Examinations, Kharkiv, Ukraine

MODELING NONLINEAR ELEMENTS OF CRITICAL COMPUTER NETWORK

Abstract. The subject of research discussed in the paper is indicators of a critical network performance. **The research target** is a model of nonlinear elements of a critical network. **The research objective** is creation of a model for nonlinear elements of computer network (CN) telecommunications facilities of a critical system providing the desired parameters of QoS. The paper fulfills the following tasks: analysis of the main factors causing impaired service quality in CN; creation of a model for a small nonlinearity impact on forming free oscillations by generating a relevant motion equation; analysis of oscillator free motion presented in the form of the Duffing equation; working out a general integral of the Duffing equation as applied to a stiff system. The research methods used are: the foundations of the theory of computer systems and networks and the nonlinear differential equations theory. The results obtained are as follows: the main factors presumably causing impaired network services of forensic systems are analyzed; it was found that one of the main causes is the telecommunications component of CN, which possesses a number of critical parameters, including lack of stability and robustness of data signal frequency; numerical simulation of the findings was performed. Conclusions: a formula was devised to define the relationship between the free oscillation frequency and the oscillation system energy with reference to nonlinearity which takes into account the parameters of the oscillation system initial state at startup; nonlinearity of the oscillation system of a self-oscillator has a significant impact on accuracy and stability of its output oscillation frequencies; it was determined that for equivalent nonlinearity parameter values $k>0.1$ there is a considerable mismatch between the reference signal and the actual signal transmitted in the network, which can cause a large deterioration of QoS; further research should be aimed at development of hardware-software tools making it possible to reduce the impact of small nonlinearities of telecommunications equipment elements of critical networks on quality of performance.

Keywords: critical networks; nonlinearity of oscillation system; equivalent nonlinearity parameter; telecommunications component of computer network; signal frequency stability and robustness.

Introduction

Computer systems and computer networks (CN) in the modern world are becoming crucial for the performance of management and decision-making systems in various spheres of human life. To a large extent, this also applies to critical systems for which there are stricter requirements for quality, reliability, integrity and rate of data transmission. These systems include a forensic system titled "Automated system for the accumulation of empirical data on the practice of computer-technical expert examinations" that was developed by the specialists from Department of Computer Engineering, Telecommunications, Video- and Audio-recording Research of Hon. Prof. M.S. Bokarius Kharkiv Research Institute of Forensic Examinations [1].

Review of literature. A significant number of works have been devoted to the problem of providing the required parameters of service quality (QoS) [2-19]. They identified the main factors causing a decrease in the quality of service in CN. The factors can be divided into several groups:

– factors determined by CN structure and architecture;

– factors determined by the strategy of control and redistribution of the CN computational power;

– factors determined by properties and parameters of telecommunications facilities of CN.

Each of these factors has been explored in numerous research works, but the present paper focuses on the last-named factor. The properties of telecommunications facilities play an important role in ensuring compliance between the required QoS indicators and those actually realized in modern computer systems. One of the main parameters affecting the quality of service is the stability and robustness of the frequency of a signal over which data is transmitted. In [1, 21], methods and techniques for improvement of the accuracy of carrier frequency measurement in computer networks, reducing the jitter effect and increasing synchronization in communication channels, are analyzed. However, the studies were conducted without taking into account the nonlinear properties of either the signal source or the propagation medium. In reality, everything is much more complicated, because there is a need to consider the small nonlinearity of the elements of telecommunications facilities of CN.

The paper objective is creation of a model for nonlinear elements of computer network (CN) telecommunications facilities of a critical system providing the desired parameters of QoS. To solve this problem, a number of specific problems are to be solved:

1. To create a model of small nonlinearity impact on the formation of free oscillations by composing an appropriate motion equation
2. To analyze the free oscillator motion having the form of the Duffing equation
3. Construct a general integral of the Duffing equation as applied to a stiff system

Basic relationships and formulations

1. To solve the outlined problem, let us evaluate the impact of small nonlinearity on the process of forming free oscillations of a resonant oscillation system of an individual quartz generator. The free motion equation for a conservative nonlinear oscillator has the form:

$$z + f(x) = 0, \quad (1)$$

where $f(x)$ is the restoring force in dimensionless form.

© Mozhaiev M.O., 2020

The cross travel of the bar supporting a weightless flexible coating is described using the function:

$$f(x) = x + x^3,\ \lambda > 0. \quad (2)$$

Free oscillations in a non-damped electric circuit of nonlinear capacitance are described (4.2) using magnetic ferrielectric. Parameter λ is called K-rating factor. Equation (1) with the restoring force (2), where $\lambda>0$ or $\lambda<0$, is commonly referred to as the Duffing equation. In case of a simple pendulum making planar motion, function $f(x)$ equals:

$$f(x) = \sin(x) = x - \frac{x^3}{6} + \frac{x^5}{120} - ... \quad (3)$$

A mass oscillating in a direction orthogonal to the direction of the stretched spring axis gives the restoring force of the following form:

$$f(x) = x\left(1 + \beta - \beta\Big/\sqrt{1+x^2}\right),\quad \beta > 0. \quad (4)$$

In (2) and (4), the restoring force corresponds to a stiff (hard) system; while in (3) – to a non-stiff system.

2. Consider the free motion of an oscillator in the form of the Duffing equation:

$$\ddot{x} + x + \lambda x^3 = 0. \quad (5)$$

Equation (5) permits reduction of order. Suppose:

$$\dot{x} = v,\ v = v(x),$$

then

$$\ddot{x} = \dot{v} = \frac{dv}{dx}\cdot\frac{dx}{dt} = V\frac{dv}{dx}. \quad (6)$$

Consequently, equation (5) becomes:

$$v\frac{dv}{dx} + x + \lambda x^3 = 0. \quad (7)$$

Separating the variables, we get:

$$vdv + (x + \lambda x^3)dx = 0,$$

By integrating the last equation, we find:

$$v^2\big/2 + \Pi(x) = C_0,\quad C_0 = Const, \quad (8)$$

where $\Pi(x)$ is potential energy,

$$\Pi(x) = x^2\big/2 + \lambda x^4\big/4. \quad (9)$$

Constant C_0 is derived from the initial conditions:

$$v(x\ ) = v_0,\ x(0) = x_0. \quad (10)$$

The value of C_0 equals:

$$C_0 = v_0^2\big/2 + \Pi(x_0). \quad (11)$$

We deduce v from equation (8):

$$v(x\ ) = \pm\sqrt{2C_0 - \Pi(x_0)}. \quad (12)$$

In the plane (x,v), the phase trajectory consists of two branches. Let us consider the case of $\lambda=0$. The phase trajectory of a linear oscillator is a circle.

Let us assume that $\lambda > 0$ (a stiff system).

Constant $C_0 > 0$ for any values of v_0, x_0 in the initial conditions (10). The graphic plotting shows that the phase trajectory is closed i.e. solution (5) satisfies the initial conditions (8) and is periodic. Constant C_0 is determined by expression: $C_0 = v^2(0)\big/2$, where $v(0)$ is the value of velocity corresponding to the value of $x=0$.

From (11) it is seen that (for the same values of v_0, x_0) an increment of the nonlinearity parameter λ leads to an increase in velocity $v(0)$. The point of intersection of the phase trajectory and the x axis is found from equation $\Pi(\pm x_1) = C_0$, where

$$x_1 = 2\sqrt{C_0\Big/\left(1+\sqrt{1+4\lambda C}\right)},\quad \lim_{\lambda\to 0} x_1 = x_0. \quad (13)$$

The limit values of x_1 correspond to a very stiff nonlinear system. In a very stiff nonlinear system ($x_0 = const$), there is a phase trajectory stretching along the v-axis. The condition $x_0 \neq 0$ is essential. Consider the case of $\lambda < 0$ (non-stiff system). Constant C_0, given by formula (11), has two upper maximums, corresponding to values of $x_0 = \pm x_2$, where x_2 equals:

$$x_2 = \sqrt{-\ell_0/\lambda},\quad \lambda < 0. \quad (14)$$

The value of the maximum $C_0(x_0)$ is equal to:

$$\max C_0(x_0) = v_0^2\big/2 - 1\big/(4\lambda),\quad \lambda > 0. \quad (15)$$

Potential energy $\Pi(x)$, according to (4.9), has two upper maximums corresponding to values of $x_0 = \pm x_2$, where x_2 is found from (14)

$$\max \Pi(x) = -1\big/(4\lambda) = 1\big/(4|\lambda|) = C^* > 0. \quad (16)$$

As can be seen from (15) and (16), there are values of C_0 which satisfy inequality $C_0 > C^*$. Let us define more precisely the range of initial values v_0, x_0 which meet the indicated inequality. We will fix the values of x_0 and define the range of values v_0^2 as an inequality:

$$v_0^2 > \left(1/|\lambda| + |\lambda|x_0^4\right)\Big/2 - x_0^2. \quad (17)$$

In (17) inequality $C_0 > C^*$ is satisfied.

Theorem. When meeting the initial conditions, satisfying inequality (18), the motion, described by the Cauchy problem for the Duffing equation which corresponds to a non-stiff system, is unlimited.

Proof. Consider the right side of (12). It is determined for any x and is an increasing function for $x \to \pm\infty$. *The theorem is proved.*

We will specify the description of the trajectory in the phase plane for satisfied (18). Let us denote the right side of the inequality (18).

$$v_1^2(x_0,\lambda) > \left(|\lambda|x_0^4 - 2x_0^2 + 1/|\lambda|\right)\Big/2. \quad (18)$$

It is not hard to prove that

$$v_1^2(x_0,\lambda) > 0,\quad x_0^2 \neq 1/|\lambda|,$$

$$v_1^2(\pm x_2,\lambda) > 0,\quad x_2 = \sqrt{1/|\lambda|}.$$

Hence, phase trajectories, satisfying inequality (17), do not cross axis X. Consider the phase trajectories of a non-stiff system, which cross X-axis. Let constant C_0 satisfy inequality $C_0 < C^*$. As a result we get:

$$v_0^2 < v_1^2(x_0, \lambda),$$

where $v_1^2(x_0, \lambda)$ is determined in (18).

Therefore, we have an inequality that is opposite to the inequality in (17). The initial conditions in (10) are set at any arbitrary time, thus it is more convenient to set the conditions at the time of crossing the phase trajectory of X-axis.

$$v(x_0) = 0,\ x(0) = x_0 \tag{19}$$

We apply (19) to (12), taking into account $C_0 < C^*$:

$$C_0 = \Pi(x), \quad x^2/2 - |\lambda| x_0^4/4 < 1/(4|\lambda|),$$

that is $v_1^2(x_0, \lambda) > 0$.

From this we derive two initial conditions:

$$v(x_0) = 0,\ x(0) = x_0 \quad 0 < |x_0| < 1/\sqrt{|\lambda|} \tag{20}$$

$$v(x_0) = 0,\ x(0) = x_0 \quad |x_0| > 1/\sqrt{|\lambda|} \tag{21}$$

When the initial conditions (20) are met, the motion is periodic, and phase trajectories are closed lines which surround the origin of coordinates. When the initial conditions (21) are met, the solution of the Duffing equation is unbounded. We will consider the trajectories of periodic motion in more detail. According to (20), we set

$$|x_0| > 1/\sqrt{|\lambda|}, \quad 0 < \varepsilon < 1. \tag{22}$$

From (20) and (11), we find C_0. From (12) we define $\sqrt{v(x)}$. As a result, we have a phase trajectory formula:

$$\begin{gathered} |v(x)| = \sqrt{(\varepsilon/|\lambda|)\cdot(1-\varepsilon/2) - x^2 + x^4|\lambda|/2}, \\ |x| \le |x_0|, \quad 0 < \varepsilon < 1. \end{gathered} \tag{23}$$

We will use (23) to calculate the ratio

$$|v(0)/x_0| = \sqrt{1-\varepsilon/2}, \quad 0 < \varepsilon < 1. \tag{24}$$

It follows from (24) that the phase trajectories of the periodic motion of a non-stiff system are stretched along the *X*-axis. Therein lies the qualitative difference between the phase trajectories of periodic motions of non-stiff and stiff nonlinear systems. Formulas (23) allow estimating velocity at any point of the phase trajectory explicitly under a certain initial deviation of the system, described in (20) and (22). The equation of phase trajectory (12) in implicit form is written as $F(x, v) = 0$, where *F* equals:

$$F(x, v) = v^2 - 2C_0 + x^2 + \lambda x^4/2.$$

The special points have coordinates (0,0), ($-x^2$, 0), (x^2, 0), where $x_2 = \sqrt{-1/\lambda}$. The slope of the tangent line $k = v'$, is found from the equation $A + 2Bk + Ck^2 = 0$, where *A, B, C* are values of derivatives

$$\frac{d^2F}{dx^2}, \quad \frac{d^2F}{dxdv}, \quad \frac{d^2F}{dv^2}$$

at points. Let us find the derivative of order two:

$$\frac{d^2F}{dx^2} = 2 + 6\lambda x^2, \quad \frac{d^2F}{dxdv} = 0, \quad \frac{d^2F}{dv^2} = 2.$$

A quadratic discriminant with respect to *K* has the form:

$$B^2 - AC = -2\left(2 + 6\lambda x^2\right) < 0.$$

Therefore, the special points are such that they have no tangent. These points are called isolated. In the small neighborhood of isolated points, the restoring force displays different behavior. We will analyze the restoring force by power series summation. Keeping the first term of the power series, we deduce:

$$(0,0), \quad f(x) \approx x; \quad (-x^2, 0), \quad f(x) \approx -2(x + x_2);$$
$$(x^2, 0), \quad f(x) \approx -2(x - x_2).$$

It is seen from the formula that in point (0,0) the restoring force is directed towards equilibrium. In the rest of the points, the restoring force turns into the repulsive one.

3. Let us create a complete integral of the Duffing equation as applied to a stiff system:

$$\ddot{x} + x + \lambda x^3 = 0, \quad \lambda > 0 \tag{25}$$

Solution (25) is found in the form of an elliptic cosine

$$x = acn(u, k), \quad u = \sigma t, \tag{26}$$

where *a, σ, k* are unknown invariables.

We will use the known ratios from the theory of elliptic functions

$$\begin{gathered} (cnu)' = -snudu; \quad (snu)' = snu \cdot dnu; \\ (dnu)' = -k^2 snu \cdot cnu. \end{gathered} \tag{27}$$

Let us find the derivatives of (26)

$$\begin{gathered} \dot{x} = -a\sigma snudu; \quad \ddot{x} = (cnu \cdot dn^2u - k^2 sn^2 ucnu) \times \\ \times\left(-a\sigma^2\right) = -x\sigma^2(dn^2u - k^2 sn^2 u). \end{gathered} \tag{28}$$

(28) is transformed, using other ratios from the theory of elliptic functions:

$$\begin{gathered} sn^2u = 1 - cn^2u; \\ dn^2u = 1 - k^2 sn^2 u = 1 - k^2 + cn^2 u. \end{gathered} \tag{29}$$

We get

$$\ddot{x} = -x\sigma^2\left[\left(1-k^2\right) + k^2 cn^2 u - k^2\left(1 - cn^2 y\right)\right] =$$
$$= x\sigma^2\left[\left(1-k^2\right) + x^2 \cdot 2k^2/a^2\right],$$

that is $$\ddot{x} + \sigma^2\left(1-k^2\right)x + \left(2k^2\sigma^2/a^2\right)\cdot x^3. \tag{30}$$

From (26) and (30), two equations are derived

$$\sigma^2\left(1-k^2\right) = 1, \quad 2k^2\sigma^2/a^2 = \lambda. \tag{31}$$

Equation (31) includes three unknowns; therefore we will consider the initial conditions:

$$x(0) = x_0, \quad \dot{x}(0) = 0. \tag{32}$$

Satisfy the initial conditions, taking into account that cn(0, k) =1, sn(0, k)=0. We find that $a = x_0$, i.e. it

equals the shift at the initial instant. By condition λ> 0; that is why in (31) the values of k satisfy inequality

$$0 \le k \le 1/\sqrt{2}. \quad (33)$$

Consequently, we have a complete integral of the Duffing equation (a stiff system) in the form:

$$x = x_0 cn(\sigma t, k), \quad (34)$$

where $$\sigma = \sqrt{\frac{1}{\left(1-2k^2\right)}}, \quad \lambda = \frac{2k^2}{x_0^2\left(1-2k^2\right)}. \quad (35)$$

The values of k (equivalent parameter of nonlinearity) in (33) correspond to the interval of nonlinearity parameter λ, ranging from zero to infinity.

Research results

Fig. 1 presents the calculated data for the impact of nonlinearity of network equipment elements on the stability of the frequency of information transmission in the network. This graph demonstrates to what extent the stability of master generator signal varies as the parameter k changes.

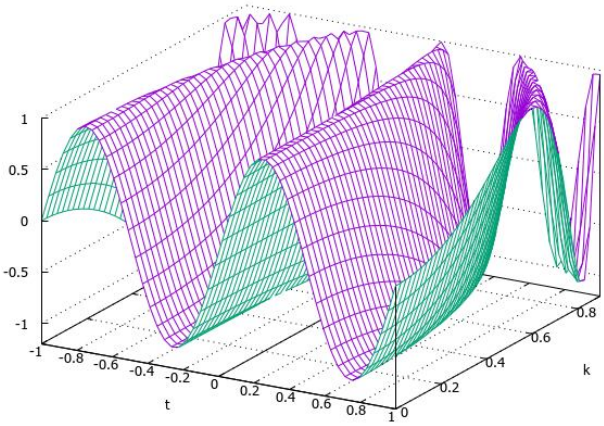


Fig. 1. Dependence of the signal variation coordinate on the equivalent parameter of nonlinearity k

For better illustration, Fig. 2-4 present the differences between the propagating signal and the standard harmonic signal for different ranges of the equivalent parameter of nonlinearity. Fig. 2-4 are presented in such a way that they cover the entire range of variation of the equivalent parameter of nonlinearity k.

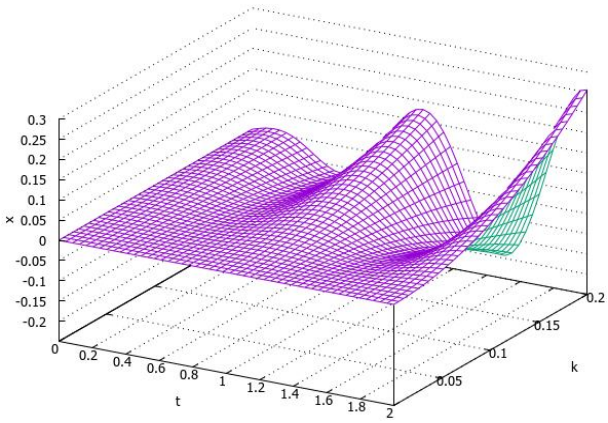


Fig. 2. The difference between the propagating signal and the standard harmonic signal for *0<k<0.2*

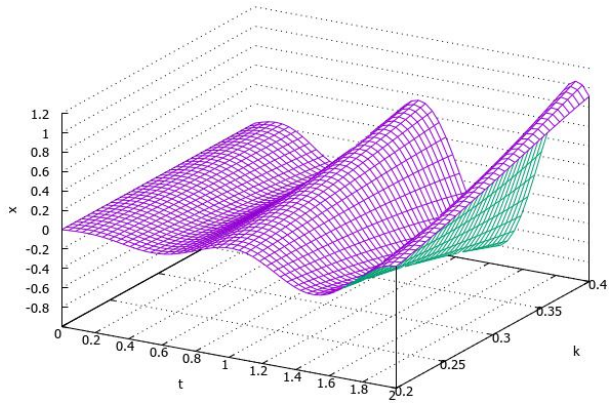


Fig. 3. The difference between the propagating signal and the standard harmonic signal for *0.2<k<0.4*

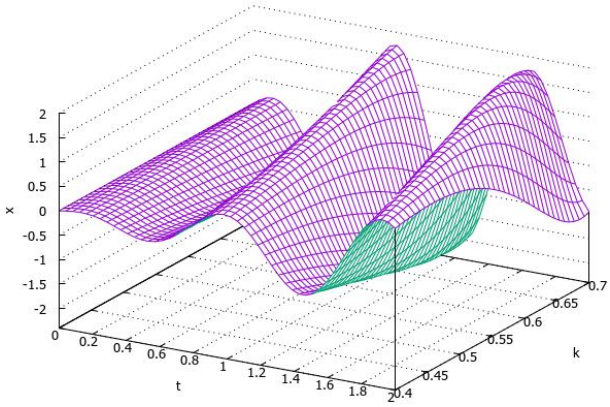


Fig. 4. The difference between the propagating signal and the standard harmonic signal for *0.4<k<0.7*

For small values of parameter k within the range *0<k<0.01* (Fig. 2), oscillations of the system are harmonic or very close to them. The stability of oscillation frequency is $\delta\omega \sim 2\cdot 10^{-8}\omega$. However, for the value *k=0.25*, the frequency stability deteriorates considerably to $\delta\omega \sim 5\cdot 10^{-6}\omega$. Such frequency fluctuations are large enough to impair the quality of CN functioning. Yet, with further increase in the value of parameter k, considerable mismatch of harmonic process is observed. Thus, as a result of numerical simulation of an oscillation process in the data transmission channels of CN, it has been established that even a slight nonlinearity can lead to significant changes in the frequency of a signal transmitted in the network, which in turn causes a severe loss of information or longer time required for a reliable transmission.

Conclusions

The paper conducts analysis of the main factors which can be regarded as the cause of the degrading quality of service of computer forensic networks. It has been established that one of the main causes is the telecommunications component of CN, which has a number of critical parameters, including lack of stability and robustness of data transmission signal frequency.

The paper studies the impact of small nonlinearity of telecommunications equipment elements (generators, multiplexing units and transmission medium) on the functioning of the relevant datalinks.

According to the results of the study, the following conclusions can be made:

1. A formula for a relationship between free oscillations frequency and oscillation system energy with regard to nonlinearity is developed, which makes it possible to take into account the parameters of the initial conditions of an oscillation system at start.

2. The nonlinearity of the oscillatory system of a self-excited generator impacts considerably the accuracy and stability of its output oscillations frequency.

3. As a result of numerical simulation, it has been established that for small values of parameter *k* within the range *0<k<0.01*system oscillations (Fig.2) are harmonic or nearly harmonic. Oscillations frequency stability $\delta\omega \sim 2\cdot 10^{-8}\omega$. But when reaching the value of *k=0.25,* frequency stability deteriorates considerably to $\delta\omega \sim 5\cdot 10^{-6}\omega$. Such frequency fluctuations are large enough to impair the quality of CN functioning. Yet, with further increase in the value of parameter k, considerable mismatch of harmonic process is observed.

4. It has been established that even a slight nonlinearity is able to cause significant changes in transmitted signal frequency, which in turn leads to substantial losses of information or increase in time required for a reliable transmission.

Further research should be directed towards the development of software and hardware tools that allow reducing the impact of small nonlinearities of telecommunications equipment elements of critical computer networks on their performance.

References

1. Mozhaiev, M., Melashchenko, O., Roh, V. Usatenko M. (2020), "Means for improving the quality of service of the computer network of the forensic information system", *Innovate Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (12), P. 57-65. DOI: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.12.057
2. Merlac, V., Smatkov, S., Kuchuk, N., Nechausov, A. (2018), "Resources Distribution Method of University e-learning on the Hypercovergent platform", *Conf. Proc. of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Service and Technologies, DESSERT'2018. Ukraine, Kyiv, May 24-27, 2018*, P. 136–140. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409114
3. Kuchuk, N., Artiukh, R. and Nechausov, A. (2017), "Method of building the semantic network of distributed search in e-learning", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (2), P. 62–69. DOI: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.2.062
4. Kuchuk, G. (2007), "Traffic management of multiservice distributed telecommunications network" ["Upravlinnya trafikom mul□tyservisnoyi rozpodilenoyi telekomunikatsiynoyi merezhi"], *Control, navigation and communication systems*, Kyiv: TsNII NiU,Issue 2, P. 18–27.
5. Svyrydov, A., Kovalenko, A., Kuchuk, H. (2018), "The pass-through capacity redevelopment method of net critical section based on improvement on/off models of traffic", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 2, P. 139–144. DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24
6. Kuchuk, G., Ruban, I., Davikoza, O. (2013), "Conceptual approach to synthesis of information and telecommunications network structure" ["Kontseptual□nyy pidkhid do syntezu struktury informatsiyno-telekomunikatsiynoyi merezhi"], *Systems of information processing: collection of scientific works*, No. 7 (114), P. 106–112.
7. Lemeshko, O., Yevdokymenko, M., Yeremenko, O. (2019), "Model of data traffic QoS fast rerouting in infocommunications networks", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (9), P. 127–134. DOI: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.9.127
8. Kosenko, V. (2017), "Mathematical model of optimal distribution of applied problems of safety-critical systems over the nodes of the information and telecommunications network", *Advanced Information Systems*, Vol. 1, No. 2, P. 4–9. DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.01
9. Kovalenko A., Kuchuk G. (2018), "Methods of synthesis of information and the technical structure of structural systems governs a critical situation" ["Metody sinteza informacii i tekhnicheskoj struktury strukturnyh sistem upravlyaet kriticheskoj situaciej"], *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 1. P. 22-27. DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04
10. Zykov, I., Kuchuk, N., Shmatkov, S. (2018), "Architecture synthesis of the computer system of transaction control e-learning", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 3, P. 60–66. DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.3.10
11. Gelenbe, E., Pujolle, G. (2010), *Analysis and synthesis of computer systems (2nd Edition), Advances in Computer Science and Engineering*: Texts, Vol. 4, 309 p.
12. Kuchuk, G., Kovalenko, A., Lukov-Chuiko, N. (2017), "A method for minimizing the average packet delay in virtual cloud support network connections" ["Metod minimizatsiyi seredn□oyi zatrymky paketiv u virtual□nykh z□yednannyakh merezhi pidtrymky khmarnoho servisu"], *Control, navigation and communication systems*, No. 2 (42), P. 117–120.
13. Kuchuk, G., Kharchenko, V., Kovalenko, A., Ruchkov, E. (2016), "Approaches to selection of combinatorial algorithm for optimization in network traffic control of safety-critical systems", *East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*, P. 1–6. DOI: https://doi.org/10.1109/EWDTS.2016.7807655
14. Mozhaiev, O., Kuchuk, H., Kuchuk, N., Mozhaiev, M., Lohvynenco, M. (2017), "Multiservice network security metric", *IEEE Advanced information and communication technologies-2017, Proc. of the 2th Int. Conf. Lviv, 2017*, P. 133–136.
15. Kuchuk, G., Kovalenko, A., Mozhaev, A. (2010), "Approach to Development of Complex Metric for Multiservice Network Security Assessment", *Statistical Methods of Signal and Data Processing (SMSDP – 2010): Proc. Int. Conf., October 13-14, 2010. – Kiev: NAU, RED, IEEE Ukraine section joint SP*, P. 158–160.
16. Kliuiev, O., Mozhaiev, M., Uhrovetskyi, O., Mozhaiev, O., Simakova-Yefremian, E. (2019), "Method of forensic research on image for finding touch up on the basis of noise entropy", *2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies, AICT 2019 – Proceedings.*
17. Mozhaiev, M., Kuchuk, N., Usatenko M. (2019), "The method of jitter determining in the telecommunication network of a computer system on a special software platform", *Innovate Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (10), P. 134-140. DOI: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.10.134

21. Rudnytsky, V., Mozhaiev, M. and Kuchuk, N. (2020), "Method for the diagnostics of synchronization disturbances in the telecommunications network of a critical used computer system", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, (1 (11), P. 172-180. DOI: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.11.172.

Received (Надійшла) 19.08.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 14.10.2020

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Можаєв Михайло Олександрович – кандидат технічних наук, завідувач сектором комп'ютерно-технічних, телекомунікаційних досліджень та досліджень відео-, звукозапису Харківського науково-дослідного інституту судових експертиз ім. засл. проф. М. С. Бокаріуса, Харків, Україна;

Mykhailo Mozhaiev – Candidate of Technical Sciences, Head of Department of Computer Engineering, Telecommunications, Video- and Audio-recording Research, Hon. Prof. Bokarius Kharkiv Research Institute of Forensic Examinations, Kharkiv, Ukraine; e-mail: mikhail.mozhayev@hniise.gov.ua; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-1566-9260.

Моделювання нелінійних елементів комп'ютерної мережі критичного застосування

М. О. Можаєв

Анотація. Предметом дослідження в статті є показники якості функціонування комп'ютерної мережі критичного застосування. Об'єкт досліджень - модель нелінійних елементів комп'ютерної мережі критичного застосування. **Мета роботи** - створення моделі нелінійних елементів телекомунікаційного обладнання комп'ютерної мережі (КС) системи критичного застосування для забезпечення необхідних параметрів QoS. У статті вирішуються такі **завдання**: аналіз основних факторів, що викликають зниження якості обслуговування в КС; створення моделі впливу малої нелінійності на формування вільних коливань, за допомогою складання відповідного рівняння руху; аналіз вільного руху осцилятора, що має вигляд рівняння Дюффінга; побудова загального інтеграла рівняння Дюффінга в разі жорсткої системи. Використовуються такі методи дослідження: основи теорії комп'ютерних систем і мереж та основи теорії нелінійних диференціальних рівнянь. Отримані наступні результати: проведено аналіз основних факторів, які можна вважати причиною зниження якості обслуговування комп'ютерних мереж системи судової експертизи; визначено, що однією з основних причин є телекомунікаційна складова КС, яка має ряд критичних параметрів, в тому числі і недостатня стабільність і стійкість частоти сигналу передачі інформації; проведено чисельне моделювання отриманих результатів. **Висновки:** Отримана формула залежності частоти вільних коливань від енергії коливальної системи з урахуванням нелінійності, яка дозволяє врахувати параметри вихідного стану коливальної системи при її запуску; нелінійність коливальні системи автогенератора істотно впливає на точність і стабільність частот його вихідних коливань; визначено, що при значеннях еквівалентного параметра нелінійності k> 0,1 відбувається істотне неузгодженість між еталонним і реальним сигналом, які передаються в мережі, що може привести до значного зниження показників QoS, подальші дослідження необхідно направити на розробку програмно-апаратних засобів, що дозволяють знизити вплив малих нелінійностей елементів телекомунікаційного обладнання комп'ютерних мереж критичного застосування на показники якості функціонування.

Ключові слова: комп'ютерні мережі критичного застосування; нелінійність коливальні системи; еквівалентний параметр нелінійності; телекомунікаційна складова комп'ютерної мережі; стабільність і стійкість частоти сигналу.

Моделирование нелинейных элементов компьютерной сети критического применения

М. А. Можаев

Аннотация. Предметом исследования в статье являются показатели качества функционирования компьютерной сети критического применения. **Объект исследований** – модель нелинейных элементов компьютерной сети критического применения. **Цель работы** – создание модели нелинейных элементов телекоммуникационного оборудования компьютерной сети (КС) системы критического применения для обеспечения требуемых параметров QoS. В статье решаются следующие **задачи**: анализ основных факторов, вызывающих снижение качества обслуживания в КС; создание модели влияния малой нелинейности на формирование свободных колебаний, посредством составления соответствующего уравнения движения; анализ свободного движения осциллятора, имеющего вид уравнения Дюффинга; построение общего интеграла уравнения Дюффинга в случае жёсткой системы. Используются следующие методы исследования: основы теории компьютерных систем и сетей и основы теории нелинейных дифференциальных уравнений. Получены следующие результаты: проведен анализ основных факторов, которые можно считать причиной снижение качества обслуживания компьютерных сетей системы судебной экспертизы; определено, что одной из основных причин является телекоммуникационная составляющая КС, которая имеет ряд критических параметров, в том числе недостаточная стабильность и устойчивость частоты сигнала передачи информации; проведено численное моделирование полученных результатов. **Выводы:** Получена формула зависимости частоты свободных колебаний от энергии колебательной системы с учётом нелинейности, которая позволяет учесть параметры исходного состояния колебательной системы при её запуске; нелинейность колебательной системы автогенератора существенным образом влияет на точность и стабильность частот его выходных колебаний; определено, что при значениях эквивалентного параметра нелинейности *k>0,1* происходит существенное рассогласование между эталонным и реальным сигналом, которые передаются в сети, что может привести к значительному снижению показателей QoS, дальнейшие исследования необходимо направить на разработку программно-аппаратных средств, позволяющих снизить влияние малых нелинейностей элементов телекоммуникационного оборудования компьютерных сетей критического применения на показатели качества функционирования.

Ключевые слова: компьютерные сети критического применения; нелинейность колебательной системы; эквивалентный параметр нелинейности; телекоммуникационная составляющая компьютерной сети; стабильность и устойчивость частоты сигнала.

Methods of information systems synthesis

UDC 629.76 **doi: 10. 20998/2522-9052.2020.4.05**

Eugene Aleksandrov[1], Tetiana Aleksandrova[2], Iryna Kostianyk[2], Yaroslav Morgun[2]

[1] Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine
[2] National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

TO THE QUESTION OF CONSTRUCTING THE REGION OF ALLOWABLE VALUES OF VARIABLE PARAMETERS OF A DIGITAL STABILIZER OF A MOVABLE OBJECT

Abstract. Solving the problems of analysis and synthesis of closed digital systems for stabilization of movable objects is associated with significant difficulties. One of the possible ways to solve the problem is the transition from a mathematical model of a continual-discrete closed stabilization system to an approximate mathematical model of a discrete closed system using infinite matrix series containing the own matrix and the control matrix of the continuous part of the system, as well as the quantization period of the discrete part. Using the example of a closed digital stabilization system for a space stage of a solid-propellant carrier rocket flying in an airless space with a marching engine turned on, the problem of constructing stability regions of a closed digital stabilization system in the plane of variable parameters of a digital stabilizer was solved and a comparative analysis of these regions was carried out for various numbers of members of matrix series taken into account and different values of the digital stabilizer quantization period.

Keywords: continual-discrete stabilization system; digital stabilizer; stability region of a closed discrete system; stabilizer quantization period.

Introduction

Problem statement. Let perturbed motion of a movable object is described by vector-matrix differential equation

$$\dot{X}(t) = A \cdot X(t) + B \cdot U(t), \qquad (1)$$

where $X(t)$ is the n-dimensional state vector of the object; $U(t)$ is the m-dimensional control vector; A is the object's own matrix of size $n \times n$; B is the control matrix of size $n \times m$.

Assume that the digital stabilizer realizes stabilization algorithm

$$U[nT] = K \cdot X[nT], \qquad (2)$$

where K is the matrix of constants of algorithm (2) of size $m \times n$, moreover some columns of the matrix K are zero, corresponding to the unmeasured components of the vector $X(t)$.

The problem of parametric synthesis of the digital stabilizer (2) consists in finding the values of the matrix elements K that ensure the stability of the closed system (1), (2) and deliver the required quality of the stabilized processes to the closed system (1), (2).

To solve the problem of parametric synthesis of digital stabilizers of complex high-dimensional objects, an algebraic method is used, based on the use of Optimization Toolbox software package MATLAB or Minimize software MATHCAD [1,2], with the help of which the solution is found in the region G_k representing the stability region of the closed system (1), (2) in the space of variable constants of the algorithm (2). For this, in accordance with the work [3], from the ordinary vector-matrix differential equation (1) one passes to the vector-matrix equation in finite differences

$$X[(n+1)T] = \Phi \cdot X[nT] + H \cdot U[nT], \qquad (3)$$

in which the matrices Φ of size $n \times n$ and H of size $n \times m$ respectively, are determined by the formulas

$$\Phi = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{i!} A^i T^i; \qquad (4)$$

$$H = \sum_{i=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(i+1)!} A^i T^{i+1} \right] B. \qquad (5)$$

The number of taken into account members of the matrix series (4) and (5) depends on the value of the quantization period T.

Modern onboard digital computers, used for information processing in complex movable technical objects, perform, in addition to generating control signals, many other functions. First of all, these functions are associated with digital filtering of the output signals of sensors noisy with high-frequency interference, analysis of the technical state of various systems and assemblies that make up the object, solution of navigation problems and decision-making problems by the crew members of a moving object. The combination of these problems leads to the fact that the value of the quantization period of the on-board computer is limited from below T^* by the value below which this value cannot be chosen. In modern on-board computers of movable military objects, this value is $T^* = (0{,}002 - 0{,}01)$ c. Let us substitute relation (2) into the right side of equation (3). As a result, we obtain the vector-matrix difference equation of the closed digital stabilization system

$$X[(n+1)T] = [\Phi + H \cdot K] \cdot X[nT]. \qquad (6)$$

Then the characteristic equation of the closed digital stabilization system is written in the form

$$\det\left[\Phi + H\cdot K - E\cdot z\right] = 0\,, \qquad (7)$$

where z is complex variable, Z is transformation of the lattice function.

Using the characteristic equation (7) for a given value of the quantization period T^*, it is possible to construct the stability region of a closed digital stabilization system G_k in the space of variable stabilizer constants (2) [4]. It is clear that the region G_k depends not only on the value T^*, but also on the number of considered members of the matrix series (4) and (5).

The purpose of this article is to study the influence of the number of taken into account members of the matrix series (4) and (5) on the stability region G_k of a closed digital stabilization system of a moving object at various values of the quantization period of the on-board computer.

Main material

This purpose is carried out on the example of constructing stability regions of a closed digital stabilization system for a cosmic stage of a solid-propellant carrier rocket flying in an airless space with a marching engine turned on. The equations of angular disturbed motion of such a stage have the following form [5, 6]:

$$\begin{gathered}\ddot{\psi}(t) = a_{\psi\delta}\cdot\delta(t);\\ T_1^2\ddot{\delta}(t) + T_2\dot{\delta}(t) + \delta(t) = k\cdot u(t),\end{gathered} \qquad (8)$$

where $\psi(t)$ is the yaw angle of the stage; $\delta(t)$ is the angle of deviation of the axis of the marching engine from the longitudinal axis of the rocket; $u(t)$ is the control signal generated by the stabilization system; k is the coefficient of proportionality.

As a first step, we assume that stage stabilizer is analog one, realizing the stabilization law in the form of the relation

$$u(t) = k_1\psi(t) + k_2\dot{\psi}(t)\,. \qquad (9)$$

Let us introduce into consideration the state vector of the stabilization object

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t)\\ x_2(t)\\ x_3(t)\\ x_4(t)\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\psi(t)\\ \dot{\psi}(t)\\ \delta(t)\\ \dot{\delta}(t)\end{bmatrix}$$

and write the differential equation of the perturbed motion of the stabilized object in the form

$$\dot{X}(t) = A\cdot X(t) + B\cdot u(t)\,, \qquad (10)$$

where matrices A and B are equal

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & a_{\psi\delta} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ 0 & 0 & -\dfrac{1}{T_1^2} & -\dfrac{T_2}{T_1^2}\end{bmatrix};\ B = \begin{bmatrix}0\\0\\0\\ \dfrac{k}{T_1^2}\end{bmatrix}.$$

Relation (9) can be written in vector-matrix form

$$u(t) = K\cdot X(t)\,, \qquad (11)$$

where the matrix of the gain coefficients K is equal

$$K = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & 0 & 0\end{bmatrix}.$$

Then, taking into account (10) and (11), the equation of the perturbed motion of the closed stabilization system is written

$$\dot{X}(t) = \left[A + B\cdot K\right]X(t)\,, \qquad (12)$$

and the characteristic equation of the closed system (12) is written in the form

$$\det\left[A + B\cdot K - E\cdot s\right] = 0\,, \qquad (13)$$

where s is complex variable of Laplace transformation.

Substituting the matrices A, B and K, into the characteristic equation (13), and disclosing the determinant, we have

$$s^4 + \frac{T_2}{T_1^2}s^3 + \frac{1}{T_1^2}s^2 - a_{\psi\delta}\frac{k}{T_1^2}k_2 s - a_{\psi\delta}\frac{k}{T_1^2}k_1 = 0\,. \qquad (14)$$

In the characteristic equation (14), we make a substitution $s = j\omega$, select the real and imaginary parts in the obtained relation, equate them to zero, and solve the resulting system of two algebraic equations with respect to the variable gains k_1 and k_2:

$$k_1 = \frac{T_1^2\omega^2}{a_{\psi\delta}k}\left(\omega^2 - \frac{1}{T_1^2}\right);\ k_2 = -\frac{T_2\omega^2}{a_{\psi\delta}k}. \qquad (15)$$

Relations (15) will be used below when comparing the stability regions of continuous and discrete stabilizers.

Let's move on to considering a digital stabilizer that implements the stabilization algorithm (2) for two options. In the first variant, the matrices (4) and (5) are represented in the form:

$$\Phi = E + AT;\quad H = BT, \qquad (16)$$

and in the second – in the form:

$$\Phi = E + AT + \frac{1}{2}A^2T^2;\quad H = BT + \frac{1}{2}ABT^2. \qquad (17)$$

For the first variant, the characteristic equation of the closed stabilization system (7) with the substitution of matrices (16) into it is written

$$\begin{bmatrix} 1-z & T & 0 & 0\\ 0 & 1-z & a_{\psi\delta}T & 0\\ 0 & 0 & 1-z & T\\ \dfrac{k}{T_1^2}k_1T & \dfrac{k}{T_1^2}k_2T & -\dfrac{1}{T_1^2}T & 1-z-\dfrac{T_2}{T_1^2}T\end{bmatrix} =$$

$$= (1-z)^4 + A_1^{\mathrm{I}}(1-z)^3 + A_2^{\mathrm{I}}(1-z)^2 + \qquad (18)$$
$$+ A_3^{\mathrm{I}}(1-z) + A_4^{\mathrm{I}} = 0,$$

moreover

$$A_1^{\mathrm{I}} = -\frac{T_2}{T_1^2}T; \quad A_2^{\mathrm{I}} = \frac{1}{T_1^2}T^2; \quad A_3^{\mathrm{I}} = a_{\psi\delta}\frac{k}{T_1^2}k_2T^3; \quad A_4^{\mathrm{I}} = -a_{\psi\delta}\frac{k}{T_1^2}k_1T^4. \tag{19}$$

For the second variant, equation (7), upon substitution of matrices (17), takes the following form

$$\begin{bmatrix} 1-z & T & \frac{1}{2}a_{\psi\delta}T^2 & 0 \\ 0 & 1-z & a_{\psi\delta}T & a_{\psi\delta}T^2/2 \\ \frac{1}{2}\frac{k}{T_1^2}k_1T^2 & \frac{1}{2}k_2T^2 & 1-z-\frac{T^2}{2T_1^2} & T-\frac{T_2}{2T_1^2}T^2 \\ \left(\frac{k}{T_1^2}T-\frac{T_2k}{2T_1^4}T^2\right)k_1 & \left(\frac{k}{T_1^2}T-\frac{T_2k}{2T_1^4}T^2\right)k_2 & -\frac{T}{T_1^2}\left(1-\frac{T_2}{2T_1^2}T\right) & 1-z-\frac{T_2}{T_1^2}T-\frac{1}{2T_1^2}\left(1-\frac{T_2^2}{T_1^2}\right)T^2 \end{bmatrix} = \tag{20}$$

$$= (1-z)^4 + A_1^{\mathrm{II}}(1-z)^3 + A_2^{\mathrm{II}}(1-z)^2 + A_3^{\mathrm{II}}(1-z) + A_4^{\mathrm{II}} = 0,$$

moreover

$$\begin{aligned} A_1^{\mathrm{II}} &= -\frac{T}{T_1^2}\left[T_2 + T\left(1-\frac{T_2^2}{T_1^2}\right)\right]; \\ A_2^{\mathrm{II}} &= \frac{T^3}{2T_1^4}\left[T_2 + T\left(1-\frac{T_2^2}{T_1^2}\right)\right] + \frac{T_2^2}{T_1^2}\left(1-\frac{T_2}{2T_1^2}T\right)^2 - \\ &\quad -a_{\psi\delta}k\frac{T^4}{4T_1^2}k_1 - a_{\psi\delta}k\frac{T^3}{2T_1^2}k_2 - \\ &\quad -a_{\psi\delta}k\frac{T^3}{2T_1^2}\left(1-\frac{T_2}{2T_1^2}T\right)k_2; \\ A_3^{\mathrm{II}} &= a_{\psi\delta}k\frac{T^4}{2T_1^4}\left[T_2 + \frac{T}{2}\left(1-\frac{T_2^2}{T_1^2}\right)\right]k_2 + \\ &\quad +a_{\psi\delta}k\frac{T^3}{T_1^2}\left(1-\frac{T_2}{2T_1^2}T\right)^2 k_2 + a_{\psi\delta}k\frac{T^4}{2T_1^2}k_1 + \\ &\quad +a_{\psi\delta}k\frac{T^5}{4T_1^4}\left[T_2 + \frac{T}{2}\left(1-\frac{T_2^2}{T_1^2}\right)\right]k_1 + \\ &\quad +a_{\psi\delta}k\frac{T^4}{2T_1^2}\left(1-\frac{T_2}{2T_1^2}T\right)^2 k_1; \\ A_4^{\mathrm{II}} &= -a_{\psi\delta}k\frac{T^5}{2T_1^4}\left[T_2 + \frac{T}{2}\left(1-\frac{T_2^2}{T_1^2}\right)\right]k_1 - \\ &\quad -a_{\psi\delta}k\frac{T^4}{T_1^2}\left(1-\frac{T_2}{2T_1^2}T\right)^2 k_1. \end{aligned} \tag{21}$$

For small values T, determinant (20) degenerates into determinant (18), and the values of the coefficients of equation (20) determined by relations (21) approach the values of the coefficients of equation (18) determined by relations (19).

A closed digital stabilization system is stable if all roots of its characteristic equation (18) or (20) are located inside a circle of radius that equal one, of the complex plane z (Schur-Kohn criterion [7]).

To construct the stability regions of a closed digital stabilization system in the plane of variable constants (k_1, k_2), we use the W-transformation method [8, 9], according to which the bilinear transformation

$$z = \frac{1+w}{1-w} \tag{22}$$

defines a conformal mapping of a circle of unit radius of the complex plane z to the imaginary axis of the complex plane w. Replacing (22) in characteristic equations (18) and (20), we obtain new characteristic equations with respect to a complex variable w, in relation to which we can use all the provisions of the theory of stability of continuous dynamical systems, including the D-partition method for constructing stability regions of systems in the space of variable parameters.

In accordance with formulas (21), the coefficients of the characteristic equation (20) A_2^{II} and A_3^{II} represent in the form:

$$A_2^{\mathrm{II}} = A_{20}^{\mathrm{II}} + A_{21}^{\mathrm{II}}k_1 + A_{22}^{\mathrm{II}}k_2; \quad A_3^{\mathrm{II}} = A_{31}^{\mathrm{II}}k_\psi + A_{32}^{\mathrm{II}}k_2,$$

where

$$\begin{aligned} A_{20}^{\mathrm{II}} &= \frac{T^3}{2T_1^4}\left[T_2 + T\left(1-\frac{T_2^2}{T_1^2}\right)\right] + \frac{T_2^2}{T_1^2}\left(1-\frac{T_2}{2T_1^2}T\right)^2; \\ A_{21}^{\mathrm{II}} &= -a_{\psi\delta}k\cdot T^4/\left(4T_1^2\right); \\ A_{22}^{\mathrm{II}} &= -a_{\psi\delta}k\cdot T^3/\left(2T_1^2\right)\cdot\left(2-T\cdot T_2/\left(2T_1^2\right)\right); \\ A_{31}^{\mathrm{II}} &= \frac{1}{2}a_{\psi\delta}k\left\{\begin{matrix}\frac{T^5}{2T_1^4}\left[T_2 + \frac{T}{2}\left(1-\frac{T_2^2}{T_1^2}\right)\right] + \\ +\frac{T^4}{T_1^2}\left(2-\frac{T_2}{2T_1^2}T\right)^2\end{matrix}\right\}; \\ A_{32}^{\mathrm{II}} &= a_{\psi\delta}k\left\{\begin{matrix}\frac{T^4}{2T_1^4}\left[T_2 + \frac{T}{2}\left(1-\frac{T_2^2}{T_1^2}\right)\right] + \\ +\frac{T^3}{T_1^2}\left(1-\frac{T_2}{2T_1^2}T\right)^2\end{matrix}\right\}. \end{aligned} \tag{23}$$

The characteristic equations (18) and (20) of both

considered variants will be reduced to a single form

$$\begin{gathered}(1-z)^4+A_1^{\mathrm{I}}(1-z)^3+\left[A_{20}^{\mathrm{I}}+A_{21}^{\mathrm{I}}k_1+A_{22}^{\mathrm{I}}k_2\right]\times\\ \times(1-z)^2+\left[A_{31}^{\mathrm{I}}k_1+A_{32}^{\mathrm{I}}k_2\right](1-z)+A_4^{\mathrm{I}}=0.\end{gathered} \tag{24}$$

for variant I and

$$\begin{gathered}(1-z)^4+A_1^{\mathrm{II}}(1-z)^3+\left[A_{20}^{\mathrm{II}}+A_{21}^{\mathrm{II}}k_1+A_{22}^{\mathrm{II}}k_2\right]\times\\ \times(1-z)^2+\left[A_{31}^{\mathrm{II}}k_1+A_{32}^{\mathrm{II}}k_2\right](1-z)+A_4^{\mathrm{II}}=0.\end{gathered} \tag{25}$$

для варианта II. При этом коэффициенты уравнения (24) составляют: for variant II. In this case, the coefficients of equation (24) are:

$$\begin{gathered}A_1^{\mathrm{I}}=-\frac{T_2}{T_1^2}T;\quad A_{20}^{\mathrm{I}}=\frac{T^2}{T_1^2};\ A_{21}^{\mathrm{I}}=0;\ A_{22}^{\mathrm{I}}=0;\\ A_{31}^{\mathrm{I}}=0;\ A_{32}^{\mathrm{I}}=a_{\psi\delta}\frac{k}{T_1^2}T^3;\ A_4^{\mathrm{I}}=-a_{\psi\delta}\frac{k}{T_1^2}T^4k_1.\end{gathered} \tag{26}$$

We omit the superscripts in the coefficients of the characteristic equations (24) and (25), using the universal form of representation of each of the equations

$$\begin{gathered}(1-z)^4+A_1(1-z)^3+\left[A_{20}+A_{21}k_1+A_{22}k_2\right]\times\\ \times(1-z)^2+\left[A_{31}k_1+A_{32}k_2\right](1-z)+A_4=0.\end{gathered} \tag{27}$$

In the characteristic equation (27), we replace (22). As a result, we obtain a new characteristic equation of the closed-loop digital stabilization system with respect to the complex variable w:

$$\begin{gathered}16w^4+8A_1w^4+4\left(A_{20}+A_{21}k_1+A_{22}k_2\right)w^4+\\ +2\left(A_{31}k_1+A_{32}k_2\right)w^4+A_4k_1w^4-8A_1w^3-\\ -8\left(A_{20}+A_{21}k_1+A_{22}k_2\right)w^3-4A_4k_1w^3-\\ -6\left(A_{31}k_1+A_{32}k_2\right)w^3+++6\left(A_{31}k_1+A_{32}k_2\right)w^2+\\ 4\left(A_{20}+A_{21}k_1+A_{22}k_2\right)w^2+6A_4k_1w^2-\\ -2\left(A_{31}k_1+A_{32}k_2\right)w-4A_4k_1w+A_4k_1=0.\end{gathered} \tag{28}$$

In the new characteristic equation (28), we make a replacement $w=j\omega$, select the real and imaginary parts, equate them to zero. As a result, we obtain a system of two algebraic equations with two unknowns k_1 and k_2:

$$\begin{gathered}K(T,\omega)k_1+L(T,\omega)k_2=M(T,\omega);\\ P(T,\omega)k_1+Q(T,\omega)k_2=N(T,\omega),\end{gathered} \tag{29}$$

where the corresponding coefficients of system (29) are determined by the following relations:

$$\begin{gathered}K(T,\omega)=\left(4A_{21}+2A_{31}+A_4\right)\omega^4-\\ -\left(4A_{21}+6A_{31}+6A_4\right)\omega^2+A_4;\\ L(T,\omega)=\left(4A_{22}+2A_{32}\right)\omega^4-\left(4A_{22}+6A_{32}\right)\omega^2;\\ M(T,\omega)=-\left(16+8A_1+4A_{20}\right)\omega^4+4A_{20}\omega^2;\\ P(T,\omega)=\left(8A_{21}+6A_{31}+4A_4\right)\omega^2-\left(2A_{31}+4A_4\right);\\ Q(T,\omega)=\left(8A_{22}+6A_{32}\right)\omega^2-2A_{32};\\ N(T,\omega)=-8\left(A_1+A_{20}\right)\omega^2.\end{gathered} \tag{30}$$

In accordance with Cramer's rule [10], solutions of system (29) are written in the form

$$k_1=\frac{\Delta_1}{\Delta};\quad k_2=\frac{\Delta_2}{\Delta}, \tag{31}$$

where the corresponding determinants are equal:

$$\begin{gathered}\Delta=\begin{vmatrix}K(T,\omega) & L(T,\omega)\\ P(T,\omega) & Q(T,\omega)\end{vmatrix}=K(T,\omega)Q(T,\omega)-\\ -P(T,\omega)L(T,\omega);\\ \Delta_1=\begin{vmatrix}M(T,\omega) & L(T,\omega)\\ N(T,\omega) & Q(T,\omega)\end{vmatrix}=M(T,\omega)Q(T,\omega)-\\ -N(T,\omega)L(T,\omega);\\ \Delta_2=\begin{vmatrix}K(T,\omega) & M(T,\omega)\\ P(T,\omega) & N(T,\omega)\end{vmatrix}=K(T,\omega)N(T,\omega)-\\ -P(T,\omega)M(T,\omega).\end{gathered} \tag{32}$$

Calculation results and conclusions

We choose the numerical values of the parameters of the stabilization object equal to [11]:

$$a_{\psi\delta}=-0,25\ s^{-2};\ T_1=0,02\ s;$$

$$T_2=0,04\ s;\ k=0,01\ V.$$

Changing ω from zero to infinity, using relations (15), we construct the boundary of the stability region of a closed analog stabilization system (curve 1), and also using relations (31) and (32) - the boundaries of the stability regions of a closed digital stabilization system for the two considered accounting variants the terms of the matrix series (4) and (5) (curves 2 and 3) for different periods of quantization of the on-board computer corresponding to Fig. 1-3.

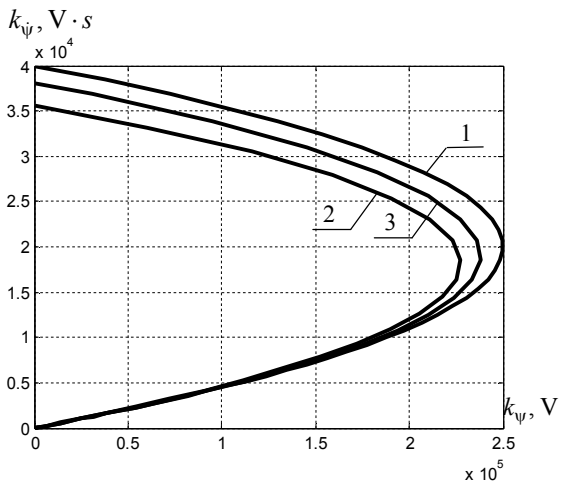


Fig. 1. Construction of boundary of stability region of closed stabilization system for $T=0{,}001$ c :
1 – analog system; 2 – first option; 3 – second option

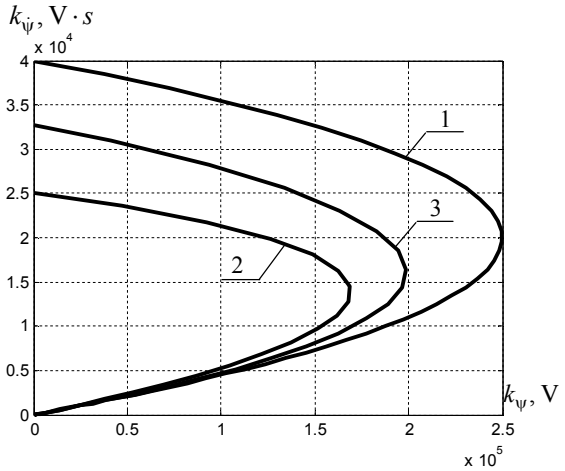


Fig. 2. Construction of boundary of stability region of closed stabilization system for $T = 0{,}005$ c :
1 – analog system; 2 – first option; 3 – second option

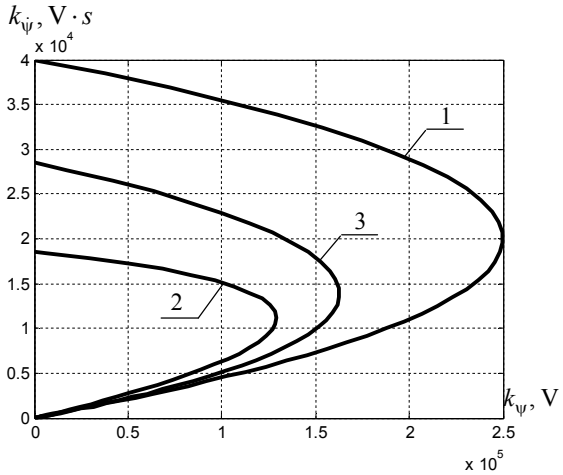


Fig. 3. Construction of boundary of stability region of closed stabilization system for $T = 0{,}01$ c :
1 – analog system; 2 – first option; 3 – second option

Simultaneously with the construction of the boundaries of the stability region, the sign of the determinant Δ is calculated. If the determinant Δ is positive, then the boundary of the stability region is hatched from the left; if the determinant Δ is negative, then the boundary is hatched from the right. In this case, the hatching is directed towards the inside of the stability region. Analysis of the above figures allows us to draw the following conclusions:

- an increase in the quantization period of the on-board computer leads to a decrease in the stability region of the closed digital stabilization system of the cosmic stage of solid-propellant carrier rocket;
- taking into account the terms of the matrix series containing quadratic terms leads to an increase in the stability region of the closed digital stabilization system of the cosmic stage of solid-propellant carrier rocket.

References

1. Aleksandrov, Ye.Ye. and Aleksandrova, T.Ye. (2014), *Matematicheskoe modelirovanie, sistemnyiy analiz i sintez dinamicheskih system* [Mathematical modeling, systems analysis and synthesis of dynamic systems], NTU «KhPI», Kharkiv, 200 p. (in Russian).
2. Aleksandrov, Ye.Ye., Aleksandrova, T.Ye. and Severin, V.P. (2019), *Osnovyi sovremennoy teorii upravleniya* [Fundamentals of modern control theory], KhNADU, Kharkiv, 324 p. (in Russian).
3. Vasilev, S.K., Zaharov, V.N. and Prohorov, Yu.F. (1979), *Kibernetika v sistemah voennogo naznacheniya* [Cybernetics in military systems], Voenizdat, Moscow, 263 p. (in Russian).
4. Ayzenberg, Ya.Ye. and Suhorebryiy, V.G. (1986), *Proektirovanie sistem stabilizatsii kosmicheskih* apparatov [Spacecraft stabilization systems design], Mashinostroenie, Moscow, 224 p. (in Russian).
5. Igdalov, I.M., Kuchma, L.D., Polyakov, N.V. and Sheptun, Yu.D. (2004), *Raketa kak ob'ekt upravleniya* [Rocket as a control object], ART-PRESS, Dnepropetrovsk, 544 p. (in Russian).
6. Igdalov, I.M., Kuchma, L.D., Polyakov, N.V. and Sheptun, Yu.D. (2010), *Dinamicheskoe proektirovanie raket* [Dynamic design of the rockets], DNU, Dnepropetrovsk, 264 p. (in Russian).
7. Tu, Yu. (1964), *Tsifrovyie i impulsnyie sistemyi avtomaticheskogo upravleniya* [Digital and pulse automatic control systems], Mashinostroenie, Moscow, 703 p. (in Russian).
8. Besekerskiy, V.A. (1976), *Tsifrovyie avtomaticheskie sistemyi* [Digital automatic systems], Nauka, Moscow, 575 p. (in Russian).
9. Hemming, R. (1984), *Tsifrovyie filtryi* [Digital filters], Nauka, Moscow, 221 p. (in Russian).
10. Bronshteyn, I.N. and Semendyaev, K.A. (1986), *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchaschihsya vtuzov* [A guide of mathematics for engineers and college students], Nauka, Moscow, 544 p. (in Russian).
11. Aleksandrov, Ye.Ye., Kozlov, Ye.P. and Kuznyeczov, B.I. (2006), *Avtomatychne keruvannya ruhomymy obyektamy i tehnologichnymy procesamy. Tom 2. Avtomatychne keruvannia rukhom litalnykh aparativ* [Automatic control of moving objects and technological processes. Volume 2. Automatic control of aircraft movement], NTU «KhPI», Kharkiv, 528 p. (in Ukrainian).

Надійшла (received) 07.09.2020
Прийнята до друку (accepted for publication) 28.10.2020

Відомості про авторів / About the authors

Александров Євген Євгенович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автомобілів, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна;

Eugene Aleksandrov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of automobiles Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: aleksandrov.ye.ye@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7525-6383.

Александрова Тетяна Євгеніївна – доктор технічних наук, професор кафедри «Системний аналіз та інформаційно-аналітичні технології», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Tetiana Aleksandrova – Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Systems Analysis and Information-Analytical Technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: aleksandrova.t.ye@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-9596-0669.

Костяник Ірина Віталіївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій і систем колісних та гусеничних машин імені О. О. Морозова, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Iryna Kostianyk – PhD, Associate Professor, Department of Information Technologies and Systems of Wheel and Track Machines named after Morozov, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: kostyanik-irina@ukr.net; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-0289-2869.

Моргун Ярослав Юрійович – аспірант кафедри «Системний аналіз та інформаційно-аналітичні технології», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Yaroslav Morgun – graduate student, Department of Systems Analysis and Information-Analytical Technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: yarki95@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-7399-4937.

До питання про побудову області дозволених значень варійованих параметрів цифрового стабілізатора рухомого об’єкта

Є. Є. Александров, Т. Є. Александрова, І. В. Костяник, Я. Ю. Моргун

Анотація. Рішення задач аналізу і синтезу замкнутих цифрових систем стабілізації рухомих об'єктів пов'язане із значними труднощами, зумовленими тим, що збурений рух безперервної частини замкнутої системи описується системою звичайних диференціальних рівнянь, а функціонування дискретної частини - алгоритмами в кінцевих різницях і різницевими рівняннями. Отримання характеристичного рівняння замкнутої дискретної системи шляхом *z*-перетворення решітчастої функції, яка відповідає перехідній функції безперервної частини системи, для складних об'єктів, що описуються диференціальними рівняннями високого порядку, часто не представляється можливим. Одним з можливих шляхів вирішення проблеми є перехід від математичної моделі континуально-дискретної замкнутої системи стабілізації до наближеної математичної моделі дискретної замкнутої системи з використанням нескінченних матричних рядів, що містять власну матрицю і матрицю керування безперервної частини системи, а також період квантування дискретної частини. При цьому точність задач аналізу і синтезу замкнутої системи стабілізації визначається кількістю врахованих членів матричних рядів. На прикладі замкнутої цифрової системи стабілізації космічного ступеня твердопаливної ракети-носія, що здійснює політ в безповітряному просторі з включеним маршовим двигуном, вирішена задача побудови областей стійкості замкнутої цифрової системи стабілізації в площині варійованих параметрів цифрового стабілізатора і проведено порівняльний аналіз цих областей при різній кількості врахованих членів матричних рядів і різних значеннях періоду квантування цифрового стабілізатора.

Ключові слова: континуально-дискретна система стабілізації; цифровий стабілізатор; область стійкості замкнутої дискретної системи; період квантування стабілізатора.

К вопросу о построении области допустимых значений варьируемых параметров цифрового стабилизатора подвижного объекта

Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, И. В. Костяник, Я. Ю. Моргун

Аннотация. Решение задач анализа и синтеза замкнутых цифровых систем стабилизации подвижных объектов связано со значительными трудностями, обусловленными тем, что возмущенное движение непрерывной части замкнутой системы описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений, а функционирование дискретной части – алгоритмами в конечных разностях и разностными уравнениями. Получение характеристического уравнения замкнутой дискретной системы путем *z*-преобразования решетчатой функции, которая соответствует переходной функции непрерывной части системы, для сложных объектов, описываемых дифференциальными уравнениями высокого порядка, часто не представляется возможным. Одним из возможных путей решения проблемы является переход от математической модели континуально-дискретной замкнутой системы стабилизации к приближенной математической модели дискретной замкнутой системы с использованием бесконечных матричных рядов, содержащих собственную матрицу и матрицу управления непрерывной части системы, а также период квантования дискретной части. При этом точность задач анализа и синтеза замкнутой системы стабилизации определяется количеством учитываемых членов матричных рядов. На примере замкнутой цифровой системы стабилизации космической ступени твердотопливной ракеты-носителя, осуществляющей полет в безвоздушном пространстве с включенным маршевым двигателем, решена задача построения областей устойчивости замкнутой цифровой системы стабилизации в плоскости варьируемых параметров цифрового стабилизатора и проведен сравнительный анализ этих областей при различном числе учитываемых членов матричных рядов и различных значениях периода квантования цифрового стабилизатора.

Ключевые слова: континуально-дискретная система стабилизации; цифровой стабилизатор; область устойчивости замкнутой дискретной системы; период квантования стабилизатора.

UDC 004.083.8:004.853 **doi: 10. 20998/2522-9052.2020.4.06**

Rustam Gamzayev, Mykola Tkachuk, Daria Shevkoplias

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

KNOWLEDGE-ORIENTED INFORMATION TECHNOLOGY TO VARIABILITY MANAGEMENT AT THE DOMAIN ANALYSIS STAGE IN SOFTWARE DEVELOPMENT

Abstract. The **subject matter** of this paper is a research of issues related to the variability management at the stage of domain analysis (DA) in the full life cycle (FLC) of software products line (SPL). The **main goal** of this research work is the elaboration of a new knowledge-based information technology to support a variability management in DA as a most complex and weak-formalized stage in FLC of SPL. In order to reach this goal the following **tasks** were formulated and resolved: to analyze the variability issues in FLC on the example of the modern agile-development approach - in the Scrum-methodology; to study how the methods of knowledge handling can be used to support some users and domain-experts activities within the DA phase with respect to software variability modeling; to make the motivated choice of the suitable CASE-tools to elaborate an appropriate IT solution to support the knowledge-oriented approach to DA; to present this IT-solution in a structured form, to consider some its implementation issues, and to discuss the first testing results. The **methods** used in this research are: domain-driven design approach to software development, repertory grids method and ontologies for expert's knowledge handling, IDEF0 notation for specification of the proposed IT solution, feature-oriented domain analysis (FODA) for variability modeling. **Conclusions:** the results of this research shown that the special attention has to be paid to the DA in a FLC, especially with usage of knowledge-based methods. To perform this process in an effective way the repertory grids method is motivated chosen and analyzed. To support the usage of this method in DA the proposal is made to elaborate the special IT-solution using some already available CASE-tools. The essentials functionality features of two such systems: GridSuite and SOVA (Semantical and Ontological Variability Analysis) are considered, and basing on this result, the integrated IT-solution is elaborated and presented in form of the IDEF0 diagram. Finally, the main technological facets of these tools installation are studied and tested, and the test-case to show the possibility to generate the FODA-variability model for the "Smart-Home" application domain is provided.

Keywords: knowledge; software; life cycle; domain analysis; variability; repertory grids method; ontology; information technology.

Introduction. Research actuality and aims

Nowadays in the domain of Software Engineering a growth number of new advanced methodologies, methods and tools are proposed, in order to produce new software products with lower cost, in shorter time, and with respect to their quality attributes [1]. Because of a lot of changes in user needs and in software and hardware components used in these processes developers are supposed to provide variable design solutions at all phases of their full life cycle (FLC) (see, e.g. in [2, 3]). Especially, these problems are really important and complex at such complex and weak-formalized stage of software FLC as a Domain Analysis (DA).

Even the **short review of some information sources** given in [4-9] has showed, that exactly to resolve these sophisticated issues so-called knowledge-oriented models and methods can be applied successfully (see in [10] for more details). To automate these approaches, it is also extremely important to propose appropriate information technologies (IT) which should be elaborated with usage of some already available CASE-tools to be integrated and configurated taking into account main specific activities included into the DA phase of FLC. Such advanced IT-solutions should allow to support a handling of expert knowledge in an appropriated problem domain in order to get finally the needed result in form of the correct domain model, e.g. as a FODA diagram, etc. [2, 9].

That is why the research topic presented in this paper is really actual, and the main tasks to be resolved in this way are the following:

- to analyze the variability issues in software FLC on the example of one of the modern and sophisticated agile-development approaches: on the Scrum-methodology;
- to provide the real example how the methods of knowledge processing can be used to support some users and domain-experts activities within the DA phase, with respect to software variability modeling;
- to make the motivated choice of the suitable CASE-tools to elaborate an appropriate IT – solution to support the knowledge-oriented approach to DA;
- to present this IT-solution in a structured form, consider some its implementation issues, and to discuss the first testing results.

Finally, in the last section the conclusions and future works are discussed.

Variability management in full life cycle of software development: general framework and the usage in Scrum methodology

The problems of software variability issues in FLC, mentioned above, are really important in the domain of Software Product Lines (SPL) development, which are the special kind of software-intensive applications built using a set of configurable or adaptable components [2, 6]. According to the reference framework for SPL engineering (SPLE) proposed by K. Pohl et al. in [2], there are 2 logical levels in all their FLC activities:

(I) *Domain Engineering Level* (DEL) that provides a reusable operational platform to define the *commonality* and the *variability* features of future SPL components;

© Gamzayev R., Tkachuk M., Shevkoplias. D., 2020

(II) *Application Engineering Level* (AEL) that is responsible for the development of target SPL-applications based on the operational platform established at the DEL. Each of these 2 levels: the DEL and the AEL, has a similar sequence of the the ordered FLC phases: *Requirements Engineering*, *Domain Analysis, Domain Design, Architecture Design and Implementation*, and there are a lot of appropriate development methods and CASE-tools to support them in an effective way [2, 3].

In order to consider the specific technological facets of the unified SPLE – framework [2], we propose to make a logical mapping of its main FLC phases to the structured scheme one of wide-used software agile-development approaches, namely to Scrum method [7], and this mapping result is shown in Fig. 1. Taking into account these mapping results, it is to mention that the main SPLE phases are ordered into 2 logically interconnected FLC – subschemas, namely (see in Fig. 1):

1) the FLC phases: *Domain Analysis, Requirements Engineering* and *Domain Design* build the first subschema in FLC, which represents the Customer's needs to be realized technologically in a target SPL, and in terms of the Scrum-methodology they are reflected in such its artefacts as *Product Backlog* and *Sprint Backlog* respectively;

2) the FLC phases: *Architecture Design, Domain Implementation and Component Implementation* from the second subschema in the FLC, which reflects the Developer's activities to be performed in such Scrum – processes as *Daily Scrum Meeting (DSM)* and *Sprint iteration (S)*.

These 2 FLC subschemas are represented in Fig. 1 as the two large dashed ovals: the *Sub-FLC(1)* and *Sub-FLC(2)* shown in Fig. 1 respectively, and they are shown overlapped graphically, because from the project development point of view, their processes are interconnected technologically via activities *Domain Design* and *Architecture Design*. Besides that, the 3 small ovals depicted with solid lines and also shown in Fig. 1, represent the following development artifacts (functions): "Customer's needs", "Expert's knowledge" and "Developer's activities". Obviously, exactly the artifact "Expert's knowledge" is a semantical "bridge" between other two ones (this issue is depicted with 2 bold dashed lines between them). That is why the appropriate IT - solutions should be elaborated exactly to support the handling of expert's domain knowledge, in order to integrate in an effective way other main processes within the whole FLC of SPLE.

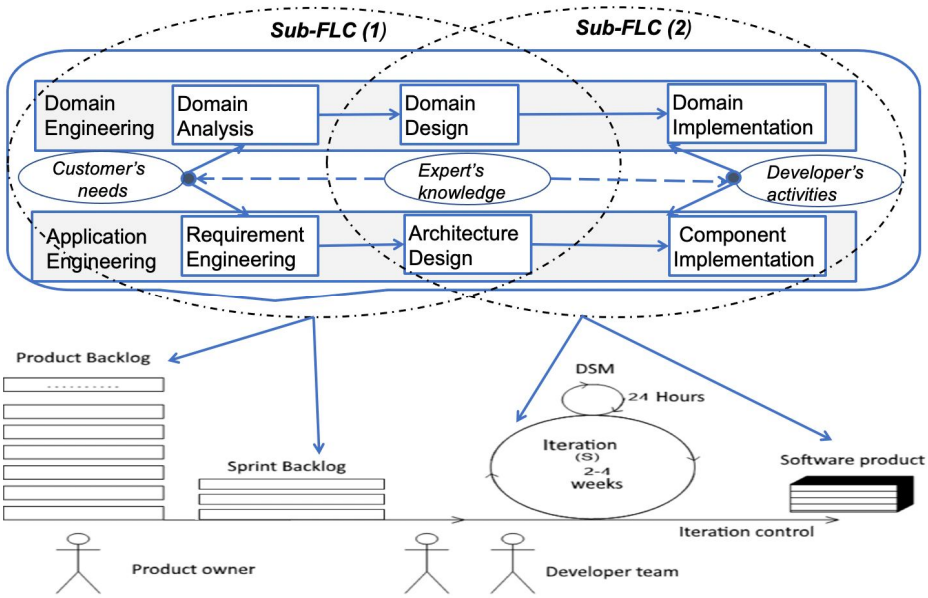


Fig. 1. The mapping results of the SPLE phases to the Scrum method activities (to compare with the SPLE - vision presented in [2])

An approach to handling of domain experts knowledge with repertory grid method

As it was already mentioned above, in [10] the recent overview of some methods for knowledge-oriented software development is presented, such as Decision Trees, Case-Based Reasoning, Heuristic-based learning and some others. From the point of view on multi-criteria and from an unified approach to its usage in different problem domains, the Repertory Grids (RG) method [13] was chosen for a further usage on expert's knowledge handling in FLC of SPLE. The main idea of this method supposes that a cognitive and collaborative thinking of experts and users in a given problem area can help to provide the domain analysis effectively, to decrease the software development costs, and finally to support an appropriate level of components variability in SPLE.

Any RG is represented as a matrix of the required dimensions (normally, not higher than 3x3), that reflects the different semantical contexts of a given domain (represented as the matrix columns), and the target software product characteristics (structured as matrix rows), which can be variable depending on the specific domain features. According to this vision, an appropriate RG includes 3 sets of basic items (*E, C, V*), and in [10] they are illustrated with the examples of the Smart-home systems (SHS) domain:

a) a set of *Elements (E)*: they can be defined based on the domain expert interviews which have to be divided into semantic objects to be represented as RG columns, (e.g.: *"Smart TV", "Smart light sensors"* ...);

b) a set of *Constructs (C)*: they characterize the alternative variable features of RG elements, and they are placed in the RG rows depend on the appropriate context, (e.g. "*Smart TV should be turned on / turned off*"; "*Smart light sensors should be switch on / switch off*", ...);

c) a set of rating *Values (V)*: they are used to represent the behavior of the software system under the influence of certain elements in some range (usually from 1 to 5), where the lowest value of range represents the left bipolar construct, and the highest value of range the right bipolar construct, e.g. the element "*Smart TV* " *should be turned on* (the value of 1) *or turned off* (the value of 5), depend of a given context.

Taking into account these definitions (a) – (c), we can propose the following set-theoretic representation of the RG as a tuple:

$$RG = \{E, C, V\}, \quad (1)$$

where *E, C,* and *V* are the set of elements, set of constructs and set of rating values respectively.

The next advantage of the RG method is its adequate visualization of the expert knowledge handling. For example, in SHS these aspects (RG or dimensions) can be defined as [8]: 1) social aspects (any SHS has to be a user-friendly solution, 2) economical aspects (the project costs should be acceptable for SHS owners), 3) environmental aspects (any SHS should be an eco-friendly facility, etc.). Taking into account these 3 dimensions the appropriate problem space (PS) for the users and experts knowledge handling can be specified using RG method and the result is shown in Fig. 2.

To continue the formalization of the RG method, we can represent this space as a subset of the Cartesian product for the three sets defined in (1), namely:

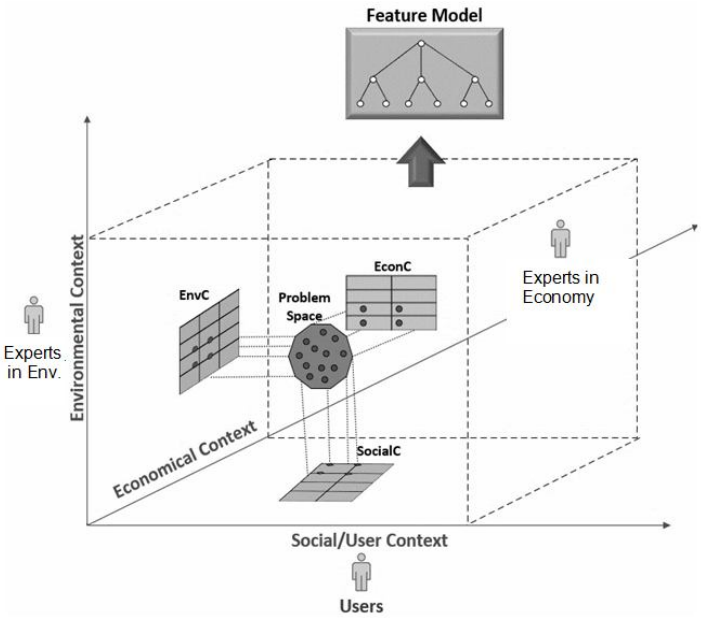


Fig. 2. The conceptual schema of RG method usage (based on [13])

$$PS(RG) \subseteq E \times C \times V \quad (2)$$

The further consideration of the RG method to handle the users and expert's knowledge on the example in SHS domain can be found for more details in [10].

Some CASE – tools for knowledge handling in domain analysis: GridSuite and SOVA systems in a nutshell

In addition to functional requirements elicitation, the RG methodology can provide an opportunity for analysis of experts' design approaches to system architecture. The RG technique can be used to explore the multidimensional space of the complex adaptive systems of the social-technical environment (e.g. "Smart-Home systems" (SHS) domain).

The whole process of variability analysis through the RG can be generalized into following steps [13], which are presented in Fig. 3.

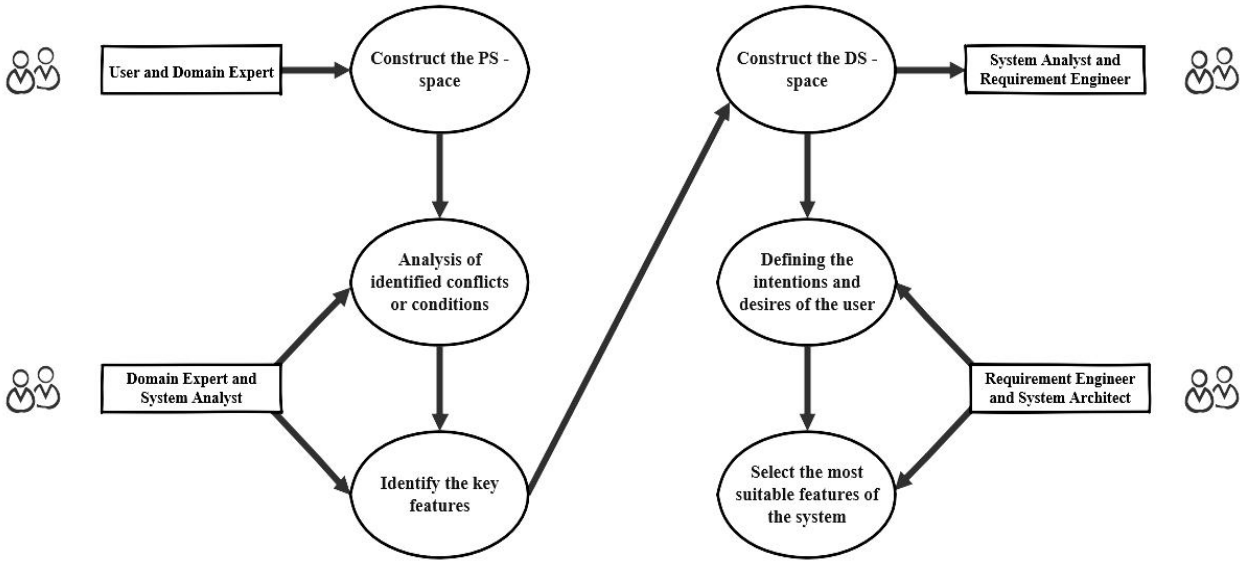


Fig. 3. Step-by-step process of variability modeling with RG method (to compare with [13])

Variability analysis process starts from construction of the problem space (PS) involving users and domain experts and then continues by analysis of conflicts or contradictions, identification of key features, construction of the design space (DS), definition of the intentions and user desires and selection of the most suitable features of the system involving the requirements engineers and designers through all the listed below stages.

Presented step-by-step variability analysis in the automated form can be implemented using the GridSuite tool [14] (CASE - tool) for elicitation, editing and analyzation of the interview-based RG. Comparing with other tools that are used to work with RG, GridSuite tool highlights user's role in RG creation as an interpreter of the interview data. Besides, GridSuite has additional build-in instruments for editing, analyzing and statistical calculations. The input data is a new or existing expert interview. The output data is an XML file with elements, functional system characteristics and their evaluations, or a created dendrogram, from which it's possible to elicit similarity, differences and variability indicators of elements/functional properties.

The main functionalities of the GridSuite tool are [15]:

- ability to present new or existing interviews as the inputs for further PS description;
- editing of one (adding, changing, deleting) or several RG's (merging grids);
- analysis of the obtained RG's by numerous methods (cluster analysis method, raw data and it's statistics method, main components analysis method and mouse sort method);
- parsing of the created RG's files (filters applying, reports creation, etc.).

The next step of experts' knowledge handling is the usage of the instrument, with help of which it is possible to build a FODA – model of domain space on the basis of the GridSuite initial data. This can be done with the SOVA (Semantic and Ontological Variability Analysis) tool [16] which is a CASE - tool combines semantical and ontological approaches to reflect system behavior rather than its implementation. The estimation of domain-focused behavior for existing or future system occurs by the representation of such system dynamical aspects in the form of ontology [17]. The appropriate semantic metrics are used to assess the similarity of the related system elements and to their variability analysis.

Fig. 4 represents the SOVA – tool functional properties for the facilitation of the ontology system creation, its behavior evaluation and similarity identification of the related elements, namely:

- text artifacts parsing using natural language processing methods (NLP) that consist of semantical role labeling, pronouns replacement and ontological model creation;
- similarity calculation of the analyzed behavior forms on the basis of entered into the system artifacts according to the criteria of initial conditions, external events and post-conditions;
- creation of a functional diagram on the hierarchical agglomerative clustering algorithm basis that represents system variability and composes the foundation of the domain model (DM).

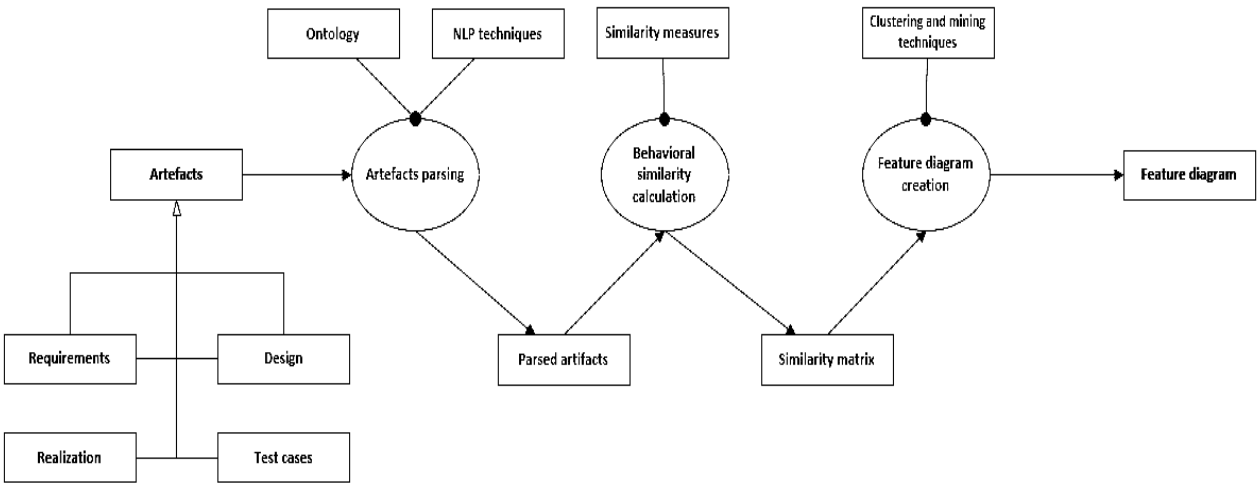


Fig. 4. SOVA tool basic functionality [17]

A technological scheme to implement the proposed approach

Based on the above-mentioned methodologies and CASE - tools, the knowledge elicitation process can be automated to increase efficiency of SPL development in the following way:

– construction of problem and domain space using experts (users) and domain experts (technical, social and economic) interviews;

– RG creation for certain aspects and contexts based on analysis of the constructed space;

– analysis of the obtained results, identification of similar, different, and variable components and functional characteristics;

– construction of variable FODA – model using semantic ontology approach and user-stories, received from the phase of knowledge elicitation, as a basis;

– applying of received feature-oriented domain analysis – model in XML format in the further

development phases.

Fig. 5 shows the developed technological procedure in the form of IDEF0 notation diagram [18], which represents the whole automatization process of expert knowledge handling in the Domain Analysis phase of FLC.

The proposed procedure consists of 2 functional blocks (FB).

According to the rules of IDEF0 notation, each FB, namely A11 "Knowledge Elicitation" and A12 "FODA – model Construction", has four interface types: "Input", "Output", "Control" and "Implementation mechanism". This allows to represent the connection of all resources: inputs, models, methods, algorithms, experts and CASE – tools, that are needed for automatization of knowledge handling process.

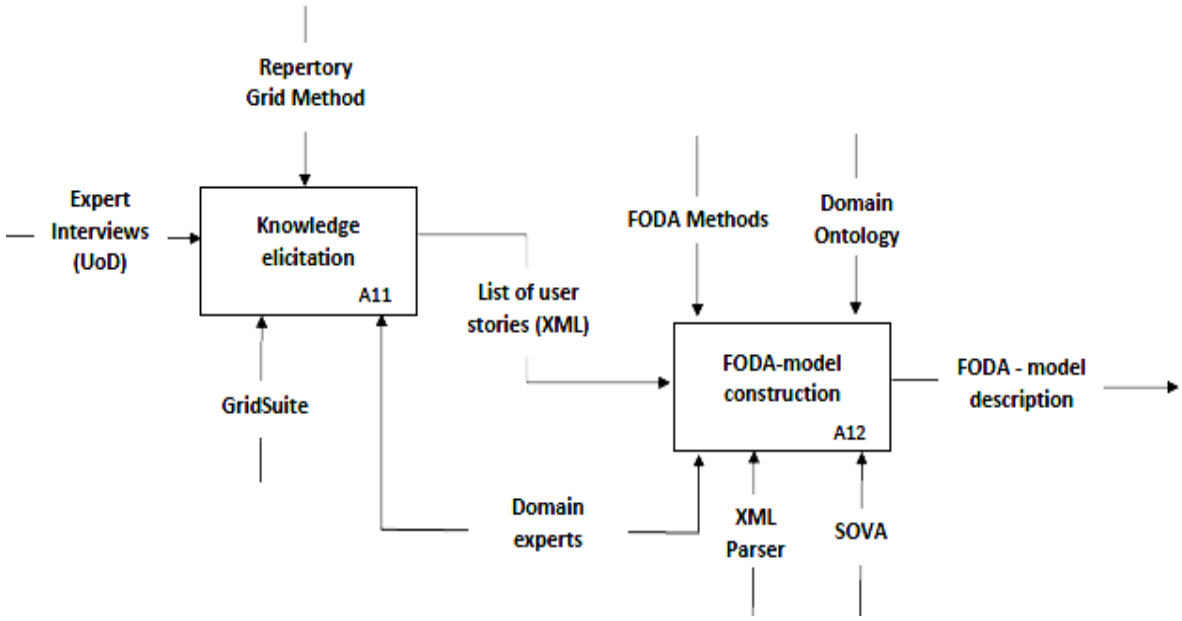


Fig. 5. The elaborated IT - solution for the combined usage of GridSuite and SOVA tools

The given scheme includes control interfaces and implementation interfaces. At the input of knowledge elicitation process, we receive experts' interviews (UoD), which are generated using RG method, domain experts' knowledge and GridSuite tool. As the output we get a list of user-stories [19] in XML format, that serves as an input for the next process of FODA – model construction. This process is carried out with the semantic ontology method and FODA methods, using SOVA tool for the variability graph creation, domain experts' knowledge and XML – parser for input handling.

As the result, at the output of the last process we receive the description of FODA model in XML format, which can be used on the further phases of SPL development.

Tool installation issues and testing results in the development of "Smart – Home" systems

The full version of the GridSuite tool is not free, but for the basic functional properties testing it's possible to install a trial demo-version, which provides the functionality for RG building, editing and complete analysis [15].

For the SOVA CASE – tool usage, the next steps have to be done:

- install the Protégé tool [20], which is a free ontological editor and open source framework for creating intelligent systems and building knowledge – based solutions;
- load additional PG ETI SOVA plug-in to work with SOVA tool [21];
- install additional HermiT OWL plug-in which is needed to determine, whether the created ontology is consistent or not and, also, to determine the connections between its elements, properties and axioms;
- activate the PG ETI SOVA that is a visualization tool for the construction of variability ontology graph with elements and their functional properties.

The RG construction begins with experts' interviews handling.

The work will be demonstrated on a small PS dimension (4x4) for the "SHS" domain for the social context of the PS. To construct RG, an arbitrary range of values is needed to be selected within which, depending on the context, the need for functional properties is estimated.

As a rule, values from 1 to 5 are selected, where 1 indicates that in the given context functionality is performed for the device, specified on the RG's left side; 5 – for the device, specified on the RG's right side. Values from 2 to 4 indicate the feature variability.

Besides, for the RG, elements of the corresponding context and constructs (certain functional devices' properties of the SHS system) in the bipolar contradistinction form are needed to be specified.

After RG creation, it becomes possible to analyze the obtained data through the computer cluster analysis instrument that automatically changes the RG to eliminate contradictions and allows to inspect the similarities, differences and variability of elements and

constructs visually and in percentage.

Fig. 6 shows the result of the RG cluster analysis in the PS based on the social context. Elements of the presented RG are the options of user activity, namely “Sleeping”, “Exercising”, “Leaving the house”, “Rest”, which in one or another way affect the need (or lack of it) for the certain usage of the devices’ functionality.

Constructs of the RG are the functional properties of the devices in the bipolar form, namely “TV should be turned on / TV should be turned off”, “Brightness of the light should be higher / Brightness of the light should be lower”, “Don’t notify about the movement inside / Notify about the movement inside”, “Increase the volume of audio speakers / Decrease the volume of audio speaker”.

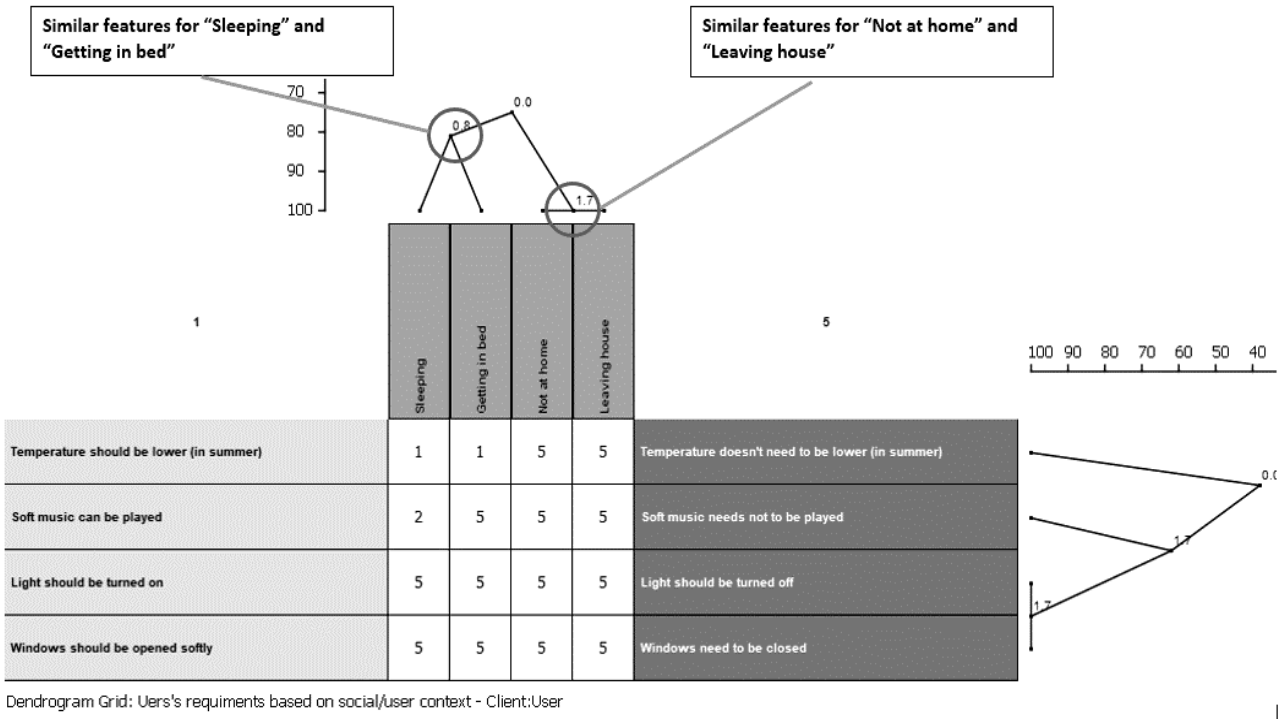


Fig. 6. RG cluster analysis, built on the basis of social context for the PS

Analyzing the obtained results, it’s obvious that the “Sleeping” and “Getting in bed” contexts require the same or similar features (similarity point), since, based on the estimations for the given contexts, the features as “Temperature should be lower / Temperature doesn’t need to be lower” or “Light should be turned on / Light should be turned off” are invariable and have the only use in all conditions: for both contexts only features “Temperature should be lower” and “Light should be turned off” are needed. As for the “Soft music can be played / Soft music needs not to be played” feature in the context of “Sleeping”, the estimation of two means the variability of the feature as its usage depends on every user’s needs and desires. Alike RGs also can be constructed and analyzed for the economic and environmental contexts. As the output, in GridSuite tool we get built RGs with all elements and constructs as a list of user stories in the XML format.

On their basis or on the analysis of the dendrograms and percentages of the devices’ similarity/ differences/ variability, it becomes possible to build a variable FODA – model for the “SHS” domain using the SOVA tool. The ontology in the above-mentioned tool is built as follows:

- creation of the classes and subclasses representing RG elements;
- creation of the properties and connections between classes representing RG constructs.

Fig. 7 shows a variable FODA – model built with the SOVA tool on the basis of GridSute tool results.

The presented ontology graph elements have the following semantical meaning [20, 22]:

- the round node T is a “Thing” class or a root class, from which we start to build the target ontology. The “Thing” class defines that each subclass under it is represented as the real-world entity;
- the rectangular elements like as “Nighttime”, “Lamp” or “Comfort” are the model entities (or ontology classes), that represent all RG elements or conditions, and they have logical connections between each other;
- the rectangular elements like as “isUsedCondition” or “is A” represent of the property existence, and they define if the appropriate entity is a RG element or a condition;
- the directional arrows show the relationship between model entities (generalization, composition, aggregation, etc.).

As the output from the SOVA tool we get a visualized variable ontology graph and file in the XML format with the constructed variable FODA – model description. Fig. 8 represents the obtained result with the use of the SOVA tool in the form of a description that can be used for the further stages of SPL development.

E.g., in [9] is already shown, that basing on a

given FODA model it is possible to generate a target source code framework with a predicted reusability coefficient value, and this approach is exactly useful for SPL development.

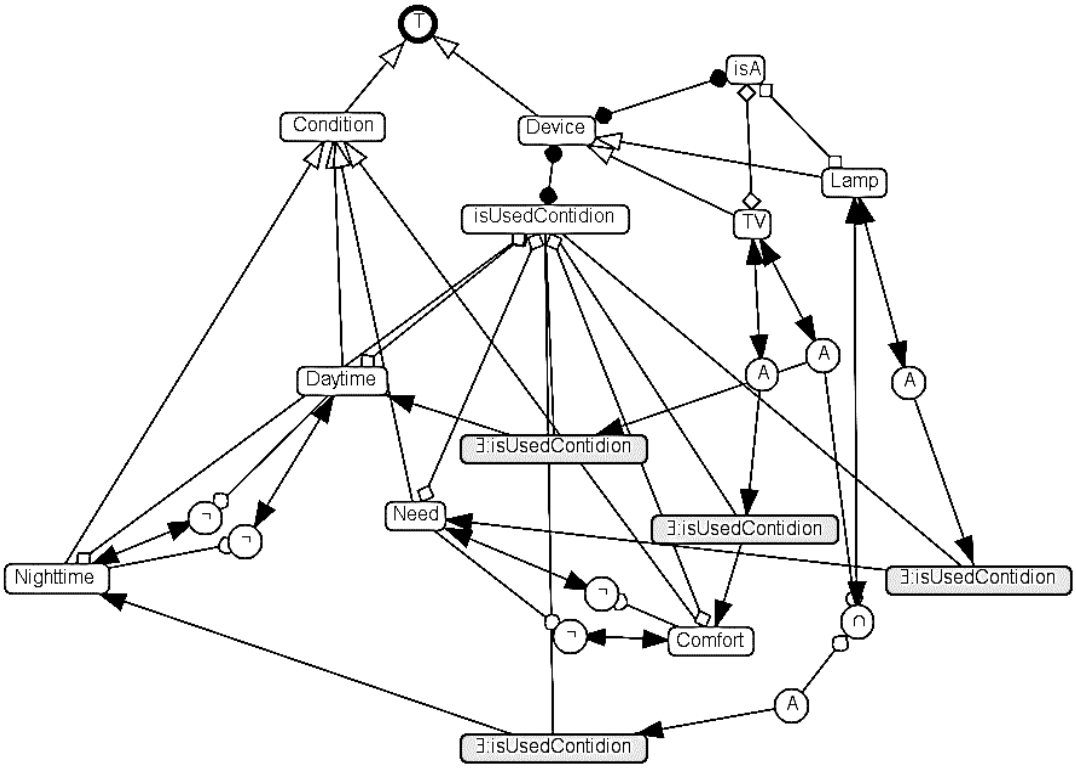


Fig. 7. Variable FODA – model for the "Smart – Home system" domain

```
<!-- http://www.semanticweb.org/shevk/ontologies/2020/4/untitled-ontology-40#isA -->

<owl:ObjectProperty rdf:about="&untitled-ontology-40;isA">
    <rdfs:range rdf:resource="&untitled-ontology-40;Audio_Speaker"/>
    <rdfs:domain rdf:resource="&untitled-ontology-40;Device"/>
    <rdfs:range rdf:resource="&untitled-ontology-40;Lamp"/>
    <rdfs:range rdf:resource="&untitled-ontology-40;Motion_Sensor"/>
    <rdfs:range rdf:resource="&untitled-ontology-40;TV"/>
</owl:ObjectProperty>



<!-- http://www.semanticweb.org/shevk/ontologies/2020/4/untitled-ontology-40#isUsedContidion -->

<owl:ObjectProperty rdf:about="&untitled-ontology-40;isUsedContidion">
    <rdfs:range rdf:resource="&untitled-ontology-40;Always"/>
    <rdfs:range rdf:resource="&untitled-ontology-40;Comfort"/>
    <rdfs:range rdf:resource="&untitled-ontology-40;Daytime"/>
    <rdfs:domain rdf:resource="&untitled-ontology-40;Device"/>
    <rdfs:range rdf:resource="&untitled-ontology-40;Need"/>
    <rdfs:range rdf:resource="&untitled-ontology-40;Nighttime"/>
    <rdfs:range rdf:resource="&untitled-ontology-40;Sometimes"/>
    <rdfs:range rdf:resource="&untitled-ontology-40;WeatherDependence"/>
</owl:ObjectProperty>
```

Fig. 8. FODA – model description in the XML format

Conclusion and future work

In this research the actual scientific and technical problem: the development of software product lines (SPL) with respect to variability issues at all stages of their full life cycle (FLC) is considered, especially using the recognized framework for FLC of SPL proposed by K. Pohl. To analyze this problem with respect to the both modeling and technological issues, the logical mapping of the main FLC phases to the structured scheme one of wide-used software agile-development, namely to the Scrum method is done.

As the result of this mapping approach the conclusion is made, that the special attention has to be

paid to such most complex and weak-formalized stages in the FLC as a domain analysis (DA) stage. It is mentioned, that to perform this process in an effective way some methods and tools of expert knowledge handling can be used, and in this research the repertory grids method is motivated chosen. To support the usage of this method in DA the proposal is made to elaborate the special IT-solution using some already available CASE-tools. The essentials functionality features of two such systems: GridSuite and SOVA (Semantical and Ontological Variability Analysis) are considered, and basing on this result, the integrated IT-solution is elaborated and presented in form of the IDEF0 diagram. Finally, the main technological facets of these tools installation are studied and tested, and the test-case to show the possibility to generate the FODA-variability model for the "Smart-home" application domain is provided.

As the next step to be done in our research we are going to develop the special software components to apply a collection of quantitative metrics for quality assessment of the generated domain models.

References

1. Sommerville, I. (2015), *Software Engineering,* 10th edition, Addison-Wesley, NY.
2. Pohl, Klaus, Böckle, Günter, van der Linden, Frank J. (2005), *Software Product Line Engineering: Foundations, Principles, and Techniques*, Springer, 467 p.
3. Lavrishcheva, K. M., Koval, G.I., Babenko, L.P., Slabospytska, O.O. and Ignatenko, P.P. (2011), *New theoretical bases of technology production of software systems families in the context of generating programming:* monograph, Institute Program Systems, NAS Ukraine, Kyiv, 277 p. (in Ukrainian).
4. Tiihonen, Juha, Raatikainen, Mikko, Myllärniemi, Varvana and Männistö, Tomi (2016), "Carrying Ideas from Knowledge-based Configuration to Software Product Lines", *Proceedings of the 15th International Conference on Software Reuse*, Cyprus, June 5-7, , pp. 55–62.
5. Methods of knowledge acquisition automatization in expert systems: classification, current state, comparative analysis, *International scientific-practical journal "Software products and systems"*, available to: http://www.swsys.ru/index.php?page= article &id=1187&lang=.docs (in Russian).
6. Capilla, R., Bosch, J. and Kang, K. (2013), *Systems and Software Variability Management*, Springer, Berlin.
7. Karagiannis, D., Mayr, H.C. and Mylopoulos, J. (2016), *Domain-Specific Conceptual Modeling: Concepts, Methods and Tools*, Springer, Berlin.
8. Tune, N. and Millet, S. (2015), *Patterns, Principles And Practices Of Domain-driven Design*, 1st ed., John Wiley & Sons.
9. Tkachuk M., Gamzaev R., Martinkus I., Sokol, V. and Tovstokorenko, O. (2018), "Towards Effectiveness Assessment of Domain Modelling Methods and Tools in Software Product Lines Development", *Enterprise Modelling and Information Systems Architectures – International Journal of Conceptual Modeling*, Vol. 13, Germany, pp. 190-206.
10. Gamzayev, R.O., Tkachuk, M.V. and Shevkoplias D.O. (2020), "Handling of Expert Knowledge in Software Product Lines Development with Usage of Repertory Grids Method", *Bulletin of the V.N. Karazin Kharkiv National University: 'Mathematical Modeling. Information Technologies. Automated Control Systems*, No. 47, pp. 13-24.
11. Eleutério, J. (2017), *A Comparative Study of Dynamic Software Product Line Solutions for Building Self-Adaptive Systems*, 30 p.
12. Kumar, Manish and Dwivedi, R.K. (2020), *Applicability of Scrum Methods in Software Development Process*, available at: https://ssrn.com/abstract=3610759 or http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3610759.
13. Sangeeta, D. and Seok-Won, L. (2015), From Requirements Elicitation to Variability Analysis Using Repertory Grid: A Cognitive Approach, *Proceeding of RE*, Ottawa, ON, Canada, pp. 46-55.
14. (2020), *GridSuite*, Repertory Grid Software, 2003-2020, available at: https://www.gridsuite.de/45623/41431.html.
15. Fromm, M. (2017), *Manual for GridSuite 4 and 4+*, 54 p.
16. Thorsten, Berger, Marsha, Chechik, Timo, Kehrer and Manuel, Wimmer (2019), "Software evolution in time and space: unifying version and variability management", *Report from Dagstuhl Seminar*, 19191, May 5-10, p. 30.
17. Itzik, N. and Reinhartz-Berger, I. (2014), "SOVA - A Tool for Semantic and Ontological Variability Analysis", *CAiSE'14 Forum*, CEUR Workshop Proceedings 1164, pp. 177-184.
18. Lavrishcheva, K. M. (2008), *Software Engineering*, IPU, Kyiv, 319 p., available at: URL: http://csc.knu.ua/uk/library/books/lavrishcheva-6.pdf (in Ukrainian).
19. Lucassen, G., Dalpiaz, F., Martijn, J. and Brinkkemper S. (2016), "Improving Agile Requirements: the Quality User Story Framework and Tool", *Requirements Engineering*, Vol. 21 pp. 383-403.
20. (2020), *Protégé System*, Stanford University, available at: https://protege.stanford.edu/products.php#desktop-protege.
21. (2020), *Simple Ontology Visualization API*, Jean-Philippe Lang, 2006-2013, available at: https://kask.eti.pg.gda.pl/redmine/projects/sova/wiki/Main_Page.
22. (2020), *SOVA-Visualization symbols*, Appendix C, available at: https://protegewiki.stanford.edu/wiki/File:SOVA-Symbols.pdf.

Received (Надійшла) 10.09.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.11.2020

Відомості про авторів / About the Authors

Гамзаєв Рустам Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри моделювання систем і технологій, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна;
Rustam Gamzayev – PhD, Asc. Professor, Doctoral Student of the Department of Systems and Technology Modeling, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: rustam.gamzayev@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-2713-5664.

Ткачук Микола Вячеславович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри моделювання систем і технологій, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна;
Mykola Tkachuk – Dc. of Techn. Science, Professor, Head of the Department of Systems and Technology Modeling, V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: mykola.tkachuk@karazin.ua; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-0852-1081.

Шевкопляс Дар'я Олександрівна – студентка кафедри моделювання систем і технологій, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна;
Daria Shevkoplias – student of the Department of Systems and Technology Modeling, V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: shevkoplysdarya23@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-5870-771X.

Знання-орієнтована інформаційна технологія для управління варіабельністю на етапі доменного аналізу у розробці програмного забезпечення

Р. О. Гамзаєв, М. В. Ткачук, Д. О. Шевкопляс

Анотація. Предметом даної роботи є дослідження, пов'язаних з управлінням варіабельністю на етапі доменного аналізу (ДА) у повному життєвому циклі (ПЖЦ) лінійки програмних продуктів (ЛПП). **Основною метою** цієї дослідницької роботи є розробка нової інформаційної технології, заснованої на знаннях, для підтримки управління варіабельністю в ДА як у найскладнішому та слабко-формалізованому етапі в ПЖЦ ЛПП. Для досягнення цієї мети були сформульовані та вирішені **наступні завдання**: проаналізувати проблеми варіабельності у ПЖЦ на прикладі сучасного підходу до гнучкої розробки - у методології Scrum; вивчити, як методи обробки знань можуть бути використані для підтримки діяльності користувачів та експертів доменів на етапі ДА з урахуванням моделювання варіабельності програмного забезпечення; зробити мотивований вибір CASE-інструментів для розробки відповідного IT-рішення для підтримки знання-орієнтованого в ДА; представити це IT-рішення у структурованій формі, розглянути деякі питання його впровадження та обговорити перші результати тестування. **Методи**, що використовуються в цьому дослідженні: проблемно-орієнтований підхід до розробки програмного забезпечення; метод репертуарних сіток та онтології для обробки знань експертів, нотація IDEF0 для специфікації запропонованого IT-рішення, орієнтований на функції доменний аналіз (FODA) для моделювання варіабельності в ЛПП. **Висновки:** результати цього дослідження показали, що особлива увага повинна бути приділена ДА в ПЖЦ, зокрема, із застосуванням знання-орієнтованих методів. Для ефективного проведення цього процесу мотивовано обрано та проаналізовано переваги методу репертуарних сіток для обробки експертних знань. Для автоматизації застосування цього методу в ДА запропоновано розробити відповідне IT-рішення, використовуючи деякі вже доступні CASE-інструменти. Розглянуто основні особливості функціональності двох таких систем: GridSuite та SOVA (семантичний та онтологічний аналіз змінності), і на основі цього результату розроблене та представлене інтегроване IT-рішення у формі діаграми IDEF0. Розглянуто основні технологічні аспекти встановлення цих інструментів, а також надається тестовий приклад, який показує можливість генерування варіабельної FODA моделі для застосування в розробках систем «Розумний дім».

Ключові слова: знання, програмне забезпечення; життєвий цикл; доменний аналіз; варіабельність; метод репертуарних сіток; онтологія; інформаційна технологія.

Знание-ориентированная информационная технология для управления вариабельностью на этапе доменного анализа в разработке программного оюеспечения

Р. А. Гамзаев, Н. В. Ткачук, Д. А. Шевкопляс

Аннотация. Предметом данной работы является исследование вопросов, связанных с управлением вариабельностью на этапе доменного анализа (ДА) в полном жизненном цикле (ПЖЦ) линейки программных продуктов (ЛПП). **Основной целью** этой исследовательской работы является разработка новой информационной технологии, основанной на знаниях, для поддержки управления вариабельностью в ДА как в сложном и слабо-формализованном этапе в ПЖЦ ЛПП. Для достижения этой цели были сформулированы и решены **следующие задачи**: проанализировать проблемы вариабельности в ПЖЦ на примере современного подхода к гибкой разработки - в методологии Scrum; изучить, как методы обработки знаний могут быть использованы для поддержки деятельности пользователей и экспертов доменов на этапе ДА с учетом моделирования вариабельности программного обеспечения; сделать мотивированный выбор CASE-инструментов для разработки соответствующего ИТ-решения для поддержки знания-ориентированного в ДА; представить это ИТ-решение в структурированной форме, рассмотреть некоторые вопросы его внедрения и обсудить первые результаты тестирования. **Методы**, используемые в этом исследовании: проблемно-ориентированный подход к разработке программного обеспечения; метод репертуарных сетей и онтологии для обработки знаний экспертов, нотация IDEF0 для спецификации предложенного ИТ-решения, ориентированный на функции доменный анализ (FODA) для моделирования вариабельности в ЛПП. **Выводы:** результаты этого исследования показали, что особое внимание должно быть уделено ДА в ПЖЦ, в частности, с использованием знание-ориентированных методов. Для эффективного проведения этого процесса мотивировано избран и проанализированы преимущества метода репертуарных сетей для обработки экспертных знаний. Для автоматизации применения этого метода в ДА предложено разработать соответствующее ИТ-решения, используя некоторые уже доступны CASE-инструменты. Рассмотрены основные особенности функциональности двух таких систем: GridSuite и SOVA (семантический и онтологический анализ сменности), и на основе этого результата разработанное и представлено интегрированное ИТ-решение в форме диаграммы IDEF0. Рассмотрены основные технологические аспекты установления этих инструментов, а также предоставляется тестовый пример, показывающий возможность генерирования вариабельной FODA модели для применения в разработках систем «Умный дом».

Ключевые слова: знания; программное обеспечение; жизненный цикл; доменный анализ; вариабельность; метод репертуарных решеток; онтология; информационная технология.

УДК 519.816:004.032.2 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.4.07**

В. Г. Левашенко [1], А. С. Ляшенко [2], Г. А. Кучук [3]

[1] Жилинский университет, Жилина, Словакия
[2] Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина
[3] Национальный технический университет “ХПИ”, Харьков, Украина

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ ДАННЫХ

Аннотация. Разработка инструментария оценки принимаемых решений является актуальной и востребованной задачей на современном этапе развития информационных технологий. Таким инструментарием являются, например, системы поддержки принятия решений (СППР). В работе предлагается математический аппарат построения СППР. Построение СППР предполагает анализ имеющихся результатов наблюдений или измерений и выработку стратегии проверок исходных параметров в виде дерева нечетких решений или продукционных правил. Основу предлагаемого аппарата составляют суммарные информационные оценки (информация и энтропия) для нечетких наборов данных. Использование нечетких данных наиболее полно соответствует человеческой природе, поскольку на практике люди часто применяют субъективные ощущения и априорные знания, чем точные вероятностные критерии. Поэтому, используя нечеткую логику и рассматривая степень возможности как нечеткую меру, эксперты имеют возможность описывать реальные данные с достаточной точностью. Исследована взаимосвязь предложенных суммарных информационных оценок. В работе приведены примеры, демонстрирующие использование предлагаемого математического аппарата на практической задаче. В дальнейшей работе, авторы планируют привести результаты экспериментальных исследований предлагаемого подхода и его сопоставление с иными известными методами и алгоритмами. Указанное сопоставление представляется для широкого круга формализованных данных, хранящихся в известном репозитории *UCI Machine Learning Repository*. В качестве сопоставляемых методов и алгоритмов планируется выбрать иные алгоритмы построения деревьев нечетких решений, алгоритмы байесовской классификации, построения деревьев решений C4.5, CART и метод ближайших соседей.

Ключевые слова: системы поддержки принятия решений; нечеткая логика; деревья нечетких решений.

Введение

Постановка проблемы. Происходящие в мире процессы, характеризуются динамичностью, неопределенностью и сложностью прогнозирования их развития. Принимаемые на различных уровнях решения зачастую противоречивы и не позволяют достичь заранее поставленных целей. Поэтому актуальной задачей является разработка инструментария оценки принимаемых решений. Таким инструментарием являются, например, системы поддержки принятия решений (СППР). Практическое применение этих систем позволяет в минимальные сроки и с минимальными затратами выполнить анализ текущего состояния объекта или процесса, выработать оптимальное по ряду критериев решение об его развитии, исследовать чувствительность принятого решения и дать научно обоснованные выводы о результатах принятого решения. Таким образом, окажется возможным минимизировать затраты на развитие объекта и потери от недостаточно проработанных решений, что является одним из основных приоритетов развития на современном этапе.

В настоящее время вопросы создания методов и алгоритмов, реализуемых в СППР, достаточно хорошо изучены. Однако, используемые в современных СППР методы и алгоритмы должны учитывать возможную не стохастическую неопределенность исходных данных, вызванную недостаточной точностью измерений, неполным соответствием методик оценки исходных показателей их реальному состоянию, неоднозначностью восприятия человеком (экспертом) окружающей действительности. Одним из перспективных подходов к учету такой неопределенности является представление исходных значений нечеткими и многозначными данными. Применение в современных СППР данных такого типа позволяет более адекватно описывать объекты и анализировать их состояние. Поэтому актуальной задачей развития современных СППР является разработка инструментария нечеткого вывода для анализа нечетких и многозначных данных.

Цель работы заключается в описании математического аппарата построения СППР, а именно модуля логического вывода. Предлагаемая СППР предполагает генерацию последовательности проверок исходных параметров, используя информацию о предыдущих результатах проверок. Таким образом, оказывается возможным осуществить прогнозирование возможных ситуаций с заданной степенью достоверности и с минимальными затратами. Применение предлагаемого математического аппарата показано на простейших примерах.

Постановка задачи принятия решений

Как правило, любой объект или процесс описывается системой сложных и взаимосвязанных показателей. Между этими показателями существует функциональная зависимость. Одним из способов представления такой зависимости является структурная функция. В этом случае исходные показатели объекта интерпретируются как исходные атрибуты структурной функции, а результирующие – как ее результирующие атрибуты. Значения, которые принимают показатели объекта, есть значения соответствующих атрибутов структурной функции [1].

Поскольку реальный объект имеет сложную структуру, то система описывающих его показате-

© Левашенко В. Г., Ляшенко А. С., Кучук Г. А., 2020

лей достаточно громоздка и в результате структурная функция обладает значительной вычислительной сложностью. Одним из подходов к снижению этой сложности является декомпозиция структурной функции. Суть декомпозиции заключается в разбиении этой функции на подфункции с меньшим числом атрибутов.

Аргументы таких подфункций будем интерпретировать как промежуточные атрибуты, а сами подфункции также являются структурными функциями меньшей сложности и, в свою очередь, могут быть декомпозируемы. Будем считать, что структурные функции являются функциями m-значной логики. На рис.1 представлена иерархия структурных функций и функций m-значной логики [2].

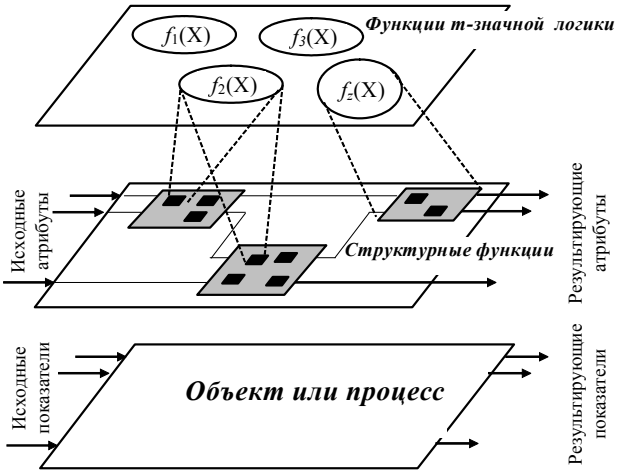


Рис. 1. Представление объекта в виде структурной и логической функций

Основной составляющей процесса принятия решений является выбор решения из множества альтернатив. В ряде случаев анализ исходной ситуации и выбор наилучшего решения осуществляется путем сопоставления с решениями, принятыми в прошлом [3-5]. При этом следует минимизировать затраты на анализ исходной ситуации, за счет определения последовательности наиболее значимых показателей, описывающих ситуацию. Такой выбор формулируется следующим образом. Имеется исходное пространство (среда) решения, описываемое независимыми показателями и конечное множество вариантов решения (альтернатив). Требуется построить модель выбора альтернативы, лучшей в некотором конкретном смысле в зависимости от конкретного состояния независимых показателей, описывающих среду решения.

Таким образом, принятие решения предполагает выбор наилучшего решения из совокупности возможных альтернатив. Этот выбор осуществляется на основе анализа значений исходных показателей. Под термином исходный показатель процедуры принятия решения понимаем измеряемую характеристику (свойство) объекта или процесса, оказывающую влияющие на принимаемое решение.

Пусть имеется n исходных показателей. Каждый i-й (i=1,...,n) исходный показатель ассоциирован с исходным атрибутом A_i, описываемым i-й лингвистической переменной, принимающей m_i ($m_i \geq 2$) возможных значений (термов) $A_{i,1},\ldots,A_{i,j},\ldots,A_{i,m_i}$. В свою очередь решение ассоциировано с результирующим атрибутом, описываемым лингвистической переменной B, а имеющиеся m_b ($m_b \geq 2$) альтернатив решения – значениями этой переменной $B_1,\ldots,B_{jb},\ldots,B_{m_b}$.

Тогда измерение (оценка) i-го исходного показателя предполагает установление всех m_i значений $A_{i,j}$ атрибута A_i. А принятие решения предполагает установление всех m_b значений результирующего атрибута B. Наилучшим решением будет та jb-я альтернатива (jb=1,...,m_b), которой соответствует максимальное значение B_{jb} результирующего атрибута B.

Пример 1. Для принятия решения о надежности возврата кредита оцениваются 4 исходных показателя: *Возраст клиента*, *Годовой доход*, *Стаж работы* и *Покрытие кредита залогом*, ассоциированные с соответствующими исходными атрибутами A_1, A_2, A_3 и A_4. Результатом является оценка надежности возврата кредита. Все исходные и результирующий атрибуты описываются лингвистическими переменными (табл. 1).

Таблица 1 – **Сопоставление показателей и ассоциированных с ними атрибутов, описываемых лингвистическими переменными**

Показатель	Атрибут	Значения атрибута
Тип атрибута – исходный		
Возраст клиента	*Возраст* (A_1)	*Молодой* ($A_{1,1}$); *Средний* ($A_{1,2}$); *Пожилой* ($A_{1,3}$)
Годовой доход	*Доход* (A_2)	*Высокий* ($A_{2,1}$); *Средний*($A_{2,2}$); *Низкий* ($A_{2,3}$)
Стаж работы	*Стаж* (A_3)	*Малый* ($A_{3,1}$); *Большой* ($A_{3,2}$)
Покрытие залогом	*Залог* (A_4)	*Недостаточный* ($A_{4,1}$); *Достаточный* ($A_{4,2}$)
Тип атрибута – результирующий		
Надежность возврата кредита	*Надежность* (B)	*Полная* (B_1); *Частичная* (B_2); *Низкая* (B_3)

Таким образом, исходные A_i (i = 1,...,n) и результирующий B атрибуты описываются лингвистическими переменными и определены группами термов $\{A_{i,1},\ldots,A_{i,j},\ldots,A_{i,m_i}\}$ и $\{B_1,\ldots,B_{jb},\ldots,B_{m_b}\}$ соответственно.

Нечеткая логика и деревья решений

Эксперт, анализируя события реального мира, быстро и с высокой точностью и надежностью оценивает полученную информацию. В своей деятельности эксперт часто оперирует такими оценками, как “*уверен*”, “*возможно*”, “*абсолютно невозможно*” и др. В результате оказывается допустимым представить эмпирические характеристики посредством числовых значений. Использование для представления алфавита четкой (булевой или многозначной) логик не всегда адекватно описывает эти характеристики, а в ряде случаев не позволяет достичь необходимой точности. Сложность описания состоит в некорректной трансформации числовых

значений в лингвистические на границах разных термов. Так, небольшое изменение исходного действительного значения на границе приводит к получению иного значения лингвистического терма.

Общая проблема использования четких данных – их неполное соответствие человеческой природе. На практике люди применяют собственные субъективные ощущения, априорные знания и личную память больше, чем точные вероятностные критерии распределения различных данных. Поэтому, используя нечеткую логику и рассматривая степень возможности как нечеткую меру, эксперты описывают реальные данные с достаточной точностью. При этом принадлежность элементов к множеству задается функцией принадлежности.

Определение 1. Нечеткий набор A, принадлежащий множеству U характеризуется *функцией принадлежности* μ_A: $U \to [0,1]$. Для каждого элемента u в U $\mu_A(u)$ задает меру принадлежности элемента u к A.

Для $u \in U$ равенство $\mu_A(u)=1$ означает, что u однозначно принадлежит аргументу A и $\mu_A(u) = 0$ означает, что u не принадлежит аргументу A, и $0 < \mu_A(u) < 1$ означает, что u частично принадлежит A. В случае, если $\mu_A(u) = 0$ или $\mu_A(u) = 1$ для всех $u \in U$, мы имеем дело с четкими данными.

Пример 2. Поясним на рис. 2 взаимосвязь действительных и лингвистических значений, представленных в многозначной (m = 3) и нечеткой формах. Действительному числу x^* соответствует значение *Молодой* лингвистической переменной с уверенностью 0.7 и значение *Средний* с уверенностью 0.3.

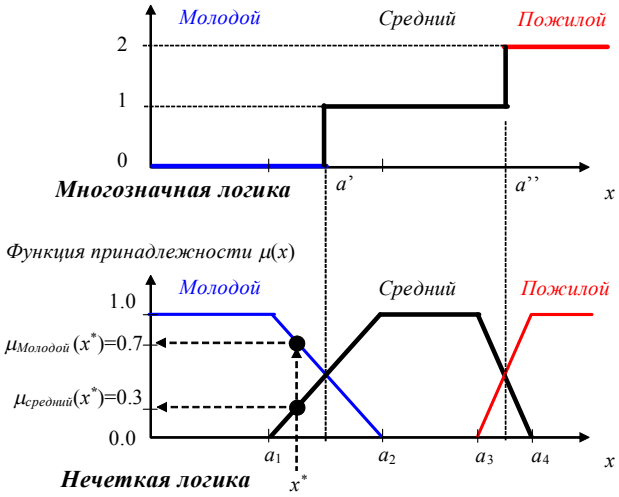


Рис. 2. Пояснение взаимосвязи действительных и лингвистических значений, представленных в многозначной (m = 3) и нечеткой формах

В целом, если значение x немного меньше величины a', то мы вынуждены представлять ее термом *Молодой*, а если немного больше, то уже совершенно иным термом *Средний*. При использовании нечеткой логики этой граничной проблемы удается избежать. Поскольку при подобном увеличении значения x функции принадлежности термов *Молодой* и *Средний* изменятся незначительно.

Вопрос получения лингвистических значений не является предметом исследований данной работы. Авторы рекомендуют ознакомиться с анализом и алгоритмом, представленные в работах [6, 7].

Определение 2. Мощность (мера *cardinality*) нечеткого набора A равна $M(A)=\Sigma_{u \in U} \mu_A(u)$.

Будем полагать, что исходными данными для принятия решений является таблица с нечеткими данными, содержащая формализованные сведения о N возможных ситуациях (комбинаций значений исходных атрибутов) и рекомендуемой в этих ситуациях альтернативе решения [8, 9]. Эти рекомендации априори получены, например, на основе наблюдений, экспертных оценок или путем преобразования действительных значений в лингвистические переменные.

Определение 3. *Таблица с нечеткими данными* есть шестерка $\{CS, CV, AS, AV, P\}$, где CS– множество исходных атрибутов, анализируемых при принятии решения; CV – множество значений исходных атрибутов; AS – множество результирующих атрибутов (в дальнейшем, для упрощения изложения будем полагать наличие единственного результирующего атрибута); AV – множество значений результирующего атрибута; P – множество из N ситуаций, представляемое наборами значений исходных и результирующего атрибутов.

Пример 3. Априори заданные результаты N=16 измерений значений 4 исходных (*Возраст*, *Доход*, *Стаж*, *Залог*) и результирующего (*Надежность*) атрибутов представлены в табл. 2. Наименование лингвистических переменных и их значений поясняется в примере 1 (табл. 1).

Оценка значения атрибута представляется действительным числом в диапазоне [0; 1] таким образом, чтобы сумма оценок каждого атрибута была равна 1. Так, например, оценка показателя *Возраст* = = {*Молодой*, *Средний, Пожилой*} = {0.9, 0.1, 0.0} интерпретируется как оценка *Молодой* с уверенностью 90% и *Средний* с уверенностью 10%.

Одной из задач, решаемых при функционировании интеллектуальной системы, является формирование правил классификация исходных данных. Анализ публикаций показал перспективность использования для задач классификации деревьев решений. Рассмотрим дерево, в котором каждая ветвь связывает начальный и конечный узлы. Узел, ветви которого не имеют начальных узлов, называется корнем, а узлы, все ветви которого не имеют конечных узлов – листья.

Определение 4. Пусть $A_i \subset \mathbf{A}$ $(1 \le i \le n)$ n групп нечетких атрибутов, где $|A_i| > 1$. Дерево нечетких решений (*Fuzzy decision tree*) – направленное дерево, удовлетворяющее условиям [8]:

- каждый узел дерева описывается атрибутом A_i из **A**;
- каждый лист соответствует одному или нескольким значениям классификационного решения;
- каждая группа нечетких наборов A_i, соответствует атрибуту, и каждый нечеткий набор есть значение этого атрибута $A_{i,j}$.

Таблица 2 – **Априори заданные результаты 16 наблюдений, представленные нечеткими данными**

№	*Возраст* (A_1)			*Доход* (A_2)			*Стаж* (A_3)		*Залог* (A_4)		*Надежность* (B)		
	$A_{1,1}$	$A_{1,2}$	$A_{1,3}$	$A_{2,1}$	$A_{2,2}$	$A_{2,3}$	$A_{3,1}$	$A_{3,2}$	$A_{4,1}$	$A_{4,2}$	B_1	B_2	B_3
1.	0.9	0.1	0.0	1.0	0.0	0.0	0.8	0.2	0.4	0.6	0.0	0.8	0.2
2.	0.8	0.2	0.0	0.6	0.4	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.6	0.4	0.0
3.	0.0	0.7	0.3	0.8	0.2	0.0	0.1	0.9	0.2	0.8	0.3	0.6	0.1
4.	0.2	0.7	0.1	0.3	0.7	0.0	0.2	0.8	0.3	0.7	0.9	0.1	0.0
5.	0.0	0.1	0.9	0.7	0.3	0.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.0	0.0	1.0
6.	0.0	0.7	0.3	0.0	0.3	0.7	0.7	0.3	0.4	0.6	0.2	0.0	0.8
7.	0.0	0.3	0.7	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.1	0.9	0.0	0.0	1.0
8.	0.0	1.0	0.0	0.0	0.2	0.8	0.2	0.8	0.0	1.0	0.7	0.0	0.3
9.	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.6	0.4	0.7	0.3	0.2	0.8	0.0
10.	0.9	0.1	0.0	0.0	0.3	0.7	0.0	1.0	0.9	0.1	0.0	0.3	0.7
11.	0.7	0.3	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.2	0.8	0.3	0.7	0.0
12.	0.2	0.6	0.2	0.0	1.0	0.0	0.3	0.7	0.3	0.7	0.7	0.2	0.1
13.	0.9	0.1	0.0	0.2	0.8	0.0	0.1	0.9	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0
14.	0.0	0.9	0.1	0.0	0.9	0.1	0.1	0.9	0.7	0.3	0.0	0.0	1.0
15.	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.8	0.2	0.0	0.0	1.0
16.	1.0	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.5	0.5	0.0
У	**6.6**	**5.8**	**3.6**	**6.1**	**5.6**	**4.3**	**5.6**	**10.4**	**6.5**	**9.5**	**4.4**	**4.4**	**7.2**

Один из первых алгоритмов для построения деревьев четких решений ID3 путем обучения на основе начальной выборки, предложен в работе J.R. Quinlan [3]. В основе алгоритма лежит использование информационных оценок. Дальнейшим развитием этого алгоритма являются алгоритмы C4.5, CART и др.

Существует несколько подходов к обобщению ID3 алгоритма на область нечетких данных [8-13]. Основная разница между этими подходами заключается в использовании различных эвристик при выборе атрибутов, которые следует ассоциировать с узлом, и окончание процесса ветвления в листе. Эти подходы основаны на энтропии Luca de Termini [8, 9], совокупная взаимная информация (CMI) [10], приближенных вычислениях (Rough set) [12] и др.

Анализ использования алгоритмов FDT при решении практических задач представлен в [13-15]. Эти работы показывают, что их применение в классификационные задачи позволяют получить хорошие результаты. В этом виде задач, цель FDT – предсказать значение цели переменная из значений нескольких исходных атрибутов. Результат классификация обычно определяется по множеству листьев. FDT может быть легко преобразован в набор правил нечеткой классификации. Пример такого преобразования приведен в работе [16].

Информационно-теоретический подход

Все комбинации значений нечетких атрибутов возникают с определенными частотами, описываемых функцией принадлежности. Анализ этих частот позволяет получить важные свойства атрибутов, такие как собственная и совместная информация, условная и взаимная информация, а также их энтропию [17].

Информация в нечетких данных. Предлагаемые информационные оценки для нечетких данных, позволяют оценить влияние значений атрибутов друг на друга.

Определение 5. *Собственная* информация в значении $A_{i,j}$ нечеткого атрибута A_i вычисляется как

$$\mathrm{I}(A_{i,j}) = \log N - \log\ M(A_{i,j}) = \log N + \mathbf{I}(A_{i,j}), \quad (1)$$

где здесь и далее log – логарифм по основанию 2; ($i = 1,\ldots,n$; $j = 1,\ldots,m_i$), $\mathbf{I}(A_{i,j})$ *суммарная собственная* информация в значении $A_{i,j}$ нечеткого атрибута A_i :

$$\mathbf{I}(A_{i,j}) = -\log\ M(A_{i,j}).$$

Определение 6. *Совместная* информация в значениях $A_{i2,j2}$ и $A_{i1,j1}$ нечетких атрибутов A_{i2} и A_{i1} вычисляется по правилу

$$\begin{aligned}\mathrm{I}\left(A_{i1,,j1}, A_{i2,j2}\right) &= \log N - \log\ M\left(A_{i1,j1} \times A_{i2,j2}\right) = \\ &= \log N + \mathbf{I}\left(A_{i1,j1}, A_{i2,j2}\right),\end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathbf{I}(A_{i1,j1},A_{i2,j2})$ *суммарная совместная* информация в значениях $A_{i2,j2}$ и $A_{i1,j1}$ нечетких атрибутов A_{i2} и A_{i1}:

$$\mathbf{I}\left(A_{i1,j1}, A_{i2,j2}\right) = -\log \mathrm{M}\left(A_{i1,j1} \times A_{i2,j2}\right).$$

Определение 7. *Условная* информация описывает неопределенность в значении $A_{i2,j2}$ нечеткого атрибута A_{i2} в случае, если значение $A_{i1,j1}$ другого нечеткого атрибута A_{i1} уже стало известным:

$$\begin{aligned}\left(A_{i2,j2} \mid A_{i1,j1}\right) &= \mathrm{I}\left(A_{i1,j1}, A_{i2,j2}\right) - \mathrm{I}\left(A_{i1,j1}\right) = \\ &= -\ \log \mathrm{M}\left(A_{i2,j2} \times A_{i1,j1}\right) + \log \mathrm{M}\left(A_{i1,j1}\right) = \\ &= \mathbf{I}\left(A_{i2,j2} \mid A_{i1,j1}\right),\end{aligned} \quad (3)$$

где $\mathbf{I}(A_{i1,j1}|A_{i2,j2})$ – *суммарная условная* информация в значениях $A_{i2,j2}$ и $A_{i1,j1}$.

Определение 8. *Взаимная* информация между значениями $A_{i2,j2}$ и $A_{i1,j1}$ нечетких атрибутов A_{i2} и A_{i1} используется в качестве оценки степени зависимости значения $A_{i2,j2}$ относительно значения $A_{i1,j1}$ и обратно

$$\begin{aligned}&\mathrm{I}\left(A_{i1,j1}; A_{i2,j2}\right) = \\ &= \mathrm{I}\left(A_{i1,j1}\right) + \mathrm{I}\left(A_{i2,j2}\right) - \mathrm{I}\left(A_{i2,j2}, A_{i1,j1}\right)\end{aligned} \quad (4, а)$$

или

$$\begin{aligned}\mathrm{I}\left(A_{i1,j1}; A_{i2,j2}\right) &= \mathrm{I}\left(A_{i1,j1}\right) - \mathrm{I}\left(A_{i1,j1} \mid A_{i2,j2}\right) = \\ &= \mathrm{I}\left(A_{i2,j2}\right) - \mathrm{I}\left(A_{i2,j2} \mid A_{i1,j1}\right) = \mathrm{I}\left(A_{i2,j2}; A_{i1,j1}\right).\end{aligned} \quad (4, б)$$

$$\mathrm{I}\left(A_{i1,j1};A_{i2,j2}\right)=\log N+\mathbf{I}\left(A_{i1,j1};A_{i2,j2}\right),$$

где $\mathbf{I}\left(A_{i1,j1};A_{i2,j2}\right)$ *суммарная взаимная* информация между значениями $A_{i2,j2}$ и $A_{i1,j1}$.

Взаимная информация показывает, какую часть информации (в битах) о значении $A_{i1,j1}$ атрибута A_{i1} мы обнаруживаем, если становится известным значение $A_{i2,j2}$ атрибута A_{i2} и наоборот.

Пример 4. Для данных, представленных в табл. 2 имеем (log – логарифм по основанию 2):

$\mathrm{I}(A_{2,1}) = \log N - \log \mathrm{M}(A_{2,1}) = \log 16 - \log 6.1 = 1.391$;

$\mathrm{I}(B_1) = \log N - \log \mathrm{M}(B_1) = \log 16 - \log 4.4 = 1.862$;

$\mathrm{I}(B_1,A_{2,1}) = \log N - \log \mathrm{M}(B_1\times A_{2,1}) = 4 - \log 1.62 = 3.304$;

$\mathrm{I}(B_1|\, A_{2,1}) = \mathrm{I}(B_1, A_{2,1}) - \mathrm{I}(A_{2,1}) = 3.304 - 1.391 = 1.913$;

$\mathrm{I}(B_1;\, A_{2,1}) = \mathrm{I}(B_1) - \mathrm{I}(B_1|\, A_{2,1}) = 1.863 - 1.913 = -0.050$.

Суммарная энтропия нечетких данных. Обобщим понятие информации в значении $A_{i,j}$ на все j (j=1,…,m_i) значений этого атрибута A_i. В результате получим энтропию нечеткого атрибута - математическое ожидание информации. Энтропия достигает максимума, когда значения A_i равномерно распределены в домене. Энтропия зависит только от распределения случайных переменных и не зависит от их значений. Это делает энтропию универсальной мерой измерения неоднородности.

Определение 9. *Суммарная* энтропия атрибута A_i равна

$$\mathbf{H}(A_i)=\sum\nolimits_{j=1}^{m_i}\mathrm{M}\left(A_{i,j}\right)\times\mathbf{I}\left(A_{i,j}\right), \qquad (5)$$

где $\mathrm{I}(A_{i,j})$ вычисляется по соотношению (1).

Энтропия исходного атрибута равна среднему значению информации, извлекаемому при определении его значения. Энтропия результирующего атрибута равна среднему значению информации, которое следует вычислить для определения значения этого атрибута.

Определение 10. *Суммарная совместная* энтропия нечетких атрибутов A_{i2} и A_{i1} равна

$$\mathbf{H}\left(A_{i2},A_{i1}\right)=\sum_{j1=1}^{m_{i1}}\sum_{j2=1}^{m_{i2}}\begin{pmatrix}\mathrm{M}\left(A_{i1,j1}\times A_{i2,j2}\right)\times\\ \times\mathrm{I}\left(A_{i1,j1},A_{i2,j2}\right)\end{pmatrix}, \qquad (6)$$

где $\mathrm{I}\left(A_{i1,j1},A_{i2,j2}\right)$ вычисляется по соотношению (2).

Определение 11. *Суммарная условная* энтропия между нечетким атрибутом A_{i2} и значением $A_{i1,j1}$ атрибута A_{i1} равна неопределенности значения нечеткого атрибута A_{i2} в случае, если задано значение $A_{i1,j1}$ атрибута A_{i1}

$$\mathbf{H}\left(A_{i2}\mid A_{i1,j1}\right)=\sum_{j2=1}^{m_{i2}}\begin{pmatrix}\mathrm{M}\left(A_{i1,j1}\times A_{i2,j2}\right)\times\\ \times\mathrm{I}\left(A_{i2,j2}\mid A_{i1,j1}\right)\end{pmatrix}, \qquad (7)$$

где $\mathrm{I}\left(A_{i2,j2}\mid A_{i1,j1}\right)$ вычисляется по правилу (3).

Суммарная условная энтропия между нечеткими атрибутами A_{i2} и A_{i1} есть неопределенность значения атрибута A_{i2}, в случае если значение атрибута A_{i1} уже известно

$$\mathbf{H}\left(A_{i2}\mid A_{i1}\right)=\sum\nolimits_{j1=1}^{m_{i1}}\mathbf{H}\left(A_{i2}\mid A_{i1,j1}\right) \text{ бит}, \quad (8, а)$$

или $\mathbf{H}\left(A_{i2}\mid A_{i1}\right)=\mathbf{H}\left(A_{i1},\, A_{i2}\right)-\mathbf{H}\left(A_{i1}\right)$ бит. (8, б)

Определение 12. *Суммарная взаимная информация* в нечетком атрибуте A_{i1} о нечетком атрибуте A_{i2} и обратно, отражает влияние атрибута A_{i1} на атрибут A_{i2}

$\mathbf{I}(A_{i2};A_{i1}) = \mathbf{H}(A_{i2}) - \mathbf{H}(A_{i2}|A_{i1}) = \mathbf{H}(A_{i1})-\mathbf{H}(A_{i1}|A_{i2})$ (9, а)

или $\mathbf{I}(A_{i2};\, A_{i1}) = \mathbf{H}(A_{i2}) + \mathbf{H}(A_{i1}) - \mathbf{H}(A_{i1}, A_{i2})$ (9, б)

или $$\mathbf{I}(A_{i2};A_{i1})=\sum_{j1=1}^{m_{i1}}\sum_{j2=1}^{m_{i2}}\begin{pmatrix}\mathrm{M}\left(A_{i1,j1}\times A_{i2,j2}\right)\times\\ \times\mathrm{I}\left(A_{i2,j2};A_{i1,j1}\right)\end{pmatrix},$$

где $\mathrm{I}\left(A_{i2,j2};A_{i1,j1}\right)$ вычисляется по правилам (4, а, б).

Основное различие между *суммарной взаимной* информацией и коэффициентом корреляции это различие между энтропией и дисперсией: энтропия - мера независимой от конкретных значений атрибутов в то время, когда коэффициент корреляции определяет степень функциональной зависимости (например, линейной) между значениями атрибутов.

Пример 5. Для данных табл. 2 используя выражения (5) - (9) запишем:

$$\begin{aligned}\mathbf{H}\left(A_2\right)&=\mathrm{M}\left(A_{2,1}\right)\times\mathrm{I}\left(A_{2,1}\right)+\mathrm{M}\left(A_{2,2}\right)\times\mathrm{I}\left(A_{2,2}\right)+\\&+\mathrm{M}\left(A_{2,3}\right)\times\mathrm{I}\left(A_{2,3}\right)=6.1\times1.391+\\&+5.6\times1.515+4.3\times1.896=25.119;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathbf{H}\left(B\right)&=\mathrm{M}\left(B_1\right)\times\mathrm{I}\left(B_1\right)+\mathrm{M}\left(B_2\right)\times\mathrm{I}\left(B_2\right)+\\&+\mathrm{M}\left(B_3\right)\times\mathrm{I}\left(B_3\right)=4.4\text{Ч}1.862+4.4\text{Ч}\\&\times1.862+7.2\text{Ч}1.152=24.684;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathbf{H}\left(B,A_2\right)&=\sum\nolimits_{jb=1}^{3}\sum\nolimits_{j=1}^{3}\mathrm{M}\left(B_{jb}\times A_{2,j}\right)\times=\\&\times\mathrm{I}\left(B_{jb},A_{2,j}\right)=\mathrm{M}\left(B_1\times A_{2,1}\right)\times\mathrm{I}\left(B_1,A_{2,1}\right)+\\&+\mathrm{M}\left(B_1\times A_{2,2}\right)\times\mathrm{I}\left(B_1,A_{2,2}\right)+\ldots+\\&+\mathrm{M}\left(B_3\times A_{2,3}\right)\times\mathrm{I}\left(B_3,A_{2,3}\right)=46.051;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathbf{H}\left(B\mid A_{2,1}\right)&=\sum\nolimits_{jb=1}^{3}(B_{jb}\times A_{2,1})\times\mathrm{I}\left(B_{jb}\mid A_{2,1}\right)=\\&=\mathrm{M}(B_1\times A_{2,1})\times\mathrm{I}\left(B_1\mid A_{2,1}\right)+\mathrm{M}(B_2\times A_{2,1})\times\\&\times\mathrm{I}\left(B_2\mid A_{2,1}\right)+\mathrm{M}(B_3\times A_{2,1})\times\mathrm{I}\left(B_3\mid A_{2,1}\right)=\\&=1.62\times1.913+3.3\times0.886+1.18\times2.370=8.820;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathbf{H}\left(B\mid A_2\right)&=\sum\nolimits_{j=1}^{3}\mathrm{H}\left(B\mid A_{2,j}\right)=\mathbf{H}\left(B\mid A_{2,1}\right)+\\&+\mathbf{H}\left(B\mid A_{2,2}\right)+\mathbf{H}\left(B\mid A_{2,3}\right)=\\&=8.820+8.201+3.91=20.932;\end{aligned}$$

$$\mathbf{H}\left(B\mid A_2\right)=\mathbf{H}\left(B,A_2\right)-\mathbf{H}\left(A_2\right)=46.051-25.119=20.932;$$

$$\mathbf{I}\left(B;A_2\right)=\mathbf{H}\left(B\right)-\mathbf{H}\left(B\mid A_2\right)=24.684-20.932=3.752;$$

$$\begin{aligned}\mathbf{I}\left(B;A_2\right)&=\mathbf{H}\left(B\right)+\mathbf{H}\left(A_2\right)-\mathbf{H}\left(B,A_2\right)=\\&=24.684+25.119-46.051=3.752.\end{aligned}$$

Результаты вычислений представлены в табл. 3.

Таблица 3 – **Суммарные условная информация и энтропия**

	I (*Надежность* | A_i)			**H** (*Надежность* | A_i)		
	Полная	*Частичная*	*Низкая*	*Полная*	*Частичная*	*Низкая*
Исходный нечеткий атрибут A_1 (*Возраст*)						
$A_{1,1}$	1.948	1.063	1.932	3.332	3.358	3.342
$A_{1,2}$	1.328	2.522	1.226	3.068	2.547	3.040
$A_{1,3}$	3.244	3.968	0.268	1.233	0.913	0.801
H(*Надежность* | *Возраст*) = 21.632						
Исходный нечеткий атрибут A_2 (*Доход*)						
$A_{2,1}$	1.913	0.886	2.370	3.099	2.925	2.797
$A_{2,2}$	1.429	2.654	1.090	2.972	2.362	2.868
$A_{2,3}$	2.619	4.356	**0.343**	1.833	0.915	1.163
H(*Надежность* | *Доход*) = 20.932 (минимальное)						
Исходный нечеткий атрибут A_3 (*Стаж*)						
$A_{3,1}$	2.322	1.515	1.152	2.601	2.969	2.903
$A_{3,2}$	1.665	2.092	1.152	5,.61	5.104	5.391
H(*Надежность* | *Стаж*) =24.428						
Исходный нечеткий атрибут A_4 (*Залог*)						
$A_{4,1}$	2.987	2.116	0.637	2.449	3.173	2.662
$A_{4,2}$	1.408	1.712	1.653	5.041	4.964	4.993
H(*Надежность* | *Залог*) =23.283						

Суммарные взаимная информация и энтропия последовательности атрибутов. Рассмотрим последовательность исходных атрибутов $A_{i1},\ldots,A_{iq}$ и один результирующий атрибут B.

Определение 13. *Суммарная совместная* информация последовательности значений $U_q = \{A_{i1,j1},\ldots,A_{iq,jq}\}$ ($q \geq 2$) и значения B_j ($j = 1,\ldots,m_b$) вычисляется как

$$\mathbf{I}\left(B_j, U_q\right) = -\log \mathrm{M}\left(B_j \times A_{i1,j1} \times \ldots \times A_{iq,jq}\right), \quad (10)$$

Определение 14. *Суммарная условная* энтропия между атрибутами B, A_{iq} и последовательностью значений $U_{q\text{-}1} = \{A_{i1,j1},\ldots,A_{iq\text{-}1,jq\text{-}1}\}$ нечетких атрибутов $\{A_{i1},\ldots,A_{iq\text{-}1}\}$ есть неопределенность значения результирующего атрибута B, в случае, если последовательность значений $U_{q\text{-}1}$ и значение $A_{iq,jq}$ (или нечеткий атрибут A_{iq}) уже известны

$$\mathbf{H}\left(B \mid U_{q-1}, A_{iq,jq}\right) = \sum_{j=1}^{m_b} \left(\begin{array}{c} \mathrm{M}\left(B_j \times U_q\right) \times \\ \times \left(\mathbf{I}\left(B_j, U_q\right) - \mathbf{I}\left(U_q\right)\right) \end{array} \right) \quad \mathbf{(11)}$$

или

$$\mathbf{H}\left(B \mid U_{q-1}, A_{iq}\right) = \sum_{jq=1}^{m_{iq}} \mathbf{H}\left(B \mid U_{q-1}, A_{iq,jq}\right). \quad (12)$$

Определение 15. *Суммарная взаимная* информация в результирующем атрибуте B о нечетком атрибуте A_{iq} и последовательности значений $U_{q\text{-}1} = \{A_{i1,j1},\ldots,A_{iq\text{-}1,jq\text{-}1}\}$ отражает влияние атрибута A_{iq} на атрибут B, если известна последовательность нечетких значений $U_{q\text{-}1}$.

$$\mathbf{I}\left(B; U_{q-1}, A_{iq}\right) =$$

$$= \sum_{jq=1}^{m_{iq}} \sum_{j=1}^{m_b} \left(\begin{array}{c} \mathrm{M}\left(B_j \times A_{i1,j1} \times \ldots \times A_{iq,jq}\right) \times \\ \left(\begin{array}{c} \mathbf{I}\left(B_j, U_{q-1}\right) + \mathbf{I}(A_{iq,jq}, U_{q-1}) - \\ \mathbf{I}(B_j, U_{q-1}, A_{iq,jq}) - \mathbf{I}\left(U_{q-1}\right) \end{array} \right) \end{array} \right) \quad (13, \text{а})$$

или

$$\mathbf{I}\left(B; U_{q-1}, A_{iq}\right) = \mathbf{H}\left(B \mid U_{q-1}\right) - \mathbf{H}\left(B \mid U_{q-1}, A_{iq}\right). \quad (13, \text{б})$$

Пример 6. Для данных, заданных в табл. 2, имеем B = *Надежность*, $U_{q\text{-}1} = \{A_{2,1}\}$ = {*Высокий доход*}. Используя выражения (11, 12 и 13, б) получим:

$$\mathbf{H}\left(B \mid A_{2,1}, A_{1,1}\right) =$$

$$= \sum_{jb=1}^{m_b} \left(\begin{array}{c} \mathrm{M}\left(B_{jb} \times A_{2,1} \times A_{1,1}\right) \times \\ \times \left(\mathrm{I}\left(B_{jb}, A_{2,1}, A_{1,1}\right) - \mathrm{I}\left(A_{2,1}, A_{1,1}\right)\right) \end{array} \right) =$$

$$= 1.935 + 1.564 + 1.227 = 4.725;$$

$$\mathbf{H}\left(B \mid A_{2,1}, A_1\right) = \mathbf{H}\left(B \mid A_{2,1}, A_{1,1}\right) + \mathbf{H}\left(B \mid A_{2,1}, A_{1,2}\right) +$$

$$+ \mathbf{H}\left(B \mid A_{2,1}, A_{1,3}\right) = 4.725 + 1.927 + 1.000 = 7.652;$$

$$\mathbf{I}\left(B; A_{2,1}, A_1\right) = \mathbf{H}\left(B \mid A_{2,1}\right) - \mathbf{H}\left(B \mid A_{2,1}, A_1\right) =$$

$$= 8.820 - 7.652 = 1.168.$$

Результаты вычислений приведены в табл. 4.

Таблица 4 – **Суммарные условные информация и энтропия последовательности атрибутов, при известном значении *Доход = Высокий***

	I (*Надежность* | *Доход = Высокий*, A_i)			**H** (*Надежность* | *Доход = Высокий*, A_i)		
	Полная	*Частичная*	*Низкая*	*Полная*	*Частичная*	*Низкая*
$A_{1,1}$	1.931	0.636	3.408	1.935	1.564	1.227
$A_{1,2}$	1.411	0.990	3.055	0.732	0.688	0.507
$A_{1,3}$	3.184	2.614	0.461	0.315	0.384	0.301
$A_{3,1}$	2.547	0.635	2.435	1.268	1.190	1.310
$A_{3,2}$	1.507	1.162	2.313	1.691	1.656	1.485
$A_{4,1}$	2.674	0.901	1.701	0.880	1.013	1.099
$A_{4,2}$	1.632	0.879	2.905	2.106	1.912	1.550

Построение деревьев нечетких решений

Поясним использование суммарных информационных оценок при построении деревьев нечетких решений. Заметим, что для построения дерева нечетких решений используется только одна из этих оценок – *суммарная условная* энтропия. *Суммарная взаимная* информация используется при ограничении размера дерева (формирования листьев).

Существует два аспекта при построении нечеткого дерева решений. Один из них – выбор очередного атрибута в качестве узла дерева - атрибута имеющего минимальную *суммарную условную* энтропию. Другой аспект – ограничение роста дерева, отсечение непродуктивных ветвей. При этом используются два типа ограничений (порога) β и α. Узлы трансформируются в листья если:

(а) частота возникновения ветви $U_q = \{A_{i1,j1},\ldots,A_{iq,jq}\}$ меньше или равно, чем заданное ограничение α: $\mathbf{I}(U_q) \geq -\log \alpha \times N$.

(б) относительная частота одного значения больше или равно, чем заданное ограничение β :

$$min\ \mathbf{I}(B_j \mid U_q) \leq -\log \beta \quad \text{for } \forall\, j = 1,\ldots m_b;$$

Уменьшение β и увеличение α приводит к построению дерева меньшей размерности. Однако точность оценки при этом также снижается. Влияние изменения параметров β и α на результат представлено в работе [18].

Алгоритм построения нечеткого дерева решений выглядит следующим образом [19].

Исходные данные: Наборы исходных и результирующего атрибутов (см. табл. 2).

$Attr = \{A_1,\ldots,A_n\} \in \boldsymbol{I}$; $B \in \boldsymbol{O}$; α, β; $q=0$; $U_q = \varnothing$.

Выходные данные: Дерево нечетких решений.

Tree = buildTree (U_q, Attr).

{ **1**. Вычисление *суммарной* энтропии (8, 11)

2. Выбор атрибута с минимальной энтропией

$num = \text{argmin}\ \mathbf{H}(B|U_q \cup A_i)$ for $\forall\ A_i \in Attr$,

3. Назначение текущего узла

Tree ← node (A_{num}); $Attr = Attr \backslash A_{num}$;

4. Выбор листьев и продолжение

for ($\forall\ A_{num,j}$), $j=1,\ldots,m_{num}$;

{ q++; $U_q = U_{q-1} \cup A_{num,j}$;

if ($A_{num,j}$ is leaf) Tree ← leaf ($A_{num,j}$)

else Рекурсивное построение поддерева:

Tree = *buildTree* (U_q, *Attr*) }

}

Поясним использование алгоритма на примере.

Пример 7. *Исходные данные:* Наборы исходных и результирующего атрибутов, содержащие 4 исходных атрибута $\boldsymbol{I}$ = {*Возраст*, *Доход*, *Стаж*, *Залог*} (n =4) и одного результирующего атрибута *Надежность* (табл. 2). Выберем ограничения равными α=0.25 и β=0.75.

Выходные данные: Дерево нечетких решений

Шаг 1. Вычислим *суммарную условную* энтропию между исходными и результирующим атрибутами в соответствии с выражением (8), табл. 3.

Шаг 2. Выберем атрибут A_i с минимальной энтропией:

$num = \text{argmin}\ \mathbf{H}(\textit{Надежность}\ |A_i)$ for $\forall\ A_i \in \boldsymbol{I}$.

$num = \text{argmin}\ \{21.632; 20.932; 24.428; 23.283\} = 2$.

Шаг 3. В качестве текущего узла выберем атрибут A_2 = *Доход*.

Шаг 4. Проверим, является ли данный узел листом. $\min\limits_{\text{for } \forall\ j2} \mathbf{I}(A_{2,j2}) \le -\log(0.25\times16)$:

$min\ \mathbf{I}(A_{2,1}) = \mathbf{I}(\textit{Высокий}) = -2.609$ бит (нет)

$min\ \mathbf{I}(A_{2,2}) = \mathbf{I}(\textit{Средний}) = -2.485$ бит (нет)

$min\ \mathbf{I}(A_{2,1}) = \mathbf{I}(\textit{Низкий}) = -2.104$ бит (нет)

$\min\limits_{\text{for } \forall\ j} \mathbf{I}(B_j|A_{2,j2}) \le -\log 0.75 = 0.415$ бит

$min\ \mathbf{I}(B_2\ |\ A_{2,1}) = \mathbf{I}(\textit{Полная}\ |\ \textit{Высокий}) = 0.886$ (нет)

$min\ \mathbf{I}(B_3\ |\ A_{2,2}) = \mathbf{I}(\textit{Низкая}\ |\ \textit{Средний}) = 1.090$ (нет)

$min\ \mathbf{I}(B_3\ |\ A_{2,3}) = \mathbf{I}(\textit{Низкая}\ |\ \textit{Низкий}) = \mathbf{0.343}$ (**лист**)

Строим первый уровень дерева нечетких решений (рис. 3).

Шаг 5. Повторить *Шаг* 1 – *Шаг* 4 для двух первых ветвей и трех оставшихся исходных атрибутов {*Возраст*, *Стаж* и *Залог*}. Результаты вычислений для первой ветви приведены в табл. 4, а само дерево нечетких решений представлено на рис. 4.

Конец алгоритма.

Поясним первый уровень полученного дерева решений с информационной точки зрения. Изначально, для оценки надежности возврата кредита требуется получить **H**(*Надежность*) = 24.684 бит информации.

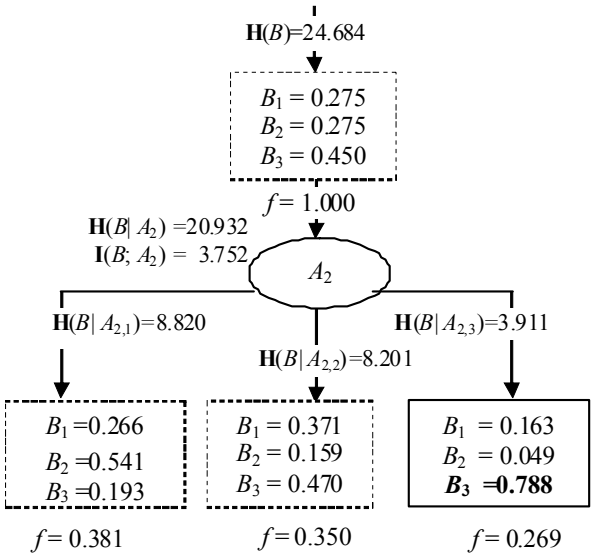


Рис. 3. Первый уровень дерева нечетких решений с одним узлом и одним окончательным листом

В качестве первого оцениваемого критерия выберем A_2 = *Доход*, определение значения которого вносит максимальное количество информации

I(*Надежность*; *Доход*) = 3.752 бита.

В результате, нам в дальнейшем требуется извлечь не более **H**(*Надежность* | *Доход*) = 20.932 бит информации.

При этом, неопределенность информации распределена следующим образом:

H(*Надежность* | *Доход = Высокий*) = 8.820 бит;

H(*Надежность* | *Доход = Средний*) = 8.201 бит;

H(*Надежность* | *Доход = Низкий*) = 3.911 бит.

Если оценка показателя *Доход* нового заемщика *равна Низкий*, то с уверенностью 78.8% в качестве итоговой оценки надежности следует принять значение *Низкая* надежность. Это значение является листом дерева нечетких решений, поскольку в данном случае относительная частота значения *Низкая* = 78.8% больше заданного ограничения β=0.75 или 75%. Для остальных вариантов *Доход = Высокий* или *Доход = Средний* требуется построить второй уровень дерева нечетких решений (рис. 4).

Процесс работы разбит на 2 этапа: (*а*) обучение и настройка СППР и (*б*) использование СППР.

Первый этап выполняется однократно. На этом этапе осуществляется построение нечеткого дерева решений (синтез продукционных правил) и как результат - происходит обучение СППР. Это обучение предполагает проверку выборки предоставленных кредитов и накопление информации о результатах надежности их возврата. Необходимым условием здесь является получение репрезентативной выборки.

Второй этап предполагает работу СППР. Изначально проверяется параметр, ответ на который позволяет извлечь максимальную информацию о надежности возврата кредита. В зависимости от ответа проверяется следующий параметр, также извлекающий максимальную информацию о надежности возврата. Процесс задания вопросов происходит до тех пор, пока уверенность в оценке надежности не достигает заданного ограничения α или β.

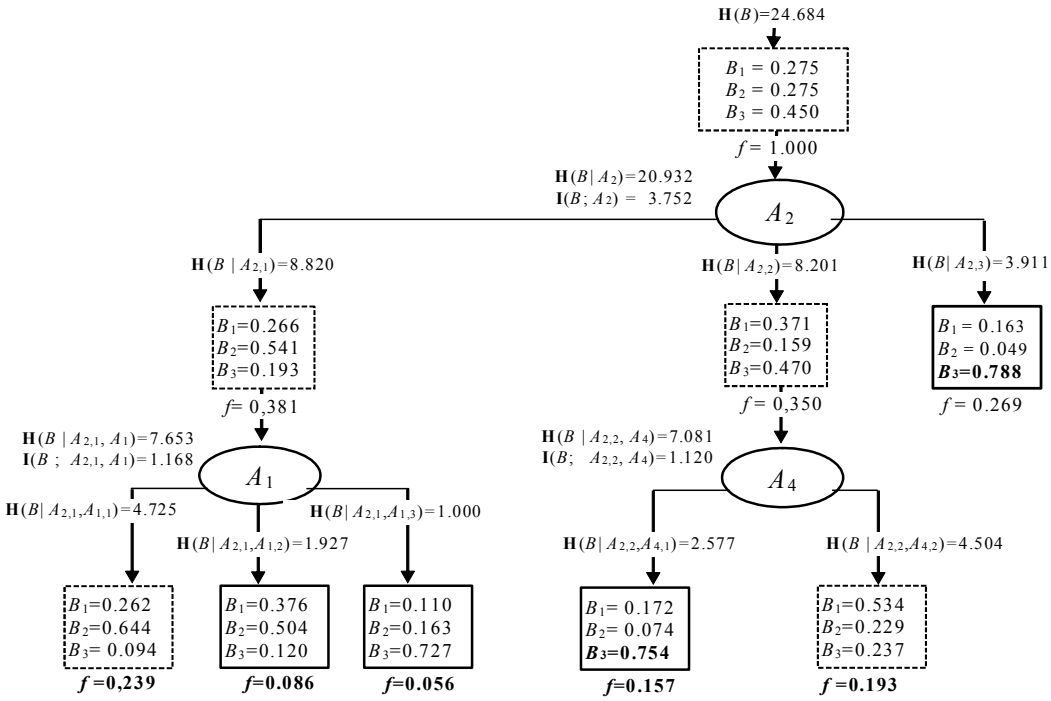


Рис 4. Дерево нечетких решений, описывающее стратегию принятия решения о надежности возврата кредита и построенное на основе данных табл. 2 с ограничениями α=0.25 и β=0.75

Заключение и направления будущих исследований

В работе предложен математический аппарат построения СППР, предусматривающих анализ предыдущих результатов проверки и выработку стратегии тестирования. В основу математического аппарата положены суммарные информационные оценки нечетких данных и алгоритм построения на их основе деревьев нечетких решений Наличие пороговых ограничений β и α позволяет строить деревья заданной размерности и заданной точности. Использование информационных оценок позволяет наблюдать процесс увеличения информации и уменьшения энтропии по мере получения результатов проверок показателей, описывающих объект или процесс. Это соответствует закону сохранения информации. В дальнейших работах авторы планируют сопоставить стратегии принятия решений на основе деревьев нечетких решений со стратегиями, полученными на основе применения нейронных сетей, в том числе и нейронных сетей на основе конволюции.

Благодарность

Работа была поддержана грантом *Slovak Research and Development Agency* регистрационный номер APVV-18-0027 «*New methods development for reliability analysis of complex system*».

References

1. Enoki, H., Takami, K., Kobayashi, Y. and Ohta, T. (1994), “Switching function conceptual model for telecommunication service specification design”, *Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf.*, vol. 2, San Francisco, USA, pp. 818-822.
2. Levashenko, V., Zaitseva, E., Kovalík, Š. (2013), *Projektovanie systémov pre podporu rozhodovania na základe neurčitých dát*, EDIS Publ., Zilina, Slovakia, ISBN 978-80-554-0680-0.
3. Quinlan, J.R. (1990), “Decision Tree and Decision Making”. *IEEE Trans. on Syst., Man and Cyb.*, vol. 20, no. 2, pp. 339-346.
4. Hullermeier, E. and Vanderlooy, S. (2009), “Why Fuzzy Decision Trees are Good Rankers”, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems, v*ol. 17, no. 6, pp. 1233-1244.
5. Yong, S., Lin, M., Robinson, W. and Fidge, C. (2010), “Using decision trees in economizer repair decision making”, *Proc. of the Int. Conf. on Prognostics and Health Management* (PHM), Portland, USA, pp. 1-6.
6. Lee, H-M., Chen, C.-M., Chen, J.-M. and Jou, Y.-L. (2001), “An Efficient Fuzzy Classifier with Feature Selection Based on Fuzzy Entropy”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Part B: *Cybernetics*, vol. 31, no. 3, pp. 426-432.
7. Garcia, S., Luengo, J., Saez, J., Lopez, V. and Herrera, F. (2013), “A Survey of Discretization Techniques: Taxonomy and Empirical Analysis in Supervised Learning”, *IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering,* vol. 24, no. 5, pp. 734-750.
8. Yuan, Y. and Shaw, M.J. (1995), “Induction of Fuzzy Decision Trees”, *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 69, pp. 125-139.
9. Wang, X., Chen, B., Qian, G. and Ye, F. (2000), “On the Optimization of Fuzzy Decision Trees”, *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 112, pp. 117–125.
10. Levashenko, V., Zaitseva, E. and Puuronen, S. (2007), “Fuzzy classifier based on fuzzy decision tree”, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Computer as a Tool* (EUROCON), Warsaw, Poland, pp. 823– 827.
11. Gasir, F., Crockett, K., and Bandar, Z. (2012), “Inducing fuzzy regression tree forests using artificial immune systems”, *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, vol. 20, pp. 133–157.
12. Zhai, J., Wang, X., Zhang, S. and Hou, S. (2018), “Rough fuzzy decision tree”, *Information Sciences*, vol. 465, pp.425–438.
13. Ahmadi, H., Gholamzadeh, M., Shahmoradi, L., Nilashi, M. and Rashvand, P. (2018), “Diseases diagnosis using fuzzy logic methods: A systematic and meta-analysis review”, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 161, pp. 145–172.

14. Olaru, C. and Whenkel, L. (2003), “A complete fuzzy decision tree technique”, *Fuzzy Sets and Systems*, vol.138, pp.221–254
15. Rabcan, J., Levashenko, V., Zaitseva, E., Kvassay, M. and Subbotin, S. (2019), “Application of fuzzy decision tree for signal classification", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 10, pp. 5425-5434, doi: 10.1109/TII.2019.2904845.
16. Levashenko, V., Zaitseva, E., Kvassay, M. and Deserno T. (2016), “Reliability estimation of healthcare systems using fuzzy decision trees”, *Proc. of the Fed. Conf. on Comp. Science and Inf. Systems* (FedCSIS), Gdansk, Poland, 2016, pp. 331–340.
17. Kurbatsky, A.N. and Cheushev, V.A. (1999), *Informational method of analysis and optimization in decision support systems*. Ed. Institute of Technical Cybernetics, Minsk, Belarus.
18. Zaitseva, E. and Levashenko, V. (2016), “Construction of a reliability structure function based on uncertain data”, *IEEE Transaction on Reliability*, vol. 65, no. 4, pp. 1710–1723.
19. Zaitseva, E., Levashenko, V., Rabcan, J. and Krsak, E. (2020), “Application of the Structure Function in the Evaluation of the Human Factor in Healthcare”, *Symmetry Basel*, vol.12, no. 93; doi:10.3390/sym12010093.

Received (Надійшла) 02.10.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.11.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Левашенко Віталій Григорович – професор, завідувач кафедри інформатики, факультет управлінських наук та інформатики, Жилінський університет, Жиліна, Словаччина;
Vitaly Levashenko – Professor, Head of the Department of Informatics, Faculty of Management Science and Informatics, University of Žilina, Žilina, Slovakia;
e-mail: vitaly.levashenko@fri.uniza.sk; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-1932-3603

Ляшенко Олексій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, декан факультету комп'ютерної інженерії та управління, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Oleksii Liashenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of Faculty of Computer Engineering and Control, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: oleksii.liashenko@nure.ua; ORCID ID: http://orcid.org/ 0000-0002-0146-3934.

Кучук Георгій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна;
Heorhii Kuchuk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Computer Science and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: kuchuk56@ukr.net; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-2862-438X

Побудова системи підтримки прийняття рішень на основі нечітких даних

В. Г. Левашенко, О. С. Ляшенко, Г. А. Кучук

Анотація. Розробка інструментарію оцінки прийнятих рішень є актуальним і потрібним завданням на сучасному етапі розвитку інформаційних технологій. Таким інструментарієм є, наприклад, системи підтримки прийняття рішень (СППР). У роботі пропонується математичний апарат побудови СППР. Побудова СППР передбачає аналіз наявних результатів спостережень або вимірювань і вироблення стратегії перевірок вихідних параметрів у вигляді дерева нечітких рішень або продукційних правил. Основу запропонованого апарата становлять сумарні інформаційні оцінки (інформація і ентропія) для нечітких наборів даних. Використання нечітких даних найбільш повно відповідає людській природі, оскільки на практиці люди часто застосовують суб'єктивні відчуття і апріорні знання, ніж точні імовірнісні критерії. Тому, використовуючи нечітку логіку і розглядаючи ступінь можливості як нечітку міру, експерти мають можливість описувати реальні дані з достатньою точністю. Досліджено взаємозв'язок запропонованих сумарних інформаційних оцінок. В роботі наведені приклади, що демонструють використання запропонованого математичного апарату для практичних задач. У подальшій роботі автори планують привести результати експериментальних досліджень запропонованого підходу і його зіставлення з іншими відомими методами і алгоритмами. Зазначене зіставлення представляється для широкого різноманіття формалізованих даних, що зберігаються в відомому репозиторії UCI Machine Learning Repository. У якості зіставлених методів і алгоритмів планується вибрати інші алгоритми побудови дерев нечітких рішень, алгоритми байєсівської класифікації, побудови дерев рішень C4.5, CART і метод найближчих сусідів.

Ключові слова: системи підтримки прийняття рішень; нечітка логіка; дерева нечітких рішень.

Building Decision Support Systems based on Fuzzy Data

Vitaly Levashenko, Oleksii Liashenko, Heorhii Kuchuk

Abstract. The implementation of tools for assessing decisions making is an urgent and demanded task at the current stage of information technology development. Decision-making support systems (DMSS) are perspective tools for it. The paper proposes a mathematical tool for construction a DMSS. DMSS construction involves the analysis of the available observation or measurement results and the development of a strategy for checking the initial parameters in the form of a fuzzy decision tree or production rules. The proposed tool is based on cumulative information estimates (information and entropy) for fuzzy data sets. The use of fuzzy data is a most fully consistent with human nature. It can be explained, that in practice people often use subjective sensations and a priori knowledge than precise probabilistic criteria. Therefore, using fuzzy logic and considering the degree of possibility as a fuzzy measure, experts are able to describe real data with sufficient accuracy. The relationship of the proposed total information estimates is investigated in the paper. The paper provides examples which demonstrating the practical application of the proposed mathematical tool. The authors plan to present the results of experimental investigations of the proposed approach and its comparison with other known methods and algorithms in a next work. These results will be obtained on a wide range of formalized data stored in the well-known UCI Machine Learning Repository. As compared methods and algorithms, we are going to choose algorithms for constructing fuzzy decision trees based on Luca de Termini entropy, Naive-Bayesian classification, algorithms for decision trees induction - C4.5, CART and the method of nearest neighbours.

Keywords: decision making support systems; fuzzy logic; fuzzy decision trees.

УДК 004.254 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.4.08**

В. О. Пуйденко

Харківський радіотехнічний коледж, Харків, Україна

АЛГОРИТМ ЗАМІЩЕННЯ MFU: АВТОМАТНА МОДЕЛЬ, СИНТЕЗ ТА ОЦІНКА АПАРАТНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ

Анотація. Політика заміщення алгоритму MFU (Most Frequently Used) поширюється на архітектуру асоціативного кеш буфер сторінкового перетворення. Подія влучання у кеш буфері сторінкового перетворення має спричинити подію фіксації використання відповідного елементу адресованої множини блоку даних. Подія промаху має залучити певну апаратну логіку для прийняття процесором рішення про заміщення достовірного найбільш часто використаного елементу у блоці даних з урахуванням аналізу фіксацій подій звертання до певних елементів при подіях влучань. В статті побудована автоматна модель політики з комбінаторним підходом компаративного аналізу фіксованих подій звертання. Автоматна модель описана відповідними дискретними функціями і структурною блок – схемою алгоритму. Створена й алгоритмізована автоматна модель спричинила синтез апаратури політики заміщення алгоритму MFU для q – спрямованого асоціативного кеш буфера сторінкового перетворення. В основу синтезу був покладений математичний апарат комбінаторного синтезу визначення дозволених умов селекції q - напрямків. Результатом синтезу стали логічні рівняння селекції q - напрямків зі схемотехнічним рішенням апаратури політики заміщення та детальна блок – схема керуючого апаратурою алгоритму. Синтезоване апаратне рішення дало змогу оцінити її складність за Квайном за кількістю полюсів схеми та за загальною кількістю вентилів. Це дозволило провести розрахунки ймовірностей безвідмовної роботи за час напрацювань на відмову до 100000 годин при ймовірності 10^{-7} відмови одного вентиля. Стаття також містить оцінку швидкодії апаратного рішення як при подіях промахів, такі при подіях влучань.

Ключові слова: асоціативний кеш буфер сторінкового перетворення; політика заміщення; алгоритм MFU; автоматна модель; комбінаторний синтез; швидкодія; оцінка складності; ймовірність безвідмовної роботи.

Вступ

Архітектура асоціативного кеш буфера сторінкового перетворення має містити у своєму складі апаратний модуль з певним алгоритмом заміщення достовірних елементів блоку даних. За такими критеріями як невелика кількість q - напрямків (q=4) [1] та використання з більшою ймовірністю більш "застарілої" інформації є сенс використовувати алгоритм заміщення MFU. Відомо, що елементами блоку даних асоціативного кеш буфера сторінкового перетворення є адресна інформація. При подіях промаху в асоціативній кеш пам'яті "винна" адреса одразу потрапить до асоціативного кеш буфера і "застаріла" інформація стане в нагоді – мине необхідність двохсходинкового перетворення "винної" адреси. Це значно економить такти процесорного ядра, минаючи звертання останнього до каталогу сторінок та таблиць сторінок.

В публікації [2], присвяченій алгоритму заміщення MF-LRU, описана логіка роботи алгоритму MFU, але разом з тим відсутнє апаратне рішення алгоритму і такі його характеристики, як швидкодія, складність реалізації та надійність.

Публікації [3-9] містять дослідження алгоритмів заміщення PLRU, LRU, SF-LRU, MRU на структурному рівні, але тут також тут відсутні оцінки швидкодії, складності реалізації та ймовірностей безвідмовної роботи.

Мета і задачі

Ймовірності промахів і влучань в асоціативних кеш пам'яті та кеш буфері сторінкового перетворення пов'язані з незбігом або збігом адреси, яку формує пристрій сегментації, з адресами, які зберігається у блоці тегів, і це не дозволяє у повній мірі дослідити характеристики того чи іншого алгоритму заміщення. Синтезована апаратура алгоритму заміщення дозволяє більш детально дослідити характеристики алгоритму.

Мета статті полягає в оцінюванні таких характеристик алгоритму, як швидкодія при подіях промахів і влучань, складність реалізації та ймовірність безвідмовної роботи синтезованої апаратури алгоритму MFU. Ця мета досягається шляхом розв'язання задач розроблення автоматної моделі, схемної реалізації цього алгоритму та дослідження його характеристик.

1. Автоматна модель апаратури алгоритму заміщення

До автоматної моделі входять елементи пам'яті типу синхронний двійковий лічильник та комбінаційні логіки CS_1 та CS_2 (рис. 1). Комбінаційну логіку CS_1 представляє перемикальна функція μ(•), яка описує роботу цифрових компараторів, які мають забезпечити порівняння вмістів елементів пам'яті $\vec{Q}_1, \vec{Q}_2, ..., \vec{Q}_q$ комбінаторним методом. Вихід комбінаційної логіки CS_1 має сформувати відповідні результати порівнянь у вигляді векторів $\overrightarrow{C_j}$, $j = \overline{1,m}$, що є аргументами перемикальної функції φ(•). Загальний алгоритм роботи автоматної моделі описується виразом (M – сигнал промаху, m – кількість компараторів, e, d – номера компараторів):

$$L_i = \lambda\left(\varphi\left(\overrightarrow{C_1}, \overrightarrow{C_2}, \ldots, \overrightarrow{C_m}\right), M\right), \quad (1)$$

де $\overrightarrow{C_j} = \mu\left(\vec{Q}_e, \vec{Q}_d\right) \in \{A > B, A = B, A < B\}$; $e \neq d$.

Кількість компараторів залежить від кількості напрямків q і визначається як

$$m = S_q^2 = q!/\left(2! \cdot (q-2)!\right). \quad (2)$$

© Пуйденко В. О., 2020

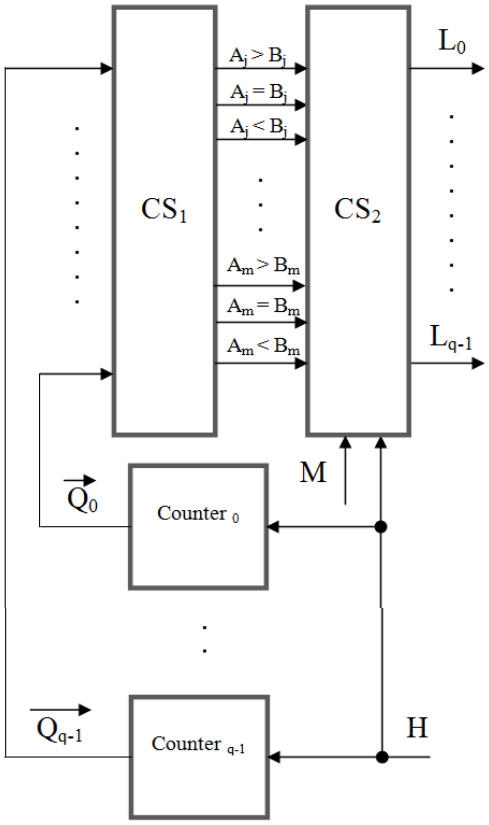


Рис. 1. Автоматна модель апаратури алгоритму заміщення з елементами пам'яті типу синхронний двійковий лічильник

Вихідна комбінаційна логіка CS_2 представляє собою складну перемикальну функцію λ(μ(•)) селекції *q* напрямків (*H* – сигнал влучання).

2. Алгоритм функціонування автоматної моделі

Алгоритм роботи (рис. 2) автоматної моделі (рис. 1) представляє собою політику заміщення достовірного найбільш нещодавно використаного елементу через селекцію напрямку L_i за знайденим максимальним значення вмісту лічильника C_i та дає змогу синтезувати логічну модель апаратури (3) - (69) з подальшою побудовою схемотехнічного рішення (рис. 3) і Результат селекції напрямку L_0 (8) (рис. 4).

3. Логічна модель апаратури політики заміщення MFU

У виразах (3)-(69) позначено: C_i – вміст лічильника, L_i – селектований напрямок.

3.1. Логіка селекції напрямку L_0:

$$L_{01} = (C_0 > C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (3)$$

$$L_{02} = (C_0 > C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (4)$$

$$L_{03} = (C_0 > C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (5)$$

$$L_{04} = (C_0 > C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (6)$$

$$L_{05} = (C_0 > C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (7)$$

$$L_{06} = (C_0 > C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (8)$$

$$L_{07} = (C_0 = C_1)\&(C_0 = C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 = C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (9)$$

$$L_{08} = (C_0 > C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 = C_2)\&(C_1 = C_3)\&(C_2 = C_3); \quad (10)$$

$$L_{09} = (C_0 > C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 = C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (11)$$

$$L_{010} = (C_0 = C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (12)$$

$$L_{011} = (C_0 > C_1)\&(C_0 = C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (13)$$

$$L_{012} = (C_0 > C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 = C_3); \quad (14)$$

$$L_{013} = (C_0 > C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 = C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (15)$$

$$L_{014} = (C_0 > C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 = C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (16)$$

$$L_{015} = (C_0 > C_1)\&(C_0 = C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 = C_3)\&(C_2 > C_3). \quad (17)$$

3.2. Логіка селекції напрямку L_1:

$$L_{11} = (C_0 < C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (18)$$

$$L_{12} = (C_0 < C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (19)$$

$$L_{13} = (C_0 < C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (20)$$

$$L_{14} = (C_0 < C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (21)$$

$$L_{15} = (C_0 < C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (22)$$

$$L_{16} = (C_0 < C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (23)$$

$$L_{17} = (C_0 = C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 = C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 = C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (24)$$

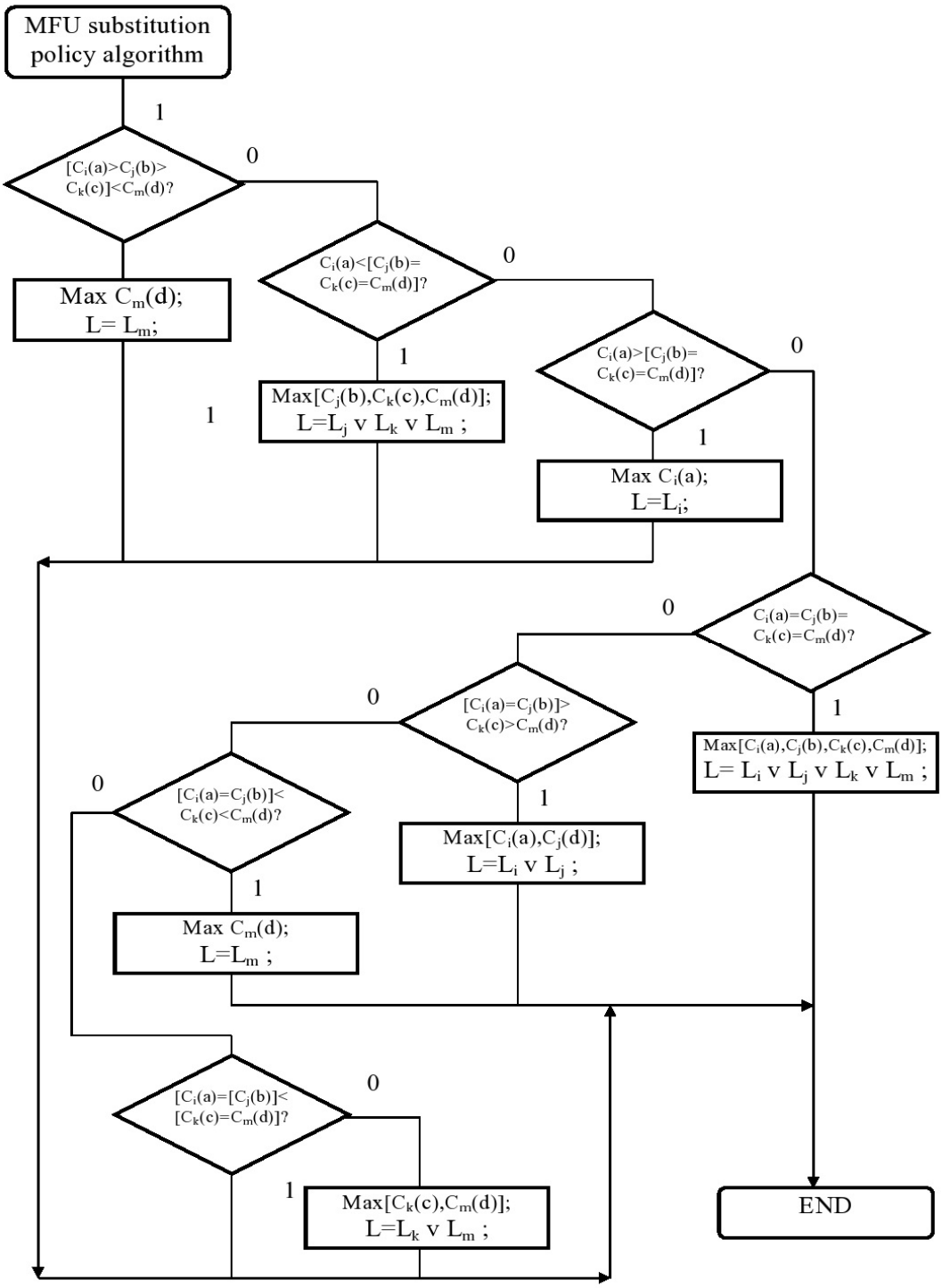


Рис. 2. Алгоритм роботи автоматної моделі алгоритму заміщення MFU з $q = 4$

$$L_{18} = (C_0 < C_1)\&(C_0 = C_2)\&(C_0 = C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 = C_3); \quad (25)$$

$$L_{19} = (C_0 = C_1)\&(C_0 = C_2)\&(C_0 = C_3)\& \\ \&(C_1 = C_2)\&(C_1 = C_3)\&(C_2 = C_3); \quad (26)$$

$$L_{110} = (C_0 = C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (27)$$

$$L_{111} = (C_0 < C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 = C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (28)$$

$$L_{112} = (C_0 < C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 = C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (29)$$

$$L_{113} = (C_0 < C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 = C_3); \quad (30)$$

$$L_{114} = (C_0 < C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 = C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (31)$$

$$L_{115} = (C_0 < C_1)\&(C_0 = C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (32)$$

$$L_{116} = (C_0 = C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 = C_3). \quad (33)$$

3.3. Логіка селекції напрямку L_2:

$$L_{21} = (C_0 < C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (34)$$

$$L_{22} = (C_0 > C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (35)$$

$$L_{23} = (C_0 < C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (36)$$

$$L_{24} = (C_0 > C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (37)$$

$$L_{25} = (C_0 > C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (38)$$

$$L_{26} = (C_0 < C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (39)$$

$$L_{27} = (C_0 > C_1)\&(C_0 = C_2)\&(C_0 = C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 = C_3); \quad (40)$$

$$L_{28} = (C_0 = C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 = C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 = C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (41)$$

$$L_{29} = (C_0 < C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 = C_3); \quad (42)$$

$$L_{210} = (C_0 < C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 = C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (43)$$

$$L_{211} = (C_0 > C_1)\&(C_0 = C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (44)$$

$$L_{212} = (C_0 < C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 = C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (45)$$

$$L_{213} = (C_0 = C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (46)$$

$$L_{214} = (C_0 > C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 > C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 = C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (47)$$

$$L_{215} = (C_0 < C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 = C_3)\& \\ \&(C_1 = C_2)\&(C_1 > C_3)\&(C_2 > C_3); \quad (48)$$

$$L_{216} = (C_0 = C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 = C_3). \quad (49)$$

3.4. Логіка селекції напрямку L_3:

$$L_{31} = (C_0 < C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (50)$$

$$L_{32} = (C_0 > C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (51)$$

$$L_{33} = (C_0 < C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (52)$$

$$L_{34} = (C_0 > C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (53)$$

$$L_{35} = (C_0 > C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (54)$$

$$L_{36} = (C_0 < C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (55)$$

$$L_{37} = (C_0 < C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 = C_2)\&(C_1 = C_3)\&(C_2 = C_3); \quad (56)$$

$$L_{38} = (C_0 = C_1)\&(C_0 = C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 = C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (57)$$

$$L_{39} = (C_0 > C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 = C_3); \quad (58)$$

$$L_{310} = (C_0 > C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 = C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (59)$$

$$L_{311} = (C_0 < C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 = C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (60)$$

$$L_{312} = (C_0 = C_1)\&(C_0 < C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 < C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (61)$$

$$L_{313} = (C_0 > C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 = C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (62)$$

$$L_{314} = (C_0 < C_1)\&(C_0 = C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (63)$$

$$L_{315} = (C_0 < C_1)\&(C_0 = C_2)\&(C_0 < C_3)\& \\ \&(C_1 > C_2)\&(C_1 = C_3)\&(C_2 < C_3); \quad (64)$$

$$L_{316} = (C_0 > C_1)\&(C_0 > C_2)\&(C_0 = C_3)\& \\ \&(C_1 = C_2)\&(C_1 < C_3)\&(C_2 < C_3). \quad (65)$$

3.5. Логіка остаточної селекції напрямків L_3, L_2, L_1, L_0:

$$L_0 = L_{01} \vee L_{02} \vee L_{03} \vee L_{04} \vee L_{05} \vee L_{06} \vee \\ \vee L_{07} \vee L_{08} \vee L_{09} \vee L_{010} \vee L_{011} \vee \\ \vee L_{012} \vee L_{013} \vee L_{014} \vee L_{015}; \quad (66)$$

$$L_1 = L_{11} \vee L_{12} \vee L_{13} \vee L_{14} \vee L_{15} \vee L_{16} \vee \\ \vee L_{17} \vee L_{18} \vee L_{19} \vee L_{110} \vee L_{111} \vee \\ \vee L_{112} \vee L_{113} \vee L_{114} \vee L_{115} \vee L_{116}; \quad (67)$$

$$L_2 = L_{21} \vee L_{22} \vee L_{23} \vee L_{24} \vee L_{25} \vee L_{26} \vee \\ \vee L_{27} \vee L_{28} \vee L_{29} \vee L_{210} \vee L_{211} \vee \\ \vee L_{212} \vee L_{213} \vee L_{214} \vee L_{215} \vee L_{216}; \quad (68)$$

$$L_3 = L_{31} \vee L_{32} \vee L_{33} \vee L_{34} \vee L_{35} \vee L_{36} \vee \\ \vee L_{37} \vee L_{38} \vee L_{39} \vee L_{310} \vee L_{311} \vee \\ \vee L_{312} \vee L_{313} \vee L_{314} \vee L_{315} \vee L_{316}. \quad (69)$$

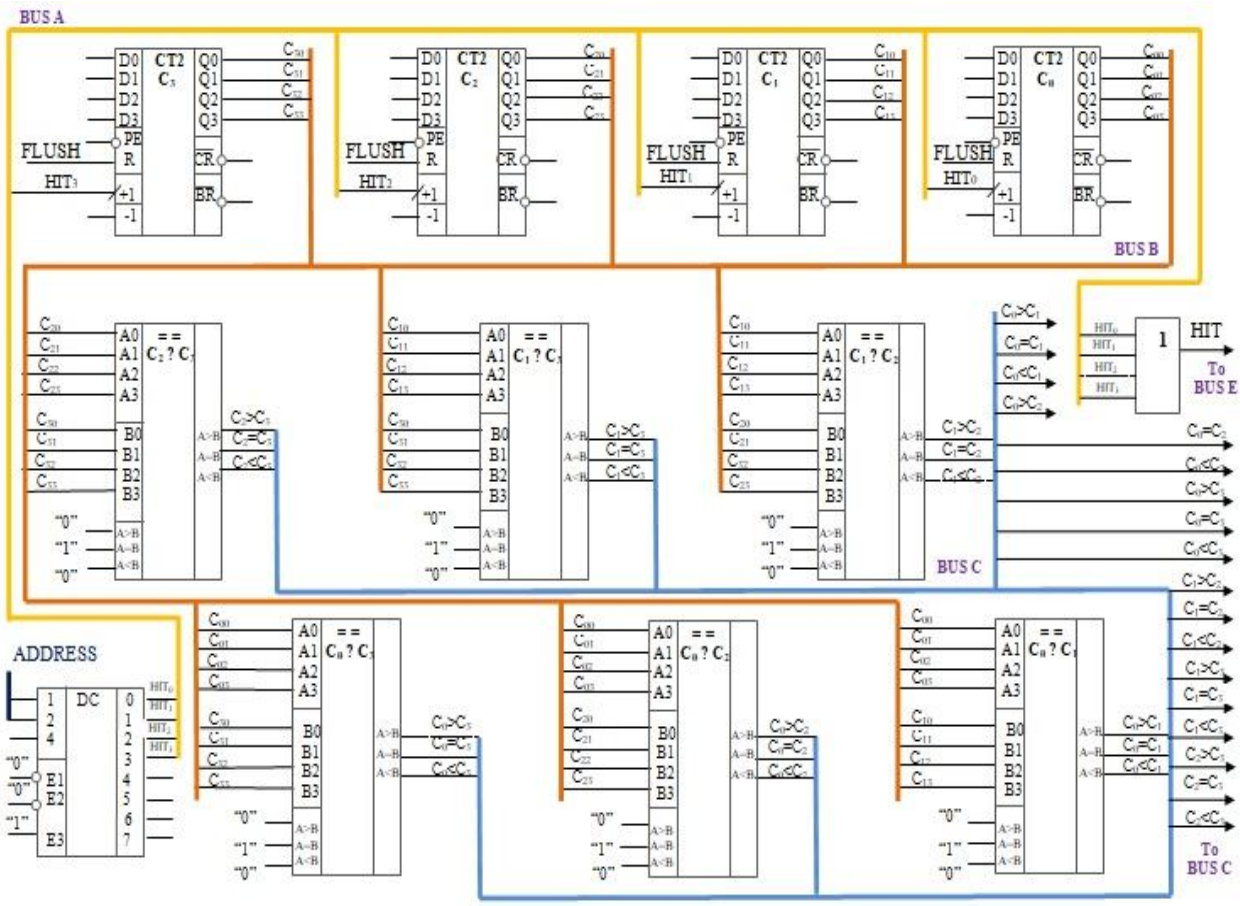


Рис. 3. Схемотехнічне рішення апаратури алгоритму заміщення MFU

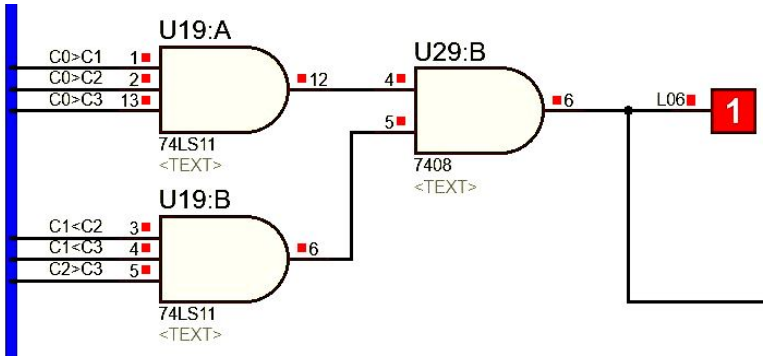


Рис. 4. Результат селекції напрямку L_0 (8) апаратури алгоритму заміщення MFU

4. Результати оцінювання

4.1. Оцінювання складності за Квайном. Оцінювання складності за Квайном відбувається у відповідності з виразами (70) - (75):

$$K = K_{CS1} + K_{CS2} + K_{cnt}; \quad (70)$$

$$K_{CS1} = K_{cmp} + K_{dc}, \quad (71)$$

де K_{CS1} – оцінка складності комбінаційної схеми CS1, K_{CS2} – оцінка складності комбінаційної схеми CS2, K_{cnt} – оцінка складності схеми елементів пам'яті типу синхронний двійковий лічильник, K_{cmp} – оцінка складності компоненти на базі компараторів, K_{dc} – оцінка складності компоненти на базі декодера;

$$K_{dc} = j \cdot 2^{j-6} \ (j = 6), \quad (72)$$

$$K_{cnt} = i * 2^{i-6}, \ (i = 8), \quad (73)$$

$$K_{cmp} = (l-3) * 2^{(l-8)} + 2, \ (l = 11). \quad (74)$$

Наступний вираз описує складність K комбінаційної схеми CS_2 через залежність від розрядності логічних елементів, які саме і складають комбінаційну схему:

$$K_{CS2} = \left[m \cdot 2^m + 2^m \right] + \left[2^{n^{n+1}-1} + 2^{n+1} + 2^n + n \right] + \\ + \left[2^{(k-1)^k} + 2^{(k-1)*k} + 2^{(k-1)*k-1} + 2^{k+1} + 2^k + 2^{k-1} + k - 1 \right], \quad (75)$$

де $n = 2$, $k = 3$, $m = 4$

Вирази (72) – (74) є підставою побудови діаграми зміни складності (рис. 5):

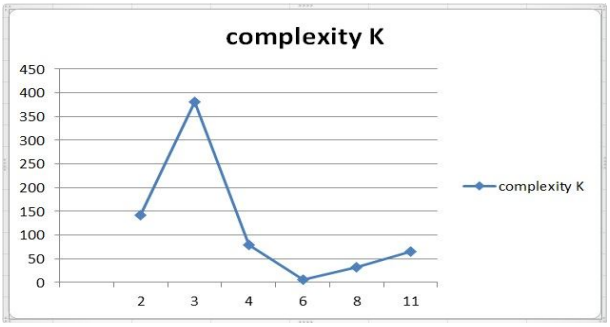


Рис. 5. Діаграма зміни складності апаратури алгоритму заміщення MFU в залежності від розрядності компонент

4.2. Оцінювання ймовірності безвідмовної роботи. Ймовірність безвідмовної роботи визначається за таким виразом:

$$P(t) = e^{-\lambda * t}, \qquad (76)$$

де e - Неперове число, λ – ймовірність безвідмовної роботи одного вентилю, t – час напрацювання на відмову (години).

У табл. 1 наведена складність синтезованої апаратури алгоритму MFU у вентилях.

Таблиця 1 – **Складність апаратури алгоритму MFU (*V* – кількість вентилів)**

№	Компоненти	*V*
1	Синхронний двійковий лічильник на (mod 16)	**96**
2	Компаратор	**30**
3	Дешифратор	**6**
4	Логічний елемент «і» на 3 входи	**96**
5	Логічний елемент «або» на 3 входи	**1**
6	Логічний елемент «і» на 2 входи	**63**
7	Логічний елемент «або» на 4 входи	**20**
		V=312

Формула (76) дозволяє обчислити ймовірності безвідмовної роботи апаратури алгоритму MFU при t=100, t=1000, t=10000, t=100000 годин відповідно:

$$P(100) = 2,72^{-312*10^{-7}*100} = 0,9969;$$

$$P(1000) = 2,72^{-312*10^{-7}*1000} = 0,9693;$$

$$P(10000) = 2,72^{-312*10^{-7}*10000} = 0,7320;$$

$$P(100000) = 2,72^{-312*10^{-7}*100000} = 0,0442.$$

Вищенаведені обчислення дозволяють побудувати відповідну діаграму (рис. 6).

4.3. Оцінювання швидкодії. Швидкодія апаратури при події промаху:

$$\tau = \tau_{3AND} + \tau_{2AND} + \tau_{4OR}(\tau_{3OR}) + \tau_{4OR} + \tau_{tbuf}, \qquad (77)$$

де τ_{3AND} - швидкодія логічної схеми типу AND на 3 входи, τ_{2AND} - швидкодія логічної схеми типу AND на 2 входи, $\tau_{4OR}(\tau_{3OR})$ - швидкодія логічної схеми типу OR на 4/3 входи, τ_{4OR} - швидкодія логічної схеми типу OR на 4 входи, τ_{tbuf} - час відкриття тристабільного буфера.

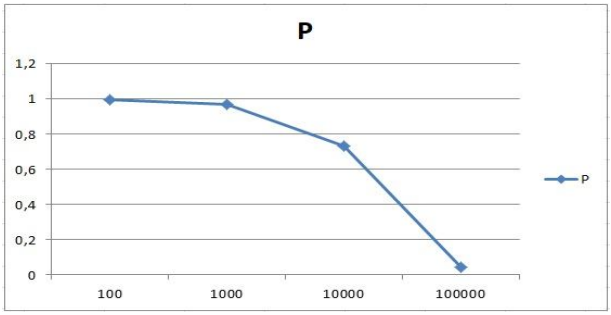


Рис. 6. Діаграма ймовірностей безвідмовної роботи апаратури алгоритму заміщення MFU у часі

Швидкодія апаратури при умові влучання:

$$\tau = \tau_{DC} + \tau_{CNT} + \tau_{CMP} + \tau_{4OR} + \tau_{tbuf}, \qquad (78)$$

де τ_{DC} - швидкодія логічної схеми комбінаційного типу декодер, τ_{CNT} - швидкодія схеми накопичувального типу лічильник, τ_{CMP} - швидкодія логічної схеми комбінаційного типу компаратор, τ_{4OR} - швидкодія логічної схеми типу OR на 4 входи, τ_{tbuf} - час відкриття тристабільного буфера.

Формули (77) та (78) дозволяють оцінити швидкодію апаратури MFU з урахуванням перехідних процесів обраної елементної бази та технологій.

Висновки

Досліджено швидкодію апаратної реалізації алгоритму MFU при подіях промахів та влучань, складність апаратної реалізації та ймовірності безвідмовної роботи апаратури. На підставі досліджень можна зробити висновки, що:

- швидкодія апаратури при події влучання повільніше швидкодії при події промаху;
- складність змінюється в залежності від розрядності компонент апаратури;
- з плином часу безвідмовність апаратури експоненційно спадає на проміжку між 100 та 100000 годин напрацювання відповідно.

References

1. Puidenko, V. and Kharchenko, V. (2020), "The Pseudo LRU Hardware Complexity Decreasing for Associative Cache Memory and Translation Look-a-Side Buffer", *CERes Journal,* Vol. 6, Is. 1, pp. 142-153.
2. Sabarinathan, Sayiraman, Senthil Kumar, Dayalan and Shanmugavel Mani, Subbiah (2002), *A Framework for MF-LRU (Most Frequently-Least Recently Used) Replacement Policy*, available at: https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.618.3125&rep=rep1&type=pdf
3. Hsin-Chuan, Chen and Jen-Shiun, Chiang (2007), "A high-performance sequential MRU cache using valid-bit assistant search algorithm", *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, Vol. 16, No. 4, pp. 613–626.
4. Sudarshan, T.S.B. Rahil Abbas, Mir and Vijayalakshmi, S. (2017), "Highly Efficient LRU Implementations for High Associativity Cache Memory", *Birla Institute of Technology and Science,* Pilani, Rajasthan 330331 INDIA.

5. Safaa S., Omran and Ibrahim A., Amory (2018), "Implementation of LRU Replacement Policy for Reconfigurable Cache Memory Using FPGA", *2018 International Conference on Advanced Science and Engineering,* Kurdistan Region, Iraq, November, 12-14, pp.13-18.
6. Jaafar, Alghazo, Adil, Akaaboune and Nazeih, Botros (2004), "Cache Replacement Algorithm Records", *2004 International Workshop on Memory Technology, Design and Testing,* Illinois, USA, August, pp.19-24.
7. Alejandro, Valero, Julio, Sahuquillo, Salvador, Petit, Pedro, Lopez, and Jose, Duato (2019), "MRU-Tour-based Replacement Algorithms for Last-Level Caches", C*onference: 23rd International Symposium on Computer Architecture and High Performance Computing* (SBAC-PAD), Vitória (Brazil), DOI: https://doi.org/10.1109/SBAC-PAD.2011.13
8. Burhan U.l. Islam, Khan, Rashidah, Olanrewaju, Roohie, Naaz Mir, Abdul Raouf, Khan and Yusoff, S.H. (2017), "A Computationally Efficient P-LRU based Optimal Cache Heap Object Replacement Policy*", Int. Journal of Advanced Computer Science and Applications,* Vol. 8, No. 1, pp. 128-139, DOI: https://doi.org/10.14569/IJACSA.2017.080118
9. Swadhesh, Kumar and Singh, P.K. (2016*)*, "An Overview of Modern Cache Memory and Performance Analysis of Replacement Policies", *2nd IEEE International Conference on Engineering and Technology,* India, pp. 4145-4148*,* DOI: https://doi.org/10.1109/ICETECH.2016.7569243

Received (Надійшла) 25.08.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.10.2020

ABOUT THE AUTHOR / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

Пуйденко Вадим Олексійович – заступник директора з навчально-виробничої роботи, спеціаліст вищої категорії, Харківський радіотехнічний коледж, Харків, Україна.
Vadym Puidenko – Deputy Director of Production and Training, Expert of the higher category, Kharkiv RadioTechnical College, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: VAPuydenko@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6393-034X

Алгоритм замещения MFU: автоматная модель, синтез и оценка аппаратной реализации

В. А. Пуйденко

Аннотация. Политика замещения адаптивного алгоритма MFU (Most Frequently Used) распространяется на архитектуру ассоциативного кэш - буфер страничного преобразования. Событие попадания в кэш - буфере страничного преобразования должно вызвать событие фиксации использования соответствующего элемента адресованного множества блока данных. Событие промаха должно привлечь определенную аппаратную логику для принятия процессором решения о замещении достоверного наиболее часто использованного элемента в блоке данных с учетом анализа фиксаций событий обращения к определенным элементам при событиях попаданий. В статье построена автоматная модель политики с комбинаторным подходом компаративного анализа фиксированных событий обращения. Автоматная модель описана соответствующими дискретными функциями и структурной блок - схемой алгоритма. Созданная и алгоритмизированная автоматная модель вызвала синтез аппаратуры политики замещения алгоритма MFU для q - направленного ассоциативного кэш - буфера страничного преобразования. В основу синтеза был положен математический аппарат комбинаторного синтеза определения разрешенных условий селекции q - направлений. Результатом синтеза стали логические уравнения селекции q - направлений со схемотехническим решением аппаратуры политики замещения и детальная блок - схема управляющего аппаратурой алгоритма. Синтезированное аппаратное решение аппаратуры позволило оценить ее сложность по Квайну: по количеству полюсов схемы и по общему количеству вентилей, что позволило провести расчеты вероятностей безотказной работы за время наработок на отказ до 100000 часов при вероятности 10^{-7} отказа одного вентиля. Статья также содержит оценку быстродействия аппаратного решения как при событиях промахов, такие при событиях попаданий.

Ключевые слова: ассоциативный кэш буфер страничного преобразования, политика замещения, алгоритм MFU, автоматная модель, комбинаторный синтез, быстродействие, оценка сложности, вероятность безотказной работы.

MFU substitution algorithm: automaton model, synthesis and assessment of the hardware implementation

Vadym Puidenko

Abstract. The substitution policy of the MFU (Most Frequently Used) algorithm is extending to the associative translation look-a-side buffer architecture. The hit event in the translation look-a-side buffer should call the event of fixing and using the corresponding element in the multitude of the data unit, which was addressed. The miss event should involve certain hardware logic to allow the processor core to make a decision about of the most frequently used element substitution in the data unit, taking into account the analysis of events fixing on access to certain elements at the hit events. The paper has developed automaton model of the policy with combinatorial approach of comparative analysis for fixed events of access. The automaton model is described by the corresponding discrete functions and the structural block diagram of the algorithm. The automaton model which was created and algorithmized caused the synthesis of the hardware substitution policy of the MFU algorithm for q - directed associative translation look-a-side buffer. The synthesis was founded on the mathematical apparatus of combinatorial synthesis of determining the enabled conditions for selecting q - directions. The result of the synthesis was logical equations of selection for q - directions with technical scheme solution of the substitution policy hardware and the detailed diagram block of the control algorithm. The synthesized hardware solution made it possible to make an assessment of complexity according to Quine by the number of poles of the circuit and by the total number of gates, that is allow to compute the probability of failure-free operation during the time of failures up to 100,000 hours with a probability of failures in 10^{-7} for a one gate. The paper also contains an assessment of the productivity for the developed hardware solution as for the miss event, as for the hit event.

Keywords: associative translation look-a-side buffer; substitution policy; MFU algorithm; automaton model; combinatorial synthesis; productivity; complexity assessment; probability of failure-free operation.

Information systems research

UDC 004.932 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.4.09**

Valeriy Barsov, Olena Kosterna, Oleksandr Plakhotnyi

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine

RESEARCH OF THE METHODS EFFICIENCY FOR DETERMINING THE DISTANCE AND GEOMETRIC OBJECTS PARAMETERS OF TECHNICAL VISION SYSTEMS

Abstract. Study subject. The article discusses methods for determining the distance to objects and their geometric parameters using the vision systems. **The goal** is a comparative analysis of the quality indicators of the most used methods for determining the distance and geometric parameters of the object. The following **task** is to analyze and experimentally study the quality indicators of methods for determining the distance and geometric parameters of the object; to assess the efficiency of monocular and stereoscopic systems in laboratory conditions. Used methods: statistical modeling, laboratory field tests. The obtained **results**: a comparative analysis of the efficiency of the known methods for determining the distance and geometric parameters of the object. The quality indicators estimates of the studied methods for determining the distance and geometric parameters are obtained. **Conclusions**: the algorithms for the implementation of the investigated methods for determining the distance and geometric object parameters, used in stereoscopic and monocular vision systems, have been implemented; experimental results have been obtained that allow a comparative analysis of their effectiveness. The software products modeling the considered methods, operating in real time in the Python environment, are obtained.

Keywords: stereoscopic vision systems; determining the distance; determining the geometric parameters, monocular vision systems.

Introduction

Now days the robotics field associated with the autonomous mobile robots development has acquired great relevance. The use of this robots type has found its application in the civil and military fields: for reconnaissance of the territory and premises that have been destroyed; in natural disaster zones where a man cannot enter; in areas with a high level of danger to humans [1-4].

To use such robots, they must have a number of functions that allow them to move autonomously, analyzing the environment. One of these functions is the ability of the robot to recognize an obstacle and get a route around the obstacle. For this, the robot must directly determine the distance to the obstacle and its geometric parameters, which is an urgent scientific and technical task of a mobile robot navigation [5].

The article discusses and analyzes three basic methods aimed for solving this problem. The first investigated method is based on the use of the minimum composition of the technical vision system, consisting of one video camera and the so-called "beacon", which is an object with known geometric parameters.

The second investigated method is a method based on the use of a computer vision system consisting of a video camera and a laser radiation source. The determination of distance and geometric parameters is carried out using the method of laser triangulation.

The third investigated method is the use of stereoscopic technical vision systems, which involves the use of two identical video cameras with a certain base between them.

Objective. To evaluate the effectiveness usage of methods for determining the distance and geometric parameters of an obstacle, to build optimal routes for moving mobile robots, based on a comparative analysis of the basic methods algorithms in laboratory conditions, by comparing the measurement results obtained via an optical channel with the results of measurements of real geometric parameters and distances to the object – the obstacles.

Determination of distance and geometric parameters using the "beacon"

Determination of the distance and geometric parameters of the obstacle in this method is based on the use of only one video camera and a "beacon" with known parameters, located in the area of interest. To determine the parameters of the object, the video camera, located of the interest area. After that, the video stream goes through the numbers of processing [5]:

- identification of a "beacon" in the area of interest (using color detection);
- determining the "beacon" contours;
- determining the "beacon" size in the image;
- determining the object of interest;
- determining the object contours;
- determining the object size in the image;
- calculation of distance and geometric parameters of the object.

After determining the object contours of interest, its dimensions in the image in pixels are determined. Next, the distance to the object and its geometrical parameters are calculated.

For example, the "beacon" dimensions are known, it is a square with a side of 7sm which is installed at a distance 2,3 m. The distance to the object of interest is calculated using the following relationship:

$$d = f \cdot h_r \cdot h_i / (h_o \cdot h_s), \quad (1)$$

where d is the design distance, mm; f is the focal length of the video camera obtained as a result of calibration, mm; h_r is the real beacon width, mm; h_i is the image

© Barsov V., Kosterna O., Plakhotnyi O., 2020

height in pixels; h_o is the beacon width in pixels, h_s is the height of the video camera matrix, mm.

The geometric object parameters are calculated using the following expression:

$$w_r = d \cdot w_o \cdot h_s / (w_t \cdot f), \quad (2)$$

where w_r is the estimated real width of the desired object; d is the calculated distance, mm; f is the focal length of the video camera obtained as a result of calibration, mm; h_i is the image height in pixels; w_o is the width of the searched object in pixels; h_s is the height of the video camera matrix, mm [4, 12].

Using these dependences, an algorithm for calculating the distance and geometric parameters using a monocular vision system was proposed and implemented. The algorithm is implemented using the Python tools [7-9] and related libraries OpenCV [10, 11] and shown in Fig. 1. Fig. 2 shows the main window of the program for the algorithm implementation of the determining the distance and geometric parameters using a monocular vision system. The results obtained by the searching of this method for determining the distance and geometric object parameters are presented in the Table 1.

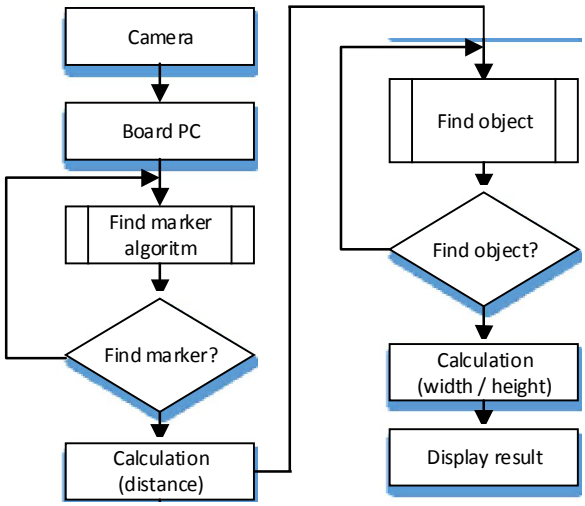


Fig. 1. Algorithm for determining the distance and geometric parameters using a monocular vision system

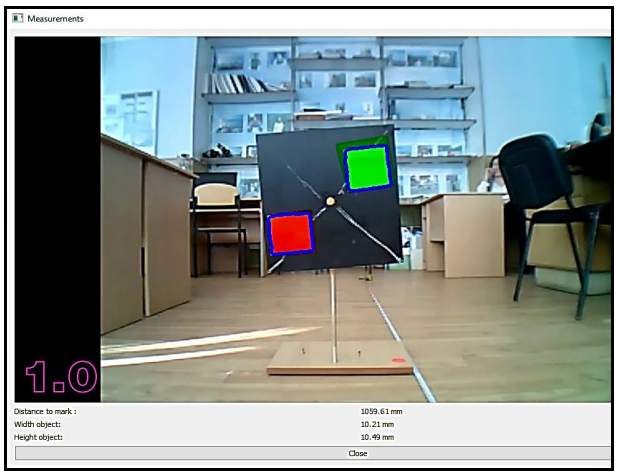


Fig. 2. The main window of the program for the implementation of the method using a monocular vision system

Table 1 – **Measurements results using a monocular vision system**

Real distance, mm	Received distance, mm	Actual dimensions (h / w), cm	Received dimensions (h / w), cm
500	509.12	10/10	10.29 \ 10.05
1000	1059.61	10/10	10.21 \ 10.49
1500	1615.29	10/10	11.28 \ 10.85
2000	2192.67	10/10	11.55 \ 11.39
2500	2783.85	10/10	12.43 \ 12.65
3000	3379.74	10/10	13.87 \ 13.85

The results obtained during the experiment showed that the accuracy of the determination depends on the distance. The average error was 8.51% for determining the distance and 16.05% for determining the geometric parameters. The dependence of the error on the distance can be seen in the graph below (Fig. 3).

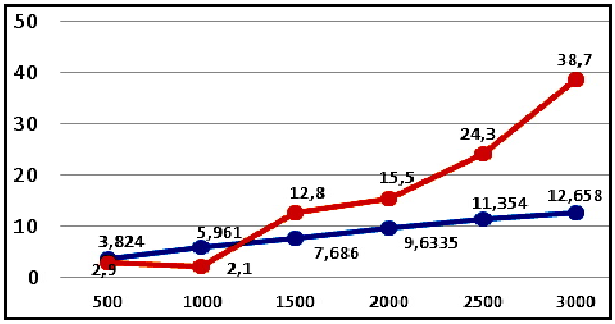


Fig. 3. Error change graph

Determination of distance and geometric parameters using a lidar-type system

The method is based on a computer vision system that works in the manner of a laser rangefinder. This system includes a direct source of laser radiation and a video camera that records this scene. The received data is processed by the calculator. Distance determination is based on the use of laser triangulation. In this method, the laser point is a pointer to the object to which the distance is measured [2].

The reflection is recorded by a webcam, which is installed at some distance from the laser, thereby forming a triangle between the object, the camera and the laser. The reflection of the laser point entering the camera forms an angle between the direction of the laser and the reflection of the point on the camera, which allows you to determine the distance to the object (Fig. 4).

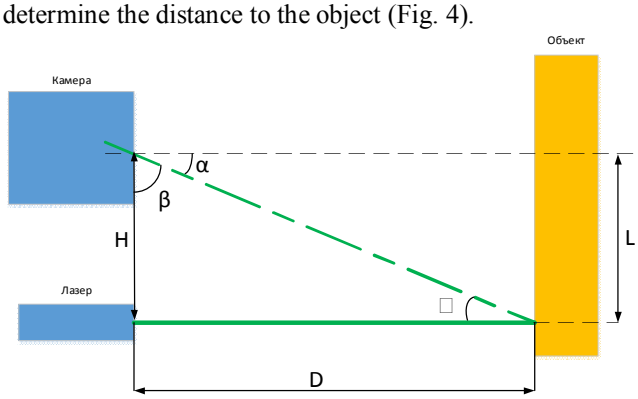


Fig. 4. Laser triangulation

The distance to the object is determined as follows:

$$D = H/\tan\theta, \quad (3)$$

where D is the distance to the object, H is the distance between the webcam and the laser, $\tan\theta$ is the angle between the laser beam and the laser point.

The angle between the laser beam and the returned laser point can be found using the expression:

$$\theta = P + R + R_o, \quad (4)$$

where P is the number of pixels from the center of the focal plane; R is radians per pixel pitch; Ro is the radius offset.

This method allows you to measure the distance to moving objects in real time. The implementation results are presented in Table 2.

Table 2 – **Results of measurements using laser triangulation**

Real distance, mm	Received distance, mm	Error, %
500	490	2
1000	998	0.2
1500	1500	0
2000	1970	1.5
2500	2450	2
3000	2920	2.6

The obtained results analysis of determining the distance showed that the maximum error is 2.6%.

To determine the geometric object parameters we use the scheme shown in Fig. 5.

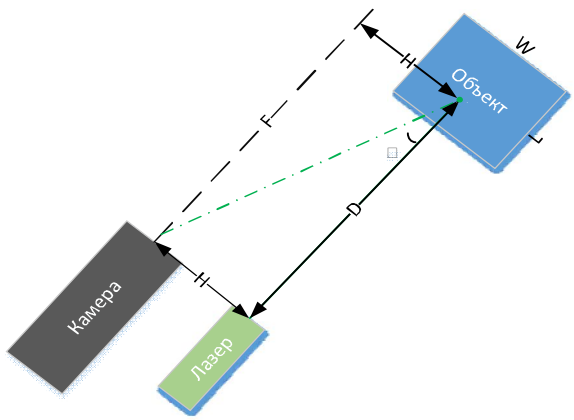


Fig. 5. Installation diagram for determining the object size

The essence of the method is to consider a rectangle formed by a laser beam and the focal plane line, as shown in Fig. 5, where: *D* is the laser beam, *F* is the frame center line.

Given that we know the distance between the camera and the laser and is 10.4 cm, for example, then the distance from the frame center to the laser mark is the same, it remains to find the distance from the frame center to the mark in pixels, and calculate the pixel size in the formed plane using expression:

$$K = 10,4/D_{center}, \quad (5)$$

where: D_{center} is the distance from the frame center to the mark in pixels.

Further, taking into account the equation result (5), we find the object width.

$$W = K \cdot W_{px}, \quad (6)$$

where W_{px} is the object width in pixels.

The object height is the same as the width.

$$L = K \cdot L_{px}, \quad (7)$$

where L_{px} is the object height in pixels

The general procedure algorithm implementing the proposed method is shown in Fig. 6.

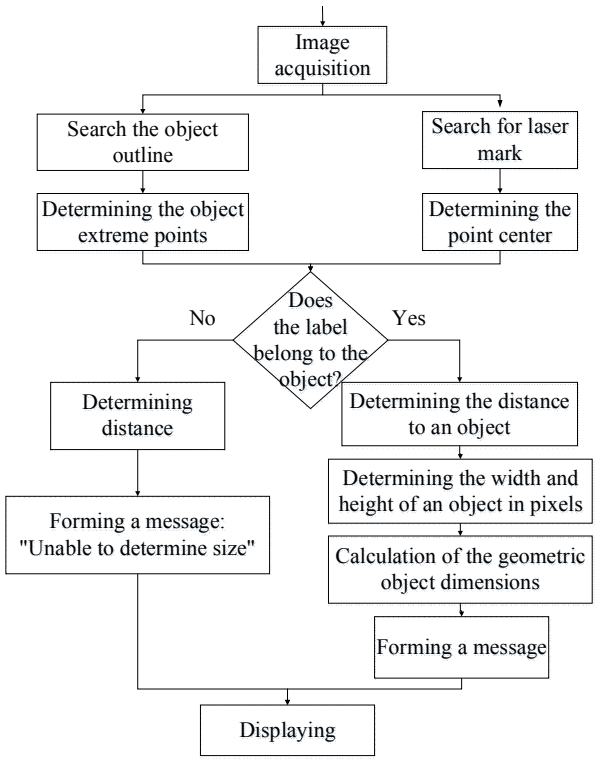


Fig. 6. Determination of distance and geometric parameters using a lidar-type system

Using the algorithm shown in Fig. 6, the geometric object dimensions are determined only if the label points to it. Otherwise, the distance is simply determined, since it can merge with the environment. The developed interface that implements the algorithm of this method clearly shows the method results. The main interface window is shown in Fig. 7. The results of determining the geometric object dimensions are presented in Table 3.

Fig. 7. Main interface window of determination the distance and geometric parameters using the "lidar" type system

Table 3 – **The results of determining the geometric dimensions**

Real dimensions (h / w), mm	Received dimensions (h / w), mm	Error, %
180/63	170/60	5.5
108/74	100/70	7.4
163/82	150/80	7.9
165/223	150/210	9.09

As can see in Table 3, the error in determining the object size can be up to 9.09%, the result is rather ambiguous, however, the sizing accuracy depends on many factors, such as the input image quality, as well as the accuracy of object determination in the image. The resulting error does not relate to the object size calculation, but directly to the object definition.

Determination of distance and geometric parameters using a system of the "stereo pair" type

One of the effective ways to measure the distance to an object and its geometric parameters is the use of stereoscopic vision systems. The method involves the use of two identical cameras with a certain distance between them, which is called the base. In the case of two identical cameras with parallel optical axes, the distance to the point is defined as

$$r_t = f \cdot d / (x_1 - x_2), \quad (8)$$

where f is the focal length; d is the distance between cameras; $x1$ and $x2$ are projections coordinates on the left and right images [3].

For a more convenient practical application of (1), we represent it in the form

$$r_H = dH / \left(tg(\alpha) \cdot (x_1 - x_2)\right), \quad (9)$$

where d is the base (distance between cameras); H is the horizontal image resolution; α is the video camera's angle of view; x_1 and x_2 are coordinates of the point to which the distance is determined, in the coordinate system of the first and second video cameras, respectively.

For the possibility of using formula (9), it is assumed that the images received from the cameras are rectified. That means that the video cameras are located so that in their coordinate systems the coordinates of the point to which it is required to determine the distance, $y1$ and $y2$ are equal. This means that the horizontal lines in the images are in the same plane. The difficulties in using this method is the difficulty of correctly installing the two cameras: the cameras axes must be parallel to each other, and perpendicular to the line connecting the cameras centers. Due to improper cameras installation, a significant measurement in accuracy can result (the difference of one degree can lead to an error of more than two times). To use this method, an algorithm was developed (Fig. 8).

In fig. 9 shows the screen of the developed software for vision systems with the implemented algorithm for determining the distance and dimensions of the object described above.

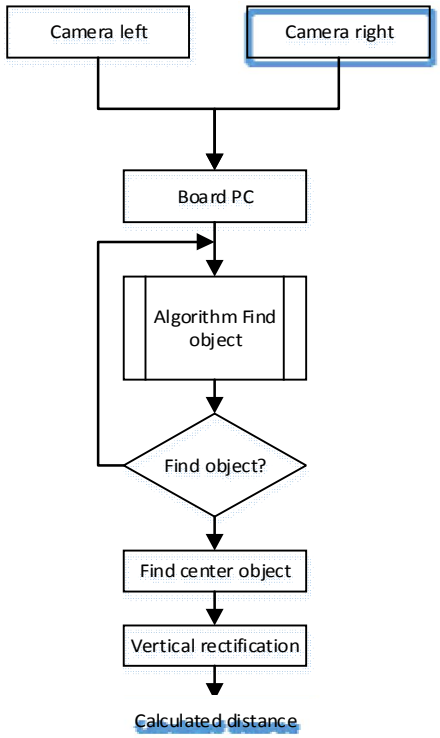


Fig. 8. Algorithm for determining the distance and geometric parameters using a stereo pair

Experiments using this method were carried out on a laboratory bench. This bench is a setup where two identical video cameras are fixed strictly parallel. With the ability to adjust the distance between cameras, the so-called base. During the experiment, measurements were carried out at distances from 0.5 m to 3 m, with a step of 50 cm. The results obtained during the experiment are presented in Table 4.

Table 4 – **Obtained experimental results for determining the distance and geometric parameters using the "stereo pair" system**

Real distance, mm	Received distance, mm	Actual size W / H, mm	Received size W / H, mm
500	508	10/10	10.12 / 10.66
1000	1041	10/10	9.34 / 9.57
1500	1563	10/10	9.14 / 9.21
2000	2171	10/10	8.87 / 8.98
2500	2723	10/10	8.31 / 8.12
3000	3298	10/10	8.04 / 7.83

As shown by the experiment results, provided in the Table 4. This system allows you to determine the distance and geometric parameters of the object with a maximum error of 9.93% to determine the distance. In addition, the average error for determining the geometric object parameters was 11.08%.

Conclusions

The performed research of methods for determining the distance and geometric object parameters, and the results analysis obtained made it possible to evaluate the effectiveness of these methods and identify their disadvantages and advantages.

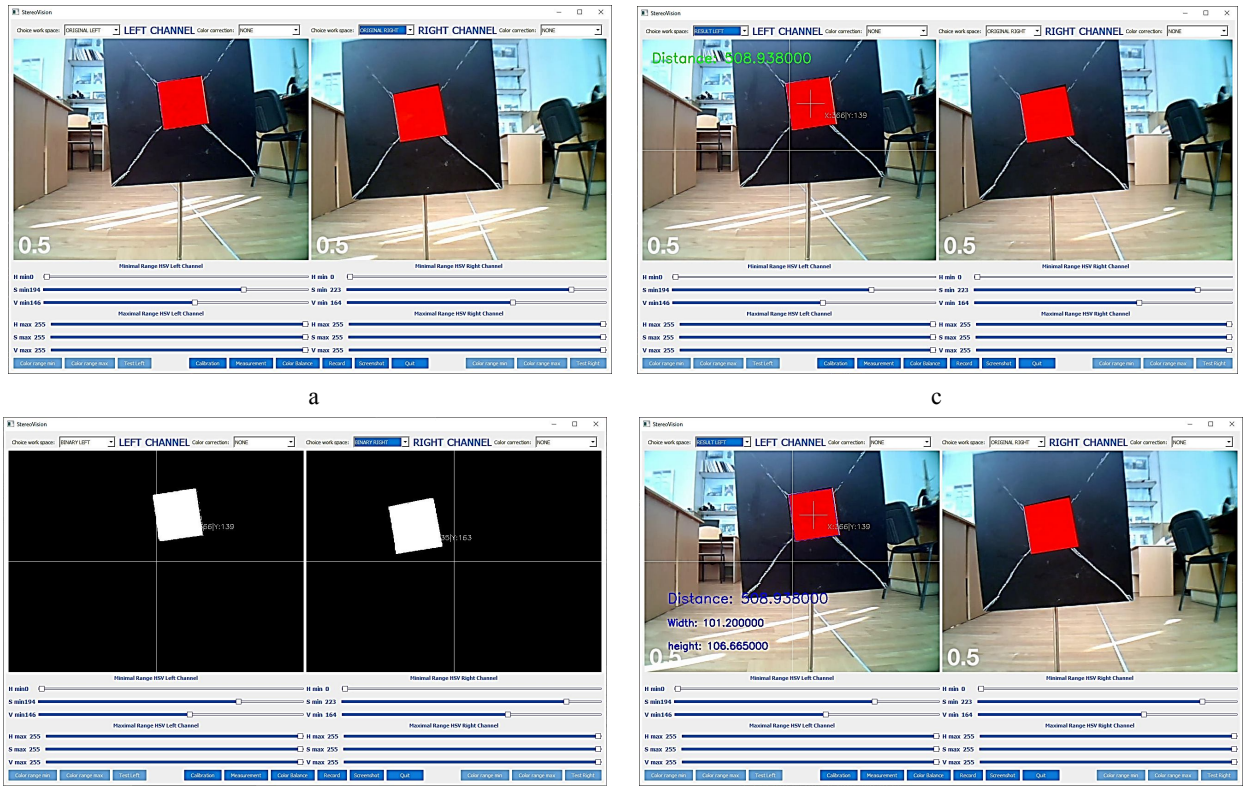


Fig. 9. Software screen for vision systems:
a is the program main window; b is the binary image of the selected object; c is the window for determining the distance to the object; d is the window for determining the distance and geometric parameters of the object

Obtaining data when implementing the method using the "Beacon" was with the largest error at the maximum distance. One of the reasons for this is not the accuracy of determining the object in the video image, but since in this method it is necessary to determine the contours of two objects, the accuracy of the determination doubly affects the final result. Also, the most significant drawback is the fact that calculations can be carried out only for objects located in the same plane.

A lidar-type technical vision system showed a good result, the error in determining the distance was 2.6%. This method is the most accurate among the methods considered. In turn, the error in determining the geometric parameters did not exceed 9.09% at the peak distance. The main disadvantage of this method is the presence of a laser radiation source, which in turn can greatly distort the data when used on reflective surfaces. In addition, the parameters are calculated directly on the laser mark, i.e. in order to determine the distance and parameters of an object, it is necessary that the mark is located on this object. The method for determining the distance and geometric parameters using a stereo pair made it possible to determine the distances to the object with an error not exceeding 9.93% and to determine the geometric object parameters with an average error of 11.08%. This approach has the greatest potential among those considered. Its disadvantage is the design complexity, namely, the cameras installation so that their axes are parallel. Even a deviation of 0.1° may distort the final result.

In this work, the effectiveness of using these methods was experimentally analyzed using the developed software product in Python using the resources of the OpenCV library. The proposed algorithms make it possible to implement the work of the considered methods in real time.

The measurement accuracy is significantly influenced by such factors: the quality of the video stream, illumination and transparency of the environment (nebula or smoke, etc.).

References

1. Dergachov, K., Krasnov, L., Cheliadin, O. and Plakhotnyi, O. (2019), "Web-cameras stereo pairs color correction method and its practical implementation", *Advanced Information Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 29-42, DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.1.06
2. Barsov, V. and Plakhotnyi, O. (2018), "Determining the distance to the object and its geometric parameters for navigating the robot", *Control, navigation and communication systems*, Is. 4(50), pp. 3-7, https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.4.003
3. Ilyasov, E.S. (2016), "Calculation of the distance to the observed object from images from a stereo pair", *Young Scientist*, no. 14 (118), pp. 146-151.
4. Dergachov, K. Bahinskii, S. and Piavka I. (2020), "The Algorithm of UAV Automatic Landing System Using Computer Vision", 2020 *IEEE 11th Int. Conference on Dependable Systems, Services and Technologies. DESSERT*, Ukraine, Kyiv.
5. (2020), *Camera Calibration in the program Camera Calibration Toolbox for Matlab*, Homepage, available to: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/

6. Dergachev, K.Yu., Krasnov, L.A. and Pyavka, E.V. (2017), "Algorithms for object detection and estimation of their motion parameters in computer vision systems", *Radio electronic and computer systems*, No. 4 (78), pp. 28-39.
7. (2020), *Computer Vision Library OpenCV*, available to: http://docs.opencv.org/
8. Kruchinin, A. (2020), *Stereo vision functions in OpenCV*, available to: https://docplayer.ru/53282398-Funkcii-stereozreniya-v-opencv.html.
9. Joseph, Howse, Joe and Minichino (2015), *Learning OpenCV 3 Computer Vision with Python*, Packt Publishing, 266 p.
10. Saurabh, Kapur (2017), *Computer Vision with Python 3*, Packt Publishing, 192 p.
11. Prateek, Joshi (2015), *OpenCV with Python By Example*, Packt Publishing, 268 p.
12. (2020), *Library for developing interfaces in Python*, available to: https://doc.qt.io/qtforpython/

Received (надійшла) 25.08.2020
Accepted for publication (прийнята до друку) 28.10.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Барсов Валерій Ігорович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна;
Valeriy Barsov – Doctor of Technical Science, professor, Professor of the Aerospace Radio-Electronic Systems Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: v.i.barsov@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-9029-4633.

Костерна Олена Юріївна – аспірантка, асистентка кафедри аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна;
Olena Kosterna – graduate student, assistant of the Aerospace Radio-Electronic Systems Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: lenchik31pka19@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-7546-1616.

Плахотний Олександр Вікторович – аспірант, асистент кафедри аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна;
Oleksandr Plakhotnyi – graduate student, assistant of the Aerospace Radio-Electronic Systems Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: plahotnyi@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6406-8501.

Дослідження ефективності методів визначення відстані і геометричних параметрів об'єкта систем технічного зору

В. І. Барсов, О. Ю. Костерна, О. В. Плахотний

Анотація. Предмет вивчення. У статті розглядаються методи визначення відстані до об'єктів та їх геометричних параметрів з використанням систем технічного зору. Метою є порівняльний аналіз показників якості найбільш використовуваних методів визначення відстані та геометричних параметрів об'єкта. **Задачі**: провести аналіз і експериментальні дослідження показників якості методів визначення відстані та геометричних параметрів об'єкта; оцінити ефективність роботи монокулярних і стереоскопічних систем в лабораторних умовах. Використовувані **методи**: статистичне моделювання, лабораторні натурні випробування. Отримані **результати**: проведено порівняльний аналіз ефективності роботи відомих методів визначення відстані і геометричних параметрів об'єкта. Отримано оцінки показників якості досліджуваних методів визначення відстані та геометричних параметрів. **Висновки**. Реалізовано алгоритми виконання досліджуваних методів визначення відстані та геометричних параметрів об'єкта, які використовуються в стереоскопічних і монокулярних системах технічного зору, отримані експериментальні результати, що дозволяють провести порівняльний аналіз їх ефективності. Отримано моделюючі розглянуті методи програмні продукти, що працюють в реальному часі в середовищі Python.

Ключові слова: стереоскопічні системи технічного зору; визначення відстані; визначення геометричних параметрів; бінокулярні системи технічного зору.

Исследование эффективности методов определения расстояния и геометрических параметров объекта систем технического зрения

В. И. Барсов, Е. Ю. Костерная, А. В. Плахотный

Аннотация. Предмет изучения. В статье рассматриваются методы определения расстояния до объектов и их геометрических параметров с использованием систем технического зрения. **Целью** является сравнительный анализ показателей качества наиболее используемых методов определения расстояния и геометрических параметров объекта. **Задачи**: провести анализ и экспериментальные исследования показателей качества методов определения расстояния и геометрических параметров объекта; оценить эффективность работы монокулярных и стереоскопических систем в лабораторных условиях. Используемые **методы**: статистическое моделирование, лабораторные натурные испытания. Полученные **результаты**: проведен сравнительный анализ эффективности работы известных методов определения расстояния и геометрических параметров объекта. Получены оценки показателей качества исследуемых методов определения расстояния и геометрических параметров. **Выводы**. Реализованы алгоритмы выполнения исследуемых методов определения расстояния и геометрических параметров объекта, используемых в стереоскопических и монокулярных системах технического зрения, получены экспериментальные результаты, позволяющие провести сравнительный анализ их эффективности. Получены моделирующие рассматриваемые методы программные продукты, работающие в реальном времени в среде Python.

Ключевые слова: стереоскопические системы технического зрения; определения расстояния; определение геометрических параметров; монокулярные системы технического зрения.

UDC 629.76 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.4.10**

Pylyp Prystavka[1], Olha Cholyshkina[2]

[1] National Aviation University, Kyiv, Ukraine
[2] Interregional Academy of personnel management, Kyiv, Ukraine

COMPARATIVE ANALYSIS OF DIFFERENTIAL INVARIANTS BASED ON THE SPLINE MODEL FOR VARIOUS IMAGE DISTORTION

Abstract. In the task of finding the features of digital images, it is relevant to determine solutions that provide high processing speed. In the article experimental studies of the application of differential invariants based on the partial image model as a linear combination of B-splines that are close to the average interpolation. Such a model retains the properties of the Gaussian model in the frequency domain, but has less computational complexity, which allows us to better investigate its asymptotic properties and the properties of the corresponding partial derivatives used in the construction of differential invariants. The issue of differences in gradient magnitude, Lapsasian, Hessian determinant, and curvature of the scaling curve during image processing was studied, and the masks of low-frequency filters and operator masks were minimized based on differences of smoothing operators. It has been experimentally proved that smoothing of digital images and reduction of their linear sizes allows to formalize the process of feature selection on the basis of analysis of probability distributions of introduced differential invariants. The suggested approach may be recommended when searching for similar objects containing different images. The approach considered in the work has a low computational complexity, which makes it possible to recommend it for use in systems with a low computation speed, in particular for systems operating on single-board computers.

Keywords: image model, B-spline; differentiation operators; differential invariants distributions; invariant values.

Introduction

Today, the generally accepted approach to searching for local features of digital images (DI) is to use differential invariants [1] based on continuous models, most often using private derivatives of the first and second order two-dimensional Gauss function [2-7]. The only drawback when using the kerosene image model can be considered relative computational complexity, but for special cases, this warning is not significant, because when processing the DI, discrete convolutions with pre-calculated masks are used.

By a model alternative on the basis of Gaussian there is a spline-model [8] as linear combination of *B*-splines, that is near to interpolation in middle [9]. Such a model retains almost all the properties of the Gaussian model in the frequency domain, however, it has a much lower computational complexity, which makes it possible to better investigate its asymptotic properties and the properties of the corresponding partial derivatives [10-12], which are used in constructing differential invariants. As researches of authors showed [12], even limit amount of operators on the basis of spline model, allows effectively to decide the task of search steady to the turns and down-scalings of features of DI. This approach also has an advantage over patented methods, because the model and operators based on it are publicly available. Therefore, for the further development of the method of using the spline model DI it is important to study its application in different types of distortions, which is why this work is devoted.

Analysis of publications and statement of the research problem. Let [8] be in a continuous two-dimensional image model $p(t,q)$ as a function of the pulse call uses the model:\

$$S_{r,0}(p,t,q) = \\ = \sum_{i\in Z}\sum_{j\in Z} p_{i,j} B_{r,h_t}(t-ih_t) B_{r,h_q}(q-jh_q),\ r=2,3,\ldots. \quad (1)$$

where $B_{r,h}(\bullet)$ – *B*-spline of order r defined by [9] on a uniform partition of the real axis with a step h.

Then, due to the explicit form of the model (1), it is not difficult to obtain both the explicit form of its partial derivatives and their discrete analogues suitable for processing digital images. From private derivatives

$$\begin{pmatrix} S'_{r,0}(p,t,q)_t, S'_{r,0}(p,t,q)_q, S''_{r,0}(p,t,q)_{tt}, \\ S''_{r,0}(p,t,q)_{qq}, S''_{r,0}(p,t,q)_{tq} \end{pmatrix},$$

for each of the models (1) of order $r=2,3,\ldots$ four differential invariants with respect to local rotations can be constructed - gradient magnitude $|\nabla S_{r,0}|$, Laplacian $\nabla^2 S_{r,0}$, Hessian determinant $\det \mathrm{H}_{r,0}$ and the curvature of the scaling curve $\tilde{k}_{r,0}$ (up to the notation of operators of different order):

$$|\nabla S| = S_t'^2 + S_q'^2, \quad (2)$$

$$\nabla^2 S = S''_{tt} + S''_{qq}, \quad (3)$$

$$\det \mathrm{H} = S''_{tt} S''_{qq} - S''^2_{tq}, \quad (4)$$

$$\tilde{k} = S_t'^2 S''_{qq} + S_q'^2 S''_{tt} - 2S'_t S'_q S''_{tq}, \quad (5)$$

At different $r=2,3,\ldots$ the authors obtain explicit types of partial derivatives of model (1). So, for work with DI at $r=3$ discrete analogs $S'_{3,0}(p,t,q)_t$, $S'_{3,0}(p,t,q)_q$ considering $h_t = h_q = 1$, can be filed as follows [11]:

$$S'_{3,0,l} = \sum_{ii=i-1}^{i+1}\sum_{j=i-1}^{j+1} \gamma'_{l,ii-i,jj-j} \cdot p_{ii,jj}, \quad (6)$$

where $l = \{t,q\}$;

© Prystavka P., Cholyshkina O., 2020

$$\gamma'_t = \frac{1}{12}\begin{pmatrix} -1 & -4 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 1 \end{pmatrix}; \ \gamma'_q = \frac{1}{12}\begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -4 & 0 & 4 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Discrete convolutions of second-order differentiation operators $r = 3$ such :

$$S''_{3,0,l} = \sum_{ii=i-1}^{i+1} \sum_{j=i-1}^{j+1} \gamma''_{l,ii-i,jj-j} \cdot p_{ii,jj}, \qquad (7)$$

where $l = \{tt, qq, tq\}$; $\gamma''_{tt} = \frac{1}{6}\begin{pmatrix} 1 & 4 & 1 \\ -2 & -8 & -2 \\ 1 & 4 & 1 \end{pmatrix}$;

$$\gamma''_{qq} = \frac{1}{6}\begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 4 & -8 & 4 \\ 1 & -2 & 1 \end{pmatrix}; \ \gamma''_{tq} = \frac{1}{4}\begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Similarly, first-order and second-order partial derivatives are obtained for higher-order.

In the author's work [10] the method of determining the features on the basis of operators (2) - (5), obtained with the help of expressions like (6), (7), is widely described. In contrast to the well-known method SIFT [13] and its like, it is proposed to use the distribution of differential invariants, in particular to identify which of them are present on «tails» distributions when selecting features. This approach has been analysed in more detail in the work [12], but such research can be continued as described in this publication.

According to [12], the possibility of using invariants (2) - (5) to identify objects in the production of aerial photography was considered (Fig. 1).

It was proposed to use a linear operator to determine the detectors to the reference image (Fig. 1). $Delta\left(p^{i,j}\right)$ in the form of a discrete convolution of the sequence $\{p_{i,j}\}_{i,j\in\mathbb{Z}}$:

$$d\_p_{i,j} = Delta\left(p^{i,j}\right) = \\ = \sum_{ii=i-3}^{i+3} \sum_{jj=j-3}^{j+3} \delta L_{ii-i,jj-j}\, p_{ii,jj}, \quad i,j \in \mathbb{Z}, \qquad (8)$$

where $\{d\_p_{i,j}\}_{i,j\in\mathbb{Z}}$ - a newly formed sequence for finding special points; δL - symmetric matrix dimensional of (7x7);

$$\delta L = \frac{1}{21233664} \times \\ \times \begin{pmatrix} 0{,}01 & 7{,}22 & 105{,}43 & 235{,}48 & \dots \\ 7{,}22 & 3738{,}28 & 37781{,}9 & 72695{,}6 & \dots \\ 105{,}43 & 37781{,}9 & 114745{,}93 & -47679{,}32 & \dots \\ 235{,}48 & 72695{,}6 & -47679{,}32 & -878100{,}32 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}.$$

This operator is based on model (1), a discrete analogue of the function of the difference of Gaussian folding functions of two near scales, divided by constant factors with the original image, which is used in the construction of the pyramid of images [14].

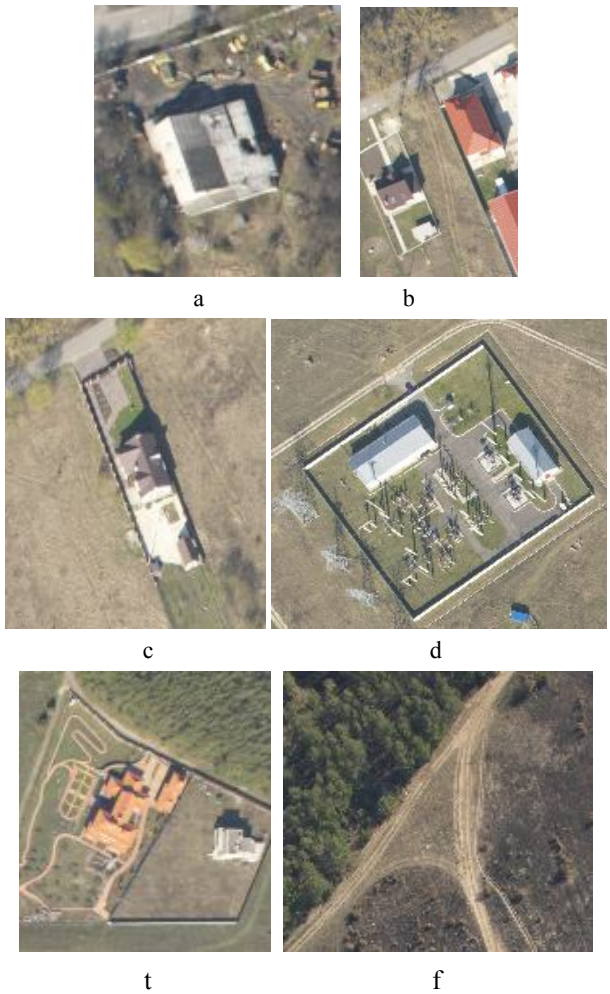


Fig. 1. Test examples of terrain elements according to aerial photography

In particular, the calculation of the convolution of the original image with Gaussian functions or other DI models, smoothing like (1), is necessary to describe features in the scale-position space. Such a convolution can be determined by simply subtracting Gaussian or spline images, in addition, such a difference gives a closed approximation of the scale-normalized Lapsassian.

After application (8) we form [12] a three-dimensional array

$$Ext = \left\{\left(ext_l, i\_pos_l, j\_pos_l\right); l = \overline{1,M}\right\} \qquad (9)$$

scope M , that as $ext_l, l = \overline{1,M}$ contains the value of the invariant calculated in the locations of local minima and maxima $\{d\_p_{i,j}\}_{i,j\in\mathbb{Z}}$: if

$$d\_p_{i,j} = \max\left\{d\_p_{ii,jj}; ii = \overline{i-1,i+1}, jj = \overline{j-1,j+1}\right\}$$

or

$$d\_p_{i,j} = \min\left\{d\_p_{ii,jj}; ii = \overline{i-1,i+1}, jj = \overline{j-1,j+1}\right\},$$

then $i\_pos_l = i$, $j\_pos_l = j$.

This approach to determining the location of DI features is not original - the SIFT method and many of its modifications for the same purpose use the above-mentioned difference of DI convolutions with Gaussian, the analogue of which is expression (8).

Using the received locations of the local extrema were calculated $ext_l, l=\overline{1,M}$ - value (2)-(5) singular point detectors taking into account (6), (7) after collapsing derived spline masks with $\left\{d\_p_{i,j}\right\}_{i,j\in\mathbb{Z}}$. It is worth noting that the high saturation of singular points even for small fragments of images imposes the requirement to select those detector values corresponding to unlikely realizations on the tails of the distributions of operators (2) - (5). Therefore, it was proposed [12] to analyze the probability distribution of the array of values for the final selection of special points suitable for recognition $\left\{ext_l; l=\overline{1,M}\right\}$ specific detector and leave those that meet the conditions:

$$ext_l \le ext_{\alpha_1},\ l=\overline{1,M},\ ext_{\alpha_1}=F^{-1}(\alpha_1); \quad (10)$$

$$ext_l \ge ext_{1-\alpha_2},\ l=\overline{1,N}, ext_{1-\alpha_2}=F^{-1}(1-\alpha_2), \quad (11)$$

where $F^{-1}(\bullet)$ – the inverse function of the probability distribution to the detector for a specific central zone by $\left\{ext_l; l=\overline{1,M}\right\}$; ext_{α_1}, $ext_{1-\alpha_2}$ – quantiles of such distribution on its tails at some rather small probabilities α_1 and α_2.

When analyzing the distributions of operators (2), (3) and (5), which have a distribution density function close to symmetric, which, for definiteness, can, for example, be set $\alpha_1=0,01$ and $\alpha_2=0,01$, what should be left for further analysis 2% from the number of special points. And for the distribution of the operator (4) worth taking value α_1 less, and for the right tail α_2 – more, for example, $\alpha_1=0,005$ and $\alpha_2=0,015$. In addition, the number of singular points in work [12] studied the effect of smoothing and reducing the linear dimensions of the DI . In particular, convolutions with symmetric masks were used to smooth the DI (7 × 7)

$$\gamma^{(6)}=\frac{1}{21233664}\times$$
$$\times\begin{pmatrix} 0,01 & 7,22 & 105,43 & 235,48 & \cdots \\ 7,22 & 5212,84 & 76120,46 & 170016,56 & \cdots \\ 105,43 & 76120,46 & 1111548,49 & 2482665,64 & \cdots \\ 235,48 & 170016,56 & 2482665,64 & 5545083,04 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}. \quad (12)$$

What are obtained on the basis of the spline model (1) at $r = 6$.

It was experimentally shown that the number of singular points on DI can be significantly reduced by smoothing and decreasing their linear dimensions. In this case, we obtain a mesh number of special points with detector distributions that differ from the distributions on the initial size DI only by the scale. Therefore, it can be stated that the definition of singular points is quite positively affected by both smoothing DI and reduction of their linear dimensions, because the number of points decreases, but the value of detectors correlates with those determined for the original image. With regard to the choice of a specific differential invariant for the determination of singular points, it is recommended to pay attention to the curvature of the scaling curve $\tilde{k}$ (5), after all, it is for this operator that the maximum growth rate of the detector distribution function can be observed near zero, and therefore the features that will be highlighted on the tails will be more "characteristic" and their number will be relatively smaller.

In general, given the low computational complexity, the considered approach can be used as a basis for information technology data processing, where the requirement for computational complexity is critical, for example when performing calculations on low-power computers, such as those used for target load subsystems in reconnaissance drones. drone. However, further research requires a question similar to the analysis of the distributions of invariants (2) - (5) when they are applied directly to the image, and not after the convolution, which is determined by the operator (8) $Delta(P_{I,J})$. We aim to explore this issue in this work.

Main material

If the location of the feature is determined directly by the values $\left\{p_{i,j}\right\}_{i,j\in\mathbb{Z}}$, that is, formed (9), or an array of indexes $\left\{(i\_pos_l, j\_pos_l); l=\overline{1,M}\right\}$, then consider in the graphs (Fig. 2) the distribution of the corresponding differential invariants calculated at these points for the array $\left\{p_{i,j}\right\}_{i,j\in\mathbb{Z}}$.

From the visual analysis of the given graphs it is possible to state their similarity with the above-mentioned distributions presented in [12]. However, there are differences that are worth noting. The difference in scale along the abscissa axis is obvious. There is a difference in the growth rate of the gradient distribution function (2) and the behavior of the Lapsasian distribution near zero.

It will be useful to analyze the effect of the DI smoothing operation on the distribution of the calculated invariants. Without diminishing the generality, we present graphs of the distributions of invariants (2) - (5) on the example of smoothing one of the images.

After smoothing we have (Fig. 3): for the distribution of the operator (2) neither the scale nor the form of the distribution has practically changed; for others, there is a change in scale; for the distribution of the operator (3) - the shape of the distribution in the vicinity of the quantile 0.5 has changed significantly. The latter can be a characteristic feature of the procedure of smoothing the DI, so we give the distributions of this operator for other DI.

From the analysis of the graphs (Fig. 4) it is obvious that smoothing has a very significant effect on the distribution of lapsasian, which should be taken into account in subsequent studies.

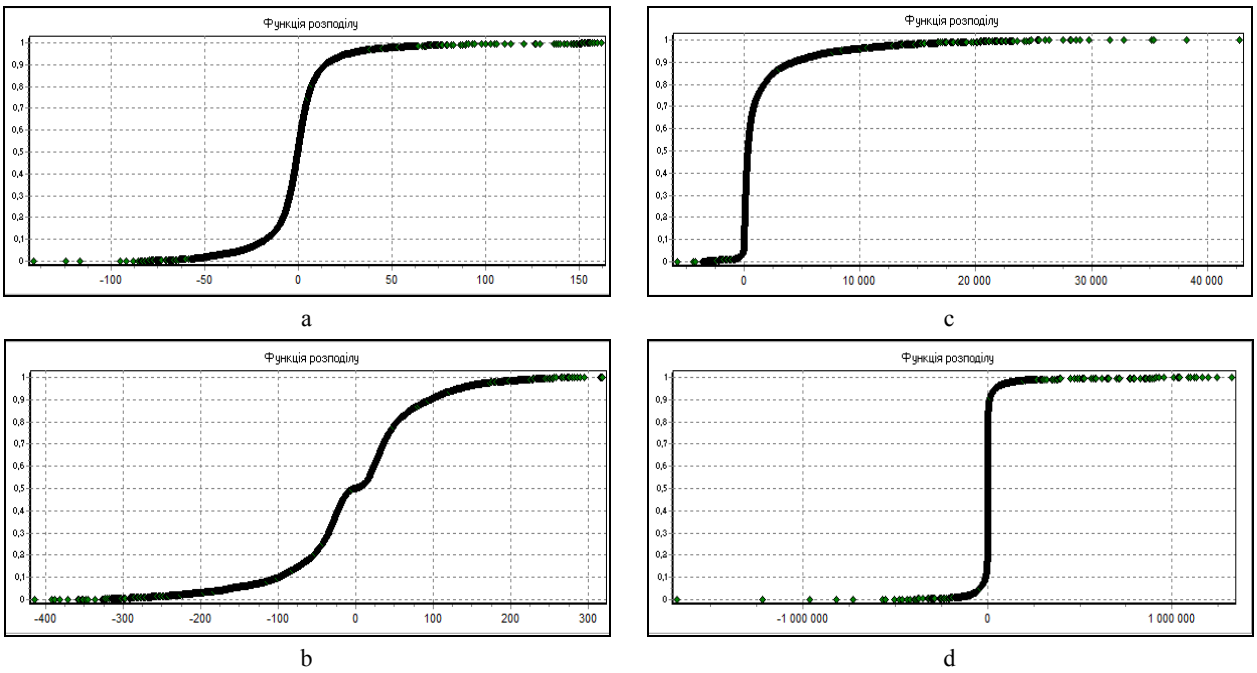


Fig. 2. Distributions of the operator (2) - (5) on the example of the image "g": a – (2), b – (3), c – (4), d – (5)

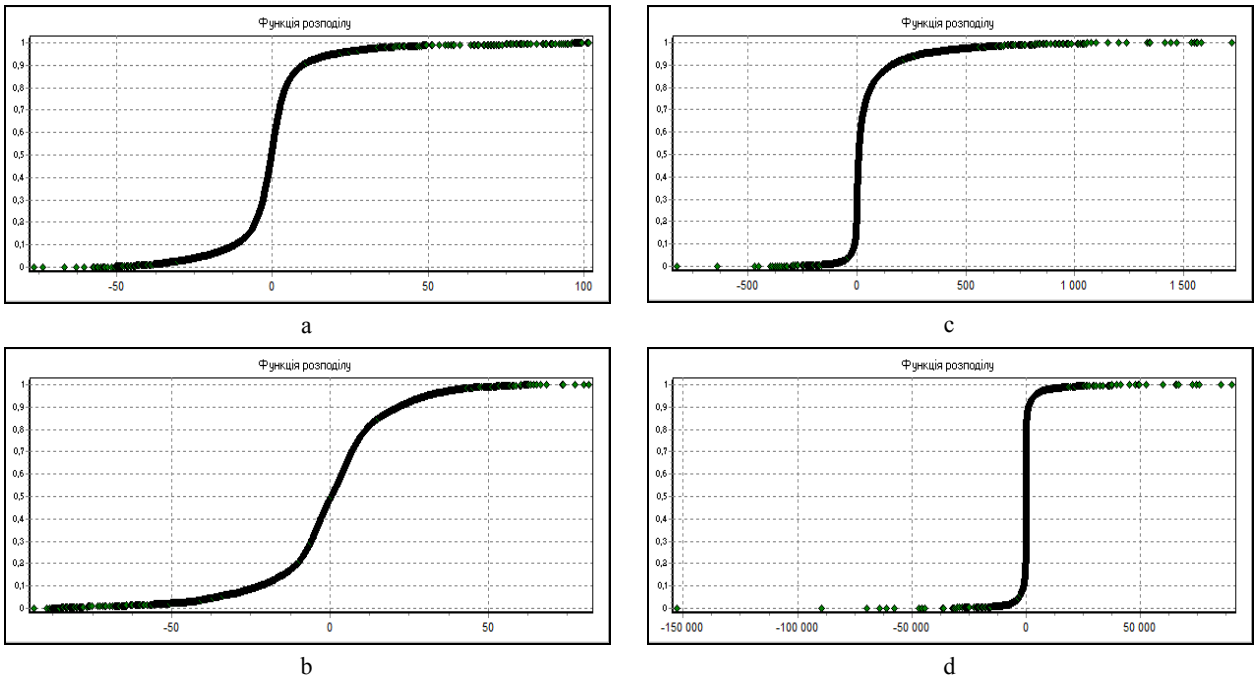


Fig. 3. Distributions of detectors after smoothing of the image "g" (fig. 1) operator with mask (12): a – distribution of the operator (2); b – (3); c – (4); d – (5)

It is useful to study the correlation (Table 1) of differential invariants (2) - (5) for images before and after smoothing (at the same points).

Table 1 –**Estimates of the linear correlation coefficient for the values of invariants that are calculated from the output DI and smoothed with a mask (12)**

	a	b	c	d	e	f
(3.2)	0,968	0,964	0,949	0,927	0,947	0,89
(3.3)	0,925	0,895	0,877	0,819	0,907	0,858
(3.4)	0,737	0,562	0,63	0.463	0,595	0,52
(3.5)	0,828	0,757	0,798	0,798	0,792	0,78

When analyzing the data shown in the table (Table 1), attention is drawn to a significant relationship between the values of the Lapsasian and the gradient of the output and smoothed images and less correlation for the curvature and, especially, the Hessian determinant (4).

This may be due to the “heavier” tails of the last two distributions that appeared after smoothing. However, all the given correlation coefficients are significant and it can be argued that in further research, attention should be paid to the possibility of using exactly smoothed DI, because in this case, objectively more "persistent" features should be expected.

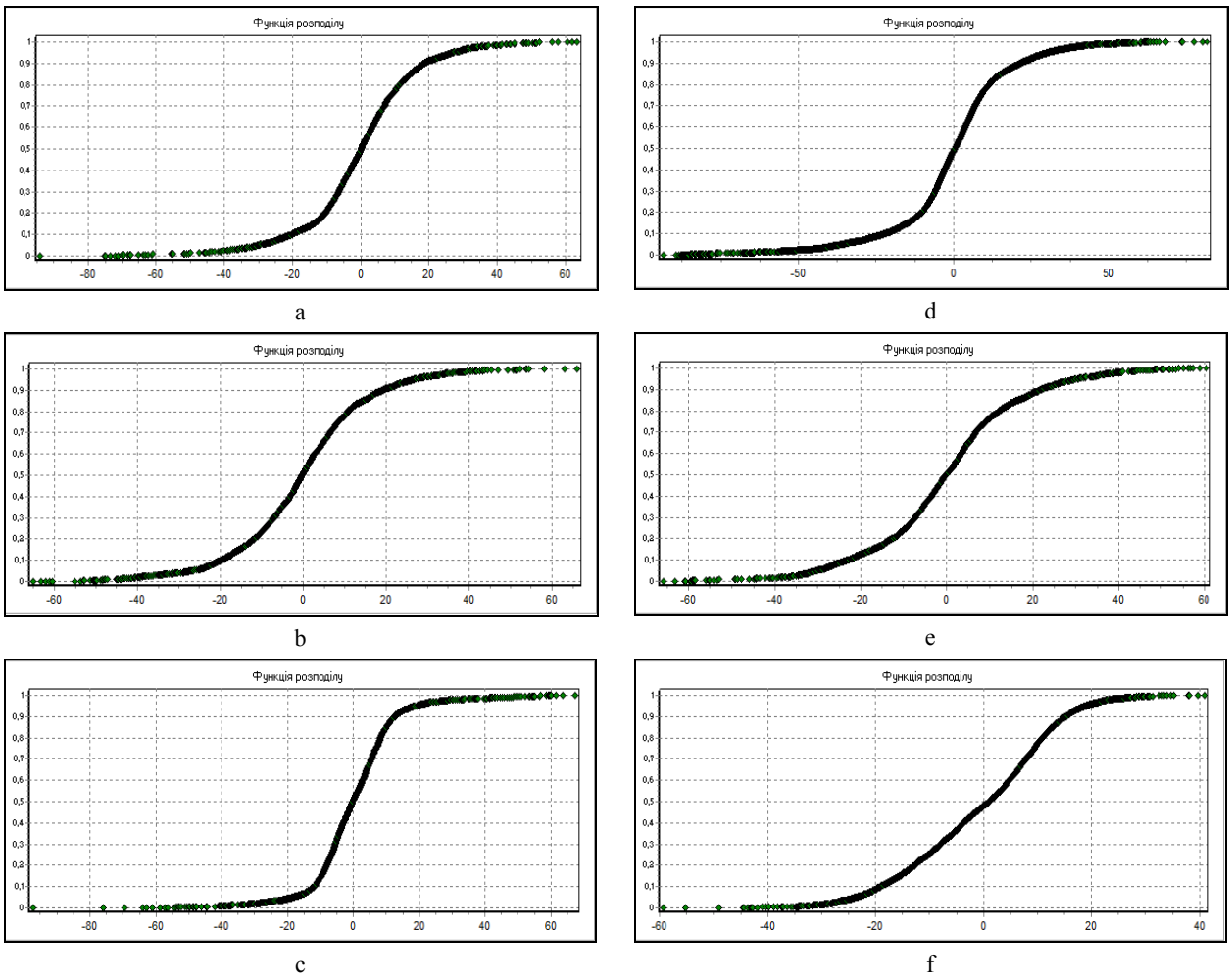


Fig. 4. Operator distributions (3.3) after DI smoothing

We will not bypass and analyze the correlation of differential invariants that are calculated for the original or smoothed DI and DI after the application of the operator *Delta*($P_{I,J}$) (Table 2, 3).

When analyzing the tables (Tables 2 and 3), we first see the complete consistency of the values of the operator (3) - Lapsassian. The explanation is that the operator *Delta*($P_{I,J}$) in fact, it is an approximation of the normalized. In addition, a high correlation is observed for the values of the invariant (4) in contrast to the gradient (2) and curvature (5). However, such values of the correlation of invariants (2) and (5) are also statistically significant.

The scaling operation (reduction with smoothing) shows (Table 4) that the correlation of the values of operators (2) and (5) increases significantly, which in itself may be useful to take into account in further studies the issue of selecting the positions of singular points. Finally, in this section, we give graphs of the distributions (Fig. 5) of the differential invariants calculated for the image "d" (Fig. 1) after reduction with smoothing and once again smoothing of the already reduced DI.

Table 2 – **Correlation of invariant values calculated for the output DI and after application *Delta*($P_{I,J}$)**

	a	b	c	d	e	f
(3.2)	-0,798	-0,852	-0,847	-0,889	-0,882	-0,828
(3.3)	-0,99	-0,99	-0,99	-0,979	-0,989	-0,986
(3.4)	0,967	0,962	0,975	0,939	0,951	0,944
(3.5)	-0,807	-0,822	-0,884	-0,884	-0,875	-0,81

Table 3 – **Correlation of invariant values calculated for smoothed DI with mask (12) and after application *Delta*($P_{I,J}$)**

	a	b	c	d	e	f
(3.2)	-0,613	-0,561	-0,567	-0,714	-0,631	-0,52
(3.3)	-0,977	-0,976	-0,976	-0,984	-0,983	-0,981
(3.4)	0,912	0,888	0,926	0,952	0,907	0,91
(3.5)	-0,556	-0,574	-0,591	-0,746	-0,583	-0,509

Table 4 – **Correlation of invariant values**

	a	b	c	d	e	f
(3.2)	-0,818	-0,798	-0,792	-0,855	-0,832	-0,668
(3.3)	-0,988	-0,991	-0,992	-0,989	-0,991	-0,988
(3.4)	0,962	0,973	0,974	0,957	0,96	0,935
(3.5)	-0,786	-0,871	-0,877	-0,876	-0,875	-0,686

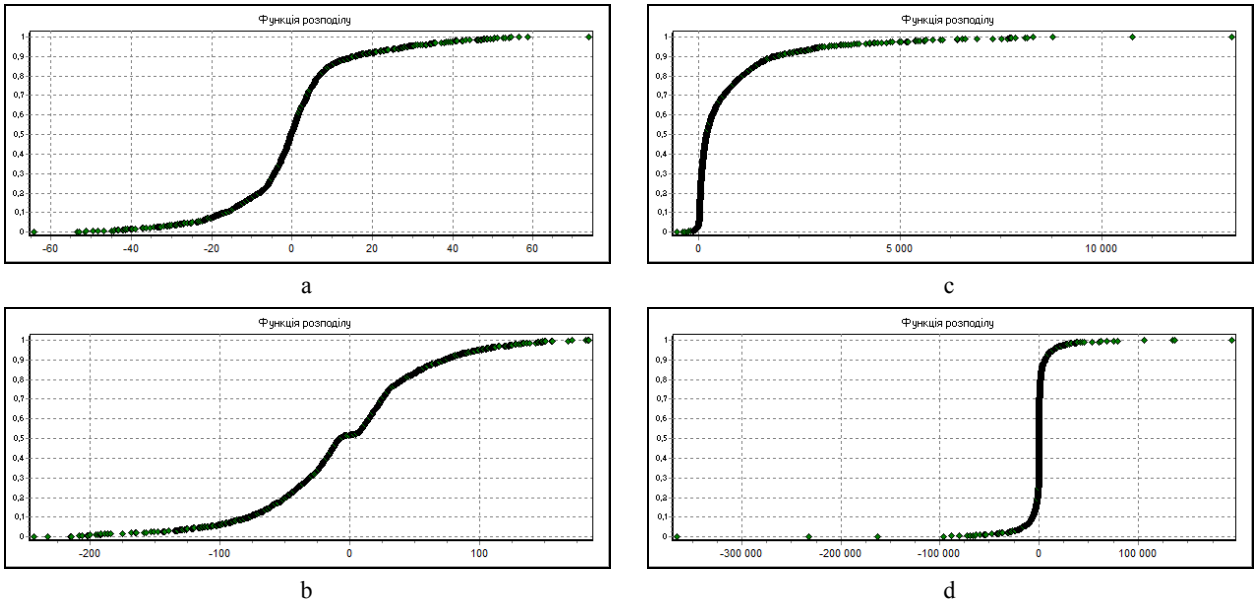


Fig. 5. Distributions of image detectors «d» (Fig. 3) after reduction with smoothing by the operator (12) and again applying after that smoothing with a mask (12): a – operator distribution (2); b – (3); c)– (4); d)– (5)

As we can see (Fig. 5), the tails of the distributions have become quite "heavy". Perhaps this fact can be useful, because it is on the tails of the distributions of invariants should expect the value of features (special points), the most "resistant" to various operations on DI - such as displacement, rotation, scaling, smoothing, and the like.

Conclusions

As a result of the conducted experimental researches it is established that application to initial DI of the operator (8) $Delta(P_{I,J})$ when finding singular points has no priority in comparison with the definition of features on the basis of differential invariants (2) – (5) before the approach, was investigated in this work, namely - the calculation directly behind the raster. In both cases, the distributions of all invariants have a similar shape and, despite the different scales along the abscissa, there is a significant correlation of their values.

It was further confirmed that fewer features are significantly affected by DI smoothing and reduction of linear dimensions, with those remaining features located on the tails of differential invariants distributions, which allows you to formalize the selection process for further analysis and use in the task of searching for similar objects in photos. In contrast to the known ones, the considered approach has objectively less computational complexity, which allows us to recommend it for use in systems with low computing speed, in particular for systems running on single-board computers.

At further researches it is necessary yet to pay attention to the analysis of percent of coincidences site of feature for standard and control objects on the basis of offered approach.

References

1. Kukharenko, B.G. (2011), "Algorithms of image analysis for determining local features and recognition of objects and panoramas", *Information Technology*, No. 7, Appendix, 32 p.
2. Sobel, I.E. (1970), *Camera Models and Machine Perception*, PhD Thesis, Stanford University, CA.
3. Canny, J. (1986), "A computational approach to edge detection", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol 8, No. 6, pp. 679-698.
4. Marr, D.C. and Hildreth, E. (1980), "Theory of edge detection", *Proc. of the Royal Society of London*, Vol. 207, Is. 1167, pp. 187-217, DOI: https://doi.org/10.1098/rspb.1980.0020
5. Schmid, C., Mohr, R. and Bauckhage, C. (2000), "Evaluation of interest point detectors", *International Journal of Computer Vision*, Vol. 37, No. 2, pp. 151-172.
6. Lindeberg, T. (2009), "Scale-space", *Encyclopedia of Computer Science and Engineering*, Hoboken, John Wiley and Sons, New Jersey, Vol. IV, pp. 2495 – 2504.
7. Koenderink, J.J. and van Dorn, A.J. (1992), "Generic neighborhood operators", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 6, pp. 597-605.

8. Prystavka, P. and Ryabiy, M. (2012), "Model of realistic images based on two-dimensional splines close to interpolation on average", *Science-intensive technologies*, No. 3 (15), pp. 67-71.
9. Prystavka. P. (2004), *Polynomial splines in data processing*, Dnipropetrovsk Publishing House, Dnipropetrovsk, 236 p.
10. Prystavka, P. (2015), "Determining the features of images based on combinations of B-splines of the second order, close to the interpolation on average", *Current issues of automation and information technology*, Vol. 19, LIRA, pp. 67-77.
11. Prystavka, P., Tyvodar, O. and Martyuk, B. (2017), "Feature detection for realistic images based on b-splines of 3rd order related to interpolar on average", *Proceedings of the National Aviation University*, No. 2 (71), pp. 76-83.
12. Lowe, D.G. (1999), "Object recognition from local scale-invariant features", *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, Corfu, Greece, pp. 1150-1157.
13. Lowe, D.G. (2004), "Distinctive image features from scale-invariant keypoints", *International Journal of Computer Vision*, Vol. 60, No. 2, pp. 91-110.
14. Pawlak, Z (1991), *Rough Sets – Theoretical Aspects of Reasoning about Data*, Kluwer Academic Publ., Dordrecht, 246 p.

Надійшла (received) 11.08.2020
Прийнята до друку (accepted for publication) 21.10.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Приставка Пилип Олександрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри прикладної математики, Національний авіаційний університет, Київ, Україна;
Pylyp Prystavka – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Applied Math Department, National Aviation University, Kyiv, Ukraine;
e-mail: chindakor37@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-0360-2459

Чолишкіна Ольга Геннадіївна – кандидат технічних наук, декан факультету комп'ютерно-інформаційних технологій, Міжрегіональна Академія управління персоналом, Київ, Україна;
Olha Cholyshkina – PhD, Dean of Faculty computer-information technologies, Kyiv, Ukraine;
e-mail: greenhelga5@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-0681-0413

Порівняльний аналіз диференціальних інваріантів на основі сплайн-моделі при різних спотвореннях зображень

П. О. Приставка, О. Г. Чолишкіна

Анотація. У завданнях пошуку особливостей цифрових зображень актуальним є визначення таких рішень, які забезпечують швидкодію при обробці. У статті проведено експериментальні дослідження застосування диференціальних інваріантів на основі часткових похідних моделі зображення, як лінійної комбінації B-сплайнів, що близькі до інтерполяційних у середньому. Така модель зберігає властивості гауссових моделі в частотній області, проте має меншу обчислювальну складність, що дозволяє краще дослідити асимптотичні властивості і властивості відповідний приватних похідних, що використовуються при побудові диференціальних варіантів. Вивчалось питання відмінностей результатів обрахунку магнітуди градієнта, лапсасіану, детермінанту гессіану та кривизни кривої масштабування при обробці зображень, що згортались з масками низькочастотних фільтрів та масок операторів, що побудовані на основі різниць операторів згладжування.. Експериментально підтверджено, що згладжування цифрових зображень і зменшення їх лінійних розмірів дозволяє формалізувати процес відбору особливостей на підставі аналізу розподілів ймовірностей введених диференціальних інваріантів. Запропонований підхід може бути рекомендований при пошуку схожих об'єктів, які містять різні зображення. Розглянутий в роботі підхід має низьку обчислювальну складність, що дозволяє рекомендувати його для використання в системах з низькою швидкістю обчислень, зокрема, для систем функціонують на одноплатних комп'ютерах.

Ключові слова: модель зображення, B-сплайни, оператори диференціювання, диференціальні інваріанти розподілу, інваріантні значення.

Сравнительный анализ дифференциальных инвариантов на основе сплайн-моделей при различных искажениях изображений

Ф. А. Приставка, О. Г. Челышкина

Аннотация. В задачах поиска особенностей цифровых изображений актуальным есть определение таких решений, которые обеспечивают быстродействие при обработке. В статье проведены экспериментальные исследования применения дифференциальных инвариантов на основе частных производных модели изображения, как линейной комбинации B-сплайнов, близких к интерполяционных в среднем. Такая модель сохраняет свойства гауссовой модели в частотной области, однако имеет меньшую вычислительную сложность, что позволяет лучше исследовать асимптотические свойства и свойства соответствующий частных производных, используемых при построении дифференциальных вариантов. Изучался вопрос различий результатов расчета магнитуды градиента, лапсасиану, детерминанту гессиан и кривизны кривой масштабирования при обработке изображений, сворачивались с масками низкочастотных фильтров и масок операторов, построенные на основе различий операторов сглаживания. Экспериментально подтверждено, что сглаживание цифровых изображений и уменьшение их линейных размеров позволяет формализовать процесс отбора особенностей на основании анализа распределений вероятностей введенных дифференциальных инвариантов. Предложенный подход может быть рекомендованный при поиске похожих объектов, которые содержат различные изображения. Рассмотренный в работе подход имеет низкую вычислительную сложность, что позволяет рекомендовать его для использования в системах с низкой скоростью вычислений, в частности, для систем, функционирующих на одноплатных компьютерах.

Ключевые слова: модель изображения, B-сплайны, операторы дифференцирования, дифференциальные инварианты распределения, инвариантные значения.

УДК 004.728 : 519.87 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.4.11**

Є. В. Ручков[1, 2], В. С. Харченко[2], А. А. Коваленко[3], Є. В. Бабешко[2], А. І. Порошенко[3]

[1] ПАТ «Науково-виробниче підприємство «Радій», Кропивницький, Україна
[2] Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна
[3] Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ОЦІНЮВАННЯ БЕЗВІДМОВНОСТІ РЕЗЕРВОВАНИХ СТРУКТУР «2-з-3» і «1-з-2» З УРАХУВАННЯМ ЗАСОБІВ ОБРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ ТА КОМУНІКАЦІЙ

Анотація. Предметом досліджень статті є резервовані структури складних систем (РСС), зокрема, керуючих систем безпеки АЕС, енергомереж, аерокосмічних систем, інших комплексів критичного застосування (ККЗ). **Метою** є розроблення і дослідження моделей надійності (безвідмовності) таких РСС з урахуванням засобів оброблення інформації та комунікацій ККЗ. **Завдання:** 1) сформувати множину РСС, які базуються на мажоритарному резервуванні за принципом «2-з-3» і дублюванні за принципом «1-з-2» засобів оброблення інформації та комунікацій при послідовно-паралельних і місткових з'єднаннях елементів; 2) розробити структурні схеми надійності (ССН), математичні (аналітичні) моделі безвідмовності РСС з каскадним резервуванням «2-з-3» і «1-з-2»; 3) дослідити ці моделі і визначити залежності ймовірностей безвідмовної роботи різних РСС від часу, інтенсивностей відмов засобів оброблення інформації та комунікацій, мажоритарних елементів, елементів «1-з-2»; 4) сформулювати рекомендації щодо вибору типів РСС залежно від значень вхідних параметрів та вимог до систем. Для цього використовувались **методи** теорії множин, теорії ймовірностей, комбінаторного аналізу. Отримано такі **результати.** Запропоновано множину РСС з різними варіантами резервування і з'єднання ярусів «2-з-3», розроблено і досліджено відповідні ССН і математичні моделі безвідмовності та сформульовано рекомендації щодо їх використання залежно від вхідних параметрів. **Висновки.** Наукова новизна отриманих моделей полягає в наступному: вони надають аналітичну оцінку для РСС з різними варіантами каскадів «2-з-3» і «1-з-2 з урахуванням засобів оброблення інформації та комунікацій ККЗ.

Ключові слова: резервування; оцінювання; структура; безвідмовність; оброблення інформації; логіка; комунікації.

Вступ

Резервування застосовується сучасною промисловістю у багатьох сферах, включаючи генерацію електроенергії, машинобудування, аерокосмічну та хімічну галузі, переробку тощо. Оцінювання безвідмовності резервованих структур є комплексною задачею, вирішення якої неможливо без попередньої формалізації і представлення первинною моделлю. Найбільш поширеним типом моделей для оцінювання безвідмовності є структурні схеми надійності (ССН) (Reliability Block Model)

До теперішнього часу багатьма авторами описано можливі підходи і рішення стосовно мажоритарно-резервованих систем, дубльованих систем і різних типів логіки резервування, починаючи від класичних монографій [1] до сучасних праць [2, 3].

Більшість авторів не враховує безвідмовність засобів комунікацій, що може призвести до завищених оцінок показників надійності. Традиційно ці засоби припускаються абсолютно надійними, але для багатьох промислових систем таке припущення є достатньо оптимістичним з огляду на складність кабельних засобів комунікацій [4, 5], а також велику кількість додаткових з'єднань між конструктивами (шафами, окремими модулями, …), які розміщені у приміщеннях підприємства.

У роботах [6-8] досліджувався вплив безвідмовності засобів комунікацій на безвідмовність мажоритарно-резервованих систем, які працюють за логікою «2-з-3» та «2-з-4».

Однак в цих роботах різні варіанти резервування структур, які працюють за логікою «1-з-2» та «2-з-3», по-перше, не були систематизовані, а, по-друге, не були досліджені з урахуванням різних варіантів включення елементів голосування. В умовах практичного застосування резервовані структури іноді мають надлишковість і з точки зору засобів комунікацій, які можуть резервуватися у різний спосіб [9].

Метою статті є систематизація резервованих структур складних систем (РСС), і розроблення і дослідження РСС з логікою «2-з-3» та «1-з-2» з урахуванням засобів комунікацій.

Відповідно до мети стаття структурується наступним чином:

1) формується множина РСС, які базуються на мажоритарному резервуванні за принципом «2-з-3» і дублюванні за принципом «1-з-2» засобів оброблення інформації та комунікацій при послідовно-паралельних і місткових з'єднаннях елементів;

2) розробляються структурні схеми надійності (ССН), математичні (аналітичні) моделі безвідмовності РСС з каскадним резервуванням «2-з-3» і «1-з-2»;

3) досліджуються залежності ймовірностей безвідмовної роботи різних РСС від часу, інтенсивностей відмов засобів оброблення інформації та комунікацій, мажоритарних елементів, елементів «1-з-2»;

4) формулюються загальні рекомендації щодо вибору типів РСС залежно від значень вхідних параметрів та вимог до систем.

Систематизація та розроблення резервованих структур

В рамках сформульованих задач на першому етапі є огляд резервованих структур та їх систематизація. Розглянемо наступні варіанти, що наведено нижче.

На рис. 1 наведено найпростішу нерезервовану структуру (S_0), що враховує як процеси обробки даних (D), так і комунікації (C).

© Ручков Є. В., Харченко В. С., Коваленко А. А., Бабешко Є. В., Порошенко А. І., 2020

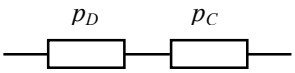


Рис. 1. Послідовна нерезервована структура

На рис. 2 наведено просту резервовану структуру (S_1), яка працює за логікою «2-з-3».

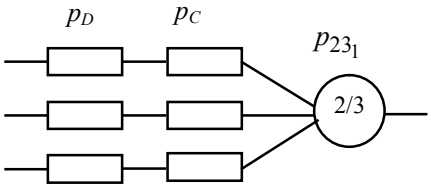


Рис. 2. Мажоритарно-резервована структура з загальним вузловим резервуванням за логікою «2-з-3»

Структуру, що реалізує мажоритарно-резервовану структуру з дубльованою логікою «2-з-3» (S_2), наведено на рис. 3.

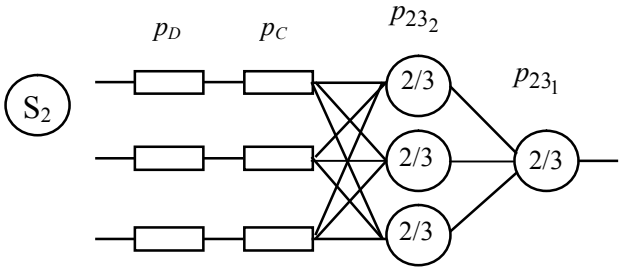


Рис. 3. Мажоритарно-резервована структура з загальним резервуванням і каскадною логікою «2-з-3» (мережним і вузловим)

На рис. 4 представлено структуру (S_3), яка являє собою окремий випадок попередньої структури та реалізує на виході логіку «1-з-2».

Рис. 6 відбиває структуру (S_5) з секційним розділенням та голосуванням за логікою «2-з-3».

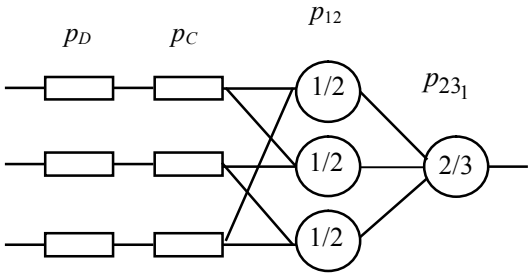


Рис. 4. Резервована структура з загальним резервуванням з каскадною логікою «1-з-2» і «2-з-3» (мережним і вузловим) мажоритарним резервуванням

На рис. 5 представлено структуру (S_4) з роздільним резервуванням за логікою «2-з-3».

Окремий випадок структури S_5 приведено на рис. 7. У такій структурі (S_6) також є окремі секції, але вони здійснюють роздільне голосування за логікою «1-з-2» та «2-з-3».

Наступна структура S_7 (рис. 8) являє собою нелінійний варіант, де зв'язки включено до мажоритарної структури.

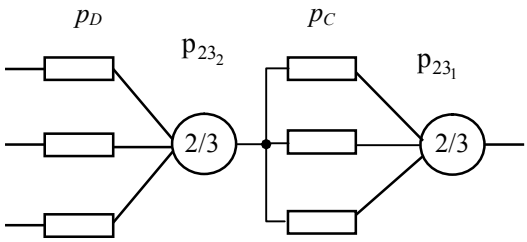


Рис. 5. Мажоритарно-резервована структура з роздільним вузловим резервуванням за логікою «2-з-3»

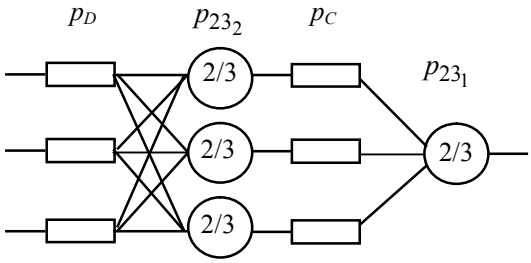


Рис. 6. Мажоритарно-резервована структура з роздільним мережним резервуванням за логікою «2-з-3»

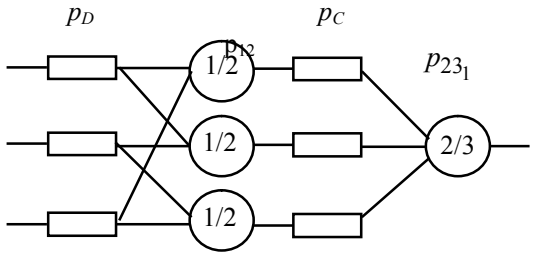


Рис. 7. Структура з роздільним голосування за логікою «1-з-2» та «2-з-3»

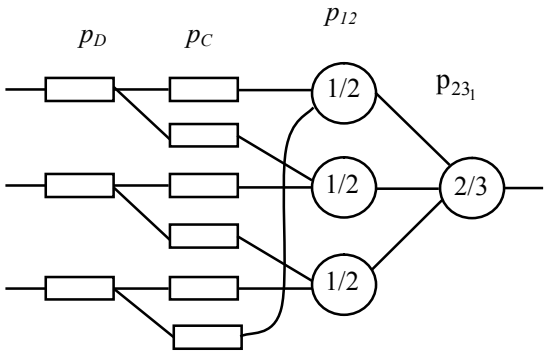


Рис. 8. Місткова структура з каскадним резервуванням «1-з-2», «2-з-3»

Останнім варіантом у рамках даного дослідження є структура S_8 (рис. 9), де реалізовано варіант подвійного (каскадного) голосування за логікою «2-з-3».

Моделі безвідмовності

У даному підрозділі наведено результати розробки аналітичних залежностей (1) – (8), що відповідають кожній з наведених у попередньому підрозділі структур (S_0- S_8).

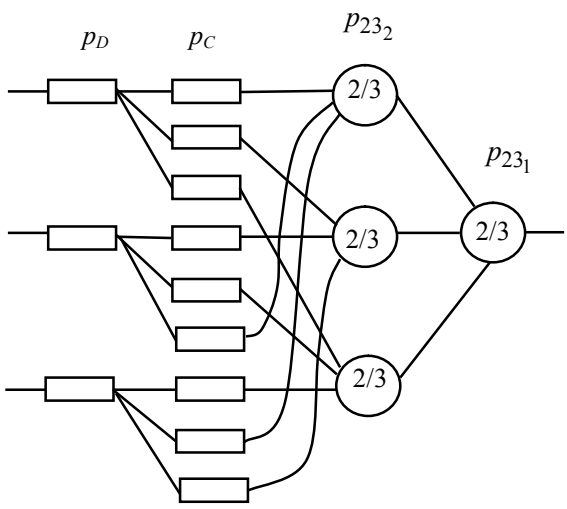


Рис. 9. Місткова структура з каскадним мережним і вузловим резервуванням «2-з-3»

$$P_{S_0} = p_D \cdot p_C \quad (1)$$

$$P_{S_1} = \left(3p_D^2 p_C^2 - 2p_D^3 p_C^3\right) p_{23_1} \quad (2)$$

$$P_{S_2} = \left(3p_D^2 p_C^2 - 2p_D^3 p_C^3\right) \cdot \left(3p_{23_2}^2 - 2p_{23_2}^3\right) p_{23_1}; \quad (3)$$

$$P_{S_3} = \left\{ \begin{array}{c} \left[1-(1-p_D p_C)^3\right] p_{12}^3 + 3p_{12}^2 \times \\ \times\left(1-p_{12}\right)\left(p_D p_C + p_D^2 p_C^2 - p_D^3 p_C^3\right) \end{array} \right\} p_{23_1}; \quad (4)$$

$$P_{S_4} = \left(3p_D^2 - 2p_D^3\right) p_{23_2} \cdot \left(3p_C^2 - 2p_C^3\right) p_{23_1} \quad (5)$$

$$P_{S_5} = \left(3p_D^2 - 2p_D^3\right) \cdot \left(3p_C^2 p_{23_2}^2 - 2p_C^3 p_{23_2}^3\right) p_{23_1} \quad (6)$$

$$P_{S_6} = \left\{ \begin{array}{c} \left[1-(1-p_D)^3\right] p_{12}^3 p_C^3 + 3p_{12}^2 p_C^2 \times \\ \times\left(p_D + p_D^2 - p_D^3\right) \cdot \left(1-p_{12} p_C\right) \end{array} \right\} p_{23_1} \quad (7)$$

$$P_{S_7} = p_{23_1} \times$$

$$\times \left[\begin{array}{c} \left\{ p_D^3 \sum_{i=0}^{4} C_6^{6-i} p_C^{6-i} (1-p_C)^i + 3p_D^2 (1-p_D) \left[\sum_{i=0}^{2} C_6^{6-i} p_C^{6-i} (1-p_C)^i + \sum_{i=3}^{4} C_4^{6-i} (1-p_C)^i \right] + 3p_D^2 (1-p_D)^2 p_C^2 \right\} \times \\ \times p_{12}^3 + 3p_{12}^2 (1-p_{12}) \times \left\{ p_D^3 \left[\sum_{i=3}^{2} C_6^{6-i} p_C^{6-i} (1-p_C)^i + \sum_{i=3}^{4} C_4^{6-i} p_C^{6-i} (1-p_C)^i \right] + 3p_D (1-p_D)^2 p_C^2 \right\} \end{array} \right]; \quad (8)$$

$$P_{S_8} = p_{23_1} \cdot \left[\begin{array}{c} p_{23_2}^3 \left\{ \begin{array}{c} p_D^3 \left[\sum_{i=0}^{3} C_9^{9-i} p_C^{9-i} (1-p_C)^i + 3C_3^2 C_3^2 C_3^1 p_C^5 (1-p_C)^4 + 3C_3^2 C_3^2 p_C^4 (1-p_C)^5 \right] + \\ +3p_D^2 (1-p_D) \cdot \left[\sum_{i=0}^{1} C_6^{6-i} p_C^{6-i} (1-p_C)^i + C_3^2 C_3^2 p_C^4 (1-p_C)^2 \right] + \end{array} \right\} \\ +3p_{23_2}^2 \left(1-p_{23_2}\right) \cdot \left\{ p_D^3 \left[p_C^2 + C_6^1 p_C^5 (1-p_C) + C_3^2 p_C^4 (1-p_C)^2 \right] + 3p_D^2 (1-p_D) p_C^4 \right\} \end{array} \right] \quad (9)$$

Дослідження

На першому етапи досліджень проводилося моделювання безвідмовності структур S_0-S_8, зокрема, досліджено залежності ймовірностей $Ps1$ - $Ps8$ як функцій ймовірностей p_D, p_C, p_{12}, p_{231}, p_{232}.

Відповідні вихідні дані та результати представлено у вигляді табл. 1. У табл. 2 наведено результати залежності ймовірності безвідмовності кожної зі структур S_0-S_8, що наведені на рис. 1-9, відповідно. Можна відмітити, що, в цілому, спостерігається збільшення такої ймовірності зі збільшенням відповідної ймовірності окремих компонент структури, та, водночас, з ускладненням (тобто переходом від початкового типу мажоритарно-резервованої структури з загальним вузловим резервуванням за логікою «2-з-3» до останнього типу – місткової структури з каскадним мережним і вузловим резервуванням «2-з-3») відповідних схем резервування у таких структурах. Такі результати моделювання цілком відповідають теоретичним очікуванням.

На другому етапі досліджень було виконано моделювання моделей безвідмовності структур S_0-S_8, у якості яких було обрано ймовірності $Ps1$ - $Ps8$ як функції часу, а також відповідні інтенсивності відмов λD, λC, λ_{12}, λ_{231}, λ_{232} (1/год), де $p_z = \exp(-\lambda_z t)$. Вихідні дані представлено у вигляді табл. 3.

Таблиця 1 – **Вихідні дані**

p_D	p_C	p_{12}	p_{231}	p_{232}
0.9	0.95	0.995	0.990	0.990
0.9	0.95	0.999	0.999	0.999
0.9	0.99	0.995	0.990	0.990
0.9	0.99	0.999	0.999	0.999
0.95	0.99	0.995	0.993	0.993
0.95	0.99	0.999	0.995	0.995
0.95	0.995	0.999	0.997	0.997
0.95	0.995	0.9995	0.999	0.999
0.99	0.995	0.9995	0.9993	0.9993
0.99	0.995	0.9999	0.9995	0.9995
0.99	0.999	0.9999	0.9997	0.9997
0.99	0.999	0.9995	0.9999	0.9999
0.995	0.999	0.9999	0.9995	0.9995
0.995	0.999	0.99995	0.9999	0.9999
0.995	0.9995	0.99995	0.9999	0.9999
0.995	0.9995	0.99999	0.99995	0.99995

Таблbwz 2 – ***Результати моделювання***

Ps0	***Ps*1**	***Ps*2**	***Ps*3**	***Ps*4**	***Ps*5**	***Ps6***	***Ps*7**	***Ps*8**
0,855000	0,933592	0,933314	0,98638	0,94575	0,952465	0,977826	0,985645	0,955787
0,855000	0,942079	0,942076	0,995844	0,963024	0,963723	0,988017	0,9949	0,96715
0,891000	0,957278	0,956992	0,988333	0,952373	0,961152	0,987578	0,98814	0,960719
0,891000	0,96598	0,965977	0,99764	0,969768	0,970679	0,997062	0,997404	0,970841
0,940500	0,982872	0,982728	0,992618	0,978608	0,984963	0,992012	0,992589	0,985024
0,940500	0,984852	0,984778	0,994768	0,982554	0,987131	0,994365	0,994715	0,987322
0,945250	0,988362	0,988335	0,996816	0,986729	0,989583	0,996684	0,996787	0,98962
0,945250	0,990344	0,990341	0,998827	0,990691	0,991651	0,998707	0,998796	0,991716
0,985050	0,998637	0,998635	0,999295	0,998228	0,998905	0,999206	0,999295	0,99899
0,985050	0,998837	0,998836	0,999496	0,998628	0,999112	0,999418	0,999496	0,999193
0,989010	0,99934	0,99934	0,999699	0,999099	0,999397	0,999695	0,999698	0,999401
0,989010	0,99954	0,99954	0,999898	0,999499	0,999598	0,999891	0,999897	0,999602
0,994005	0,999393	0,999392	0,9995	0,998923	0,999419	0,999496	0,9995	0,999422
0,994005	0,999793	0,999793	0,9999	0,999722	0,999822	0,999896	0,9999	0,999825
0,994503	0,99981	0,99981	0,9999	0,999725	0,999824	0,999899	0,9999	0,999825
0,994503	0,99986	0,99986	0,99995	0,999825	0,999874	0,999949	0,99995	0,999875

Таблbwz 3 – ***Вихідні дані для другого етапу моделювання***

λ_D	λ_C	λ_{12}	$\lambda_{231}=\lambda_{232}$	t
0.001	0.0005	0.00005	0.0001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.001	0.0005	0.00001	0.00005	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.001	0.0005	0.000001	0.00001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.001	0.00001	0.000001	0.000002	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.001	0.00001	0.0000005	0.000001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.001	0.00001	0.0000001	0.0000005	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0005	0.00001	0.000002	0.000005	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0005	0.00001	0.000001	0.000002	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0005	0.00001	0.0000001	0.000001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0005	0.00005	0.000005	0.00001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0005	0.00005	0.000001	0.000005	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0005	0.00005	0.0000001	0.000001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0001	0.00005	0.000005	0.00001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0001	0.00005	0.000001	0.000005	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0001	0.00005	0.0000001	0.000001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0001	0.00001	0.000005	0.00001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0001	0.00001	0.000001	0.000005	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.0001	0.00001	0.0000001	0.000001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.00001	0.000005	0.0000005	0.000001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.00001	0.000005	0.0000001	0.0000005	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.00001	0.000005	0.00000001	0.0000001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.00001	0.000001	0.0000002	0.00005	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.00001	0.000001	0.0000001	0.000005	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000
0.00001	0.000001	0.00000005	0.000001	0, 1, 100, 1000, 10000, 20000, 50000, 100000

Відповідні результати для першого та останнього наборів вихідних даних відповідно наведено на рис. 10 - 12.

Слід окремо зазначити, що результати для усіх інших наборів вхідних даних не приведено у рамках даної статті внаслідок їх прогнозованої зміни між наведеними значеннями.

Так, можна констатувати, що наведені часові залежності є цілком прогнозованими, виходячи з попереднього аналізу структурних схем надійності. підтверджують результати попереднього етапу досліджень.

Найбільшу безвідмовність мають структури S_3 S_7, S_6. Найменшу безвідмовність має структура S_2, середній рівень безвідмовності з невеликими відмінностями – структури S_1, S_4, S_5, S_8. Ці висновки зберігаються і рівень різниці між цими групами структур у безвідмовності зростає при зменшенні безвідмовності засобів оброблення інформації.

На підставі розрахунків можуть бути сформульовані рекомендації щодо вибору резервованих структур, а запропоновані аналітичні залежності використано для розрахунку показників безвідмовності і функційної безпеки.

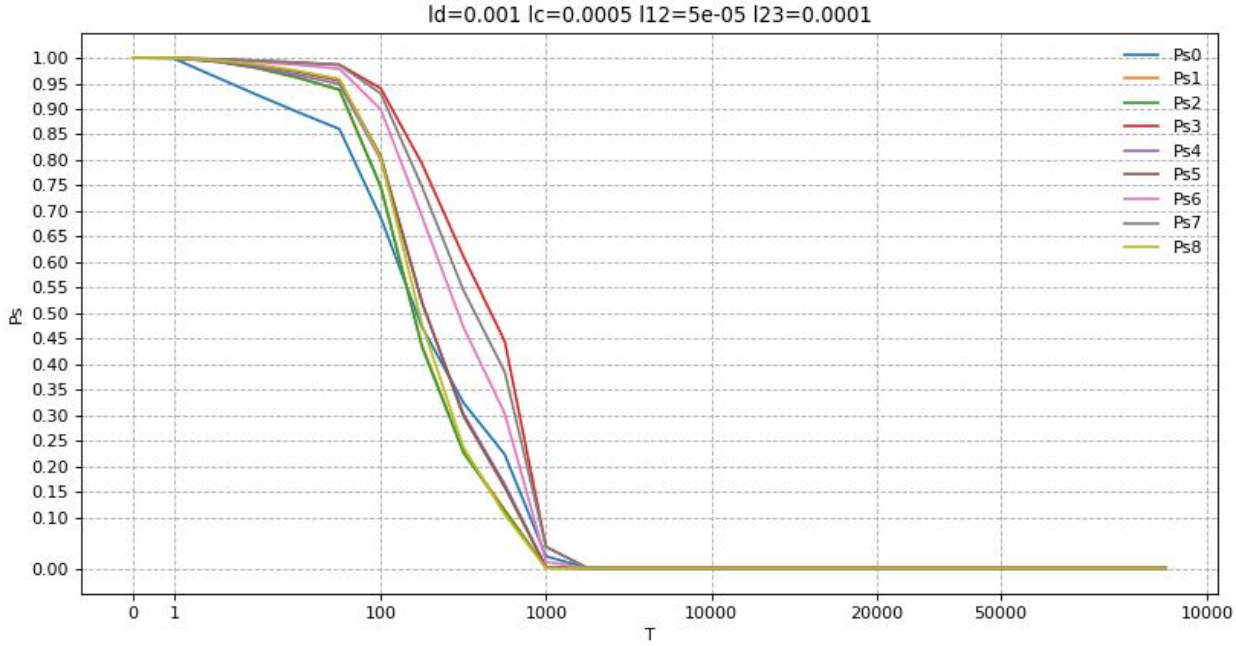


Рис. 10. Результати моделювання
першого набору вихідних даних (табл. 3)

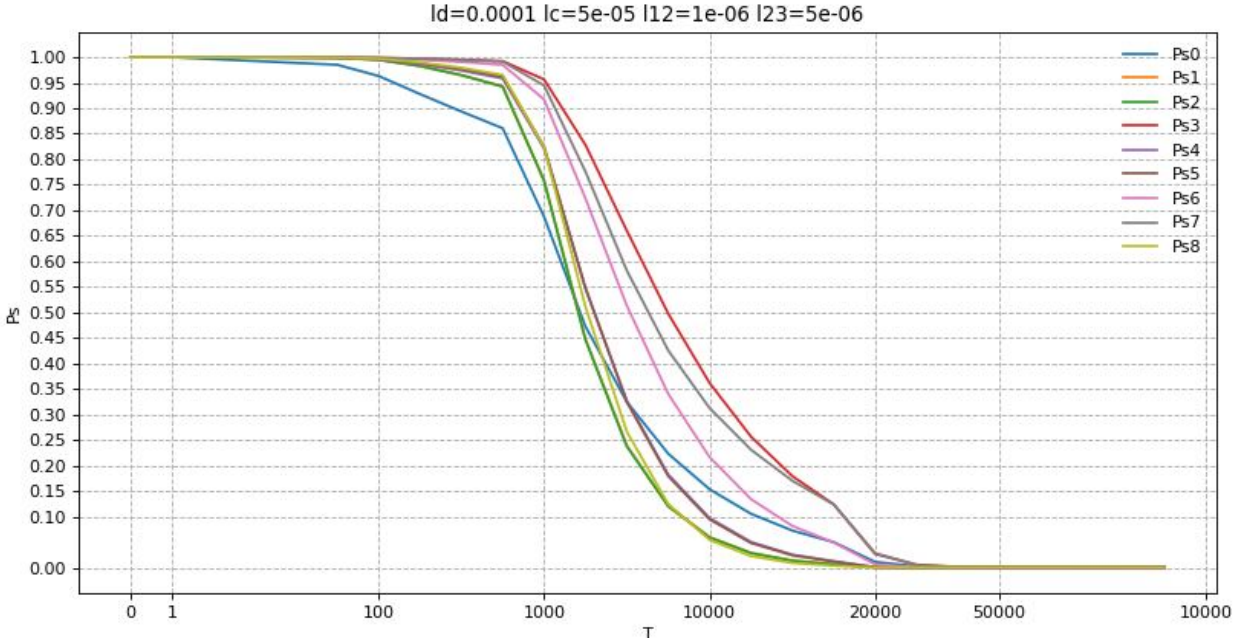


Рис. 11. Результати моделювання
сімнадцятого набору вихідних даних (табл. 3)

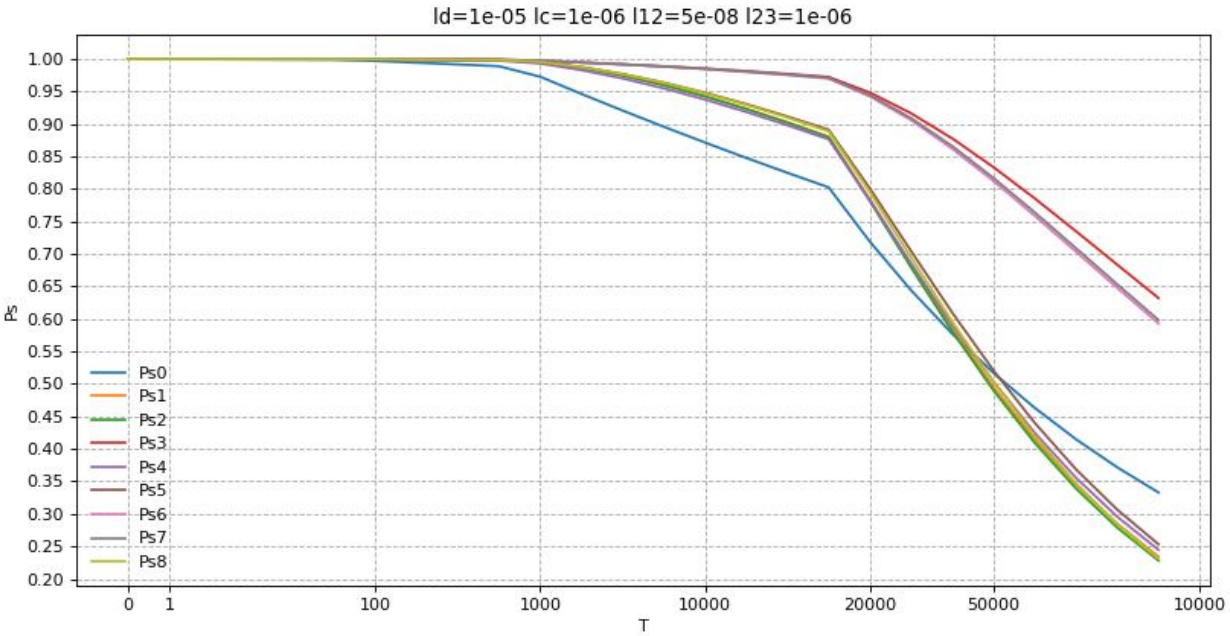


Рис. 12. Результати моделювання
останнього набору вихідних даних (табл. 3)

Висновки

В статті, по-перше, розроблено структурні схеми надійності для низки резервованих структур з різними варіантами каскадів «2-з-3» і «1-з-2» з урахуванням засобів оброблення інформації та комунікацій; по-друге, запропоновано аналітичні моделі безвідмовності (функційної безпечності у разі, якщо йдеться про системи аварійного захисту) для отримання оцінок ймовірності безвідмовної роботи для цих структур; по-третє, проведено дослідження аналітичних моделей для різних значень інтенсивностей відмов елементів і часу використання і сформульовано рекомендації щодо їх використання резервовані структури складних систем.

У подальшому доцільно розробити метод розрахунку надійності (безвідмовності) і функційної безпечності для багатоярусних інформаційно-комунікаційних систем з різними варіантами вузлового і мережного резервування «2-з-3» і «1-з-2», базуючись на одержаних у даній статті аналітичних моделях.

References

1. Polovko A.M. (1964), *Fundamentals of the theory of reliability*, Nauka, Moscow, 448 p.
2. Daniel P., Siewiorek and Robert S., Swarz (1998), *Reliable Computer Systems: Design and Evaluation*, Peters Ltd, 932 p.
3. Martin L., Shooman (2002), *Reliability of Computer Systems and Networks: Fault Tolerance, Analysis, and Design*, John Wiley & Sons, Inc., 546 p.
4. Osmo, Siirto, Jukka, Vepsäläinen, Aki, Hämäläinen and Mika, Loukkalahti (2017), "Improving reliability by focusing on the quality and condition of medium voltage cables and cable accessories", *24th International Conference on Electricity Distribution (CIRED)*, Glasgow, 12-15 June 2017, pp. 229-232.
5. Bruce, Broussard (2007), *Specifying Cable System Reliability*, Pure Power, June 2007, pp. 26-30.
6. Kharchenko, V.S., Lysenko, I.V., Sklyar, V.V. and Herasimenko O.D. (2005), "Safety and Reliability Assessment and Choice of the Redundant Structures of Control Safety Systems", *Proceedings of IEEE East-West Design & Test Workshop (EWDTW'05)*, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, pp. 212-218.
7. Babeshko, E., Kharchenko, V., Leontiiev, K., Ruchkov, E. and Sklyar V. (2018), "Reliability Assessment of Safety Critical System Considering Different Communication Architectures", *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies*, Kyiv, Ukraine, pp. 18-21.
8. Babeshko, E., Illiashenko, O., Kharchenko, V. and Ruchkov, E. (2020), "NPP Instrumentation and Control systems safety and reliability assessment considering different communication architectures", *Nuclear and Radiation Safety*, 2 (86), pp.38-43.
9. (2017), Threats to Undersea Cable Communications, available at: https://www.dni.gov/files/PE/Documents/1---2017-AEP-Threats-to-Undersea-Cable-Communications.pdf

Received (Надійшла) 12.08.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.10.2020

Відомості про авторів / About the authors

Ручков Євген Валентинович – начальник відділу супроводження КБ АСУ ТП, Науково-виробниче підприємство «Радій», Кропивницький, Україна.
Eugene Ruchkov – head of support department, Research and production corporation "Radiy", Kropyvnytskyi, Ukraine
e-mail: rev@radiy.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-4570-9844.

Харченко В'ячеслав Сергійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна;

Vyacheslav Kharchenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: v.kharchenko@csn.khai.edu; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-5352-077X

Коваленко Андрій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Andriy Kovalenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: andriy_kovalenko@yahoo.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-2817-9036.

Бабешко Євген Васильович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна;

Ievgen Babeshko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Computer Systems, Networks and Cyber Security Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: e.babeshko@csn.khai.edu; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-4667-2393.

Порошенко Антон Ігорович – студент, кафедра електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Anton Poroshenko – student, Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: anton.poroshenko@nure.ua; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7266-4269.

Оценивание безотказности резервированных структур «2 из 3» и «1 из 2» с учетом средств обработки информации и коммуникаций

Е. В. Ручков, В. С. Харченко, А. А. Коваленко, Е. В. Бабешко, А. И. Порошенко

Аннотация. Предметом исследований статьи являются резервированные структуры сложных систем (РСС), в частности, управляющих систем безопасности АЭС, энергосетей, аэрокосмических систем, других комплексов критического применения (ККП). **Целью** является разработка и исследование моделей надежности (безотказности) таких РСС с учетом средств обработки информации и коммуникаций ККП. **Задачи:** 1) сформировать множество РСС, основанных на мажоритарном резервировании по принципу «2-из-3» и дублировании по принципу «1-из-2» средств обработки информации и коммуникаций при последовательно-параллельных и мостиковых соединениях элементов; 2) разработать структурные схемы надежности (ССН), математические (аналитические) модели безотказности РСС с каскадным резервированием «2-из-3» и «1-из-2»; 3) исследовать эти модели и определить зависимости вероятностей безотказной работы различных РСС от времени, интенсивностей отказов средств обработки информации и коммуникаций, мажоритарных элементов, элементов «1-из-2»; 4) сформулировать рекомендации по выбору типов РСС в зависимости от значений входных параметров и требований к системам. Для этого использовались **методы** теории множеств, теории вероятностей, комбинаторного анализа. Получены следующие **результаты**. Предложено множество РСС с различными вариантами резервирования и соединения ярусов «2-из-3», разработаны и исследованы соответствующие ССН и математические модели безотказности и сформулированы рекомендации по их использованию в зависимости от входных параметров. **Выводы**. Научная новизна полученных моделей состоит в следующем: они предоставляют аналитическую оценку для РСС с различными вариантами каскадов «2-из-3» и «1-из-2 с учетом средств обработки информации и коммуникаций ККП.

Ключевые слова: резервирование; оценивание; структура; безотказность; обработка информации; логика; коммуникации.

Reliability assessment of "2oo3" and "1oo2" redundant structures taking into account the means of information processing and communications

Eugene Ruchkov, Vyacheslav Kharchenko, Andriy Kovalenko, Ievgen Babeshko, Anton Poroshenko

Abstract. The **subject matter** of the paper is the redundant structures of complex systems (RCS), in particular, safety control systems for nuclear power plants, power grids, aerospace systems, and other critical application complexes (CAP). The **goal** is to develop and study models of reliability (availability) of such RCS taking into account the means of information processing and communications of the CAP. The **tasks** to be solved are: 1) to form a set of RCS based on majority voting according to the "2oo3" principle and redundancy according to the "1oo2" principle of information and communication processing facilities with serial-parallel and bridge connections of elements; 2) to develop reliability block diagrams (RBD), mathematical (analytical) models of reliability of RCS with cascade redundancy "2oo3" and "1oo2"; 3) to study these models and determine the dependences of the probabilities of failure-free operation of various RCSs on time, the failure rates of information processing and communication facilities, voting elements, 1oo2 elements; 4) formulate recommendations for the selection of RCS types depending on the values of input parameters and requirements for systems. For this, the **methods** of set theory, probability theory, combinatorial analysis were used. The following **results** were obtained. A set of RCSs with various options for redundancy and connection of layers "2oo3" have been proposed. The corresponding RBDs and mathematical models of reliability have been developed and researched, and recommendations have been formulated for their use depending on the input parameters. **Conclusions**. The scientific novelty of the obtained models is as follows: they provide an analytical assessment for the RCS with various variants of the 2oo3 and 1oo2 cascades, taking into account the information processing and communication facilities of the CAP.

Keywords: reservation; assessment; structure; reliability; data processing; logics; communications.

UDC 681.326:681.51 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.4.12**

Yevhen Sydorenko[1], Helen Makogon[2], Oleksandr Isakov[2], Mykyta Korda[2], Mykhaylo Mosiychuk[2], Alexej Klimov[2]

[1] Central Armored Department of the Logistics Forces Armament Command of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[2] Military Institute of Tank Troops of National Technical University, Kharkiv, Ukraine

THE DYNAMIC ANALYSIS OF THE STATE DEFENSE FORCES GROUP LOGISTICS SUPPORT SYSTEM USING OF THE QUEUING MODEL

Abstract. **The subject matter of the article is** the logistics support for the state defense forces. The **goal** of the study is the finding out a logistics support model that allows to obtain quantitative estimates of the required number of weapons ensured a given level of combat readiness and support the serviceability of troops, as well as optimal management of procurement, repair and modernization of weapons over time. **The tasks** to be solved are: to present the process of logistics support of the state defense forces group using the queuing model; to compile a state graph of a sample of weapons and military equipment; to compose a equations system describing the average number of weapons and military equipment samples in different states during their operation in the troops; by solving the differential equations system to obtain the dependences of the main logistics support system's parameters in time. General scientific and special **methods** of scientific knowledge are used. The following **results** were obtained: The logistics support of the state defense forces group is presented as a queuing model, the parameters of which are determined by statistical data from the troops. Based on the obtained solution of the corresponding of differential equations system, an analysis of the logistics support system of the state defense forces group for a certain period of time can be made. The dynamic analysis of the logistics support system will form the basis of the recommendation for the implementation of promising guidelines of equipping state defense forces weapons and military equipment and optimizing the management of the system according to the certain criteria. **Conclusions.** A model of queuing is proposed to describe the logistics support process for the state defense forces group. In the model, the transitions of the sample of weapons from one state to another are carried out with intensities, μ or λ dependis on the influence of the external environment and management. Within the framework of the proposed model, a differential equations system is obtained describes the average numbers of weapons samples in different states during their operation in the army. The obtained differential system solution corresponding the model is a quantitative estimate of the required number of weapons needed to ensure a given level of combat readiness and serviceability of state defense forces troops, as well as optimal management of procurement, repair and modernization of weapons over certain time.

Keywords: logistics; queuing model; state graph of armaments and military equipment; quantitative estimates of logistics support system.

Introduction

Formulation of the problem and research tasks. Today, given Ukraine's path to European and Euro-Atlantic integration, NATO standards and procedures are being intensively implemented in all spheres of activity. The defense reform defining the ways of its implementation based on and principles guided by NATO member states. It was introduced the concept of "logistics" replaced the maintenance, deliveries and materials. The development of logistics forces and the entry of capabilities to ensure the actions of troops (forces) in conducting interspecies, interdepartmental joint operations is one of the priorities for the development of the state defense forces.

Thus, the system of logistical support of SOD at all levels (strategic, operational and tactical) is being developed with the development of regulatory documents, change of organizational and staffing structures and redistribution of powers and functions. In these conditions, such measures of logistics support of actions of troops (forces) in the performance of assigned tasks, such as supply of troops with the necessary nomenclature of weapons and military equipment (WME), maintenance of armaments in certain combat readiness and technical condition, ensuring the implementation of maintenance and repair (maintenance and repair), modernization, write-off and disposal of weapons. Depending on the completeness and quality of these measures, their level of combat readiness, combat capability and combat potential depends.

Therefore, an important scientific and applied task is to develop information and mathematical models for military-economic analysis and management of technical in particular, and logistics of troops in general.

In this regard, the authors consider it important to search for new methods for both analysis and optimization of the process of drug management, equipping armored weapons and acquisition of armored property of the SFD group [1-3].

Analysis of recent research and publications of recent research and publications on the above issues shows that a lot of effort is being put into the creation and development of logistics for both the SFD and the Armed Forces of Ukraine, in particular, including the experience of NATO member countries.

The authors worked out the ideology of logistics management of SFD supply, proposed logistics SFD models of different structure. Studies of the flow nature of the process of WME acceptance, storage, repair, maintenance and write-off (disposal) give an abstract idea of WME during the preparation and conduct of SFD operations. However, the mechanism of obtaining quantitative assessments of the compliance of SFD armored weapons with modern requirements in the interests of forming prospects for the development and equipping of troops (forces) with them has been fully studied [4-7].

© Sydorenko Ye., Makogon H., Isakov O., Korda M., Mosiychuk M., Klimov A., 2020

The **goal** of the study is the is the development a model of equipping SFD armored weapons and armored equipment of a group of troops allows to obtain quantitative estimates of the required number of weapons to ensure a given level of combat readiness and combat potential, as well as costs necessary for optimal procurement management, repair and repair. for a certain period of time.

This **goal** defined the following research tasks:

– to present the process of logistics support (LS) of the SFD group using the queuing model;

– make a graph of states of the sample of weapons;

– to make a system of equations that describes the average number of weapons samples are in different states during their operation in the army;

– by solving a system of differential equations to obtain the dependences of the basic parameters of the vehicle system over time.

General scientific and special **methods** of scientific knowledge are used.

Main material

1. A queuing model and graph of states of WME samples of SFD group

Let's consider a group of SFD troops includes weapons of various kinds, in number, each. A certain number is needed to solve a certain amount of tasks for the purpose. Let's assume each WME sample can be in one of the incompatible states.

For the TS system under consideration, we accept:

S_0 - serviceable (operational) a sample is in storage mode (ready for use);

S_1 - faulty (inoperable), a sample needs repair of a certain type;

S_2 - serviceable (operational), a sample is in combat readiness;

S_3 - defective, a sample requires write-off and further disposal;

S_4 - serviceable (operational) condition, a sample requires modernization.

Accordingly, in each *j-th* state can be found n_{ij}, $j = \overline{0,m}$ samples of *i-th* type weapons (armored vehicles automobile equipment). With what

$$\sum_{i=1}^{n} n_{ij} = N_j,\ i = \overline{0,n},\ j = \overline{0,m}, \qquad (1)$$

We assume that a serviceable condition is a condition of a sample of weapons and ammunition characterized by the presence of a stock of technical resources and the finding of all technical parameters within the established limits.

The working condition differs from the working condition in that some parameters of the sample of weapons that do not affect its operation may not meet the established limits.

The most important factor determining the serviceability (serviceability) of a WME sample is the technical resource reserve. In case of a technical resource expenditure, a WME sample is considered defective and its operation should be terminated.

After that, the sample is subject to technical inspection and further, or overhaul (O) to restore the technical resource, or write-off and disposal.

Repair of weapons and military equipment, has a reserve of technical resources, is carried out in military repair units. Major repairs associated with the restoration of technical resources are carried out at industrial enterprises.

WME disposal of weapons and military equipment is usually carried out in special units (bases) or at industrial enterprises.

Modifications of WME samples for the purpose of their modernization aimed at increasing their combat capabilities (reliability, operational adaptability, combat effectiveness) are carried out both in the troops and at repair enterprises of the defense industry. At the same time WME samples are excluded from the list of military units.

To re-equip the troops with new equipment, new WME types are being supplied to industry. The transfer of weapons and military equipment from one state to another is carried out under the action of certain management.

A queuing model is proposed to describe the TS process of the SOD group [8].

According to the theory of queuing transitions of the sample of weapons from one state to another are carried out with intensities, μ or λ, depends on the influence of the external environment and control influences from the control system.

Fig. 1 shows a graph of possible states of the WME sample.

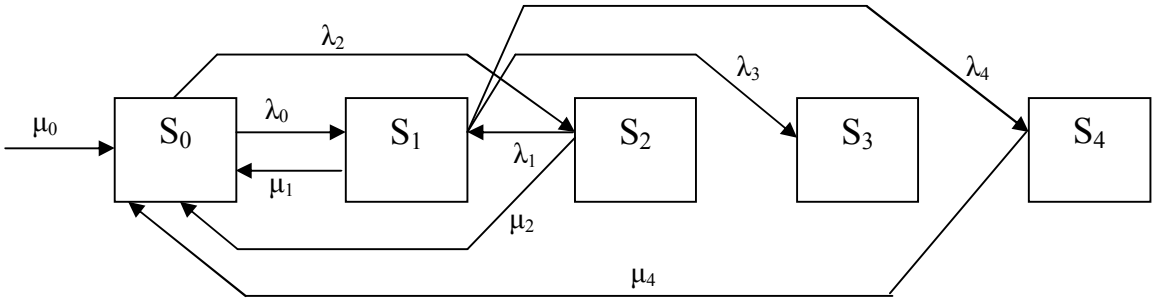


Fig. 1. Graph of possible states of the WME sample

As it is seen from Fig. 1, an WME sample can be in one of five states. We define the corresponding intensities of the transition from state to state of change as follows: μ_0 the intensity of the arrival of new WME samples; λ_0

□ the WME samples failure rate in storage; λ_1 □ the WME samples failure rate in a state of combat readiness; μ_1 □ the WME samples restoration intensity by means of repair; λ_2 □ the intensity of WME samples transferring to a combat readiness state; μ_2 □ the intensity of WME samples transferring to a state of constant readiness; λ_3 □ the intensity of WME samples leaving for disposal; λ_4 □ the WME samples departure rate for modernization; μ_4 □ the WME samples receipt of modernized rate. These model parameters can be determined from statistical data from the combat operations.

2. The logistics support process dynamic analysis of the state defense forces group for a certain time. According to the state graph (Fig. 1) for a certain *i-th* type, the average number of weapons in each *j-th* state can be determined by a system of differential equations

$$\frac{dn_0^i(t)}{dt} = -(\lambda_1^i + \lambda_2^i + \lambda_4^i)n_0^i(t) + \mu_1^i n_1^i(t) + \\ +\mu_2^i n_2^i(t) + \mu_4^i n_4^i(t) + \mu_0^i(t); \quad n_0^i(0) = N_0^i; \tag{2}$$

$$\frac{dn_1^i(t)}{dt} = -(\mu_1^i + \lambda_3^i)n_1^i(t) + \lambda_1^i n_0^i(t) + \mu_1^i n_2^i(t); ; \\ n_1^i(0) = N_1^i; \tag{3}$$

$$\frac{dn_2^i(t)}{dt} = -(\mu_1^i + \lambda_3^i)n_1^i(t) + \lambda_1^i n_0^i(t) + \mu_1^i n_2^i(t); ; \\ n_2^i(0) = N_2^i; \tag{4}$$

$$\frac{dn_3^i(t)}{dt} = \lambda_3^i n_1^i; \quad n_3^i(0) = N_3^i; ; \tag{5}$$

$$\frac{dn_4^i(t)}{dt} = -\mu_4^i n_4^i(t) + \lambda_4^i n_1^i(t); \quad n_4^i(0) = N_4^i; \tag{6}$$

$$n_0^i(t) + n_1^i(t) + n_2^i(t) + n_3^i(t) + n_4^i(t) = N^i(t); \tag{7}$$

here $i = \overline{1,n}$, $t \in [0,T]$, T □ certain time.

The solution of the differential equations system (2) □ (7) will be the time dependences of the i-*th* type WME samples average numbers in each state $n_j^i(t)$, $i = \overline{1,n}$, $j = \overline{0,m}$. Based on this solution, a dynamic analysis of the logistics support system of the SFD group can be made for a certain period of time T by types (for example, for automotive equipment, armored vehicles, etc.) weapons:

$$N^i(t) = n_0^i(t) + n_1^i(t) + n_2^i(t) + n_3^i(t) + n_4^i(t) = \sum_{j=0}^{m} n_j^i, \tag{8}$$

here $N^i(t)$ $i = \overline{1,n}$ □ current number of the *i-th* type WME samples in the group SFD ; T - a certain time.

Similarly, the average number of the *j-th* state ($j = \overline{0,m}$) WME samples can be calculated.

$$N_j(t) = n_j^1(t) + \ldots + n_j^i(t) + \ldots + n_j^m(t) = \sum_{i=1}^{n} n_j^i. \tag{9}$$

For example, $N_j(t)$ determines the current number of serviceable (able-bodied) WME samples are in combat readiness mode.

The ratios between the different $N_j(t)$, $j = \overline{0,m}$ will allow to assess the indicators of combat readiness and combat potential of the SFD group. Thus, the coefficient of serviceability of weapons can be calculated by expression

$$K_c = \left(N_0(t) + N_2(t)\right)/N(t), \tag{10}$$

where $N(t)$ □ the total current number of the WME samples in the SFD group.

$$N(t) = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=0}^{m} n_j^i. \tag{11}$$

By analogy, the coefficient of the SFD group combat readiness can be determined:

$$K_{CR} = \frac{N_2(t)}{N_0(t) + N_2(t)}. \tag{12}$$

3. Study of the process of maintenance by types of weapons and military equipment to ensure compliance with the requirements of the combat readiness and combat potential of the SFD group. The specifics of performing of assigned tasks for the SFD group purpose allows us to consider it expedient to study the process of maintenance by WME types (for example, armored weapons and military equipment) with a fixed *i*. An example of solving the system of differential equations (2) - (7) in the environment of computer algebra Mathcad [9] is shown in Fig. 2.

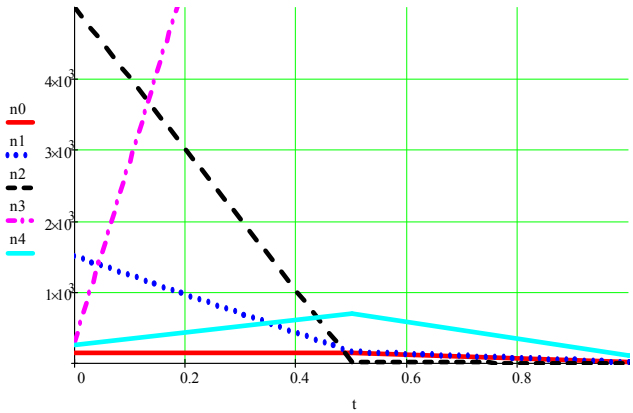


Fig. 2. Dynamics of weapons average numbers of a certain type by state during a certain time

The obtained calculated data of the average number of weapons and military equipment weapons in each *j-th* state, allow a dynamic analysis of the vehicle system in the period of 1.5 years. Similarly, data were obtained on the change of the serviceability coefficient K_s and the combat readiness coefficient K_{cr} of a certain type of weapons over time (Fig. 3).

The obtained data should be used to ensure compliance with the requirements of combat readiness and combat capability of the SFD group. Based on the analysis of changes in quantitative estimates of the number of weapons in each of the possible states, it is possible to form appropriate management decisions on the LS for the procurement, repair and modernization of AMWE staff samples during a certain period.

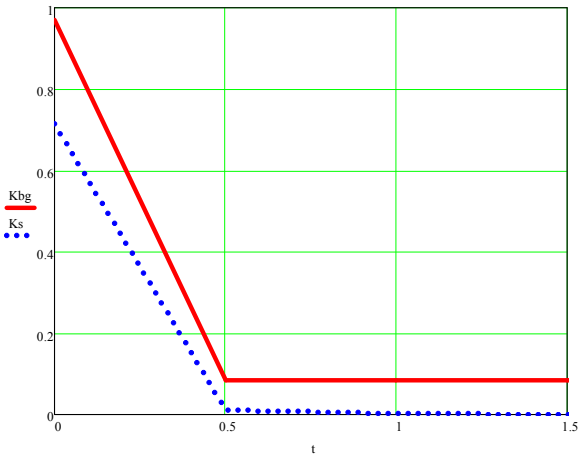


Fig. 3. Changes in the coefficient of serviceability K_s and the coefficient of combat readiness K_{cr} weapons of a certain type over time

Thus, with a constant intensity of the conversion of weapons into combat readiness and the combat readiness factor of the SFD group will decrease.

To maintain a constant level of combat readiness, the intensity of λ_2 must vary according to a certain law.

Adjustments of the intensity of λ_2 as well as other parameters of the drug system will form the basis of the recommendation on the implementation of promising areas of SFD equipping SOD with AWME and optimizing the management of the drug system by a certain criterion as a whole.

Conclusions

A model of queuing is proposed to describe the logistics support process for the state defense forces group. In the model, the transitions of the sample of weapons from one state to another are carried out with intensities, μ or λ depends on the influence of the external environment and management. Within the framework of the proposed model, a differential equations system is obtained describes the average numbers of weapons samples in different states during their operation in the army. The obtained differential system solution corresponding the model is a quantitative estimate of the required number of weapons needed to ensure a given level of combat readiness and serviceability of state defense forces troops, as well as for optimal management of procurement, repair and modernization of weapons over certain time.

References

1. Romanenko, Y.O. (2016), "Reforming the Armed Forces of Ukraine according to NATO standards", *Publichne uryaduvannya*, vol. №3 (4), pp. 142-150, available at: https://cyberleninka.ru/article/n/reformirovanie-vooruzhennyh-sil-ukrainy-po-standartam-nato.
2. Simchi-Levi, D., Chen, X., and Bramel, J. (2004), *The Logic of Logistics: Theory, Algorithms, and Applications for Logistics and Supply Chain Management*, New York: Springer, USA.
3. Gallasch, G. E. (2008), "Modelling Defence Logistics Networks", *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, vol. 10, no. 1, pp.75-93.
4. Buravlev, A.I. and Pyankov, A.A. (2010), "Troops technical support model", *Elektronnyy nauchnyy zhurnal "Vooruzheniye i ekonomika",* vol. 1(10), pp.4-10.
5. Buravlev, A.I. and Pyankov, A.A (2011), "Troops technical support management model", *Elektronnyy nauchnyy zhurnal "Vooruzheniye i ekonomika"*, vol. №4(6), pp.29-34.
6. Biletov, V.I. (2010), "The problem of building a unified system of logistical support of military formations of Ukraine", *Trudy Nat. University of Defense of Ukraine,* vol. 4(91), pp.81-89.
7. Sysoev, V.V (2015), "The concept of modeling the logistics management of the supply of forces of the security and defense sector of the state", *Problems of the economy*, vol.3, pp.342-251, available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pekon_2015_3_47.
8. Taha, Hamdy A. (2005), *Operations Research An Introduction*, Pearson Education, Inc., New Jersey 07458, 910 p.
9. Brent Maxfield, B (2006), *Engineering with Mathcad*, Jordan Hill, Oxford, 494 p.

Received (Надійшла) 31.08.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.11.2020

Відомості про авторів / About the authors

Сидоренко Євген Анатолійович – Заступник начальника Центрального бронетанкового управління Озброєння Командування Сил логістики Збройних Сил України, Київ, Україна;
Yevhen Sydorenko – Deputy Chief of the Central Armored Armament Department of the Logistics Forces Command of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine;
e-mail: sidorenkoe49@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6190-5151.

Макогон Олена Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна;
Helen Makogon – Candidate of Technical Sciences**,** Associate Professor of the Armored vehicles and military equipment Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "KhPI", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: helmkg@ukr.net; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1112-8707.

Ісаков Олександр Володимирович – старший викладач кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна;
Oleksandr Isakov – Senior Lecture of the Armored vehicles and military equipment Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: alexalex999@ukr.net; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0801-790X.

Корда Микита Володимирович – курсант за профілем кафедри бронетанкового, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна;

Mykyta Korda – cadet of the Armored weapons and military equipment Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: kordanikita1@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0630-4948.

Мосійчук Михайло Володимирович – заступник начальника факультету озброєння та військової техніки з навчальної та наукової роботи, Військовий інститут танкових військ НТУ "ХПІ", Харків, Україна;
Mykhaylo Mosiychuk Deputy Head of the Armaments and Military Equipment Faculty for educational and scientific work, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: miso0904_01@ukr.net; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5682-2842.

Клімов Олексій Петрович – заступник начальника кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна;
Alexej Klimov – Deputy Head the Armored weapons and military equipment Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: klimovaleksej800@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0727-2976.

Динамічний аналіз системи логістичного забезпечення угруповання сил оборони держави з використанням моделі масового обслуговування

Є. А. Сидоренко, О. А. Макогон, О. В. Ісаков, М. В. Корда, М. В. Мосійчук, О. П. Клімов

Анотація. Предметом вивчення в статті є логістичне забезпечення сил оборони держави. **Метою дослідження** є розробка моделі логістичного забезпечення, що дозволяє отримувати кількісні оцінки потрібної чисельності ОВТ для забезпечення заданого рівня боєготовності і підтримки справності військ, а також для здійснення оптимального управління закупівлями, ремонтом і модернізацією ОВТ протягом визначеного періоду часу. **Завдання дослідження:** представити процес логістичного забезпечення угруповання сил оборони держави з використанням моделі масового обслуговування; скласти граф станів зразка ОВТ; скласти систему рівнянь, що описує середні чисельності зразків ОВТ; шляхом вирішення системи диференціальних рівнянь отримати залежності основних параметрів системи логістичного забезпечення у часі. Методологічною основою дослідження стали загальнонаукові та спеціальні **методи** наукового пізнання. **Отримані такі результати**. Процес логістичного забезпечення угруповання сил оборони держави представлений як модель масового обслуговування, параметри якої визначаються за статистичними даними з військ. На підставі отриманого розв'язання відповідної системи диференційних рівнянь може бути зроблений аналіз системи логістичного забезпечення угруповання сил оборони держави за визначений період часу. Динамічний аналіз системи логістичного забезпечення складатиме основу рекомендації щодо реалізації перспективних напрямків оснащення сил оборони держави озброєння та військовою технікою. **Висновки.** Для опису процесу логістичного забезпечення угруповання сил оборони держави пропонується модель масового обслуговування. В моделі переходи зразка ОВТ з одного стану в інший здійснюються з інтенсивностями, μ або λ, які залежать від впливу зовнішнього середовища і керуючих впливів з боку системи управління. Розв'язання відповідної моделі ї системи диференційних рівнянь являє собою кількісні оцінок потрібної чисельності ОВТ, необхідної для забезпечення заданого рівня боєготовності і справності ОВТ угрупування сил оборони держави, а також для здійснення оптимального управління закупівлями, ремонтом і модернізацією ОВТ протягом визначеного періоду часу.

Ключові слова: логістичне забезпечення; модель масового обслуговування; граф станів зразка озброєння та військової техніки; кількісні оцінки системи логістичного забезпечення.

Динамический анализ системы логистического обеспечения группировки сил обороны государства с использованием модели массового обслуживания

Е. А. Сидоренко, Е. А. Макогон, А. В. Исаков, Н. В. Корда, М. В. Мосийчук, А. П. Климов

Аннотация. Предметом изучения в статье является логистическое обеспечение сил обороны государства **Целью исследования** является разработка модели логистического обеспечения, позволяющей получать количественные оценки нужной численности ВВТ для обеспечения заданного уровня боеготовности и поддержания исправности войск, а также необходимые для осуществления оптимального управления закупками, ремонтом и модернизацией ВВТ в течение определенного периода времени. **Задачи исследования:** представить процесс логистического обеспечения группировки сил обороны государства с использованием модели массового обслуживания; составить граф состояний образца ВВТ; составить систему уравнений, описывающую средние численности образцов ВВТ; путем решения системы дифференциальных уравнений получить зависимости основных параметров системы логистического обеспечения во времени. Методологической основой исследования стали общенаучные и специальные **методы** научного познания. **Получены следующие результаты**. Процесс логистического обеспечения группировки сил обороны государства представлен как модель массового обслуживания, параметры которой определяются по статистическим данным из войск. На основании полученного решения соответствующей системы дифференциальных уравнений может быть сделан анализ системы логистического обеспечения группировки сил обороны государства за определенный период времени. Динамический анализ системы логистического обеспечения будет составлять основу рекомендации по реализации перспективных направлений оснащение сил обороны государства вооружения и военной техникой и оптимизации управление системой по определенному критерию. **Выводы.** Для описания процесса логистического обеспечения группировки сил обороны государства предлагается модель массового обслуживания. В модели переходы образца ВВТ из одного состояния в другое осуществляется с интенсивностями, μ или λ, которые зависят от влияния внешней среды и управляющих воздействий со стороны системы управления. Решение соответствующей модели й системы дифференциальных полученные представляет собой количественные оценки нужной численности ВВТ, необходимой для обеспечения заданного уровня боеготовности и исправности ВВТ группировки сил обороны государства, а также для осуществления оптимального управления закупками, ремонтом и модернизацией ВВТ в течение определенного периода времени.

Ключевые слова: логистическое обеспечение; модель массового обслуживания; граф состояний образца вооружения и военной техники; количественные оценки системы логистического обеспечения.

UDC 004.932.2:004.93'1 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.4.13**

Olena Yakovleva[1], Kateryna Nikolaieva[2]

[1] Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine
[2] SYTOSS Ltd, Kharkiv, Ukraine

RESEARCH OF DESCRIPTOR BASED IMAGE NORMALIZATION AND COMPARATIVE ANALYSIS OF SURF, SIFT, BRISK, ORB, KAZE, AKAZE DESCRIPTORS

Abstract. The subject of research is image normalization based on key points analysis. The purpose is development of mathematical models and their software implementation for normalization of image geometric transformations based on the analysis of SIFT, SURF, ORB, BRISK, KAZE, AKAZE descriptors; the model application for comparative analysis of descriptors based on expert assessments of normalization quality, time costs and other indicators; construction and usage in experiments the own dataset with 100 real image pairs which contains scenes of five types: buildings, plane images outside, plane images inside, natural and artificial textures; making conclusions about the performance of the considered descriptors to solve the normalization problem. Such methods are applied: SIFT, SURF, ORB, BRISK, KAZE, AKAZE descriptors for describing key points, the Nearest Neighbor Distance Ratio method or symmetric method for search of corresponding pairs of key points from different images, the RANSAC method for rejecting false correspondences and obtaining a homography matrix, similarity measures, software modeling. The results obtained: experimental normalization results by SIFT, SURF, ORB, BRISK, KAZE, AKAZE descriptors for 100 real pairs of own dataset (normalized images, their overlaps, quantitative descriptor evaluation, precision and recall estimation, time costs estimation, expert quality assessment, conversion of all indicator values to an 8-point rating scale); summary diagrams and conclusions about advantages and weaknesses of the compared descriptors; recommendations about the most-suitable-algorithm selection for solving normalization problem in specific cases.

Keywords: normalization of geometric transformation; detector; descriptor; SURF; SIFT; BRISK; ORB; KAZE; AKAZE; RANSAC method; method of k-nearest neighbors; Nearest Neighbor Distance Ratio method; OpenCV library.

Introduction

Review of the current state of solving computer vision problems. Today, computer vision is experiencing a period of significant progress in problem solving, on which researchers have been working for decades. Meaningful advances have been made in detection, segmentation, classification of objects, image search by pattern, image generation, and other tasks.

For many years, most approaches of image analysis have been based on transition from an image to a feature space, which contains basic information about the whole image or its characteristics, and has a denser representation than the image. After the transition, such features are compared with the appropriate method, and then a decision is made according to the problem which is being solved. In addition to being informative and having reduced dimension, the obtained feature should be as insensitive as possible, i.e., invariant to image geometric transformations, changes in lighting, noise, local occlusion, for example, when objects are partially overlapped, or an object part extends beyond an image.

There isn't any universal way to describe images with a feature set. The choice of feature space and their processing method depends on a specific problem. The weakness of the classical feature approaches is the need for complex configuration, where it is necessary to set various parameters on the basis of heuristic information. Values of such parameters affect the final result significantly [1, 2].

In recent years, neural networks have provided a significant breakthrough in computer vision. In 2012, the AlexNet neural network took part in the annual ImageNet competition and showed the best results in solving the object classification problem with a number of errors 15.3% against 26.2% of the runner-up [3]. Then, in 2019, the classification quality with neural networks equaled human capabilities. The combination of achievements of classical analytical feature approach with a neural network one has a great perspective.

But even now, there are a lot of tasks where the classical feature approach is necessary. Such tasks, as cartography, stitching of panoramic images etc., depend on solving the problem of normalization (compensation) of present geometric transformations.

Normalization problem and approaches to solve it. In the work, the normalization means the process of compensation of geometric transformations that distinguish one image from another. This matter has been investigated for a long time. The fundamental work [2] about normalization proposes two main approaches: tracking and parametric and also considers some methods for each of these approaches.

The tracking approach implies the gradual compensation of geometric transformations with many steps. The processed image is compared with the pattern at each step, and then it undergoes a tiny geometric transformation that compensates only a part of the whole geometric transformation, bringing the processed image closer to the pattern. As a result of all steps, the processed image will become a pattern, and parameters of a general geometric transformation will be defined. This approach is applied to tracking and targeting tasks.

The parametric approach is aimed to determine parameters of an entire geometric transformation at once. Then the found transformation is compensated, and the processed image turns into the pattern. This approach is used more widely.

© Yakovleva O., Nikolaieva K., 2020

In [2], for both approaches, it is offered to put an integrated method of construction of functionals which are based on the moments of a different order, but only cases with simple geometrical transformations are considered. Also, for all integrated methods, a significant problem is the background that can be partially or completely changed. In [4,5], to solve the problem of normalization in the conditions of complex geometric transformations and local occlusions, it is proposed to use the method of one-dimensional normalizations and decomposition of complex groups of transformations into compositions of simple ones. However, such methods solve the problem only partially. This article is devoted to analyzing the normalization on the basis of the descriptors of image key points.

Construction of image features based on descriptors. In the classical approach, a solution of a big amount of tasks is based on the key points definition and description of their neighborhoods by a feature vector with further processing of obtained vectors. So, there is a transition from an image to a space of key points feature vectors.

An algorithm that gets key points is a detector, and an algorithm that gets a description of the found points is called a descriptor. Also, a descriptor means a feature vector of a key point.

Over a long period of existence of computer vision tasks, a significant number of algorithms have been developed to detect and describe key points, which differ in varying degrees of invariance to geometric transformations, changes in lighting, angles of view, and time costs values. The implementation of most of these algorithms can be seen in popular software libraries. For instance, the open library OpenCV contains SURF, SIFT, ORB, BRISK, KAZE, AKAZE, LATCH, VGG, LUCID, DAISY, FREAK and other descriptors.

Statement of the research task. This work is dedicated to:

– research of the parametric normalization approach, where key points and their descriptors are used to find out the normalization parameters;

– comparing the quality and time costs of the normalization process based on different descriptors. For comparison were selected the full-cycle descriptors, such as SURF128, SURF64, SIFT, BRISK, ORB, ORB1000, KAZE, AKAZE.

In this work, it was necessary:

– to consider each step of normalization in detail;

– to develop a mathematical and software model for further experiments on the photo image pairs normalization with the different descriptors;

– to create the own dataset for experiments;

– to draw conclusions in the comparative aspect about the quality and time costs of normalization basing on the considered descriptors.

Main material of the research

1. Normalization of geometrical transformations based on the descriptors. The normalization method based on descriptors uses the basic property of projective transformation

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix}$$

about the possibility of obtaining parameters from coordinates of 4 points before and after the transformation [6, 7]:

$$\begin{cases} h_{13} = x_{Ar}; \\ h_{31} = \dfrac{d_1(y_{Cr} - y_{Br}) - d_2(x_{Cr} - x_{Br})}{AB(d_3 - d_4)}; \\ h_{11} = \dfrac{x_{Dr}(h_{31}AB + 1) - h_{13}}{AB}; \\ h_{21} = \dfrac{y_{Dr}(h_{31}AB + 1) - h_{23}}{AB}; \\ h_{23} = y_{Ar}; \\ h_{32} = \dfrac{d_1(y_{Cr} - y_{Dr}) - d_2(x_{Cr} - x_{Dr})}{AD(d_4 - d_3)}; \\ h_{12} = \dfrac{x_{Br}(h_{31}AD + 1) - h_{13}}{AD}; \\ h_{22} = \dfrac{y_{Br}(h_{32}AD + 1) - h_{23}}{AD}; \end{cases}$$

where $h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{21}, h_{22}, h_{23}, h_{31}, h_{32}, h_{33}$ – parameters of projective transformation; $A(x_A, y_A)$, $B(x_B, y_B)$, $C(x_C, y_C)$, $D(x_D, y_D)$ and $A'(x_{A'}, y_{A'})$, $B'(x_{B'}, y_{B'})$, $C'(x_{C'}, y_{C'})$, $D'(x_{D'}, y_{D'})$ – 4 points before and after the transformation on B_1 and B_2 images respectively, AB, AD – segment lengths and

$$d_1 = x_{D'} - x_{C'} + x_{B'} - h_{13},$$
$$d_2 = y_{D'} - y_{C'} + y_{B'} - h_{23},$$
$$d_3 = (x_{C'} - x_{D'})(y_{C'} - y_{B'}),$$
$$d_4 = (y_{C'} - y_{D'})(x_{C'} - x_{B'}).$$

But in practice, the corresponding points on B_1 and B_2 images are unknown. Descriptors that detect and describe the key points can be used to solve the problem of establishing the corresponding points. Key points will be found with some inaccuracy because detectors and descriptors are sensitive to significant geometric and lighting transformations. The search of corresponding points that is defined based on the descriptor similarity will also make false pairs.

Therefore, in practice, it is desirable to use more than 4 pairs of found corresponding points to determine the geometric transformation parameters more accurately.

The normalization algorithm used in the work consists of the following steps:

1) key points search and their description with feature vectors, i.e., the descriptors, for B_1 and B_2 images;

2) definition of the correspondence between the key points on B_1 and B_2 images;

3) determination of geometric transformation parameters, which distinguishes B_2 image from B_1 image;

4) B_2 image normalization to B_1 image (direct normalization), or B_1 image normalization to B_2 image (inverse normalization).

Further, let's consider each step in detail.

Step1. To define key points and their description, the work considers full-cycle algorithms (detector-descriptor algorithms), which perform both key points detection and description. Based on the multi-source analysis, the detector-descriptor algorithms SURF128, SURF64, SIFT, BRISK, ORB, ORB (1000), KAZE, AKAZE were chosen as the most perspective and interesting for normalization. Table 1 shows the brief information about these algorithms. The principles of constructing descriptors according to these algorithms can be found at the links [8–13].

However, a large number of existing algorithms and the lack or inconsistency of information about their comparison, recommendations for their use in different conditions make it difficult to understand strengths and weaknesses of certain descriptors and to choose the best for solving own task. Thus, there is a need for further descriptor research in the comparative aspect and obtainment of sound recommendations for their usage.

Table 1 – **Brief information about the considered full-cycle descriptors (detector-descriptor algorithms)**

Name of full cycle descriptors, year, source, type of license	Detector: type; Descriptor: type, size
SIFT (Scale Invariant Feature Trans-form), 2004, [8], non-commercial use	detector: blob; descriptor:numeric, 128
SURF (Speeded Up Robust Features) 2008, [9], non-commercial use	detector: blob; descriptor: numeric, 128 or 64
ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF)/ORB1000/ 2011, [10], free use	detector: corner; descriptor: binary,32
BRISK (Binary Robust Invariant Scalable Keypoints) 2011, [11], free use	detector: corner; descriptor: binary,64
KAZE 2012, [12], free use	detector: blob; descriptor:numeric,128
A-KAZE (Accelerated –KAZE) 2013, [13], free use	detector: blob; descriptor: binary, 61

Mentioned below, the term "descriptor" is employed addressing detector-descriptor algorithms, excluding some cases where it is necessary to discuss the detector part of the full algorithm. The term "descriptor" is also used when it refers directly to a key point feature vector that was received as the result of applying the algorithm.

So, one of the detector-descriptor algorithms constructs the sets

$$D_1 = \{(M_1(x,y), d_1)\} \text{ and } D_2 = \{(M_2(p,q), d_2)\}$$

for images B_1 and B_2 respectively, where $M_1(x,y)$ – a key point, d_1 – a descriptor (vector with features c_{1_v}) for B_1 image; $M_2(p,q)$ – a key point, d_2 – a descriptor (vector with features c_{2_v}) for B_2 image; $v = 1 \ldots V$, V – the dimension of the feature vector, which is determined by the certain descriptor method.

Step 2. To establish the matches between key points, one should compare their descriptor vectors. As the result of matching the set of corresponding pairs

$$T = \{(M_{1i}(x,y), M_{2j}(p,q))\}, (|T| \le min(|D_1|, |D_2|)$$

is formed. To search for corresponding pairs, the Nearest Neighbor Distance Ratio (NNDR) method (modification of k-nearest neighbors, k=2) was used, and the symmetric method was covered in order to analyze some estimates of normalization.

The NNDR method consists of finding for each point $M_{1i}(x,y)$ and its descriptor d_{1i} on the image B_1 two most similar descriptors d_{2k} and d_{2t} on the image B_2. To measure the similarity of numerical descriptors was applied Manhattan distance (L1 norm)

$$\rho(d_{1i}, d_{2j}) = \sum_{v=1}^{V} \left| c_{1i_v} - c_{2j_v} \right|,$$

which becomes Hamming distance for binary descriptors.

The point M_{2k} with the descriptor d_{2k} of B_2 image was considered the match the point M_{1i} with the descriptor d_{1i} of B_1 image, if the inequality

$$\frac{\rho(d_{1i}, d_{2k})}{\rho(d_{1i}, d_{2t})} < \sigma,$$

is satisfied, where $\rho(d_{1i}, d_{2k}) < \rho(d_{1i}, d_{2t})$; σ – threshold (σ was equal to 0.75 in the experiments), and a pair of points (M_{1i}, M_{2j}) was put into the set T.

After processing all key points of B_1 image, the same actions were performed for B_2 image key points which weren't determined as the corresponding pair for the image B_1.

The found corresponding pairs for B_2 image were added to the set T.

In this approach, the result set T depends on the image which is processed first. Namely, if at first B_2 image key points are treated and at second B_1 image key points are done, the set T will be different.

In practice, the symmetric approach for finding corresponding pairs has also been researched, where the set T consists only of such pairs of points (M_{1i}, M_{2j}) for which the similarity measure is the least

$$\rho(d_{1i}, d_{2j}) =$$
$$= \min_{a=1,\ldots,|D_2|} \rho(d_{1i}, d_{2a}) = \min_{b=1,\ldots,|D_1|} \rho(d_{1b}, d_{2j}).$$

The symmetrical approach does not depend on the order of B_1, B_2 image processing.

The results of the research have shown that the use of the NNDR method or the symmetric approach at the step of matching gives a similar accuracy of the final normalization, but the symmetric method has higher time costs, almost twice (Fig. 9). The reason for this is the fact that the symmetric approach finds much more matches, but among the found matches, the false match (outlier) share is significantly larger than in the NNDR method (Fig. 1,2). This is also critical in the conditions of a small number of obtained key points. So, the main attention was paid to the NNDR method, and the symmetric method was considered only in some cases.

Fig. 1. The corresponding pairs of key points were obtained with the NNDR method based on the SIFT descriptor (96 matches)

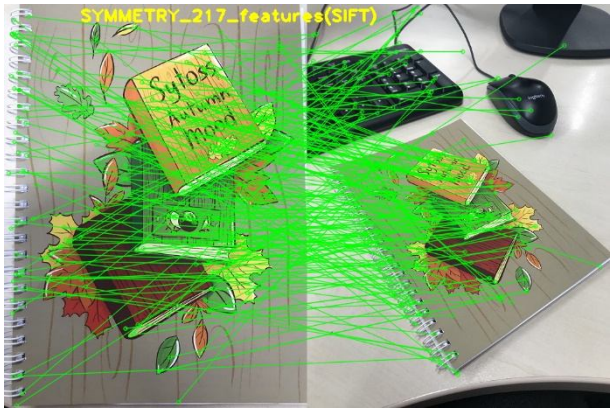


Fig. 2. The corresponding pairs of key points were got with the symmetric method based on the SIFT descriptor (217 matches)

Step 3. If there is a set T of corresponding pairs of points, the geometric transformation parameters can be got on the basis of the least squares method. But the set T, besides correct matches (inliers), may contain false correspondences (outliers), that is confirmed by practical results (Fig. 1,2).

Such outliers would significantly affect a geometric transformation model made with the least squares method, and this model would not be suitable for normalization.

Therefore, the RANSAC method was applied in this work. It is designed to look for the best homography matrix without taking outliers into consideration. To be more precise, the accelerated implementation of this method supported by the OpenCV library, which was proposed in [14], was used.

Thereby, the applied in this paper algorithm for search of the geometrical transformation model consists of two stages:

Stage I. Search for the best initial model without considering outliers with the RANSAC method using a geometric test. The RANSAC input is supplied with the set T of corresponding pairs of points for B_1 and B_2 images (constructed with the NNDR or the symmetric method); the number of iterations N; the threshold δ for estimation of match error (discarding outliers).

Repeat N times (in this work $N = 2000$), on each k-th iteration:

a) select randomly 4 corresponding pairs of points (M_{1i}, M_{2j}) from the set T.

b) check the selected subset for compliance with the geometric test [14]. For this, every 3 pairs of points from the subset formed in a) (every 3 pairs from 4 selected ones) are examined for the coincidence of the traversal sequence on B_1 and B_2 respectively.

The time for implementation of the entire RANSAC algorithm can be significantly reduced with the help of b), because if the points selected in a) do not fit, then c), d), e) are omitted, and we return to a); otherwise we move to c).

c) calculate the homography matrix H_k for the selected 4 corresponding pairs of points.

d) define quality U_k of the model H_k, namely, how accurately the matrix H_k transforms all corresponding pairs of points from the set T. Model quality U_k is calculated as the number of cases for which the match error e is less than the threshold δ

$$e\left(M'_{1i}, M_{2j}\right) < \delta, \qquad (1)$$

where $M'_{1i} = H_k M_{1i}$ – a reflection of point M_{1i} of the image B_1 obtained with the homography H_k; $\left(M_{1i}, M_{2j}\right) \in T$ – the corresponding pair; δ – threshold (equal 3 in the experiments); $e(,)$ – the match error. For example, the error can be computed as Euclidean distance between a key point on the image B_2 and reflection of the corresponding key point on the image B_1 or as the total error of direct transformation H_k (direct error) and inverse one H_k^{-1} (transfer error). Pairs of points corresponding, for which (1) is true, are considered to be correct matches (inliers), others – false matches (outliers).

e) find the model H_k that has the best quality U_k $(U_k \geq U_{max})$, store it as $H^* = H_k$ and construct the set T^* by removing from the set T outliers.

At the end of the cycle, we obtain the best model H^* and the inlier set T^*.

Stage II. Refinement of the initial model for the inlier set T^* with the method of least squares. In this

stage, it is determined the homography matrix H^{best}, for which the sum of deviations between the key points from the set T^* on the image B_2 and the reflection of the matching key points on the image B_1 is minimum:

$$\sum_{|T^*|}\left[\left(x_{2_j}-\frac{h_{11}x_{1_i}+h_{12}y_{1_i}+h_{13}}{h_{31}x_{1_i}+h_{32}y_{1_i}+h_{33}}\right)^2+\right.$$

$$\left.+\left(y_{2_j}-\frac{h_{21}x_{1_i}+h_{22}y_{1_i}+h_{23}}{h_{31}x_{1_i}+h_{32}y_{1_i}+h_{33}}\right)^2\right],$$

where $h_{11},h_{12},h_{13},h_{21},h_{22},h_{23},h_{31},h_{32},h_{33}$ – parameters of the model H^{best}, x_{1_i},y_{1_i} – the coordinate of point $M_{1_i}\in B_1$, x_{2_j},y_{2_j} – the coordinate of point $M_{2_j}\in B_2$, $\left(M_{1i},M_{2j}\right)\in T^*$.

Step 4. The direct normalization is based on the transformation of B_1 with the matrix H^{best}. The result of normalization is the normalized image B_1^H. Relatively, the inverse normalization is the transformation of B_2 with the inverse matrix $\left(H^{best}\right)^{-1}$.

2. Software implementation of the normalization method based on SIFT, SURF128, SURF64, BRISK, ORB, ORB (1000), KAZE, AKAZE descriptors. All experiments were performed using Java language and OpenCV library. OpenCV methods, shown in Table 2, were used to obtain descriptors.

Table 2 – **OpenCV methods for obtaining descriptors**

Algorithm name	Element type of vector	OpenCV object
SIFT	CV_32F	SIFT sift = SIFT.create();
SURF(128D)	CV_32F	SURF surf128 = SURF.create(); surf128.setExtended(true);
SURF (64D)	CV_32F	SURF surf64 = SURF.create(); surf128.setExtended(false);
ORB	CV_8U	ORB orb = ORB.create(); orb.setMaxFeatures(100000);
ORB (1000)	CV_8U	ORB orb1000 = ORB.create(); orb1000.setMaxFeatures(1000);
KAZE	CV_32F	KAZE kaze = KAZE.create(); kaze.setNOctaveLayers(3); kaze.setExtended(true);
AKAZE	CV_8U	AKAZE akaze = AKAZE.create(); akaze.setNOctaveLayers(3);
BRISK	CV_8U	BRISK brisk = BRISK.create();

OpenCV class BFMatcher(int normType, bool crossCheck) was used to find matches, where crossCheck = false – for the k-nearest neighbor method, true – for the symmetric approach; normType = NORM_L1 (Manhattan distance) – for numeric descriptors, NORM_HAMMING (Hamming distance) – for binary ones. BFMatcher class has the bfMatcher.knnMatch() method for implementing k-nearest neighbors and the bfMatcher.match() method for the symmetric approach. The input parameters are descriptor sets of the images B_1 and B_2 and KNN_MATCH_COUNT – parameter k, k=2 (for the k-nearest neighbors). After using the k-nearest neighbor method, filterMatchesByNNDR() method should be performed for implementing the NNDR method. At the output, we get matches – the set of corresponding point pairs.

The geometric transformation parameters were searched using findHomography() function, which implements both stages considered in the paragraph 1 (initial model search, outlier rejection and model refinement for inliers). The input findHomography() parameters are as follows:

– the coordinate set of the corresponding points of images B_1 and B_2 (obtained by executing bfMatcher.knnMatch( ) or bfMatcher.match( ));

– the method for finding homography (this parameter was equal CV RANSAC () for the application of the RANSAC method in the work);

– the threshold for checking inequality (1) which was equal 3;

– an empty set to mark the outliers and inliers by 0 and 1, respectively.

The output is a homography matrix and the completed set of outliers and inliers.

3. Dataset description for research of descriptor-based normalization. The SYTOSS_NURE_pngPairs100 dataset was created to research the normalization approach based on the analysis of key points. It has 100 pairs of self-made photos with a Sony Alpha a6000 camera, converted to PNG format (lossless compression) and reduced to a size of 600×400 or 400×600 pixels (Fig. 3). The original raw images in ARW format can be found here [15]. The dataset consists of 5 sets of image pairs, and every set contains scenes of the certain type (20 images in each set): Building – buildings, city; Picture_outside – plane images outside (graffiti, posters and other plane images found at the streets); Picture_inside – plane images inside (for example, interior images, pictures, books); Texture_artificial – artificial textures; Texture_nature – natural textures. In each pair, the images differ by geometric transformations of variable complexity (displacement, scale, rotation, change of viewpoint).

The purpose of experiments with the SYTOSS_NURE_pngPairs100 dataset is to analyze in the comparative aspect the normalization results based on SIFT, SURF, ORB, BRISK, KAZE, AKAZE descriptors for image pairs containing scenes of different types taken with the same equipment, PNG format (without compression); also, to make a general conclusion about the most suitable descriptors, using the normalization of a large number of real image pairs.

To test the descriptor-based normalization in the most complex lighting transformation, we used the small set Day_Night_pngPairs3, which consists of 3 image pairs with the SYTOSS_NURE_pngPairs100 dataset properties (equipment, size, format, geomantic transformation), but in each pair, one image is shot at day and the other at night (Fig.4).

Fig. 3. Image pairs examples for each set from the SYTOSS_NURE_pngPairs100 dataset: a – Building; b – Picture_outside; c – Picture_ inside; d – Texture_artificial; e – Texture_nature

Fig. 4. Image pair example from the Day_Night_pngPairs3

4. The purpose and content of experiments. The purpose of the research is to identify the most appropriate descriptors for solving the normalization problem. To achieve this goal, a comparative evaluation of quantitative indicators for SIFT, SURF128, SURF64, BRISK, ORB, ORB (1000), KAZE, AKAZE descriptors was performed at each step of normalization (key points search, matches, outlier rejection and obtaining normalization parameters), and what was even more important, it was compared the normalization quality and time costs in general.

To estimate the normalization results based on the considered descriptors, the indicators shown below were calculated for each pair.

4.1. Quantitative evaluation of descriptors, precision and recall estimation (with taking found overlap):

NP – a number of found key points; NP1, NP2 – a number of found key points for image1 and image2, respectively, NPO1, NPO2 – a number of found key points on the overlap for image1 and image2, respectively;

NM – a number of found matches, i.e., a number of obtained corresponding pairs of key points (NM=NI+NO); NMO – a number of matches located on the overlap;

NI – a number of inliers found with the RANSAC method, NO – a number of outliers discarded with the RANSAC method;

Precision = NI/ NM – the accuracy of finding correct matches. Precision ratio defines a part of inliers to all found matches, including outliers. This illustrates the ability of the algorithm to identify points correctly and provide the most similar description for corresponding points and vice versa dissimilar description for inappropriate points.

The conclusion depends on the method used to find the corresponding pairs.

RecallO1 = NI/ NPO1 – the completeness of inlier retrieval relative to the number of all key points on the overlap for the pattern (image1). RecallO1 ratio illustrates the usefulness of the found key points for normalization. It is also directly related to time costs because it gives the possibility to estimate how much time was wasted on detecting, describing and comparing points, which were then discarded and did not participate in the construction of the normalization model.

4.2. Estimation of time costs:

DesT – the descriptor construction time (time to detect and describe key points on an image), DesT1, DesT2 – the construction time of descriptors for image1 and image2, respectively;

MatchT - the retrieval time of matches for an image pair;

InlierT – the inlier retrieval time found with the RANSAC method for an image pair;

avgDesT – the average time for one descriptor construction;

avgMatchT – the average time for one match retrieval;

avgInlierT – the average time for one inlier retrieval with the RANSAC method;

TotalNormT – total normalization time for an image pair.

4.3. Expert quality assessment. In this work, the expert rate was used for the assessment of normalization quality. The expert rate (ER) is the expert quality assessment of normalization accuracy with a 5-point scale: “0” – normalization failed, “1” – insufficient, “2” – satisfactory, “3” – good, “4” – excellent.

Seven independent experts participated in the 5-point scale assessment of the normalization quality of each image pair for every descriptor. The experts assessed normalization quality as the overlap accuracy of normalized and original pair images. Experts had to evaluate the normalization accuracy in a comparative aspect (relatively to the results obtained by other descriptors for the same pair). If the expert believed that the normalization quality got by different descriptors for a certain pair is comparable, one put the same rate to these descriptors. In the case, when all descriptors coped equally, the expert gave the same rate to all descriptors.

The median of the expert rates of 7 experts was taken as the final assessment quality of the experiment.

The expert rate is a relative indicator given to the normalization results respectively to other descriptors. Thus, it allows ranking the descriptors from worst to best in one experiment (for a certain pair).

Value “-1” was assigned if the normalization could not be performed due to the lack of a sufficient number of matches to determine the homography matrix.

In this research, expert assessments were used to estimate the normalization quality because only a human can assess the quality of the normalized and original image overlap most accurately. However, this approach is time-consuming and subjective. In the future, it is planned to conduct a research to define some quantitative rates of normalization quality, which are calculated after normalizing automatically and correlate with the expert assessment maximally.

4.4. Averaging the values of indicators and the rates. The above-mentioned rates and indicators were calculated for 100 real image pairs from the SYTOSS_NURE_pngPairs100 dataset. Then for each of 5 sets (Building, Picture_outside, Picture_inside, Texture_artificial, Texture_nature), as well as for the whole dataset, the mean values were computed:

– mean values of absolute indicators NP, NM, NI;

– mean values of relative indicators Precision, RecallO1;

– mean values of time costs indicators DesT; MatchT; InlierT; AvgDesT; AvgMatchT; AvgInlierT; TotalNormT;

– the quantity of the same values of the expert rate ER for each value (“0”, “1”, “2”, “3”, “4”), as well as the amount of cases where the normalization did not occur due to the lack of inliers (values “-1”);

– mean values of expert rates ER for each descriptor (arithmetic mean MeanER and median).

4.5. Converting all indicator values from 4.4 to an 8-point rating scale. To summarize and compare the descriptors for different indicators easier, all assessment values were converted to an 8-point scale (point 8 is the highest mark). One of the values from 1 to 8, depending on which interval it got into, was assigned to each value of the indicator. The interval was calculated using the following formula:

$$(\min + i^* \text{ step}; \min + (i+1)^*\text{step}]$$

where step = (max - min) / 8, max, min – maximum and minimum values of indicator respectively, i = 0,…,7. If a larger value was considered the best for an indicator, then the highest score 8 was assigned to the values from the last interval (min + 7 * step, max]. Vice versa, if a lower value was regarded as the best, then the highest score 8 was assigned to the values from the first interval [min, min + step].

5. Normalization research results based on the descriptors SIFT, SURF128, SURF64, BRISK, ORB, ORB(1000), KAZE, AKAZE. The limited volume of this paper makes it possible to present only generalized results for the whole dataset. The details of normalization results for each pair, as well as, many summary tables and diagrams for each of the sets and the entire dataset, can be found here [15]. The normalization research results averaged for the whole dataset are shown in paragraph 5.1–5.4. The main received regularities for each type of scenes are illustrated in 5.5.

5.1. Comparison of descriptors by the mean number of key points, matches (with the NNDR method) and inliers. The experiments showed that a significant excess of the mean NP is characteristic for the ORB algorithm (from 2.6 times for the BRISK algorithm to 11 ones for the AKAZE algorithm) (Fig. 5). Sorting out the mean values of NP, one can see that, according to the number of found points, the algorithms are placed in the following order (from larger NP to smaller one): ORB >> BRISK >> SURF64, SURF128, SIFT >> ORB1000 > KAZE, AKAZE.

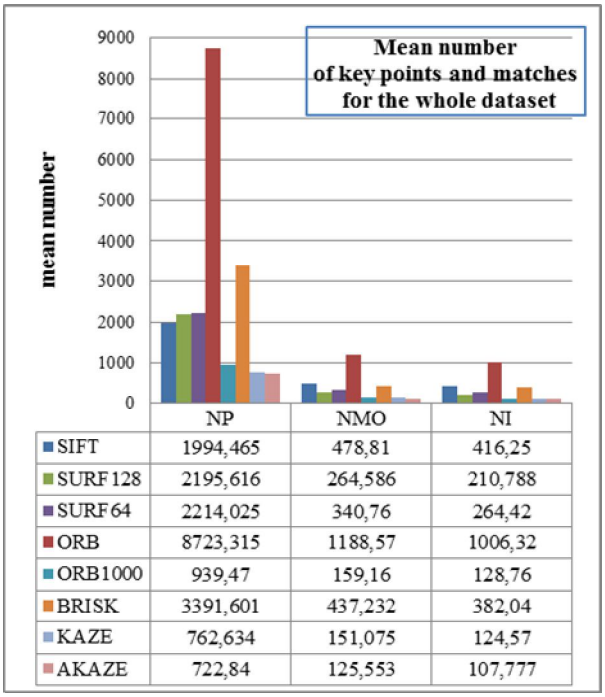


Fig. 5. Mean number of key points and matches found at the first three stages of normalization for SYTOSS_NURE_pngPairs100, i.e., the mean of such rates: a number of found key points (NP); a number of matches found with the NNDR method and located on the overlap (NMO); a number of inliers found with the RANSAC method (NI)

The largest and least mean values of NMO, NI are the same as for NP: the largest is for the descriptor ORB, the least – for ORB1000, KAZE, AKAZE that can be seen in Fig.5. This figure also shows the numerical values of mean NP, NMO, NI. Changes of NMO, NI values for different descriptors have the same regularity. Descriptors can be arranged by NI (from larger to smaller) as follows: ORB >> SIFT > BRISK > > SURF64 > SURF128 > ORB1000, KAZE > AKAZE, where the SIFT algorithm is seen moved from 5th position (by found NP) to 2nd position, overtaking BRISK, SURF64, SURF128, i.e., it has the higher percentage of key points which will be used for normalization.

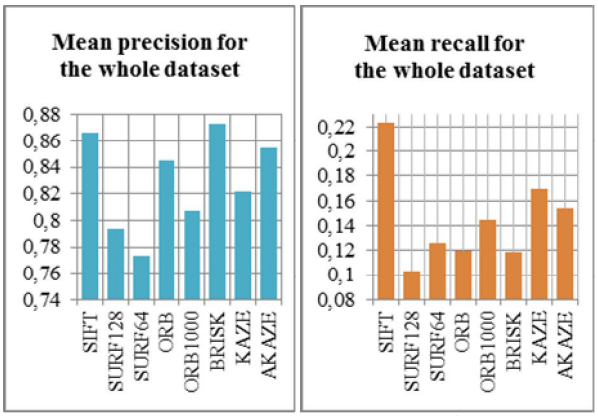
The descriptor evaluation by NP, NMO, NI was carried out under the assumption that the greater the number of NP, NMO, NI, the more accurately constructed the normalization model and, therefore, the higher the normalization quality, however, too much quantity of such ones requires a lot of time that will be presented below.

5.2. Descriptor comparison by Precision and Recall ratios. The descriptor evaluation by Precision and Recall was performed supposing that:

– the higher value of Precision, the more alike description of really similar objects (points) we get with this algorithm and the more unlike description for dissimilar ones. In addition, with high Precision, there is less unnecessary work when it takes time to find matches, some of which are outliers and will be rejected with the RANSAC algorithm;

– the higher RecallO1, the less time wasting for getting key points at the first step. RecallO1 shows the percentage of key points found at the 1st step, which will be used to define a homography matrix at the 3rd step, i.e., allows estimating a share of found points actually used for normalization.

The results of Precision and RecallO1 research for the whole dataset are presented in Fig. 6.



a b

Fig. 6. Mean precision and recall for the whole dataset SYTOSS_NURE_pngPairs100: a – mean precision (Precision); b – mean recall (RecallO1)

The mean values of Precision for all descriptors vary in the range from 0.77 to 0.87, i.e., at the average for the different descriptors, the RANSAC method rejects from 23 to 13 percent of NO, which were incorrectly defined as matches by the NNDR method (Fig. 6).

The highest (best) Precision was shown by the descriptors BRISK, SIFT, the worst one – by SURF64. In general, by Precision value, the descriptors can be sorted from the best to the worst as follows: BRISK, SIFT > AKAZE > ORB > KAZE > ORB1000 > SURF128 > SURF64.

The mean values of RecallO1 throughout the dataset show a variance in the range from 0.1 (SURF128) to 0.22 (SIFT) (Fig.6). The descriptor ORB, which has a significant excess in the number of key points comparing with the other descriptors (Fig.5), has mean RecallO1 equal 0.12, i.e., only 12% of the points found are used to determine a normalization matrix. By RecallO1, the descriptors can be ordered (from the best to the worst) as follows: SIFT >> KAZE > AKAZE > ORB1000 > SURF64 > ORB, BRISK > SURF128.

5.3. Time costs comparison. Let's consider time costs searching for a descriptor, a match (method NNDR) and an inlier (Fig. 7). According to Fig.7, ORB shows significantly less time to calculate one descriptor (AvgDesT), then ORB (1000) and BRISK come, and after them AKAZE. SIFT, SURF64, SURF128 descriptors appear next with comparable time. The KAZE descriptor illustrates significantly more time. The average one-match search time (AvgMatchT) with the NNDR method is essentially more consuming for ORB. AKAZE and ORB(1000) has the least AvgMatchT.

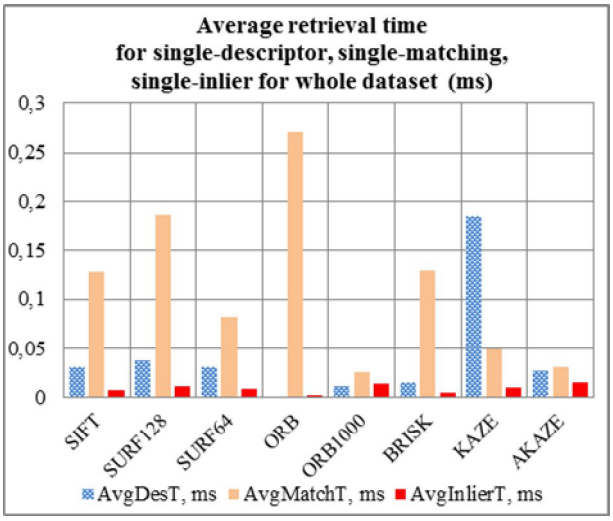


Fig. 7. Average retrieval time for a descriptor, a matching and an inlier for the whole dataset

The average retrieval time for one inlier (AvgInlierT) is longer for ORB1000 and AKAZE algorithms. For all algorithms, the values of AvgInlierT are significantly less than the values of AvgDesT or AvgMatchT. However, if we compare the values of AvgDesT and AvgMatchT for different descriptors, we do not see a single pattern. For KAZE, the time of AvgDesT is 3 times longer than AvgMatchT, and for other algorithms, AvgDesT is essentially less than AvgMatchT, but for ORB, AvgDesT is significantly less, more than 14 times.

However, the most useful for future conclusions in a comparative aspect is the total time for normalizing one image pair averaged for the whole dataset (TotalNormT). Fig.8 presents the time spent on the definition of all descriptors on the first and second images (DesT1, DesT2); all matches MatchT found with the NNDR method; all inliers InlierT for one image pair (all-time evaluations were averaged for the whole dataset).

The sum of the mean values of DesT1, DesT2, MatchT, InlierT is the mean total time (TotalNormT) of the normalization of one image pair for the dataset SYTOSS_NURE_pngPairs100 (Fig.8). Clarifying the fact that TotalNormT was estimated for a certain dataset is important because TotalNormT directly depends on the size of the images, the share of total scenes in pairs (overlap), and the type of scenes.

Below, we can see the same TotalNormT diagram for the case of using the symmetric method at the 2nd step of normalization (match search). This figure shows that the mean time for normalization almost doubles, as it was above mentioned in paragraph 2.

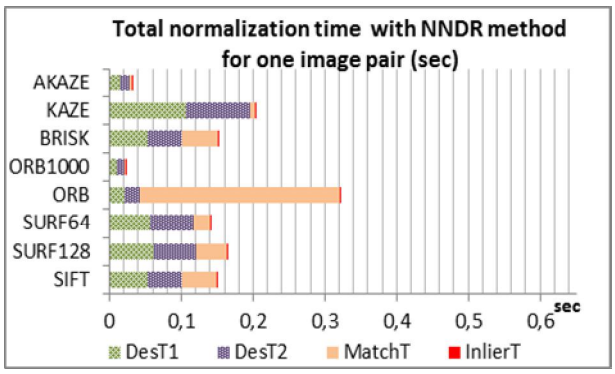


Fig. 8. Total normalization time costs of one image pair with using the NNDR method for a match search (averaged for the whole dataset)

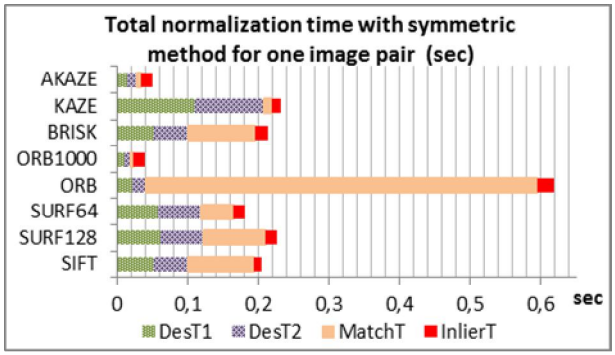


Fig. 9. Total normalization time costs of one image pair with using the symmetric method for a match search (averaged for the whole dataset)

Summing up the time costs, the descriptors by the total normalization time TotalNormT can be ranked as follows (from faster to slower):

ORB1000 < AKAZE << BRISK, SURF64 <
< SIFT < SURF128 << KAZE << ORB.

5.4. The normalization quality comparison based on expert assessments. All 800 experiments (for each pair of images 8 descriptors, 100 pairs) were evaluated by experts ("0" –"4"). If normalization could not occur due to insufficient matches, the experiment was given the value "-1" [15]. The expert rate revealed that 68% of experiments for this dataset scored "4" and "3" (good and excellent), 7% were unsuccessful, scoring "-1" and "0" (Fig.10).

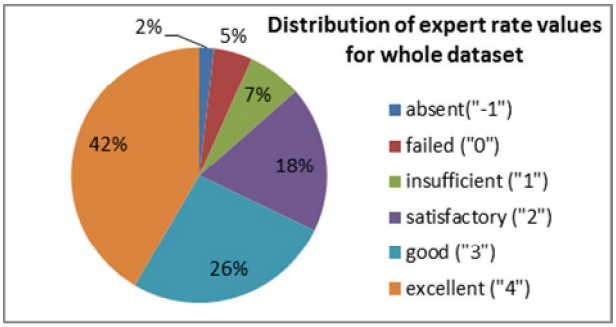


Fig. 10. Distribution of expert rate values

Fig. 11 and Table 3 illustrate how these rates were distributed among the descriptors, where it can be seen that SIFT is a clear leader. This descriptor has the biggest number of the highest rate "4", the least number of the rate "0", the rate "-1" is absent at all.

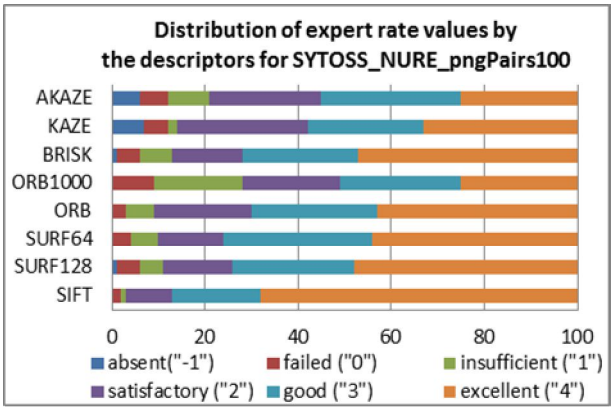


Fig. 11. Distribution of expert rate values by the descriptors for the SYTOSS_NURE_pngPairs100 dataset (for each descriptor, it is calculated the quantity of the same values of the expert rate (ER) for each value ("0"–"4"), as well as the quantity of cases where the normalization did not occur ("-1")

Table 3 – **Quantity of expert rates with the same values and mean exert rates for each descriptor (800 pairs)**

Descriptor	Quantity of the same ER values						Mean ER
	-1	0	1	2	3	4	
SIFT	0	2	1	10	19	68	3,5
SURF128	1	5	5	15	26	48	3,04
SURF64	0	4	6	14	32	44	3,06
ORB	0	3	6	21	27	43	3,01
ORB1000	0	9	19	21	26	25	2,39
BRISK	1	5	7	15	25	47	2,99
KAZE	7	5	2	28	25	33	2,57
AKAZE	6	6	9	24	30	25	2,41
Total quantity	15	39	55	148	210	333	

Fig. 12, a and Table 3 show the arithmetic mean (MeanER) of expert rate values for each descriptor, where one can notice that the highest mean value 3.5 belongs to SIFT, the descriptors SURF64, SURF128, ORB, BRISK follow. ORB1000 and AKAZE have the lowest mean ones.

For SIFT only, the median of the expert rates has a value 4. If the median is calculated without the negative points "-1" and "0", then the value 4 has SURF128 [15].

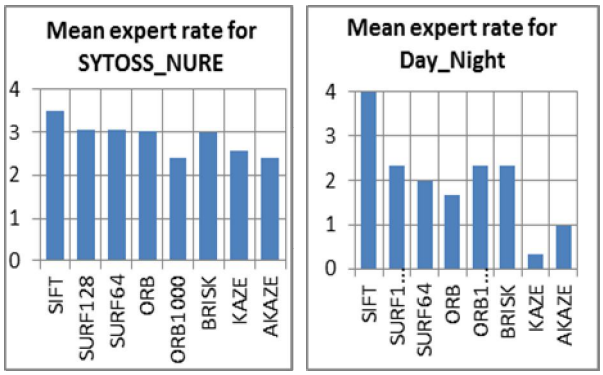
Based on the mean expert assessment and its median, the descriptors can be arranged in the following order (from a higher expert rate to lower):

SIFT >> SUFR128, SURF64, ORB, BRISK >
> KAZE > AKAZE > ORB1000.

Thus, according to the experts, the SIFT descriptor has a definite advantage in the normalization quality, but it has the middle position by time consuming (Fig. 8).

This paper didn't have such a purpose to research descriptors under significant lighting changes, but the experiments with 3 pairs of Day_Night_pngPairs3 dataset have shown that SIFT presents the best result (all pairs have an expert rate "4"), and KAZE has the lowest mean expert rate (Fig. 12, b, 13, 14).

However, this issue requires additional research for more images. The results of the experiments can be found here [15].



a b

Fig. 12. Arithmetic mean of expert rate values (AvgER): a – mean expert rate for SYTOSS_NURE_pngPairs100; b – mean expert rate for Day_Night_pngPairs3

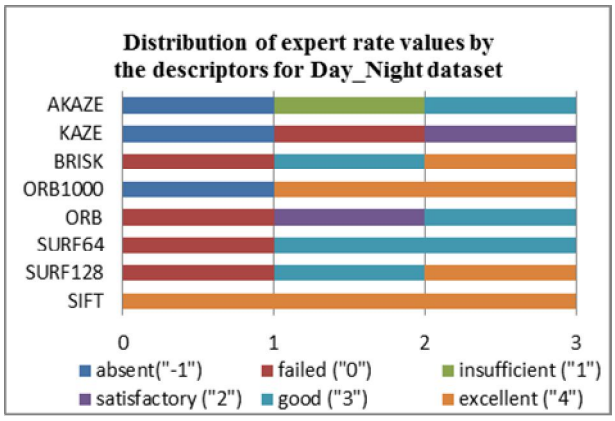


Fig. 13. Distribution of expert rate values by the descriptors for Day_Night_pngPairs3

Fig. 14. Result of normalization for the image pair from Fig. 4 (Day_Night_pngPairs3)

5.5. Analysis of normalization results for scenes of different types. The paper considers how the descriptors process images of different sceneries (Building, Picture_outside, Picture_inside, Texture_artificial, Texture_nature).

As the limited volume of the printed version does not allow to illustrate all the obtained regularities, in this article, only some of them appear below:

– all algorithms are characterized by a significant increase in number of found key points NP for natural textures. This increase is particularly typical for ORB;

– ORB, BRISK descriptors have a fairly consistently high mean Precision for all sets (from 0.84 to 0.87 for ORB, from 0.85 to 0.89 for BRISK). For other algorithms, the mean Precision varies significantly from set to set. For example, the SIFT algorithm shows the highest Precision value of 0.93 for artificial textures. In general, the scatter of mean Precision for different sets is 0.09;

– except SIFT, all descriptors showed the worst RecallO1 for artificial textures, SIFT has the highest RecallO1 for all sets;

– the time indicator AvgDesT for detection and description of one key point for the descriptors ORB, BRISK and ORB100 is significantly less than for the others and does not depend on the type of scene. For the other algorithms, AvgDesT values differ depending on scene types.

– the ORB algorithm proved to be very slow working with natural textures, that affected the estimation of time cost TotalNormT with this algorithm for the whole dataset (Fig.8,9);

– the lowest mean expert rate was defined for textures, at that natural texture is processed worse with SIFT, SUFR128, SURF64, ORB, ORB1000, BRISK descriptors, and artificial texture is worse with KAZE, AKAZE;

– there are 13 cases out of 15 ones for artificial texture when normalization was not possible (ER ="-1"), where 11 cases occurred under KAZE and AKAZE algorithms. The natural texture had the lowest quantity of the rate "4". SIFT descriptor shows the highest expert rates for each set.

All results of experiments for different scene type sets can be found in [15]. In general, we conclude that

normalization with the research method gives the worst results for natural and artificial textures.

This can be explained by the fact that natural textures often have distortions partly beyond projective transformations, and the artificial textures have more quantity of similar neighborhoods for not corresponding key points. However, to confirm the identified regularities, it is necessary to increase the number of image pairs from 20 to at least 100 pairs for each scene type.

5.6. Final conclusions on experiments. For the convenience of comparative descriptor analysis and making final conclusions on the work was constructed:

1) the bubble diagram (Fig.15) which clearly illustrates the number of values of the best expert rate "4" and the time costs for all descriptors, where the point size indicates the number of failed normalizations ("-1" and "0");

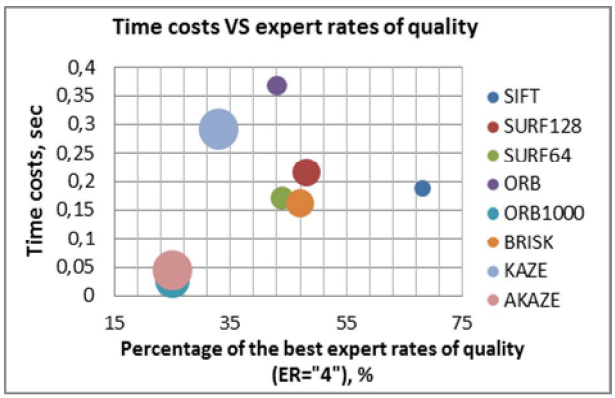


Fig. 15. Time costs VS expert rates of quality (the number of values "4" is on the abscissa axis, the time costs value is on the ordinate axis, the point size is the number of failed normalizations ("-1" and "0"), for instance, point size is 2 for SIFT and 12 for KAZE, AKAZE)

2) the rating diagram (Fig.16), which was made by converting values for each indicator into the 8-point rating scale (see paragraph 4.5). This diagram obviously presents the rating of descriptors for the considered indicators by the groups:

– quantitative estimates NP, NMO, NI;

– relative values Precision and Recall;

– time costs estimates DesT, MatchT, TotalNormT (InlierT is not given because its values are too small and their effect on time costs, in general, is not significant);

– relative quality assessments based on such expert rates: ER="4" (the winner), ER="-1" (absent), ER="0" (failed) and the mean expert rate MeanER.

The diagrams 15, 16 allow to make the following conclusions:

– the descriptors AKAZE and ORB1000 have the best time costs but the least number of expert rate "4" and a high level of failed normalizations;

– the descriptors BRISK, SURF64, SIFT, SURF128 have comparable time costs and occupy an average position in time costs relative to the other descriptors, but SIFT significantly exceeds BRISK, SURF64, SURF128 in quality (a maximum number of the expert rate "4" and a minimum number of normalization failures).

– for the SIFT algorithm, the ratio of the number of found matches to the detected points is higher than in other algorithms, i.e., SIFT detects key points and gives them a description in the best way, that makes it the winner by normalization quality among the compared algorithms. As for SURF128, SURF64, they have a similar number of key points with the SIFT algorithm, but a share of found points, which are useful for normalization, is the lowest. The normalization quality with SURF128, SURF64 is similar, like with the BRISK descriptor.

– the KAZE descriptor normalizes 1/3 longer than algorithms BRISK, SURF64, SIFT, SURF128 (but ORB does it even longer), with a maximum number of normalization failures (maximum number of the rate "-1"). The total number of rates "-1" and "0" is very similar for KAZE, AKAZE;

– the ORB descriptor has the most essential time costs, and the normalization quality is comparable to SURF64, SURF128, BRISK. The great ORB time costs are caused by the significant expenses on finding matches for a large number of points (the ORB algorithm finds the maximum number of key points, and only 10% of them are used for normalization).

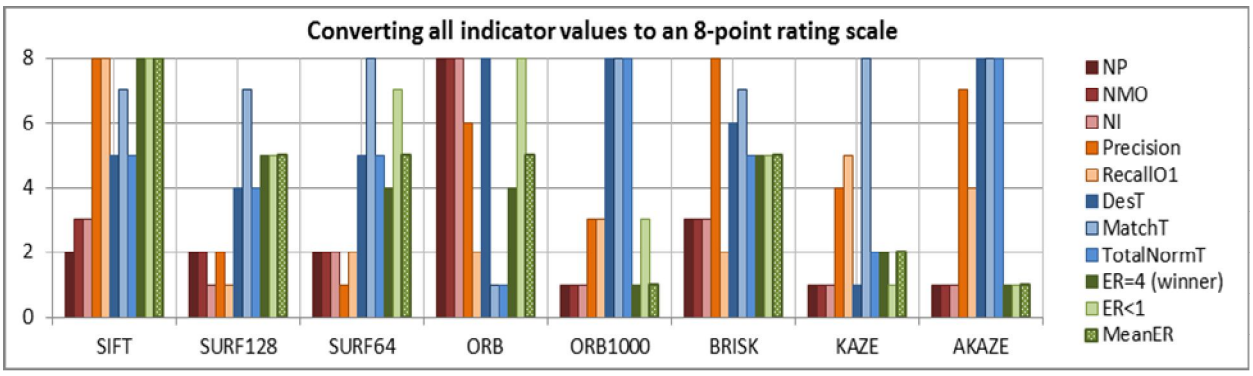


Fig. 16. Converting all indicator values to an 8-point rating scale (point 8 is the highest mark). Each value was assigned to one of the marks from 1 to 8, depending on which interval it got into (paragraph 4.5)

Conclusions

Thus, in this paper, the image normalization method implementation based on the analysis of the key points is considered in detail. Comparative estimation of the quality and time costs of the full-cycle descriptors SIFT, SURF128, SURF64, BRISK, ORB, ORB (1000), KAZE, AKAZE was conducted.

The following conclusions as to the result of the research:

– all descriptors can be used for normalization;

– the SIFT algorithm presented the best quality (even at an extreme change of lighting), however, SIFT time costs occupy an average position, along with SURF, BRISK which are significantly inferior to it by quality;

– the fastest algorithms were ORB1000 and AKAZE, the normalization quality with them is lower than with other algorithms;

– the KAZE algorithm is slower (only ORB is even more slower) and inferior to SIFT, SURF, BRISK, ORB in quality;

– the ORB descriptor has the most substantial time costs and averaged quality comparable to SURF and BRISK;

– SURF64 and SURF128 descriptors showed comparable quality and time costs, SURF64 is faster, SURF128 has better quality, but these differences are insignificant;

– the worst results were obtained for texture images;

– the symmetric method usage for searching matches at the 2nd step doubles the time costs of the normalization process in general.

Therefore, it is recommended to use the SIFT descriptor for general tasks where it is necessary to process images with the scenes, which are similar to ones of the dataset SYTOSS_NURE_pngPairs100, and the time costs requirement is not critical. If time costs are paramount and quality can be neglected within reasonable limits, it is better to use binary descriptors ORB1000 or AKAZE.

Findings on the paper are based on the image normalization of the SYTOSS_NURE_pngPairs100 dataset, which contains image scenes of different types, 40% of which are images of natural and artificial textures.

As the normalization of images of this type showed the worst results, the conclusions for the other sets may differ slightly.

In this work, the expert rates were applied to assess the normalization quality because a person can match images after normalization in the best way, but this approach to estimation is very time-costuming and is not devoid of subjectivity.

So, further research should focus on the development of an automatic criterion for assessing normalization quality and research of normalization result stability under various distortions: geometric transformation, illumination and degree of compression.

References

1. Gorokhovatskij, V.A. (2014), *Strukturny`j analiz i intellektual`naya obrabotka danny`kh v komp`yuternom zrenii* [Structural analysis and data mining in computer vision], Kompaniya SMIT, Khar`kov, 316 p. (in Russian)
2. Putyatin, E.P. and Averin, S.I. (1990), *Obrabotka izobrazhenij v robototekhnike* [Image processing in robotics], Mashinostroenie, Moscow, 320 p. (in Russian)
3. Krizhevsky, A., Sutskever, I., and Hinton, G.E. (2017), "ImageNet classification with deep convolutional neural networks", *Communications of the ACM,* No60(6), pp. 84-90.
4. Putjatin E.P., Jakovleva E.V., Ljubchenko V.A. (1996), "Razlozhenie matricy centroaffinnogo preobrazovanija dlja normalizacii izobrazhenij" [Centroaffine transformation matrix decomposition for image normalization], *Radiojelektronika i informatika* No. 4 (05), pp. 91–94. (in Russian)
5. Yakovleva, E.V. (2004), *"Metody` odnomerny`kh normalizaczij affinny`kh preobrazovanij v zadachakh raspoznavaniya izobrazhenij:* dissertation*"* [Methods of dimensional normalization affine transformations in image recognition tasks: dissertation], Kharkiv, 199 p. (in Russian)
6. Genkin, V.L., Erosh, I.L., and Moskalev, E.S. (1988), *Sistemy` raspoznavaniya avtomatizirovanny`kh proizvodstv* [Recognition systems for automated production], Mashinostroenie, Leningrad, 246 p. (in Russian)
7. Lyubchenko, V.A. (2004), *"Matematicheskie modeli i metody` normalizaczii proektivny`kh preobrazovanij v sistemakh obrabotki izobrazhenij:* dissertation" [Mathematical models and methods of normalization of projective transformations in image processing systems: dissertation], Kharkiv 156 p.
8. Lowe, D.G. (2004), "Distinctive image features from scale-invariant keypoints", *International journal of computer vision*, Vol. 60. – No 2. – pp. 91-110.
9. Bay, H., Tuytelaars, T., and Van Gool, L. (2006), "Surf*:* Speeded up robust features", *European conference on computer vision.* Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 404-417.
10. Rublee, E. et al. (2011), ORB: "An efficient alternative to SIFT or SURF", *2011 International conference on computer vision,* Ieee, pp. 2564-2571.
11. Leutenegger, S., Chli, M., and Siegwart, R.Y. (2011), "BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints", *2011 International conference on computer vision,* Ieee, pp. 2548-2555.
12. Alcantarilla, P.F., Bartoli, A., and Davison, A.J. (2012), "KAZE features", *European Conference on Computer Vision,* Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 214-227.
13. Alcantarilla, P. F., and Solutions, T. (2011), "Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces", *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell,* Vol. 34, No 7, pp. 1281-1298.
14. Márquez-Neila P. et al. (2016), "Speeding-up homography estimation in mobile devices", *Journal of Real-Time Image Processing,* Vol. 11, No 1, pp. 141-154.

15. (2020); Detail material on "Research of descriptor based image normalization and comparative analysis of SURF, SIFT, BRISK, ORB, KAZE, AKAZE descriptors" (original image pairs, normalized images, their overlaps, the tables with different estimations, summary diagrams etc.)" available at: https://github.com/SytossResearch/DescriptorBasedNormalization

Надійшла (received) 15.09.2020
Прийнята до друку (accepted for publication) 11.11.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Яковлева Олена Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформатики, Національний технічний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Olena Yakovleva – PhD, Associate Professor Department of Informatics, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: olena.yakovleva@nure.ua; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6129-6146.

Ніколаєва Катерина Геннадіївна – інженер, SYTOSS R&D Engineer, Kharkiv, Ukraine;
Kateryna Nikolaieva – SYTOSS R&D Engineer, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Ekaterina.levchenko@sytoss.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-1190-6858.

Дослідження методу нормалізації зображень на базі дескрипторів та порівняльний аналіз дескрипторів SURF, SIFT, BRISK, ORB, KAZE, AKAZE

О. В. Яковлева, К. Г. Ніколаєва

Анотація. Предметом досліджень є нормалізація зображень на основі аналізу характерних точок. Метою є розроблення математичних моделей та їх програмна реалізація для нормалізації геометричних перетворень зображень на основі аналізу дескрипторів SIFT, SURF, ORB, BRISK, KAZE, AKAZE; застосування цієї моделі для проведення порівняльного аналізу дескрипторів на основі експертних оцінок якості нормалізації, часових витрат та інших показників; формування та використання в експериментах власного датасету зі 100 реальних пар зображень, які містять сцени п'яти типів: будівлі та міські пейзажі, плоскі зображення, що зустрічаються на вулиці, плоскі зображення внутрішнього інтер'єру, природні та штучні текстури; висновки відносно використання розглянутих дескрипторів для вирішення задач нормалізації. Застосовуваними методами є: дескриптори SIFT, SURF, ORB, BRISK, KAZE, AKAZE для опису характерних точок, Nearest Neighbor Distance Ratio метод або симетричний метод для пошуку відповідних пар характерних точок з різних зображень, RANSAC метод для видалення хибних відповідностей та отримання параметрів матриці гомографії, міри подібності, програмне моделювання. Отримані результати: результати експериментів щодо нормалізації дескрипторами SIFT, SURF, ORB, BRISK, KAZE, AKAZE для 100 реальних пар зображень (нормалізовані зображення, їх перекриття, кількісні оцінки дескрипторів, precision and recall показники, часові витрати, експертні оцінки якості, конвертація всіх значень показників в 8-бальну рейтингову шкалу, підсумкові діаграми та висновки про переваги та слабкі місця дескрипторів, що порівнювалися; рекомендації відносно реалізації методу нормалізації у конкретних випадках.

Ключові слова: нормалізація геометричних перетворень; детектор; дескриптор; SURF; SIFT; BRISK; ORB; KAZE; AKAZE; метод RANSAC; метод k-найближчих сусідів; Nearest Neighbor Distance Ratio; бібліотека OpenCV.

Метод нормализации изображений на базе дескрипторов и сравнительный анализ дескрипторов SURF, SIFT, BRISK, ORB, KAZE, AKAZE

Е. В. Яковлева, Е. Г. Николаева

Аннотация. Предметом исследований является нормализация изображений на основе анализа характерных точек. Целью является разработка математических моделей и их программная реализация для нормализации геометрических преобразований изображений на основе анализа дескрипторов SIFT, SURF, ORB, BRISK, KAZE, AKAZE; применение данной модели для проведения сравнительного анализа дескрипторов на основе экспертных оценок качества нормализации, временных затрат и других показателей; формирование и использование в экспериментах собственного датасета из 100 реальных пар изображений, содержащих сцены пяти типов: здания и городские пейзажи, плоские встречающиеся на улице изображения, плоские изображения внутреннего интерьера, природные и искусственные текстуры; выводы относительно использования рассмотренных дескрипторов для решения задач нормализации. Применяемыми методами являются: дескрипторы SIFT, SURF, ORB, BRISK, KAZE, AKAZE для описания характерных точек, метод Nearest Neighbor Distance Ratio или симметричный метод для поиска соответствующих пар характерных точек на разных изображениях, метод RANSAC для удаления ложных соответствий и получения параметров матрицы гомографии, меры сходства, программное моделирование. Полученные результаты: результаты экспериментов по нормализации дескрипторами SIFT, SURF, ORB, BRISK, KAZE, AKAZE для 100 реальных пар изображений (нормализованные изображения, их перекрытия, количественные оценки дескрипторов, precision and recall показатели, временные затраты, экспертные оценки качества, конвертация всех значений показателей в 8-балльную рейтинговую шкалу, итоговые диаграммы и выводы о преимуществах и слабых места сравниваемых дескрипторов; рекомендации относительно реализации метода нормализации в конкретных случаях.

Ключевые слова: нормализация геометрических преобразований; детектор; дескриптор; SURF; SIFT; BRISK; ORB; KAZE; AKAZE; метод RANSAC; метод k-ближайших соседей; Nearest Neighbor Distance Ratio; библиотека OpenCV.

Intelligent information systems

UDC 004.855 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.4.14**

Svitlana Krepych, Iryna Spivak

West Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine

FORECASTING SYSTEM OF UTILITIES SERVICE COSTS BASED ON NEURAL NETWORK

Abstract. The work is devoted to the problem of excessive spending of people's funds on utilities, especially in winter, when these costs can amount to more than 25% of the family budget. The question of the possibility of saving at least part of these costs by monitoring their possible value and reducing this indicator is an urgent task. Hence, the development of a software system for forecasting utility costs is an urgent practical task. To solve this problem, the authors propose to use a neural network, because it is advisable to use it in situations where there is predetermined known information and on its basis the user needs to get the predicted new information. The method for forecasting utility costs based on the use of a neural network takes into account user's data of utility service costs entered manually or obtained from the EPS system, which is convenient because you can immediately get a large set of input data to more accurately predict future costs. Another type of input data is data obtained from weather forecast sites to determine forecast indicators for correct the training of neural network. Based on these data, the network studies and builds a separate model for forecasting utility costs for each user. Considering that the data on utility service costs entered by users into the system each month may not match the date, it is proposed to take into account this inaccuracy, to given the input data for forecasting as an interval corridor of values which containing the minimum and maximum forecast limits. The developed software system and the method of forecasting utility service costs were tested on the example of a real user of the EPS system.

Keywords: utilities cost; forecasting system; neural network; interval data; estimation accuracy.

Introduction

Nowadays there is an acute problem in the country of rising prices for utilities, especially for heating. Various studies and statistical samples show that the average citizen has to spend a large percentage of income to cover utility costs, which especially in winter, often is about 30-50% of family income. Together with the dynamics of rising prices for food, fuel and other goods, this factor greatly affects the standard of living in the country [1]. And it is possible only approximately predict the amount of costs, based on the season and previous costs. Therefore, the actuality task is to forecasting the most accurate amounts of utility service costs for the current or next month, based on weather indicators, to save and planning family budgets and expenses [2]. The aim of the work is to develop a software system for forecasting utility service costs using a neural network. To achieve the goal of the research it is necessary to solve the following tasks: to determine the main factors of utility service costs, to group them according to the indicators on which they have a certain impact; to explore existing tools for the development of neural networks; to develop a neural network that will take into account factors and predict the final result of utility costs; to test the network on a randomly generated data set, and to compare the result with real data; to develop a software system for forecasting utility service costs using a neural network.

Statement of task

As mentioned above, the percentage of utility costs from the total family income is a significant part (Fig. 1) [3], which in winter is at least a quarter or even a third of family earnings. For many families, especially those who rent an apartment, the question of the possibility of saving part of the budget is an urgent task. The monthly expenses for the family's utilities service consist of paying for the consumption of water, gas, electricity, as well as paying for cable TV and the maintenance of the adjacent territory.

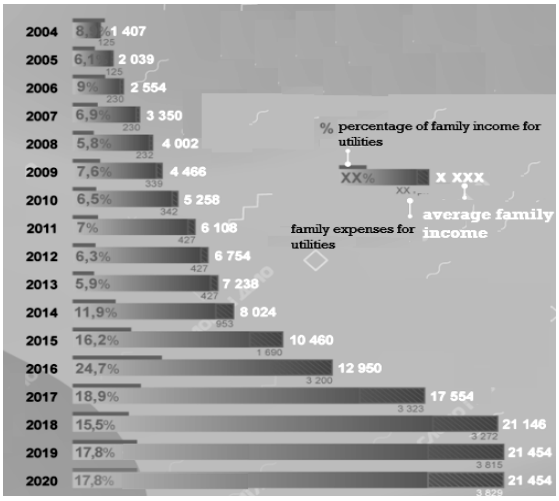


Fig. 1. Average utility costs for a family of 2 adults and 1 child for a 2-room apartment of 20 m^2.

The last two types of payments are stable and relatively unchanged, so they will not be considered in the system of forecasting utility costs.

Estimating the main sources of costs for heating, we get, that the most important factor influencing these indicators is weather conditions and season, and to understand the main sources of electricity costs, we need to analyze the main costs of electricity of appliances (Table 1).

Using the data in the table we can to calculate the approximate consumption of electricity of household appliances and to analyze the average cost of electricity:

© Krepych S., Spivak I., 2020

Fluorescent lamp 4 pcs · 100 W · 8 h · 30 d = 96 kW/m;
laptop 1 pcs · 50 W · 5 h · 30 d= 7.5 kW/m;
TV 1 pcs · 100 W · 4 h · 30 d = 12 kW/m;
Microwave oven 1 pcs * 600 W * 15 h/m = 9 kW/m;
Iron 1 pcs · 1000 W · 3 h/m = 3 kW;
Refrigerator 1 pcs · 30 W · 24 h · 30 d = 21.6 kW;
Washing machine 1 pcs · 2000 W · 10 h/m = 20 kW;
Electric kettle 1 pcs · 1500 W · 8 h/m = 12 kW.

Therefore, as we can see from the estimated data, the overall average value for the month only for these appliances is already amount 181.1 kW.

Table 1 – **Electricity consumption by appliances**

Appliance	Power, W	Appliance	Power, W	Appliance	Power, W
Coffee grinder	200	Razor	15	Blender	300
Coffee maker	800	laptop	20-80	Toaster	800-1500
Fluorescent lamp 60 W	16	PC	100-500	Fluorescent lamp 75 W	20
Fluorescent lamp 40 W	11	Inkjet printer	100	Fluorescent lamp 100 W	30
Microwave oven	600-2000	Electric stove	4000-6000	Electric clock	10
Automatic washing machine	2000	TV 25”	150	Gas drying for things	300
Hand washing machine	300	TV 19”	70	TV 12”	30
Vacuum cleaner	700-2000	Pump	75-400	Iron	1000-2000
Handheld vacuum cleaner	100	Satellite dish	5	Laser printer	600
Shaver	100	Electric dryer	400-2000	Electric oven	3000
Halogen lamp 40 W	40	Compact fluorescent lamp 25 W	28	Compact fluorescent lamp 20W	22
Large refrigerator with freezer	540	Medium refrigerator with freezer	475	Electric bell	10
Electric blanket	200-500	Drying	1000	Hair dryer	1200-2000

The class of tasks that can be solved using a neural network is determined by the actual operation of the network and its training [4]. Thus, it is advisable to use the network in situations where there is predetermined known information and on its basis the user needs to get the predicted new information. Taking into account that the information on utility service costs for a certain period is available and it is enough to train the neural network, it is advisable to use this data to design a software system that will predict the cost of utilities for the next few months.

Main part

The input parameters of the system are data of weather factors, as well as user data. Based on this, a complete set of data for analysis is formed. This information is transmitted to the system and processed by the neural network, which is a controlling element of the system. Additional data coming into the system is the weather history for a given locality, the history of payments that have already been processed by the neural network. This information is needed to obtain the most accurate prediction of the costs that the system returns at the output. The diagram of variants of software system using is presented in Fig. 2.

To take into account the inaccuracy of the user's submission of monthly data on a basis with strictly the same calendar day, it is advisable to submit the input indicator of a particular utility service in an interval form [5-7]:

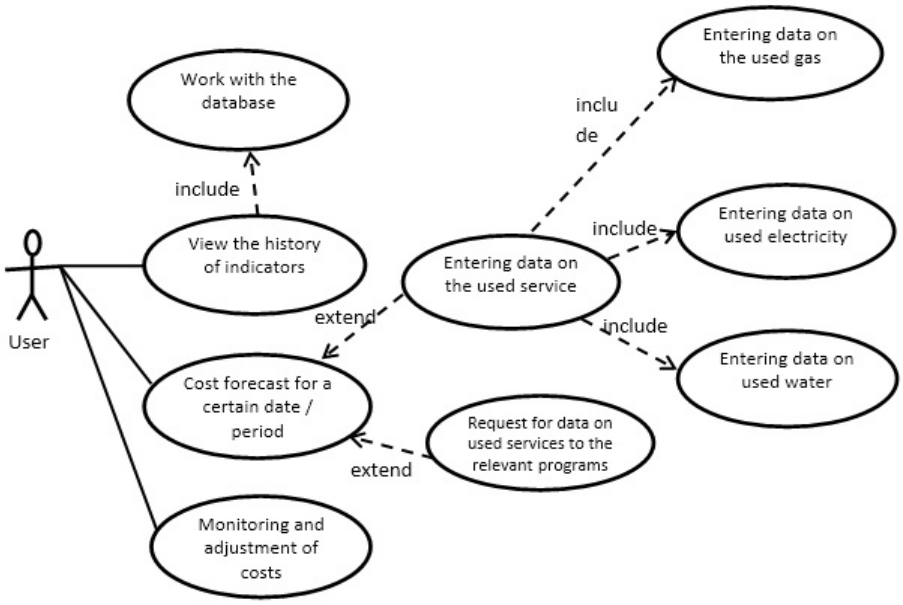


Fig. 2. Use–case system diagram

$$\left\{ I_g \in [I_g^-; I_g^+];\ I_l \in [I_l^-; I_l^+];\ I_w \in [I_w^-; I_w^+], \right. \quad (1)$$

$I_g^- = I_g - \delta \cdot I_g; I_g^+ = I_g + \delta \cdot I_g$; $I_l^- = I_l - \delta \cdot I_l; I_l^+ = I_l + \delta \cdot I_l$; $I_w^- = I_w - \delta \cdot I_w; I_w^+ = I_w + \delta \cdot I_w$ – minimum and maximum value of utility service costs entered by the user into the EPS system, relatively, for gas, electricity and water; δ - the percentage of deviation from the user-specified indicator. For adequate and correct adjustment of network weights it is advisable that the indicator δ put within such limits - $0{,}1 < \delta < 0$.

The condition of concordance of the forecasted utility service costs calculated by the system and the specified interval corridor of possible costs [7] are:

$$I_g^{\exp} \subset [I_g^-; I_g^+];\ I_l^{\exp} \subset [I_l^-; I_l^+];\ I_w^{\exp} \subset [I_w^-; I_w^+], \quad (2)$$

$I_g^{\exp}$, $I_l^{\exp}$, $I_w^{\exp}$ – forecasted utility service costs.

The indicator of concordance of forecast and real data depends on the size of the input sample on which the network is trained. As the larger the input sample, as the higher the concordance rate.

Preparation of data for further processing in the neural network takes place in several stages. First, the availability of the necessary weather information is checked in the local database. If it is not present, it is got from the weather site [8], also in the same way getting the information about the time of sunrise and sunset, its aggregated into average values for the month and recorded in the local database for future use (Listing 1).

```
public async Task<WeatherEntity>
ParseWetherByDate(DateTime date, int cityCode, string
cityName)
    {
        var link =
$"{_weatherSearchUrl}/{cityCode}/{cityName}/{date.ToStrin
g("yyyy-MM-dd")}";
        var content = await _httpClient.GetStringAsync(link);
        var htmlDocument = new HtmlDocument();
        htmlDocument.LoadHtml(content);
        var document = htmlDocument.DocumentNode;
        var tempTable =
document.QuerySelectorAll(".at_temp").Select(p =>
p.InnerText);
        var avgTemp = (int)tempTable.Select(p =>
p.Split("&deg;C").First()).Average(p => Convert.ToInt16(p));
        var wetTable =
document.QuerySelectorAll(".at_r>.at_cnt>.vl_parent>.vl_ch
ild").Select(p => p.InnerText);
        var avgWet = wetTable.Select(p =>
Convert.ToDouble(p) / 100).Average();
        var windTable =
document.QuerySelectorAll(".at_winter>.at_cnt>.vl_parent>.
vl_child").Select(p => p.InnerText);
        var avgWind = windTable.Select(p =>
Convert.ToDecimal(p.Replace('.', ',''))).Average();
        var weather = new WeatherEntity
        {
          Date = date,
          Temperature = avgTemp,
          Wetness = avgWet,
          Wind = avgWind
        };
        return weather;
    }
```

Listing 1

The next step is to download ready-made datasets for the current user from the database (Listing 2).

```
private void LoadModelFromFile(MLContext mlContext)
    {
using (var fileStream = new FileStream(_modelPath,
FileMode.Open, FileAccess.Read, FileShare.Read))
        {
var model = mlContext.Model.Load(fileStream);
}
}
```

Listing 2

Next, a set of data is formed from the current query and the information obtained in the first step. Using the Predict method, the predicted result is obtained ((Listing 3).

```
privatePredictionPredict(MLContextmlContext)
{
        ITransformer loadedModel;
using (var stream = new FileStream(_modelPath,
FileMode.Open, FileAccess.Read, FileShare.Read))
        {
loadedModel = mlContext.Model.Load(stream);
        }
var predictionFunction =
loadedModel.MakePredictionFunction<DataSet,
Prediction>(mlContext);
var set = new DataSet();
var prediction = predictionFunction.Predict(set);
return prediction;
    }
```

Listing 3

The server and, in particular, the neural network are implemented in the C # programming language using the ML.NET library. A regression three-level network model was used. The "back-side" approach was used as a corrective function for train the network.

The network step by step learns on each request and data set and as a result it learns to adjust weights correctly that the coefficient of dependence of these or those factors was the closest to real, and the more precisely adjusted weights, the more exact result is.

To build the basis of the neural network, an algorithm for processing the data set is designed, which is then used in the calculation of network weights. The basic formulas used for this:

- MapValueToKey – uses the indicator as a certain key of the data set, in this case used to classify the months, because from them mainly depend the weather.
- ReplaceMissingValues – views all variants of the indicator and inserts missed cases.
- OneHotEncoding – converts data into a sorted vector.
- Normalize – converts data into a certain range, in this case used to normalize additional weather indicators.

Fig. 3 shows schematically the method of calculating the projected costs for the consumed gas on the specified date, and Fig. 4 - for the consumed electricity. An analysis of the dependence of the accuracy of the prediction of the result on the number of data sets was performed. The system was trained using a number of random data sets and

tested for accuracy 10 times. As the accuracy assessment took the average value of 10 attempts. Since the system is customized for a specific user, it does not require a lot of data to work quite accurately. As can be seen from Fig. 5, even with 10 data sets, it gives an error of 27%, and with 100 sets of only 7%.

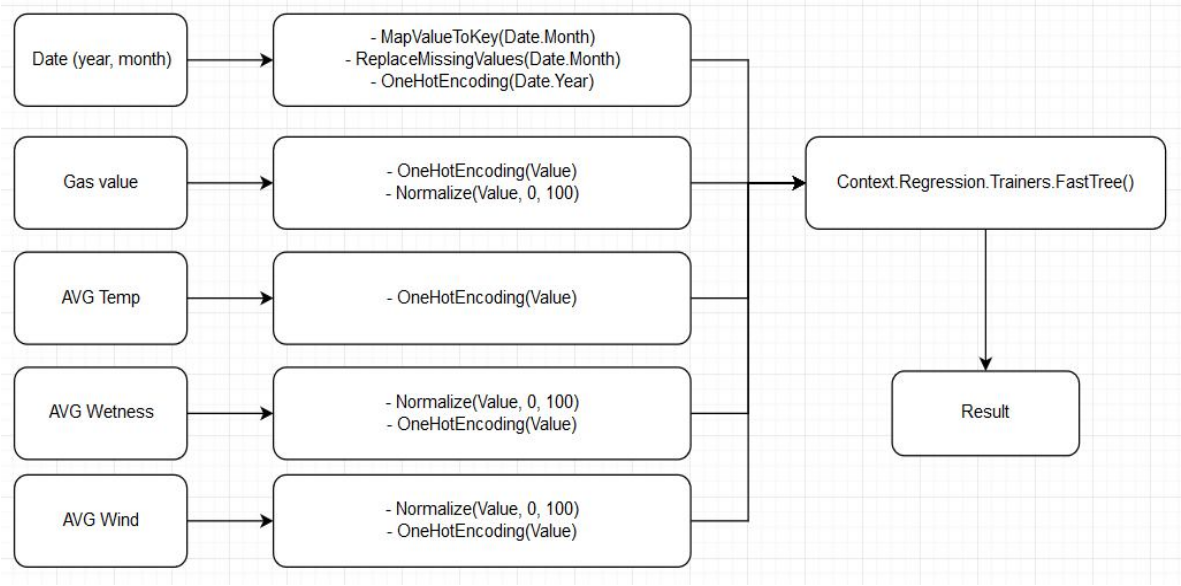


Fig. 3. Neural network diagram for gas cost calculations

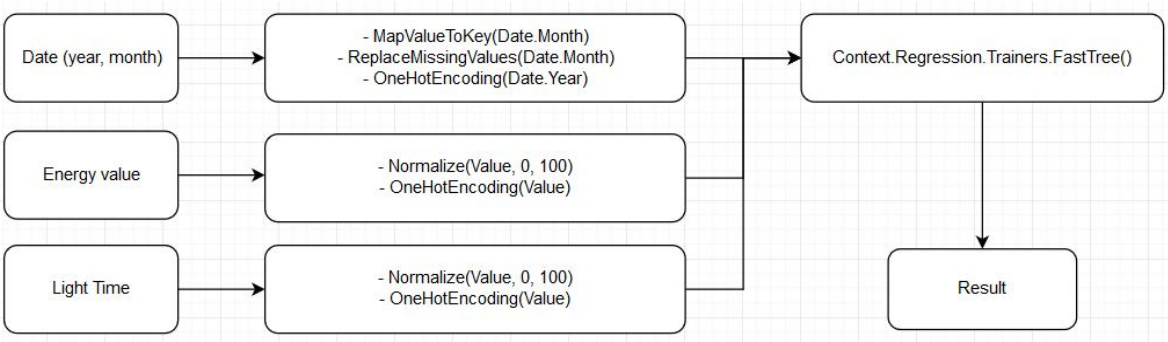


Fig. 4. Neural network diagram for calculating the cost of electricity

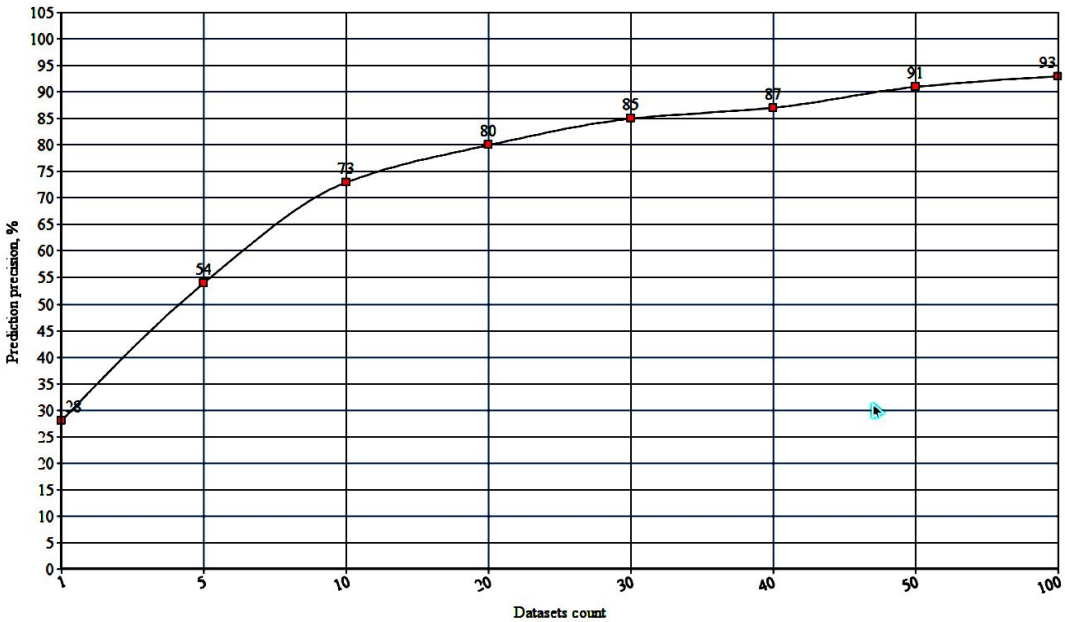


Fig. 5. Graph of the dependence of the accuracy of cost forecasting on the amount of user input

Consider the example of neural network training and the results of forecasting utility service costs. The input data presented in Table 2 are obtained from the EPS system for quick adaptation of the software system

to any user, because we can immediately get the minimum required set of input data to obtain an accuracy of more than 90%.

Table 2 – **Input data for neural network training**

Date	Elec-tricity	Gas	Water (1 counter)	Water (2 counter)
01.11.2016	575	1150	7	1
27.11.2016	722	1473	12	1
30.12.2016	1030	1880	18	2
04.01.2017	1204	1927	21	2
28.01.2017	1386	2235	25	3
…	…	…	…	…
04.09.2017	2564	3042	76	13
03.10.2017	2888	3111	82	14
02.11.2017	3138	3348	89	15
30.11.2017	3492	3594	95	16
31.12.2017	3887	3971	104	18
30.01.2017	4067	4279	111	18
…	…	…	…	…
31.07.2018	5122	5032	153	27
05.09.2018	5291	5059	160	29
01.10.2018	5448	5123	166	30
31.10.2018	5609	5297	173	31
02.12.2018	5787	5596	179	33
31.12.2018	5958	5869	186	34
…	…	…	…	…
28.05.2019	6741	6940	218	41
01.07.2019	6975	6894	223	44
01.08.2019	7062	6960	229	45
03.09.2019	7146	7011	233	46
30.09.2019	7279	7070	238	48

Fig. 6 shows a graph comparing the input data set, in particular for gas, and forecast data.

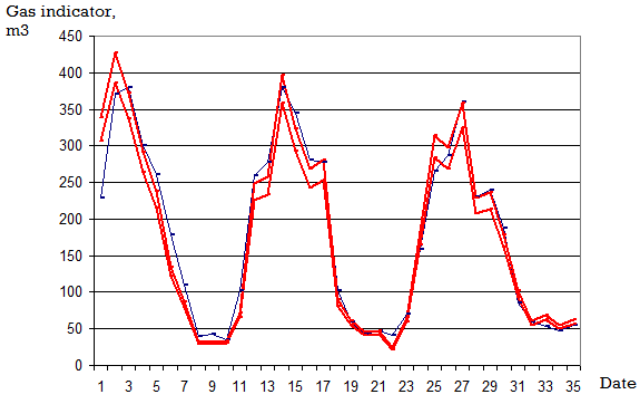


Fig. 6. Graph of comparison of gas consumption indicators on real and forecast data, where ▬ - interval corridor of input values with an error of 5%; ▬ - projected gas utilization rate calculated by the system

Another part of the experiment was division of quantity of input data for data only for neural network training (70%) and prediction (30%). As can be seen from Fig. 7, the neural network predicts light consumption within 8% accuracy, which set an interval corridor, easily adapts to insignificant fluctuations of indicators, but it does not immediately respond to significant deviations, the cause of which may be different. Therefore, one of the real reasons is failure of the EPS system or their incorrect input into the system by the users.

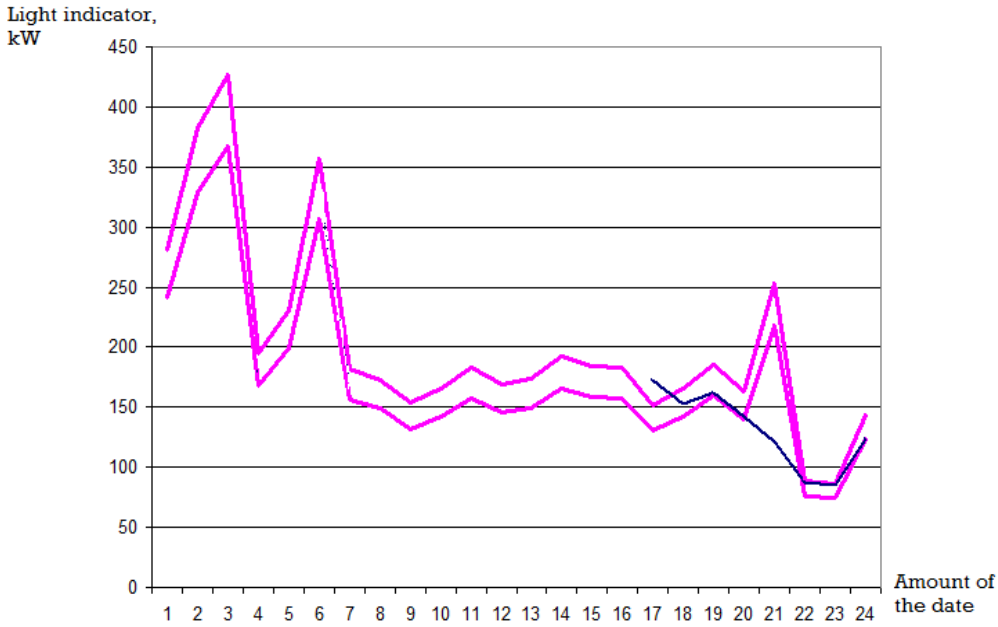


Fig. 7. Graph of comparison of input and forecast data by the system based on training the network with the part of the data, where ▬ - the interval corridor of input values with an error of 5%, ▬ - the forecast indicator of electricity use, calculated by the system

Therefore, based on the results of forecasting the system of electricity costs in accordance with formulas (1) and (2), was build system of coordination of indicators, I_l, that is:

$$\begin{aligned} &172 \not\subset [130,2;151,2]; && 121 \not\subset [217,62;252,72]; \\ &153 \subset [142,29;165,24]; && 87 \subset [76,26;88,56]; \\ &162 \subset [159,96;185,76]; && 85 \subset [74,4;86,4]; \\ &142 \subset [140,43;163,08]; && 124 \subset [123.,69;143,64]. \end{aligned} \quad (3)$$

Based on the results of training and forecasting of utility service costs by the system, in particular of the electricity, from expression (3) we can conclude that the system makes an adequate forecast within the established accuracy and small sample of input data.

Over time and increase the amount of input data, the network can learn to minimize these differences, but it is not insured against accidental changes in the data due to various factors.

There are two variants for solving this problem in further development:

1. Identify and increase the number of factors influencing the network.

2Ignore data jumps, when the indicator is much higher or lower than the diapason of previous indicators.

The main screen forms of the software system for forecasting utility service costs using a neural network are shown in Fig. 8 – 10.

Fig. 8. Selecting date or period for forecast

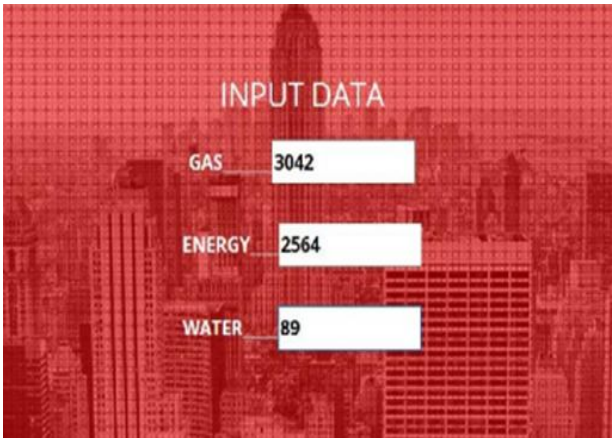


Fig. 9. Entering user data

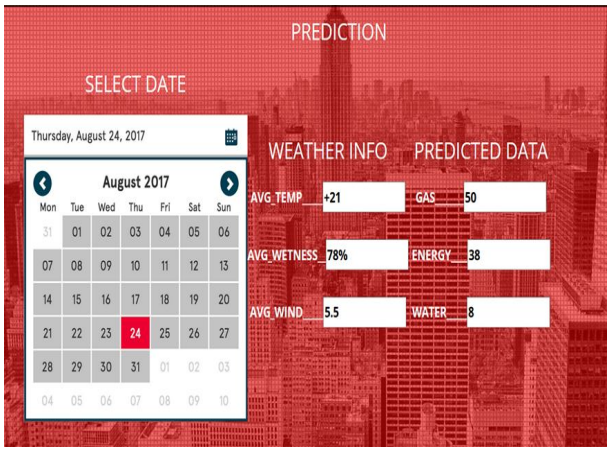


Fig. 10. The result of the forecasting system

Fig. 8 shows the calendar for selecting the date when the user wants to make a forecast of utility costs.

Fig. 9 shows the form in which the user enters the data of the counter used services, if he does not have access to the system of entering EPS indicators, and Fig. 10 shows the result of the software system, which shows the estimated cost of services for the selected date.

Conclusions

Research on forecasting utility service costs is an urgent task in recent years, especially in Ukraine, because in to pay utility costs you need to spend a significant part of salary, which in winter period often exceeds 25% of earnings. Therefore, the possibility of reducing this percentage, in particular by forecasting possible costs in accordance with the forecasted weather conditions and reducing them by adjusting certain indicators is appropriate and necessary.

Today the authors have designed and partially implemented a system for forecasting utility costs using a neural network. However, this problem is multifaceted and contains a large number of different factors that need to be considered in future research. Take into account that all factors have a certain randomness of influence and error of measurements and calculations; it is advisable in the future to apply the methods of analysis of interval data not only to concordance the data, but also to build a forecast model.

References

1. (2017), *Communal Genocide 2016/17*, available to: https://bastion.tv/komunalnij-genocid-201617_n15658
2. Krepych, S.Ya., Spivak, I.Ya. and Kapush, M.V. (2018), "System of forecasting the cost of utilities using neural networks", *Proceedings of the seminar Computer System and Information Technologies CSIT'2018*, June 2, 2018, Ternopil, pp. 37-38.
3. (2019), *Utility payments: how Ukrainian expenditures on utilities have changed over the last 15 years*, available to:: https://www.slovoidilo.ua/2019/12/16/infografika/suspilstvo/platezhi-komunalku-yak-zminyuvalysya-vytraty-ukrayinczi v-komunalni-posluhy-ostanni-15-rokiv
4. (2020), *How neural networks work: about a complex system in simple words*, available to: https://robo-hunter.com/news/kak-rabotayt-neironnie-seti-o-slojnoi-sisteme-prostimi-slovami14200
5. Bobalo, Y., Dyvak, M., Krepych, S. and Stakhiv, P. (2014), "Evaluation of functional device suitability considering both random technological deviations of its parameters from their nominal values and the process of components' aging", *Przegland Elektrotechniczny*, Warszawa, Poland, 90(4), pp. 224-228.

6. Krepych, S., Stakhiv, P. and Spivak, I. (2013), "Analysis of the tolerance area parameters REC based on technological area scattering", *12th International Conference: The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, CADSM'2013*, pp.179-180.
7. Krepych, S., Spivak, I., Spivak, S. and Krepych, R. (2019), "Modelling of the Process of the Small Hydroelectric Power Station on the Basis of Interval Input and Output Data Analysis", *9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2019*, pp.44-47.
8. (2020), *Weather forecast*, available to: https://meteo.ua/

Received (Надійшла) 29.09.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.11.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ ABOUT THE AUTHORS

Крепич Світлана Ярославівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук, Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна;
Svitlana Krepych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Computer Science Department, West Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine:
e-mail: msya220189@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7700-8367.

Співак Ірина Ярославівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук, Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна;
Iryna Spivak – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Computer Science Department, West Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine;
e-mail: spivak.iruna@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-4831-0780.

Система прогнозування витрат на комунальні послуги на основі нейронної мережі

С. Я. Крепич, І. Я. Співак

Анотація. Робота присвячена проблемі надмірної витрати коштів громадян на оплату комунальних послуг, особливо у зимовий період, коли вказані витрати можуть становити понад 25% бюджету сім'ї. Питання можливості економії хоча б частини вказаних витрат шляхом моніторингу їх можливої величини та зменшення цього показника на сьогодні постає актуальною задачею. Звідси розробка програмної системи прогнозування витрат на комунальні послуги є актуальним практичним завданням. Для рішення цього завдання авторами пропонується використання нейронної мережі, адже її доцільно застосовувати в ситуаціях, коли є наперед визначена відома інформація і на її основі користувачеві необхідно отримати прогнозовану нову інформацію. Метод прогнозування витрат на комунальні послуги базований на використанні нейронної мережі приймає на вхід дані користувачів про витрати на послуги введені вручну або отримані із системи EPS, що є зручним, адже можна одразу отримати великий набір вхідних даних для більш точнішого прогнозування майбутніх витрат. Ще одним типом вхідних даних є дані отримані із сайтів прогнозу погоди для визначення прогнозних показників для коректного навчання мережі. На вказаних даних мережа навчається та будує для кожного користувача окрему модель прогнозування витрат на комунальні послуги. Враховуючи, що внесені користувачами у систему дані про витрати на комунальні послуги кожного місяця можуть не співпадати по даті, то для врахування цієї неточності пропонується вхідні дані для прогнозування подавати у вигляді інтервального коридору значень, що містить мінімальну та максимальну межу прогнозу. Розроблена програмна система та, відповідно, метод прогнозування витрат на комунальні послуги було апробовано на прикладі реального користувача системи EPS.

Ключові слова: комунальні послуги; система прогнозування витрат; нейронна мережа; інтервальні дані; точність оцінювання.

Система прогнозирования расходов на коммунальные услуги на основе нейронных сетей

С. Я. Крепыч, И. Я. Спивак

Аннотация. Работа посвящена проблеме чрезмерного расхода средств граждан на оплату коммунальных услуг, особенно в зимний период, когда указанные расходы могут составить более 25% бюджета семьи. Вопрос возможности экономии хотя бы части указанных расходов путем мониторинга их возможной величины и уменьшение этого показателя на сегодня стоит актуальной задачей. Отсюда разработка программной системы прогнозирования расходов на коммунальные услуги является актуальной практичной задачей. Для решения этой задачи авторами предлагается использование нейронной сети, ведь ее целесообразно применять в ситуациях, когда предопределена известная информация и на ее основе пользователю необходимо получить прогнозируемую новую информацию. Метод прогнозирования расходов на коммунальные услуги основанный на использовании нейронной сети принимает на вход данные пользователей о расходах на услуги введены вручную или полученные из системы EPS, что является удобным, ведь можно сразу получить большой набор входных данных для более точного прогнозирования будущих расходов. Еще одним типом входных данных есть данные получены с сайтов прогноза погоды для определения прогнозных показателей для корректного обучения сети. На указанных данных сеть учится и строит для каждого пользователя отдельную модель прогнозирования расходов на коммунальные услуги. Учитывая, что внесенные пользователями в систему данные о расходах на коммунальные услуги каждый месяц могут не совпадать по дате, то для учета этой неточности предлагается входные данные для прогнозирования подавать в виде интервального коридора значений, который содержит минимальную и максимальную границу прогноза. Разработана программная система и, соответственно, метод прогнозирования расходов на коммунальные услуги были апробированы на примере реального пользователя системы EPS.

Ключевые слова: коммунальные услуги; система прогнозирования расходов; нейронная сеть; интервальные данные; точность оценки.

UDC 004.9 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.4.15**

Anatoly Povoroznyuk, Oksana Povoroznyuk, Khaled Shekhna

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

APPLICATION OF FRACTAL PROCESSING OF DIGITAL MAMMOGRAMS IN DESIGNING DECISION SUPPORT SYSTEMS IN MEDICINE

Abstract. The subject of the research is the methods of digital processing of halftone medical images with locally concentrated features. **The object** of the research is the process of morphological analysis of digital mammograms in the design of decision support systems in medicine. **The aim** of this work is to develop methods and technologies for detecting of diagnostically significant characteristics of digital mammograms based on their morphological analysis, taking into account fractal dimensions. **The objective of the study** is to improve the quality of mammographic examinations of patients in the design of decision support systems in medicine by developing specialized methods for morphological analysis of digital mammograms (highlighting diagnostically significant elements amid noises), based on taking into account the features of the images in the form of useful signal models, in particular, fractal dimension models. **Research methods**: a method for calculating the fractal dimension of two-dimensional halftone images specified on a discrete set, methods of object-oriented programming, methods of statistical analysis. As a **result of the research**, the following results were obtained: based on the analysis of known methods of digital image processing, a limited area of their application in processing mammograms was shown and the urgency of developing specialized methods of morphological analysis based on taking into account the features of the considered images in the form of useful signal models, in particular, fractal dimension models. A method and an algorithm for the implementation of morphological analysis of digital mammograms, taking into account their fractal dimension, have been developed. The software implementation of the method was performed using the MatLab math package and testing on real mammograms was completed. Mammograms without obvious pathologies and mammograms which having pathological structures of various types (tumors, intraductal formations and microcalcifications) were processed. The fractal dimension of the entire image and selected fragments was calculated. **Conclusions**. The results of the research showed that the fractal dimension of the entire image does not give statistically significant results on the presence or absence of pathologies, but if we calculate the fractal dimension on the selected fragments, then the results are very different. We can trace the pattern that the more obvious pathologies on a fragment, the greater the fractal dimension. Further research is aimed at developing a method for classifying digital mammograms taking into account their fractal dimensions.

Keywords: decision support system; medical image, morphological analysis, mammogram, fractal dimension.

Introduction

The introduction of computer and information technologies in medical practice has led to the creation of a wide range of medical information systems (MIS) from electronic medical records to complex decision support systems (DSS) [1, 2]. The most widespread MIS are included in diagnostic complexes, with the help of which various instrumental examinations of patients are carried out.

The overwhelming majority of diagnostic information contains data obtained during visualization and morphological analysis (isolation of diagnostically significant structural elements amid noises) of biomedical signals and images [2]. Medical images (X-rays, mammograms, ultrasound, etc.) are one of the important means of obtaining visual information about the internal structure and function of the human body, which is not directly perceived by sight.

The information processing process in biomedical DSSs consists of a sequence of corresponding stages, one of which is the stage of morphological analysis of biomedical images (BMI) with locally lumped signs (LLS) [3, 4]. BMI with LLS are images with a structure in which diagnostic signs are focused on small fragments of their definition area. The task of morphological analysis is to isolate informative fragments (structural elements) of BMI amid noises, as a result of which diagnostic signs are formed in the form of parameters of the found structural elements [5].

Morphological analysis of BMI with LLS is one of the crucial stages, since errors at this stage lead to the making of erroneous diagnostic decisions or to a refusal from making a decision at all. This stage requires the use of specialized methods of morphological data analysis, taking into account the features of BMI with LLS and methods of their transformation [6, 7]. The theory of morphological analysis has been most fully developed for processing images and scenes of various types [8, 9]. However, in medical practice, for morphological analysis of BMI with LLS, various heuristic processing methods, which intuitively operate with the concept of the shape of structural elements in the image or in certain areas of the image, are often used.

The existing methods of digital processing do not take into account the peculiarities of BMI with LLS, have a limited scope of application for processing medical images, since these images are low-contrast, contain a significant noise component, and diagnostic elements have significant variability. In addition, some elements have an irregular (fractal) structure (for example, microcalcifications in mammography).

Therefore, an urgent task is to develop specialized methods for improving visualization and morphological analysis, based on taking into account the features of the considered images in the form of useful signal models, in particular, fractal dimension models, in order to improve the quality of instrumental examination of a patient during designing decision support systems in medicine based on morphological analysis of BMI with LLS.

© Povoroznyuk A., Povoroznyuk O., Shekhna K., 2020

The aim of the work is to develop methods and information technologies for detecting diagnostically significant characteristics of halftone medical images based on their morphological analysis, taking into account fractal dimensions.

Development of a method for morphological analysis of digital mammograms taking into account their fractal dimension

Digital image processing has long been an integral part of research in almost all fields of science. Working with samples from any subject area involves not only extracting some data from images, but also classifying images, working with complex-structured samples, with non-obvious patterns and features that are often noticeable only to specialists in this field.

In medicine, the ability to automatically process large sets of images, to recognize images of internal organs in certain subject areas of medicine, to determine the type of tissue, to detect tumors, to determine the presence of any compounds can significantly affect the course of research, facilitate the process of working with images, for example, speed up the detection of a disease, making a diagnosis, which helps to choose timely and adequate treatment.

One of the widely used approaches to image analysis is fractal analysis [10]. Fractals, according to B. Mandelbrot's definition, are sets for which their fractal dimension is greater than topological. As a rule, such sets possess self-similarity properties. The characteristic that reflects this self-similarity is fractal dimension.

The approaches that are non-traditional for classical geometry, which are used in fractal analysis, help to obtain new data about the object under study, to analyze its rather complex, irregular structure.

During calculating the fractal dimension of various natural and artificial objects, a number of problems arise due to the fact that there are several definitions of fractal dimension. The basic concept is the Hausdorff dimension, but its estimation is often quite difficult. Therefore, in practice, dimensions related to the so-called box-computing (or box-counting) class [10] are often used.

With this approach, the set under study is covered by unit cells (boxes) of the same size δ and the number of elements of the covering N (δ) is considered. It is assumed that this number depends to some extent on the cell size δ. It is considered the relation

$$f = log_2 N(\delta)/log_2(\delta)$$

and its behavior with a change in the scale δ is investigated. If there is a limit of this ratio, then it is equal to the number d, which is called the fractal dimension of this set

$$d = lim_{\delta\to 0} f = lim_{\delta\to 0}\left(log_2 N(\delta)/log_2(\delta)\right). \quad (1)$$

For a point, segment, square, etc., this value coincides with the well-known geometric dimension and is an integer (d = 0, 1, 2, respectively). For fractal sets, the dimension is not an integer. Thus, the main idea of introducing this class of dimensions is the concept of "measurement on the δ scale": for each δ, an object is measured in such a way that the unevenness of objects smaller than δ is ignored and measurements are considered when δ tends to 0.

Direct determination of the fractal dimension according to (1) is used in the analysis of binary images, but to determine the fractal dimension of halftone images one of the methods described in [11, 12] is used. The idea of the method is to build the surface of the graph of the grayscale function, calculate the volume of a special "cover" for this surface, and then calculate the fractal dimension of the surface.

It turns out that in this case the Minkowski's dimension coincides with the most commonly used capacitive one, but the calculation method is simpler. Thus, a dimension vector is compared to each image, and the proximity of the images is estimated by the proximity of the vectors.

The method is based on plotting the surface of the grayscale function over a grayscale image. Then this surface "thickens" - a special δ-parallel body, the so-called cover, is built for it. Its volume, approximation to the surface area and the fractal dimension of the surface are calculated.

Let a set of points be given for a halftone image

$$F = \{Z_{ij}, i = \overline{0,k},\ j = \overline{0,l}\}$$

where $Z_{ij} \in \{0, 255\}$ is the intensity value for a pixel with coordinates (i, j).

Since grayscale is only defined for a pixel, F can be considered as a function of integer arguments. Let us extend F for points with real coordinates (x, y), $i \le x < i+1$, $j \le y < j+1$, then we can talk about the surface area of the graph of the constructed function F (we can add it with the values of Z_{ij} or using any approximation).

If we consider the resulting surface as a fractal, then the fractal dimension is determined by the value of its area. In image analysis, the set of grayscale function values is always not empty and is limited in R^3.

Let's consider all points located at a distance δ from the surface of the graph of the grayscale function. They form a "cover" with a thickness of 2δ, which is a δ-parallel body and is defined by the upper surface $u_\delta(i, j)$ and the lower surface $b_\delta(i, j)$. For δ = 1,2, ... the surfaces are determined iteratively:

$$u_\delta(i,j) = max\{u_\delta(i,j)+1, \max_{|(m,n)-(i,j)\le 1|} u_\delta(m,n)\} \quad (2)$$

$$b_\delta(i,j) = min\{u_\delta(i,j)-1, \min_{|(m,n)-(i,j)\le 1|} u_\delta(m,n)\} \quad (3)$$

It can be seen from (2, 3), that in the calculations of the extreme points we use four nearest neighbors.

A point $F(x, y)$ is included in a δ-parallel body if

$$b_\delta(i,j) \le F(x,y) < u_\delta(i,j).$$

The volume of a δ-parallel body is calculated as

$$V_\delta = \sum_{i,j}\left(u_\delta(i,j) - b_\delta(i,j)\right) \quad (4)$$

The surface area of the fractal is calculated by the following formula

$$S_\delta = V_\delta / (2\delta). \quad (5)$$

Since $S_\delta \approx \beta\delta^{2-D}$ [4], the fractal dimension D is determined from the relation:

$$D = 2 - log_2 S_\delta / log_2 \delta. \quad (6)$$

Calculation of the surface area of the graph of the function F can be performed for the entire image or we can divide it into cells with coordinates (x, y) and perform calculations for each cell.

Considering that the fractal dimension D calculated according to (6) will differ for different δ, the average value of the ratio

$$log_2 S_\delta / log_2 \delta \quad (7)$$

is found by the method of least squares as the slope coefficient a_1 of the straight line $y = a_0 + a_1 x$ in coordinates $x = log_2 \delta;\ y = log_2 S_\delta$.

Based on the above, the following algorithm for calculating the fractal dimension of halftone images is proposed

1. For the whole image or for a selected fragment, construct a grayscale function Z_{ij}.

2. Determine the initial values of the two-dimensional array of points of the upper and lower surfaces of the δ-parallel body for δ = 0:

$$u_0(i,j) = b_0(i,j) = Z(i,j),\ i = \overline{0,k},\ j = \overline{0,l}$$

3. Organize a cycle of changing the scale δ ($\delta = \overline{1,256}$), at each stage of which the following actions are performed:

3.1. Two-dimensional arrays of points of the upper $u_\delta(i,j)$ and lower $b_\delta(i,j)$ surfaces of a δ-parallel body are calculated by formulas (2) and (3).

3.2. The volume of a δ-parallel body V_δ is calculated by the formula (4).

3.3. The surface area S_δ of the fractal is calculated by the formula (5).

3.4. The values $log_2 \delta$ and $log_2 S_\delta$ are calculated and stored in the corresponding arrays.

4. By the method of least squares calculate the coefficient a_1 of the linear regression of the form $y = a_0 + a_1 x$ in coordinates $x = log_2 \delta;\ y = log_2 S_\delta$. The calculated value is taken as the average value of the ratio (7), which is then used in the formula (6).

5. Using formula (6), find the fractal dimension of an image or a selected fragment.

Software implementation and testing

During developing a software implementation of the above algorithm for calculating the fractal dimension, is was substantiated the choice of the Windows operating system (OS), which occupies almost 90% of the OS market for personal computers.

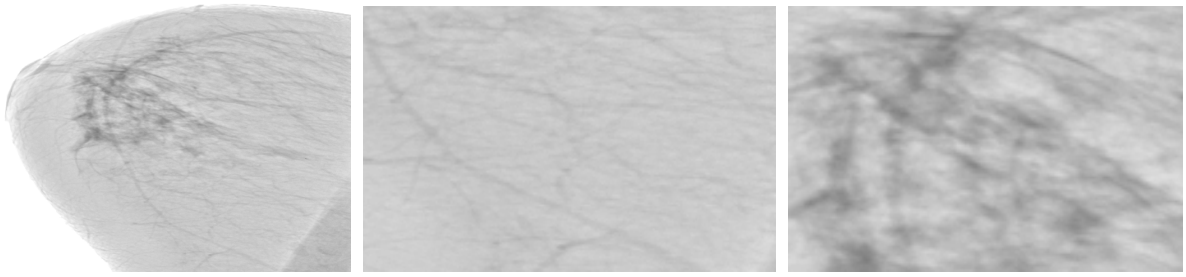
The calculations were performed using the mathematical package MATLAB [13], which provides convenient tools for developing algorithms, including high-level ones, using the concepts of object-oriented programming. It contains all the necessary IDE tools, including a debugger and profiler. In addition, MATLAB has the ability to access its built-in functions through the C interface, which allows the package functions to be used in external C applications.

The developed software product "FractalMed" is written in C# and uses a computational module for calculating the fractal dimension, which is developed in the MATLAB environment and is connected to the main program in the form of a DLL module. The software product has the following capabilities: opening an image of various formats; opening files of images of mammograms with the extension .mam; image view; approach and distance; selection of the area for calculating fractal dimension; calculation of the fractal dimension of the image.

The developed software product was tested on real mammogram images. Mammogram files in * .mam format were kindly presented by the developers of domestic mammographs - the company "Radmir", Kharkov. 60 mammograms were analyzed, among them 40 were without obvious pathologies and 20 had pathological structures of various types (tumors, intraductal formations and microcalcifications).

The fractal dimensions of the analyzed mammograms and their selected fragments were calculated. In this case, the first fragment was selected a fragment without obvious pathologies, the second was with obvious pathologies. Examples of processed medical images are shown in Fig. 1. The processing results are shown in table 1.

Table 1 shows the processing data of mammogram files: 0157.mam - without obvious pathologies; 0111.mam - pathological formation (dark spot on the mammogram) 0120.mam - microcalcifications; 0162.mam - intraductal formations.



a b c

Fig. 1. Examples of processed images a – file 0120.mam, b – fragment without pathologies of file 0120.mam, c – fragment with pathologies of file 0120.mam

Table 1 – **Results of testing of the real medical images**

File name	Fractal dimension of^		
	the whole image	a fragment without obvious pathologies	a fragment with obvious pathologies
157.mam	2,466	2,495	2,711
0111.mam	2,414	2,531	2,683
0120.mam	2,402	2,482	2,702
0162.mam	2,482	2,681	2,650

Analyzing the data of table 1, we can conclude that the fractal dimension of the whole image does not give statistically significant results on the presence or absence of pathologies; in all images, the fractal dimension lies in the range from 2.4 to 2.5. But if we make calculations of the fractal dimension on the selected fragments, then the results are very different. It is possible to trace the pattern that the more obvious pathologies on a fragment, the greater the fractal dimension.

Conclusions

The application of fractal processing of halftone medical images to identify diagnostically significant characteristics has been substantiated. A method has been developed for identifying diagnostically significant characteristics of halftone medical images based on their morphological analysis, taking into account fractal dimensions.

An algorithm for calculating the fractal dimension of medical images or selected fragments and its software implementation have been developed. The program has been tested on real mammograms.

Further research is aimed at developing a method for the classification of halftone medical images taking into account their fractal dimensions.

References

1. Avrunin, O.Gh. and Bodjansjkyj, Je.V. (2018), *Modern intellectual technologies of functional medical diagnostics*: monograph, KhNURE, Kharkiv, 236 p. (in Ukrainian).
2. Povoroznyuk, A. I. (2011), *Decision support systems in medical diagnostics. Synthesis of structured models and decision rules*, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrücken Germany, 314 p. (in Russian).
3. Povoroznyuk, A.I., Povoroznyuk, O.A. and Mumladze, G. R. (2019), "Development of a functional model of the stages of diagnostic and therapeutic measures in decision support systems in medicine", *Control, navigation and communication systems,* Issue 2 (54), PNTU, Poltava, pp.144-148 (in Russian).
4. Povoroznyuk, A.I. and Filatova, A.E. (2019), "Formalization of the problem of the matched morphological filtering of biomedical signals and images", *Information Technology in Medical Diagnostics II: Proc. of the International Scientific*, Internet Conf. «Computer Graphics and Image Processing» and the XLVIIIth International Scientific and Practical Conf. «Application of Lasers in Medicine and Biology», CRC Press, London, UK, pp. 155-162.
5. Guo, Q., Ruiz, V., Shao, J. and Guo, F. (2005), "A novel approach to mass abnormality detection in mammographic images", *Proceedings of the IASTED International Conference on Biomedical Engineering*, Innsbruck, pp. 180-185.
6. Povoroznyuk, A.I., Filatova, A.E. and Kozak, L.M. (2017), "Grayscale morphological filter based on local statistics", *The International Society for Optical Engineering*, Vol. 10445, pp. 205-214.
7. Povoroznyuk, A.I., Filatova, A.E. and Shehna, Kh. (2019), "Development of Method of Matched Morphological Filtering of Biomedical Signals and Images*", Automatic Control and Computer Sciences*, Vol. 53, No. 3, pp. 253-262.
8. Rubis, A.Yu., Lebedev, M.A., Vizil'ter, Yu.V. and Vyglov, O.V. (2016), "Morphological filtering of images based on cross-contrast", *Computer optics*, Vol. 40, No. 1, pp. 73–79 (in Russian).
9. Yu.V. Vizilter, V.S. Gorbatsevich, A.YU. Rubis, O.V. Vygolov (2015) "Comparison of images by shape using diffuse morphology and diffuse correlation", *Computer optics*, Vol. 39, No. 2, pp. 265–274 (in Russian).
10. Ajay Kumar, Bisoi and Jibitesh, Mishra (2001), "On calculation of fractal dimension of images", *Pattern Recognition Letters*, Vol. 22, Issues 6-7, pp. 631-637.
11. Ampilova, N.B., Soloviev, I.P. and Shupletsov, Yu.V. (2014), "On Fractal, Statistical and Morphological Methods of Digital Image Analysis in Medical Research", *Computer Science. Telecommunications and Control Systems*, St. Petersburg State Polytechnical University Journal, No. 1 (188), pp. 51-61.
12. Povoroznyuk, A.I. and Shekhna, K.H. (2018), "Fractal processing of digital medical images in the design of decision support systems in medicine", *Information technology and computer modeling; materials of articles of the International scientific-practical conference*, Ivano-Frankivsk, May 14-19, Ivano-Frankivsk, Mr. Goliney OM, pp. 77-80 (in Ukrainian).
13. Dyakonov, V.P. (2012), *MATLAB. Complete tutorial*, DMK-Press, Moscow, 768 p. (in Russian).

Received (Надійшла) 14.09.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.10.2020

Відомості про авторів/ About the Authors

Поворознюк Анатолій Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Anatoly Povoroznyuk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: ai.povoroznjuk@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-2499-2350.

Поворознюк Оксана Анатоліївна– кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Oksana Povoroznyuk – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: povoks@i.ua; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7524-5641.

Халед Шехна – аспірант кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Khaled Shehna – post-graduate student of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: khaled-shehna@hotmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-1698-7797

Застосування фрактальної обробки цифрових мамограм при проектуванні систем підтримки прийняття рішень в медицині

А. І. Поворознюк, О. А. Поворознюк, Х. Шехна

Анотація. Предметом дослідження є методи цифрової обробки напівтонових медичних зображень з локально зосередженими ознаками. **Об'єктом** дослідження є процес морфологічного аналізу цифрових мамограм при проектуванні систем підтримки прийняття рішень в медицині. **Метою** роботи є розробка методів і технологій виявлення діагностично значущих характеристик цифрових мамограм на основі їх морфологічного аналізу з урахуванням фрактальних розмірностей. **Завдання дослідження** - підвищення якості мамографічних обстежень пацієнток при проектуванні систем підтримки прийняття рішень в медицині шляхом розробки спеціалізованих методів морфологічного аналізу цифрових мамограм (виділення діагностично значущих елементів на тлі перешкод), заснованих на врахуванні особливостей розглянутих зображень у вигляді моделей корисних сигналів, зокрема моделей фрактальної розмірності. **Методи досліджень:** метод розрахунку фрактальної розмірності двовимірних напівтонових зображень, заданих на дискретній множині, методи об'єктно-орієнтованого програмування, методи статистичного аналізу. В результаті проведення досліджень одержано наступні **результати** : на основі аналізу відомих методів цифрової обробки зображень показана обмежена сфера їх застосування при обробці мамограм і обгрунтована актуальність розробки спеціалізованих методів морфологічного аналізу, засновані на врахуванні особливостей розглянутих зображень у вигляді моделей корисних сигналів, зокрема моделей фрактальної розмірності. Розроблено метод і алгоритм реалізації морфологічного аналізу цифрових мамограм з урахуванням їх фрактальної розмірності . Виконана програмна реалізація методу за допомогою математичного макета MatLab і тестування на реальних маммограммах. Виконана обробка мамограм без явних патологій і таких, які мають патологічні структури різних типів (пухлини, внутрішньопротокові утворення і мікрокальцинати). Була розрахована фрактальная розмірність всього зображення і виділених фрагментів. **Висновки.** Результати дослідження показали, що фрактальна розмірність всього зображення не дає статистично значущих результатів про наявність чи відсутність патологій, але якщо робити розрахунки фрактальної розмірності на виділених фрагментах, то результати сильно відрізняються. Можна простежити закономірність, що чим більше явних патологій на фрагменті, тим більше фрактальная розмірність. Подальші дослідження спрямовані на розробку методу класифікації цифрових мамограм з урахуванням їх фрактальних розмірностей.

Ключові слова: система підтримки прийняття рішень; медичне зображення; морфологічний аналіз; мамограма; фрактальна розмірність.

Применение фрактальной обработки цифровых маммограмм при проектировании систем поддержки принятия решений в медицине

А. И. Поворознюк, О. А. Поворознюк, Х. Шехна

Аннотация. Предметом исследования являются методы цифровой обработки полутоновых медицинских изображений с локально сосредоточенными признаками. **Объектом** исследования является процесс морфологического анализа цифровых маммограмм при проектировании систем поддержки принятия решений в медицине. **Целью** работы является разработка методов и технологий обнаружения диагностически значимых характеристик цифровых маммограмм на основе их морфологического анализа с учетом фрактальных размерностей. **Задача исследования** – повышения качества маммографических обследований пациенток при проектировании систем поддержки принятия решений в медицине путем разработки специализированных методов морфологического анализа цифровых маммограмм (выделение диагностически значимых элементов на фоне помех), основанных на учете особенностей рассматриваемых изображений в виде моделей полезных сигналов, в частности моделей фрактальной размерности. **Методы исследований:** метод расчета фрактальной размерности двумерных полутоновых изображений, заданных на дискретном множестве, методы объектно-ориентированного программирования, методы статистического анализа. В результате проведения исследований получены следующие **результаты**: на основе анализа известных методов цифровой обработки изображений показана ограниченная сфера их применения при обработке маммограмм и обоснована актуальность разработки специализированных методов морфологического анализа, основанные на учете особенностей рассматриваемых изображений в виде моделей полезных сигналов, в частности моделей фрактальной размерности. Разработан метод и алгоритм реализации морфологического анализа цифровых маммограмм с учетом их фрактальной размерности. Выполнена программная реализация метода с помощью математического макета MatLab и тестирование на реальных маммограммах. Выполнена обработка маммограмм без явных патологий и имеющие патологические структуры различных типов (опухоли, внутрипротоковые образования и микрокальцинаты). Была рассчитана фрактальная размерность всего изображения и выделенных фрагментов. **Выводы.** Результаты исследования показали, что фрактальная размерность всего изображения не дает статистически значимых результатов о наличии или отсутствии патологий, но если делать расчеты фрактальной размерности на выделенных фрагментах, то результаты сильно отличаются. Можно проследить закономерность, что чем больше явных патологий на фрагменте, тем больше фрактальная размерность. Дальнейшие исследования направлены на разработку метода классификации цифровых маммограмм с учетом их фрактальных размерностей.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений; медицинское изображение; морфологический анализ; маммограмма; фрактальная размерность.

Intelligent information systems

UDC 004.891.3 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.4.16**

S. Chalyi, V. Leshchynskyi, I. Leshchynska

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

A DYNAMIC EXPLANATION MODEL FOR HUMAN-COMPUTER INTERFACE

Abstract. The **subject** matter of the article is the processes of automated construction of explanations on the operation of an intelligent system for use in the human-computer interface. The **goal** is to develop a dynamic model of explanation for the human-computer interface using temporal knowledge about the process of functioning of the intelligent system. Temporal knowledge makes it possible to set possible sequences of decision-making actions in an intelligent system based on the known temporal order for pairs of such actions. **Tasks**: to develop an approach to constructing explanations for the operation of an intelligent system based on the use of temporal knowledge; development of a three-aspect model of explanations using temporal knowledge. **The approaches used** are: approaches to the construction of knowledge representation based on temporal dependencies, approaches to the construction of chatbot answers using rules, as well as with their automatic generation. The following **results** are obtained. The structuring of aspects of explanation taking into account the possibilities of their description with the help of temporal knowledge is performed; a temporal approach to constructing an explanation is proposed; a dynamic explanation model using temporal rules has been developed. **Conclusions**. The scientific novelty of the results is as follows. A temporal approach to constructing explanations for the operation of an intelligent system is proposed. The approach describes explanation as a process consisting of a temporally ordered sequence of facts. The order of time for pairs of facts is determined by temporal rules. Such rules may define the explanation process with varying degrees of detail over time, depending on the request for clarification. Detailed explanations reflect the subject area model and include the basic and alternative sequences of actions performed by the intelligent system. The explanation of the basic patterns of the intelligent system makes it possible to interpret the limitations that affect the obtained solution. The explanation of the system as a whole provides an implicit reflection of the key causal relationships, which allows you to get a simplified interpretation of the results of the intelligent system. A dynamic model of describing explanations based on temporal knowledge for use in the human-computer interface is proposed. The model takes into account the description of actions in the subject area, the patterns of these actions, as well as generalized causal relationships between such patterns. The model provides an opportunity to present the dynamics of the process of functioning of the intelligent system with the required level of detail, as well as change the level of detail to clarify the explanation at the request of the user.

Keywords: intelligent human-computer interface; intelligent system; explanation; knowledge; knowledge representation; temporal rules.

Introduction

In recent years, intelligent programs to support the human-computer interface - chatbots have become widespread in many applications [1]. They are widely used to organize interaction with customers in e-commerce systems, payment systems, marketing, education, health care, social media, etc. [2-4]. The key task that such intelligent assistants solve is to provide "smart" answers that satisfy the user's requests.

Such a program extracts the essence of the request in the form of text or voice and provides a response to the user [5]. Historically, chatbots have been designed to pass the Turing test [6, 7]. With the development of artificial intelligence methods, such programs have found practical application for automated support of interaction with users of various information systems.

Intelligent support for the human-computer interface has a number of key benefits that are the reason for the rapid development of such programs. They can work 24 hours a day, simplify navigation on the site of the information system, provide answers to FAQs, automate the collection of data from users based on a dialogue similar to a dialogue with a person [8, 9]. The chatbot program is perceived by a person as a friendly information assistant [10].

However, despite the development of such programs, today the problem of building chatbots that would offer useful information (i.e., that details, clarifies the user's request) requires further research. One of the key ways to increase the efficiency of the intelligent human-computer interface is to build explanations in an automated mode. The explanations should interpret to the user the sequence of operation of the intelligent system and the reasons for the results obtained, which the user requests.

Today, two basic approaches to building chatbots are used. The first approach uses frames and rules developed by experts. These frames specify the script of the dialogue with the user [11]. This scenario depends on a priori knowledge of the subject area. For example, in e-commerce systems, the user usually asks about the properties and benefits of recommended items. When booking seats in the restaurant, you must specify the time, contact phone number, etc.

The second approach involves the automatic generation of knowledge that meets consumer demand. Chatbot then uses this knowledge to form answers. Such answers are either selected by the program from the knowledge base [12], or generated using words from the user's query [13].

In the first case at construction the a priori set of knowledge is formed. Therefore, the chatbot generates the correct answers. But the possibilities of this approach are limited: the chatbot uses only the dependencies that have been included in the rule base.

 © Chalyi S., Leshchynskyi V., Leshchynska I., 2020

In the second case, the chatbot generates new answers that were not given a priori. The disadvantage of the second approach is that the generated responses do not always contain useful information for the user.

In general, the existing approaches give a static description of the results of the intelligent system, in particular chatbot.

To overcome such shortcomings in the construction of chatbot explanations, it is advisable to take into account not only the statics but also the dynamics of the intelligent system. Taking into account the dynamics involves the transition from declarative to procedural description of the process of functioning of the intelligent system.

Automation of the procedural description of the process of functioning of the intelligent system is provided on the basis of the use of temporal knowledge. Temporal knowledge in the form of rules sets the order in time for pairs of actions in the information system [14]. The set of rules allows to present linear sequences of actions or corresponding states of the intellectual system in the form of a sequence of facts [15]. This sequence of facts reflects the sequence of formation of the result in the intellectual system and therefore acts as an explanation. The method of inference on temporal rules, which can be used to form a sequence of facts of explanation, is proposed in [16].

However, existing approaches to the construction and use of temporal knowledge are focused mainly on decision support in intelligent systems, in particular in e-commerce systems [17-19]. Not enough attention is paid to the application of temporal knowledge to construct and explain the answers of chatbots. This indicates the relevance of the topic of this work.

The aim of the article is to develop a dynamic model of explanation for the human-computer interface, which uses the representation of temporal knowledge to build explanations of the process of functioning of the intelligent system. To achieve this goal, the following tasks are solved:

– development of the approach to construction of explanations concerning work of intellectual system on the basis of use of temporal knowledge;

– development of a three-aspect model of explanations using temporal knowledge.

Temporal approach to the construction of explanations

The explanation simplifies the interaction with the user, explaining to him the mechanism of operation of the intelligent system. The key idea in the formation of chatbot explanations based on temporal knowledge is to build an automated description of the sequence of functioning of the intelligent system.

Such a description consists of a set of temporally ordered temporal rules. The set of rules describes possible alternative processes of the intelligent system. The current process determines the current state of the intelligent system or the result of its operation as a whole. In the first case, the explanation should reflect the sequence of actions that led to the current state of the intelligent system. This sequence reflects the many causal relationships between the input data, as well as changes in the state of the system over time. In the second case, the generalized sequence of actions reflects the reasons for obtaining the result for a given input data, ie the causal relationships of the upper level.

Thus, the proposed approach to the construction of explanations of the chatbot on the basis of temporal rules provides a procedural description of the sequence of actions that reveal the process of the intelligent system. In fact, the temporal approach makes it possible to abstract from the explicit representation of causal relationships between input data, the mechanism of the intelligent system and the result of its work. Such causal connections are subject-specific. Explicit representation of causality requires the development of appropriate subject area models, or the construction by experts of a scenario based on frames and rules. This approach is quite time consuming because it requires the knowledge of experts in the subject area.

The description of the order of actions in the intellectual system on the basis of temporal rules implicitly reflects the causal links between the input information and the result. This description of time-ordered actions is unified, using the same models of knowledge representation for different subject areas. Together with the user's contextual knowledge, such ordering reveals an explanation of the algorithm of the intelligent system.

Therefore, the explanation in the form of an ordered set of temporal dependences should be considered as a simplified representation of the causal connections between the actions of the intellectual system. This explanation makes it possible to summarize the reasons and conditions for obtaining both the final and intermediate result of the intelligent system.

The explanation based on temporal knowledge has the following key aspects that are essential for the organization of the chatbot in the mode of dialogue, similar to the dialogue with the operator (Fig. 1):

– interpretation of the reasons for the decision made by the intelligent system;

– detailing of key patterns, steps and rules used by the algorithm of the intelligent system;

– disclosure of the model of the intelligent system (for example, the model of response formation).

The explanation in the first aspect sets a "superficial" causal link between the user's request and the response or solution of the intelligent system. In this aspect, the deep mechanisms of such a system are not disclosed. Instead, generalized links are formed, which should promptly satisfy the user's request. Generalized temporal connections regulate the actions of the main subsystems of the intelligent system or key objects in the subject area.

The explanation in the second aspect reveals the key schemes of decision-making and the formation of responses to consumer demand. Such key sequences of actions must be performed in all processes of forming the result of the intelligent system and therefore they play the role of temporal constraints. Disclosure of the patterns on which the information system operates should increase the confidence of the qualified user.

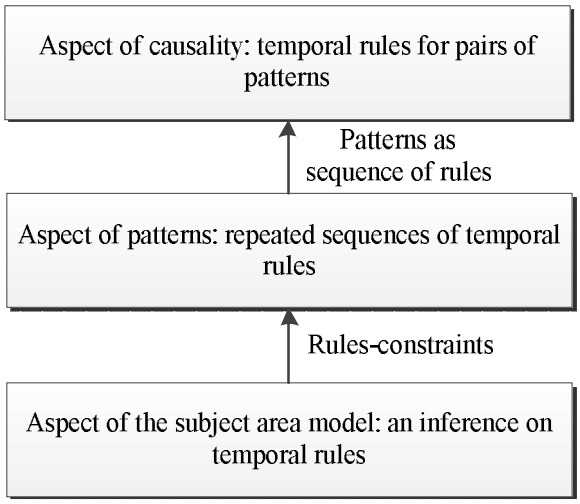


Fig. 1. Hierarchy of aspects of explanations on temporal rules

The explanation in the third aspect is intended to substantiate the correctness of important answers for critical users who want to get a detailed explanation of the result proposed by the intelligent system. Therefore, this explanation is based on the use of the model of the subject area as a whole, or models of individual objects in the subject area.

A dynamic model of explanation

The proposed approach to the formation of chatbot answers according to the given three-aspect presentation of explanations is based on the use of probabilistic inference on temporal rules.

The following rules set the order in time for a pair of states of the intelligent system, or a pair of facts about its functioning:

$$r_{i,j} : f_i \Rightarrow f_j, (\forall i \forall j) t_j > t_i, \quad (1)$$

where f_i, f_j – the facts that reflect the decisions made by the intelligent system or characterize the state of the intelligent system; t_i, t_j – moments of time when the facts f_i, f_j become true.

Each of the facts f_i captures the state of the intelligent system or the action that was performed during its operation.

According to (1), the temporal rule not only establishes a connection between the facts of the process of functioning of the intellectual system, but also sets their order in time. The facts reflect the actions that were performed in the intelligent system.

A complete description of the sequence of actions for the formation of recommendations reflects an aspect of the model of the recommendation system. This sequence is a time-ordered sequence of facts, as well as the rules that link these facts:

$$Q = \left\{ \left\langle f_1, ..., f_i, ..., f_j, ..., f_I \right\rangle, \left\{ r_{i,j} \right\} \right\}. \quad (2)$$

The sequence of facts in expression (2) reflects the decision-making process in the intelligent system. The rule organizes a couple of facts and therefore shows that after the fact f_i must be (or should be with some probability) a true fact f_j.

If the second fact is necessarily true after the first, then such a rule is considered a constraint. The following rules use the temporal quantifier A:

$$C = \left\{ Ar_{i,j} : (\forall Q) \exists r_{i,j} \right\}, \quad (3)$$

where $Ar_{i,j}$ – the restriction rule.

That is, the ordering in time for pairs of actions of the intelligent system, given by constraints, is always fulfilled.

The probability of the truth of the fact f_j after the truth of the fact f_i is determined on the basis of the weight of the rule: the greater the weight, the greater the probability of realization of the temporal rule.

The pattern is represented by a conjunction of constraint rules:

$$p_i = \bigwedge_{i=1}^{I} Ar_{i,j} \left| (\forall i) \exists r_{i,j} \right. . \quad (4)$$

According to the definition of pattern (4), the latter consists of temporal rules that specify the temporal order for all facts in the sequence:

$$p_i = \left\langle f_1, ..., f_n, ..., ..., f_N : \forall f_n \exists r_{n,j} : j > n \right\rangle. \quad (5)$$

Thus, each transition from one fact to another is explained by the corresponding temporal rule. That is, the pattern defines a continuous process on a subset of facts about the state of the subject area.

This formalization of the pattern makes it possible to present as one fact in terms of causality.

The fact of the truth of a pattern is given through the conjunction of temporal constraints, which make up this pattern:

$$p_i = \begin{cases} true, if\ Ar_{i,1} \wedge ... \wedge Ar_{i,m} \wedge ... \wedge Ar_{i,M}; \\ false, otherwise, \end{cases} \quad (6)$$

де $Ar_{i,m}$ – темпоральні обмеження.

Thus, the "superficial" explanation in terms of causality is revealed through a set of constraint rules in terms of patterns. In turn, the constraint pattern is supplemented by probabilistic rules in terms of the subject area model.

Such rules reflect differences in the decision-making process in different subject area conditions or for different sets of input data.

The temporal rule in the aspect of causality organizes in time a pair of patterns and has the form:

$$s_{l,m} : p_l \Rightarrow p_m. \quad (7)$$

Thus, in the aspect of causality, each fact reflects the result of the mandatory sequence of actions in the process of forming the decision of the intelligent system. Such facts, built on the basis of patterns, reflect the results of the subsystems of the intelligent system.

Temporal rules in all three aspects form a dynamic model of explanations:

$$K = \{Q, P, S\}, \quad (8)$$

where $P = \{p_i\}$ – a set of temporal patterns; $S = \{s_{i,m}\}$ – a set of temporal rules in the aspect of causality.

The transition between aspects is performed using constraints or artifacts.

The relationship between the aspects is as follows. First, each pattern uses constraints from the subject area model aspect.

Therefore, when constructing patterns, the condition must be met:

$$\forall p_i \in P \; \exists Ar_{i,j} \in C. \quad (9)$$

Secondly, each fact in the aspect of causality is formed on the basis of patterns. Therefore, when constructing rules in this aspect, the condition of relevance of patterns should be checked:

$$\forall s_{i,j} \in S \; \exists p_i \in P. \quad (10)$$

Consider examples of facts and rules for explanation in recommendation systems in terms of causality.

Thus, when performing collaborative filtering in recommendation systems, the fact of filtering completion may look like "Recommended for user similarity".

In that case, if the recommendation system uses a hybrid method of forming a recommended list of goods or services, the temporal rule may look like this:

$$r_{1,2}: \begin{matrix} \text{"}Recommendation \\ of\ items \\ on\ similar\ users\text{"} \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} \text{"}Recommendation \\ for\ similar\ properties \\ of\ items\text{"} \end{matrix}. \quad (11)$$

The first and second facts of rule (11) are ordered in time. Therefore, this explanation reflects a simplified causal relationship of the form: "When constructing the recommended list of goods and services, the recommendation system first selected items for similarity of users, and then clarified the recommendation for similar characteristics of goods." Each of the facts of this rule combines a number of patterns of functioning of the recommendation system.

For example, the truth of the first fact indicates the completion of the matrix factorization algorithm, which detects latent factors that characterize the similarity of users. Therefore, this rule reflects the aspect of causality in accordance with the presented in Fig. 1 scheme.

Detailing both facts in the form of a typical sequence of temporal rules describing collaborative and content filtering forms an aspect of the key patterns of explanation. In describing this aspect, the user receives an interpretation of collaborative filtering in the form of a typical sequence of actions to break the matrix of input data and identify latent factors that reflect the interests of users.

The human-computer interface that uses the proposed model has the following features.

Based on known user requests, a temporal database of explanations is formed. As facts in the aspect of the model of the subject area are the words from the query, as well as keywords that characterize the process of functioning of the intelligent system. The rules reflect the sequence of word pairs in the query as well as in the explanation.

The pattern aspect reflects the required sequences of actions to obtain the result. Such sequences are represented by chains of phrases.

In the aspect of causality, temporal rules set permissible (i.e. known from experience) sequences of pairs of phrases that generally describe the sequence of actions.

Replenishment of temporal knowledge is performed on the basis of comparison of known requests and available information about the work of the intelligent system.

Conclusions

A temporal approach to constructing explanations for the operation of an intelligent system is proposed. According to this approach, explanation is a process that has a procedural description and can be considered with varying degrees of detail over time. The use of temporal dependencies with maximum detail makes it possible to form an explanation in accordance with the process of functioning of the intelligent system.

The degree of detail of the explanations depends on the aspect in which the process of functioning of the intelligent system is considered. The explanation in the aspect of the subject area model contains detailed basic and alternative sequences of actions performed by the intelligent system. The explanation in terms of temporal patterns makes it possible to interpret the limitations used by the intelligent system. The explanation in the aspect of causality provides an implicit reflection of the key causal relationships according to their implementation over time, which allows to obtain a simplified interpretation of the results of the intelligent system.

A dynamic model of explanation presentation for human-computer interface based on temporal knowledge is proposed. The model takes into account aspects of the description of the subject area, patterns of mandatory sequences of actions, as well as the aspect of generalized causal relationships.

The model makes it possible to display the dynamics of the process of functioning of the intelligent system with the required level of detail, as well as to change the level of detail of the answers depending on the clarifying user requests.

References

1. Bansal, H. and Khan, R. (2018), "A review paper on human computer interaction", *International Journals of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, Vol. 8, pp. 53-56, DOI: https://doi.org/10.23956/ijarcsse.v8i4.630.

2. Jain, M, Kota, R., Kumar, P. and Patel, S. (2018), "Convey: Exploring the use of a context view for chatbots", *Proc. of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. CHI '18, pp. 1-6, DOI: https://doi.org/10.1145/3173574.3174042.
3. Hu, T., Xu, A., Liu, Z., You, O., Guo, Y., Sinha, V., Luo, J. and Akkiraju, R. (2018), "Touch your heart: A tone-aware chatbot for customer care on social media", *Proc. of the 2018 CHI Confe. on Human Factors in Computing Systems,* pp. 1-12.
4. Cranshaw, J., Elwany, E., Newman, T., Kocielnik, R., Yu, B., Soni, S., Teevan, J. and Monroy-Hernández, A. (2017), "Calendar.help: Designing a workflow-based scheduling agent with humans in the loop", *Proc. of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2382–2393, DOI: https://doi.org/10.1145/3025453.3025780.
5. Liao, Q., Mas-ud Hussain, M., Chandar, P., Davis, M., Khazaeni, Y., Crasso, M.P., Wang, D., Muller, M., Shami, S.N. and Geyer, W. (2018), "All work and no play?", *Proc. of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 1–3.
6. Turing, A.M. (1950), "Computing machinery and intelligence", *Mind*, Vol. LIX, Is. 236 pp. 433-460. DOI: https://doi.org/10.1093/mind/LIX.236.433.
7. Hingston, P. (2009), "A Turing test for computer game bots", *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, Vol. 1, no. 3, pp. 169-186, DOI: https://doi.org/10.1109/TCIAIG.2009.2032534.
8. Ranoliya, B.R., Raghuwanshi, N. and Singh, S. (2017), "Chatbot for university related FAQs", *International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, UDUPI, pp. 1525–1530. DOI: https://doi.org/10.1109/ICACCI.2017.8126057.
9. Higashinaka, R., Imamura, K., Meguro, T., Miyazaki, C., Kobayashi, N., Sugiyama, H., Hirano, T., Makino, T. and Matsuo, Y. (2014), "Towards an open domain conversational system fully based on natural language processing", *Proceedings of COLING 2014, the 25th International Conference on Computational Linguistics: Technical Papers*, pp. 928–939.
10. Da Costa, P.C.F. (2018), "Conversing with personal digital assistants: on gender and artificial intelligence", *Journal of Science and Technology of the Arts*, Vol. 10(3), pp. 59-72, DOI: https://doi.org/10.7559/citarj.v10i3.563
11. Mesnil, G., Dauphin, Y., Yao, K., Bengio, Y., Deng, L., Hakkani-Tur, D., He, X., Heck, L., Tur, G., Yu, D. and Zweig, G. (2015), "Using recurrent neural networks for slot filling in spoken language understanding", *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 23(3), pp. 530-539.
12. Song, Y., Li, C., Nie, J., Zhang, M., Zhao, D., and Yan, R. (2018), "An ensemble of retrieval-based and generation-based human-computer conversation systems", *Proc. of the Twenty-Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 4382-4388.
13. Serban, I. V., Sordoni, A., Bengio, Y., Courville, A. and Pineau, J. (2016), "Building end-to-end dialogue systems using generative hierarchical neural network models", *Proc. of the Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, AAAI'16, pp. 3776-3783.
14. Chala, O. (2018), "Logical-probabilistic representation of casual dependencies between events in business-process management", *Advanced information systems*, Vol. 2, No. 2, pp. 40-44, DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.07
15. Levykin, V. and Chala, O. (2018), "Method of automated construction and expansion of the knowledge base of the business process management system", *EUREKA: Physics and Engineering*, Vol. 4(17), pp. 29-35, DOI: http://dx.doi.org/10.21303/2461-4262. 2018.00676.
16. Levykin, V and Chala, O. (2018), "Development of a method of probabilistic inference of sequences of business process activities to support business process management", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 5/3(95), pp. 16-24, DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142664.
17. Chalyi, S. and Leshchynskyi, V. (2020), "Method of constructing explanations for recommender systems based on the temporal dynamics of user preferences", *EUREKA: Physics and Engineering*. Vol. 3, pp. 43-50.
18. Chalyi, S., Leshchynskyi, V. and Leshchynska, I. (2019), "Method of forming recommendations using temporal constraints in a situation of cyclic cold start of the recommender system", *EUREKA: Physics and Engineering*, Vol. 4, pp. 34-40.
19. Chalyi, S., Leshchynskyi, V. and Leshchynska, I. (2019), "Designing explanations in the recommender systems based on the principle of a black box", *Advanced Information Systems*, Vol. 3, No. 2, pp. 47-51, DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.2.08.

Надійшла (received) 25.09.2020
Прийнята до друку (accepted for publication) 11.11.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Чалий Сергій Федорович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Serhii Chalyi – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Professor of Information Control Systems Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: serhii.chalyi@nure.ua; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-9982-9091.

Лещинський Володимир Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Volodymyr Leshchynskyi – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Software Engineering Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: volodymyr.leshchynskyi@nure.ua; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-8690-5702.

Лещинська Ірина Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Iryna Leshchynska – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Software Engineering Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail iryna.leshchynska@nure.ua; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-8737-4595.

Динамічна модель представлення пояснень для людино-машинного інтерфейсу

С. Ф. Чалий, В. О. Лещинський, І. О. Лещинська

Анотація. **Предметом** вивчення в статті є процеси автоматизованої побудови пояснень щодо роботи інтелектуальної системи для використання у людино-машинному інтерфейсі. **Метою** є розробка динамічної моделі пояснення для людино-машинного інтерфейсу з використанням темпоральних знань щодо процесу функціонування інтелектуальної системи. Темпоральні знання дають можливість задати можливі послідовності дій з прийняття рішення в інтелектуальній системі на основі відомої темпоральної упорядкованості для пар таких дій. **Завдання**: розробка підходу до побудови пояснень щодо роботи інтелектуальної системи на основі використання темпоральниих знань; розробка трьохаспектної моделі пояснень з використанням темпоральних знань. Використовуваними **підходами** є: підходи до побудови представлення знань на основі темпоральних залежностей, підходи до побудови відповідей чатбота з використанням правил, а також із їх автоматичною генерацією. Отримані наступні **результати**. Виконано структуризацію аспектів пояснення з урахуванням можливостей їх опису за допомогою темпоральних знань; запропоновано темпоральний підхід до побудови пояснення; розроблено динамічну модель пояснення, що використовує темпоральні правила. **Висновки**. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному. Запропоновано темпоральний підхід до побудови пояснень щодо роботи інтелектуальної системи. Підхід описує пояснення як процес, що складається із темпорально упорядкованої послідовності фактів. Порядок у часі для пар фактів задається темпоральними правилами. Такі правила можуть визначати процес пояснення із різним ступенем деталізації у часі, в залежності від запиту на пояснення. Детальні пояснення відображають модель предметної області і містять у собі базові та альтернативні послідовності дій, що виконує інтелектуальна система. Пояснення базових патернів роботи інтелектуальної системи дає можливість інтерпретувати обмеження, які впливають на отримане рішення. Пояснення роботи системи в цілому забезпечує неявне відображення ключових причинно-наслідкових залежностей, що дозволяє отримати спрощену інтерпретацію результатів роботи інтелектуальної системи. Запропоновано динамічну модель опису пояснень на основі темпоральних знань для використання у людино-машинному інтерфейсі. Модель враховує опис дій у предметної області, патерни цих дій, а також узагальнені причинно-наслідкових зв'язки між такими патернами. Модель забезпечує можливість представлення динаміки процесу функціонування інтелектуальної системи із необхідним ступенем деталізації, а також зміну рівня деталізації для уточнення пояснення за запитом користувача.

Ключові слова: інтелектуальний людино-машинний інтерфейс; інтелектуальна система; пояснення; знання, представлення знань; темпоральні правила.

Динамическая модель представления объяснений для человеко-машинного интерфейса

С. Ф. Чалый, В. А. Лещинский, И. А. Лещинская

Аннотация. Предметом изучения в статье являются процессы автоматизированного построения объяснений относительно функционирования интеллектуальной системы для использования в человеко-машинном интерфейсе. **Целью** является разработка динамической модели объяснения для человеко-машинного с использованием темпоральных знаний о процессе функционирования интеллектуальной системы. Темпоральные знания дают возможность задать возможные последовательности действий по принятию решения в интеллектуальной системе на основе известной темпоральной упорядоченности для пар таких действий. **Задачи**: разработка подхода к построению объяснений относительно работы интеллектуальной системы на основе использования темпоральниих знаний; разработка трехаспектной модели объяснений с использованием темпоральных знаний. Используемыми **подходами** являются: подходы к построению представления знаний на основе темпоральных зависимостей, подходы к построению ответов чатбота с использованием правил, а также с их автоматической генерацией. Получены следующие **результаты**. Выполнена структуризация аспектов объяснения с учетом возможностей их описания с помощью темпоральных знаний; предложен темпоральный подход к построению объяснения; разработана динамическая модель объяснения, которая использует темпоральные правила. **Выводы**. Научная новизна полученных результатов заключается в следующем. Предложен темпоральный подход к построению объяснений относительно функционирования интеллектуальной системы. Подход описывает объяснение как процесс, состоящий из темпорально упорядоченной последовательности фактов. Порядок во времени для пар фактов задается темпоральными правилам. Такие правила могут определять процесс объяснения с разной степенью детализации во времени, в зависимости от запроса на объяснения. Подробные объяснения отражают модель предметной области и включают в себя базовые и альтернативные последовательности действий, которые выполняет интеллектуальная система. Разъяснение базовых паттернов работы интеллектуальной системы дает возможность интерпретировать ограничения, которые влияют на полученное решение. Разъяснение работы системы в целом обеспечивает неявное отображение ключевых причинно-следственных зависимостей, позволяет получить упрощенную интерпретацию результатов работы интеллектуальной системы. Предложена динамическая модель описания объяснений на основе темпоральных знаний для использования в человеко-машинном интерефейсе. Модель учитывает описание действий в предметной области, паттерны этих действий, а также обобщенные причинно-следственных связи между такими паттернами. Модель обеспечивает возможность представления динамики процесса функционирования интеллектуальной системы с необходимой степенью детализации, а также изменение уровня детализации для уточнения объяснения по запросу пользователя.

Ключевые слова: интеллектуальный человеко-машинный интерфейс; интеллектуальная система; объяснения; знания; представления знаний; темпоральные правила**.**

Methods of information systems protection

UDC 004.056 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.4.17**

Vladyslav Chernysh

Non-governmental organization "Civil Aviation of Ukraine", Kyiv, Ukraine

MODEL OF FUNCTIONAL HAZARD ASSESSMENT IN AIR TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEM REGARDING INFORMATION SECURITY THREATS

Abstract. The threat to information security for the air navigation service providers represents a potential violation of information security of the information infrastructure elements in the air traffic management system such as communications, navigation and surveillance equipment, and the information and telecommunication systems. Typically, a threat results from the presence of vulnerable components in the protection of information technology as part of air navigation service providers' activity. Most of the approaches and techniques of international aviation organizations and best-practices of air navigation service providers are focused on developing risk methods and models regarding aviation safety. A well-known problem with aviation safety risk assessment is that it does not take into account the information and cyber security threats. **The subject** of the article is exploration of methods and models for risk assessment of air navigation service providers. **The purpose** is the development of model of functional hazard assessment and set of information security requirements for air navigation service providers. The proposed model of functional hazard assessment differs from the known by detailing of information security sphere. The software model of functional hazard assessment was developed via MATLAB Fuzzy Logic Toolbox. **Practical significance** is that the obtained results allow air navigation service providers to make better decisions regarding management systems maturity improvement.

Keywords: air navigation service provider; air traffic service; risk; safety; air traffic management; information security; threats.

Introduction

The first thing that needs to be said is that the activities of the air navigation service provider (ANSP) are organized using information and telecommunication systems (ITS) for the realization of operation activity – core processes.

Awareness of the problem of air traffic management (ATM) infrastructure security risk management has led ANSP to define risk management strategies for aviation safety, ATM security (including cyber and information security), occupational safety, etc.

Prevention of aviation accidents and incidents related to operational activities in the provision of air navigation services is a desirable result of ANSP activities.

The term "aviation safety (safety)" is generally understood to mean the state in which risks associated with aviation activities, related to, or in direct support of the operation of aircraft, are reduced and controlled to an acceptable level [1].

While the term "ATM security" is defined the safeguarding of the ATM system (functional system) from security threats and vulnerabilities; and the contribution of the ATM system to civil aviation security, national security and defence, and law enforcement [2].

Nowadays, the requirements for safety risk assessment are set at the state level [3-5] and include:

- risk assessment of changes in ATM system (functional system);
- assessment of existing risks in the ATM system based on the results of monitoring and analysis;
- risk assessment performed on the basis of post safety related occurrences and (or) on the results of investigation thereof.

In addition to this ANSP must establish risk assessment procedure regarding ATM security (including information security).

It should be noted that research has tended to focus on Safety risk assessment rather than ATM Security risk assessment. Without a doubt, taking into account current trends in the field of ANSP digital transformation, the problem of information and cyber security risk assessment (as a part of ATM Security) is actual and poorly research.

This article considers the field of safety and ATM security risk assessment as the main subject of its study.

By and large, ATM system infrastructure protection is described as a set:

$$ATM_{\text{sec}} = \{InfSEC, PhSEC, HrSEC\}, \quad (1)$$

where $InfSEC$ –information security – the application of security measures to protect information and data processed, stored or transmitted in ITS and communication, navigation and surveillance (CNS) equipment against loss of integrity, confidentiality and availability, whether accidental or intentional, and to prevent loss of integrity or availability of the systems themselves; $PhSEC$ – physical security – the part of security concerned with physical measures designed to safeguard people and prevent unauthorized access to CNS equipment, facilities, material and documents [2]; $HrSEC$ – personnel security – the part of security concerned with procedures designed to assess whether an individual can, taking into account his loyalty, trustworthiness and reliability, be authorized to have initial and continued access to classified information and controlled areas without constituting an unacceptable risk to security.

Analysis of the literature [6, 7] showed that there are global vision for the problem of cybersecurity in

 © Chernysh V., 2020

aviation industry, however, there aren't any practical examples regarding the impact of information and cyber security threats on aviation safety.

Aviation safety risk assessment procedure is regulated by the relevant requirements and international standards. ANSP usually uses a number of techniques and methods recommended by International Civil Aviation Organization (ICAO) [1] and The European Organization for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL) [8] for risk assessment and mitigation.

Nevertheless, these methods haven't been adopted to assess ATM security risks. One of the most complicated task during risk assessment is to identify information security threats and hazard in ATM system. It happens due to a limitation of research and statistic data.

The work [12] shows us the research of information space and information flows of ANSP. The proposed functional model [12] is necessity for information threats identification and safety hazard assessment procedure.

The purpose of the article is the development of a functional hazard assessment model regarding information security as a part of ATM security risk management method which can be implemented by ANSP.

As a result, it provides ANSP an opportunity to increase the effectiveness of risk management to ensure information security and cyber security at the levels of the organization and information system.

Risk management is a key component of safety and ATM security management and includes aviation safety hazard identification, risk assessment, risk mitigation and risk acceptance.

The proposed model of functional hazard assessment regarding information security

The ICAO Manual [1] highlights the importance of distinguishing between hazards (the potential to cause harm) and risk (the likelihood of that harm being realized during a specified amount of risk exposure).

The risk assessment is connected with studies and identification of possible hazards associated with operation of ATM system.

The risk assessment is based on the evaluation of the criteria is described as a set:

$$SC_r = \left\{ Sev_{HAZ}, Pr_{OCC}, Tol_{ef} \right\}, \quad (2)$$

where Sev_{HAZ} – the severity of a hazard; Pr_{OCC} – the probability (frequency) of its occurrence; Tol_{ef} – tolerability of its effects.

The aim of functional hazard assessment is the identification of: a list of hazards (*HAZ*) and causes (*CAU*); effects on the operational activities of ANSP (*Ef*); severity of potential hazards.

The first stage of functional hazard assessment for the ANSP is to identify the causes of their occurrence in the ATM system.

ATM system information infrastructure consists of elements and it is described as a set:

$$ATMinf = \left\{ ATCSys, ITS, VCS, SUR, COM \right\}, \quad (3)$$

where $ATCSys$ – Automated Air Traffic Control Systems; ITS – Information and Telecommunication Systems; VCS – Voice Communication Systems; SUR – Surveillance Systems; COM – Communication Systems.

The block diagram of the relationship between information security risk assessment and aviation safety is presented in Fig. 1.

A comparative analysis of ICAO and EUROCONTROL severity classes names [1, 9] is given in Table 1.

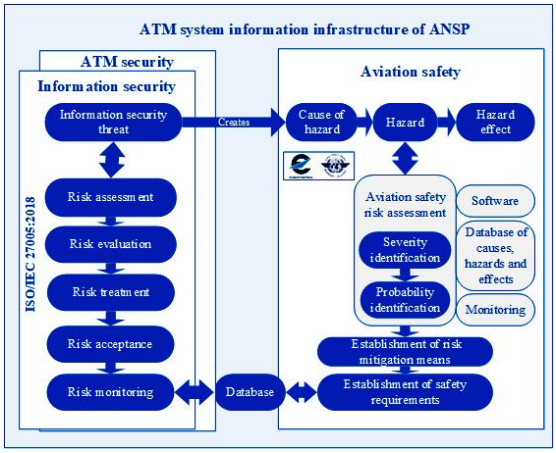


Fig. 1. Structural diagram of the relationship between information security and safety

Table 1 –**Comparative analysis of severity classes names**

Severity classes names		Number of classes
ICAO [1]	**EUROCONTROL [9]**	
Catastrophic	Accident	1
Hazardous	Serious Incident	2
Major	Major Incident	3
Minor	Significant Incident	4
Negligible	No Safety Effect	5

The list of identified typical causes of hazards, hazards and effects associated with information security threats is presented in tabl. 2 – 4.

Assessment of the severity class of the identified hazards (*HAZ*) was performed using classification schemes in ATM system [9-11]. This assessment was made by experts in a formalized view in accordance with the scheme [1, 5].

Table 2 – **The list of identified causes of hazard**

***ATMinf* elements**	**Causes of hazard**	
	ID	**Description**
ATC Sys	*Cau01*	Radar data pre-processing subsystems failure
	Cau02	Radar data processing (RDP) subsystems failure
COM	*Cau03*	Aeronautical ground telecommunication facilities failure

ATMinf elements	Causes of hazard	
	ID	Description
ATC Sys	Cau04	Flight data processing (FDP) servers failure
	Cau05	Failure of aeronautical fixed telecommunication network (AFTN) channels
	Cau06	Online Data Interchange (OLDI) server failure
ATC Sys ITS	Cau07	Local Area Network (LAN) failure
ATC Sys	Cau08	Data recording and playback server failure
	Cau09	External time reference system failure
	Cau10	Equipment failure of one of the two workplaces
VCS	Cau11	Voice communication systems failure
SUR	Cau12	Surveillance systems failure
COM	Cau13	Communication equipment failure
ITS	Cau14	AFTN equipment failure
	Cau15	Reducing the capacity of AFTN channels
ATC Sys	Cau16	Safety Nets (SNET) servers failure
	Cau17	Equipment failure of two workplaces

Table 3 – **The list of identified hazards**

Елемент *ATMinf*	Hazard	
	ID	Description
ATC Sys ITS SUR	HAZ01	Complete loss of surveillance systems data
ATC Sys ITS SUR	HAZ02	Partial loss of surveillance systems data
ATC Sys ITS	HAZ03	Partial loss of flight data
ATC Sys ITS	HAZ04	OLDI unavailability
ATC Sys	HAZ05	SNET and Monitoring Aids (MONA) unavailability
ATC Sys	HAZ06	Complete or partial loss of recording and playback data
ATC Sys	HAZ07	Complete loss of Air Traffic Control System (ATCS) data in the workplace
VCS ITS COM	HAZ08	Complete / partial loss of “air-ground” communication for more than 5 minutes
ATC Sys	HAZ09	Loss of automatic coord. functions.
ITS	HAZ10	Loss of automatic updating function of System Flight Plans (SFPLs) and airspace use restrictions.
ATC Sys	HAZ11	Unavailability information from external time reference system
ITS ATC Sys	HAZ12	Loss of automatic radar and planned data correlation
ATC Sys	HAZ13	Complete loss of ATCS data
ATC Sys ITS	HAZ14	Loss of the function of automatic updating of flight plans, airspace use restrictions, NOTAM

Table 4 – **The list of identified effects**

ID	Description
Ef01	Serious inability to ensure safety
Ef02	Surveillance data unavailability on ATCS workplaces
Ef03	Significant workload on air traffic controllers
Ef04	Significant reduction of air traffic service (ATS) sectors capacity
Ef05	Separation minima infringement
Ef06	Partial surveillance data unavailability on ATCS workplaces
Ef07	Significant workload on air traffic controllers in certain sectors
Ef08	Significant reduction of certain air traffic service sectors capacity
Ef09	Workload on air traffic controllers
Ef10	Restrictions on the provision of planning information required for ATS
Ef11	Unavailability to modify airspace use restrictions and availability of ATS routes
Ef12	Planning information irrelevance
Ef13	Partial loss of flight data
Ef14	Aeronautical Information Service (AIS) information unavailability
Ef15	Lack of automatic modification of airspace use restrictions and availability of ATS routes
Ef16	No warnings of SNET
Ef17	Impossibility to identify aircraft via surveillance systems
Ef18	Lack of correlated radar and planning data
Ef19	Lack of recording and playback data
Ef20	Desynchronization of external time reference system data
Ef21	Disappearance of data at the air traffic controllers workplace
Ef22	ATS sectors capacity reduction
Ef23	Significant reduction of defined air traffic service sectors capacity
Ef24	Significant separation minima infringement

Analytic hierarchy process [13-15] was applied for quality and quantity hazard functional assessment.

Table 5 and Fig. 2, 3 demonstrate the generalized results of the functional assessment of the severity classes of the identified hazards that are associated with information security threats. EUROCONTROL [8,9] and ICAO [1] safety risk classification schemes were applied.

According to the results of the analysis of identified hazards (Fig. 2) we can conclude that four hazards have a second class of severity – a serious incident, two hazards have a third class of severity – a major incident, six hazards – a fourth class (significant incident) and two hazards no safety effect.

Serious incidents are [9]:

- large reduction in separation (e.g., a separation of less than half the separation minima), without crew or ATC fully controlling the situation or able to recover from the situation;

- one or more aircraft deviating from their intended clearance, so that abrupt manoeuvre is required to avoid collision with another aircraft or with terrain (or when an avoidance action would be appropriate).

Table 5 – **Functional hazard assessment results**

Hazard ID	Severity	Probability	Safety objective
HAZ01	Class 2 – Serious Incident / Hazardous	Improbable	Hazard can happen once in 3 years
HAZ08			
HAZ11			
HAZ12			
HAZ02	Class 3 – Major Incident / Major	Remote	Hazard can happen once in 6 months
HAZ13			
HAZ03	Class 4 - Significant Incident / Minor	Occasional	Hazard can occur once every 10 days
HAZ05			
HAZ07			
HAZ09			
HAZ10			
HAZ14			
HAZ04	Class 5 - No Safety Effect / Negligible	Frequent	
HAZ06			

The software model of functional hazard assessment regarding information security

In order to rectify the problem of automation and visualization the process of safety risks assessment regarding information security threats, a software (program model) was developed via MATLAB Fuzzy Logic Toolbox [16, 17]. ICAO method for safety risk assessment was taken as a basis [1] and this method was improved in order to take into account the impact of information security threats on the ANSP activities.

The following parameters were taken into account when assessing the safety risk (acceptability) based on the use of a fuzzy network:

A_n – measure of the causes of the hazard regarding information security threats;

SAF_P – hazard severity;

SAF_P – hazard probability;

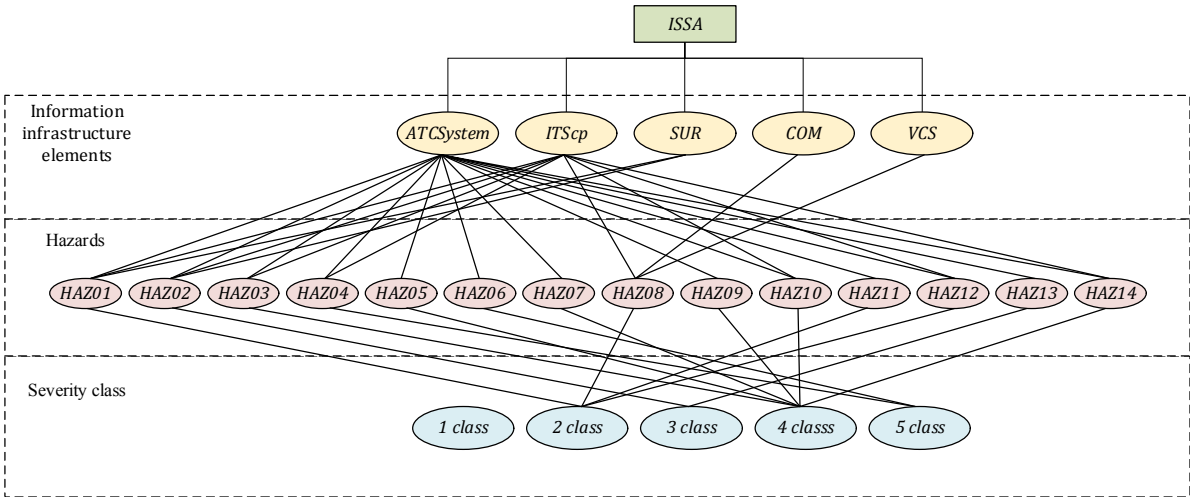


Fig. 2. Hierarchical model of qualitative functional risk assessment

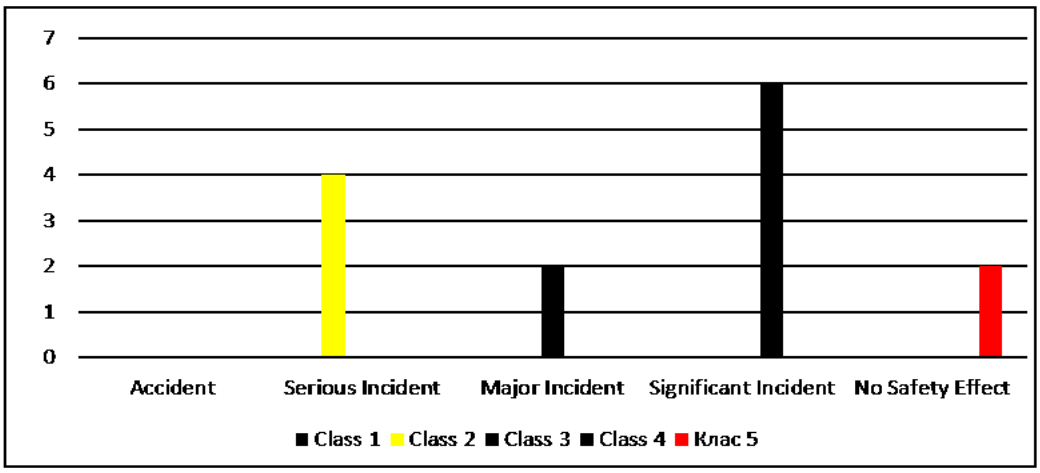


Fig. 3. Distribution of identified hazards by severity classes

Table 6 shows the qualitative and quantitative indicators of the above parameters.

A fuzzy network (Takagi-Sugeno-Kanga model) with an appropriate structure and the necessary set of parameters has been developed for the software model for safety risk assessment associated with (Fig. 4) [18-20].

Risk_tolerability – the value of safety risk, calculated as follows:

$$SAF\_R = (A_n + SAF\_P + SAF\_S)/3 \quad (4)$$

The input data (SAF_R) is a given scale of risk acceptability, which consists of three levels according to the safety risk assessment ICAO method [1] (acceptable, tolerable, intolerable). The graphical interface of the program for viewing the rules is presented in Fig. 5.

Table 6 – **Qualitative and quantitative indicators**

Symbol	Qualitative representation	Quantitative representation
A_n	Very low	$A_n = 0{,}2$
	Low	$A_n = 0{,}4$
	Average	$A_n = 0{,}6$
	High	$A_n = 0{,}8$
	Very High	$A_n = 1$
SAF_S	Negligible	$SAF\_S = 0{,}2$
	Minor	$SAF\_S = 0{,}4$
	Major	$SAF\_S = 0{,}6$
	Hazardous	$SAF\_S = 0{,}8$
	Catastrophic	$SAF\_S = 1$
SAF_P	Extremely improbable	$SAF\_P = 0{,}2$
	Improbable	$SAF\_P = 0{,}4$
	Remote	$SAF\_P = 0{,}6$
	Occasional	$SAF\_P = 0{,}8$
	Frequent	$SAF\_P = 1$

The appearance of the output surfaces of the fuzzy set rules is shown in Fig. 6.

Here we solve several problems simultaneously. The above visualization can provide information security experts information regarding risk acceptability at the level of ANSP.

Quantitative safety risk assessment associated with information security threats was performed using mathematical expression (4), Fuzzy Logic software and fuzzy inference rules. Based on the assessment results, a hierarchical model for safety risks was built (Fig.7). According to ICAO scale [1] for hazards *HAZ*01 – *HAZ*14 the risk tolerability is set as tolerable. Tolerable risk can be tolerated based on the safety risk mitigation. It may require management decision (information security requirements) to accept the risk.

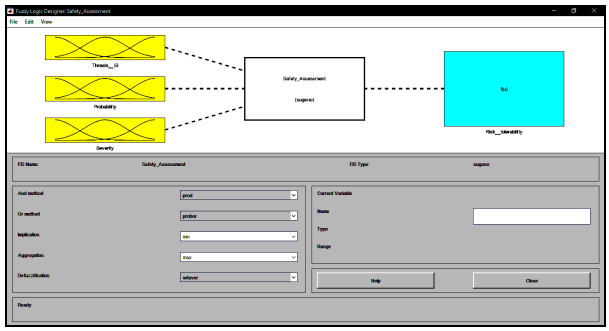


Fig. 4. The general structure of a fuzzy safety risk assessment network

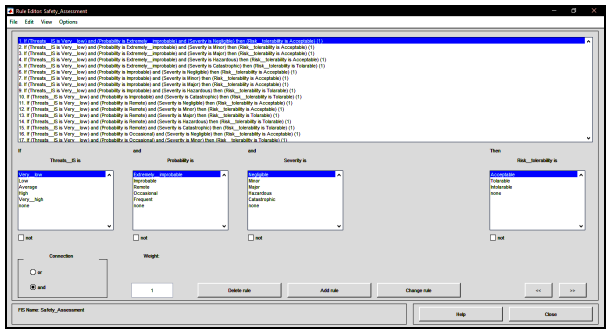


Fig. 5. Fuzzy network rule editor interface

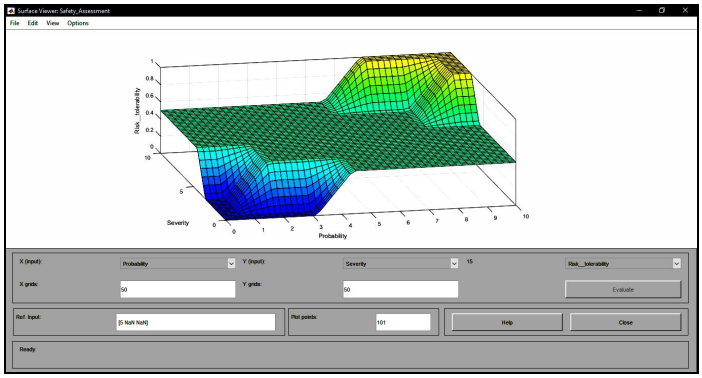


Fig. 6. Fuzzy set rule output surface viewer

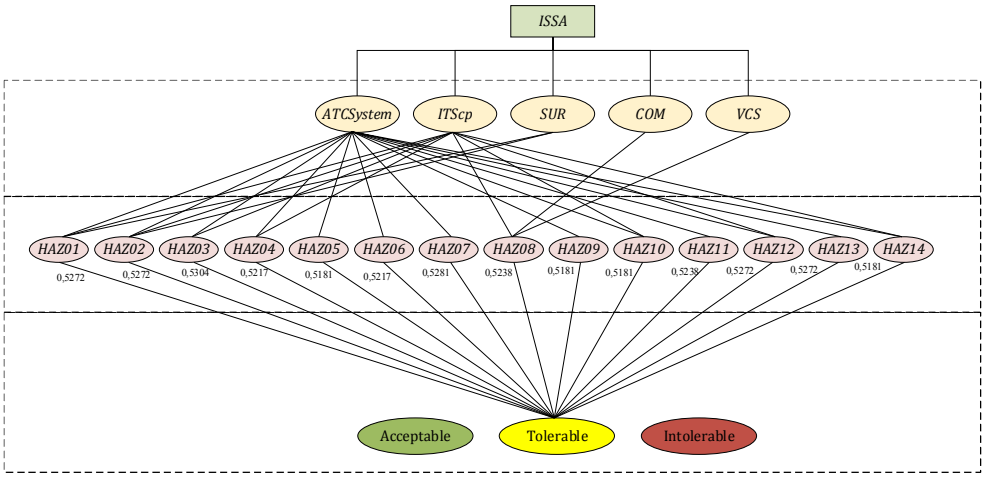


Fig. 7. Hierarchical model of safety risk assessment

The proposed set of information security requirements for air navigation service providers

Information security requirements (ISR) must be established in order to get acceptable safety risk tolerability.

A list of such ISR is offered (Table 7).

Table 7 – **The list of proposed ISR**

ID	Description
ISR01	ANSP must introduce an information security risk management process within the ANSP risk management system.
ISR02	ANSP must implement a risk-oriented approach and security measures in accordance with ISO/IEC 27001 (Annex A) and ISO / IEC 27002.
ISR03	ANSP must define all critical business processes as a minimum scope of information security management system (ISMS). ANSP has the right to expand the scope of ISMS.
ISR04	ANSP must form a security management division for ISMS implementation and operation or delegate to existing ANSP management division. ANSP must develop regulations on this management division. The regulation should include a clear tasks, functions and responsibilities for information security risk management.
ISR05	ANSP must develop and implement an information security policy (ISP). ISP should include following: 1) information security goals; 2) the scope of information security policy; 3) principles, rules and requirements of information security in the ANSP departments and divisions; 4) definition of functions (roles) and responsibilities for information security.
ISR06	ANSP must support the information security policy and review it at least once a year.
ISR07	ANSP must approve the information security policy and communicate its content to all personnel and, if necessary, to third parties.
ISR08	ANSP must develop and approve an information security development strategy.
ISR09	ANSP must develop and approve a business continuity plan and contingency plan. These plan takes into account the continuity of information security measures as part of the ANSP business continuity management process.
ISR10	ANSP must appoint a Chief Information Security Officer (CISO). CISO provides: 1) strategic management for information security at the level of ANSP; 2) determination of directions for the development of information security; 3) compliance of information security measures with the business processes of ANSP; 4) control over the implementation of information security measures in ANSP departments.
ISR11	ANSP must familiarize employees with the information security policy of the ANSP when hiring.
ISR12	ANSP must familiarize employees with internal documents establishing information security requirements.
ISR13	ANSP must implement information security awareness / training program for employees
ISR14	ANSP must introduce measures to control access to information infrastructure facilities.
ISR15	ANSP must develop and implement a policy for the use of cryptographic tools to protect information.
ISR16	ANSP must define a standard reference time source and ensure that operating systems are synchronized with it.
ISR17	ANSP must develop and implement information security measures regarding wireless data transmission networks.
ISR18	ANSP must ensure the placement of servers and equipment providing the ANSP services in the demilitarized zone of ANSP information infrastructure.
ISR19	ANSP must develop and approve internal documents that establish requirements for information security, maintenance, operation of CNS equipment
ISR20	ANSP must develop and approve a document on the use of email.

Taking into account the implemented ISR, the functional hazard assessment is shown in Fig. 8.

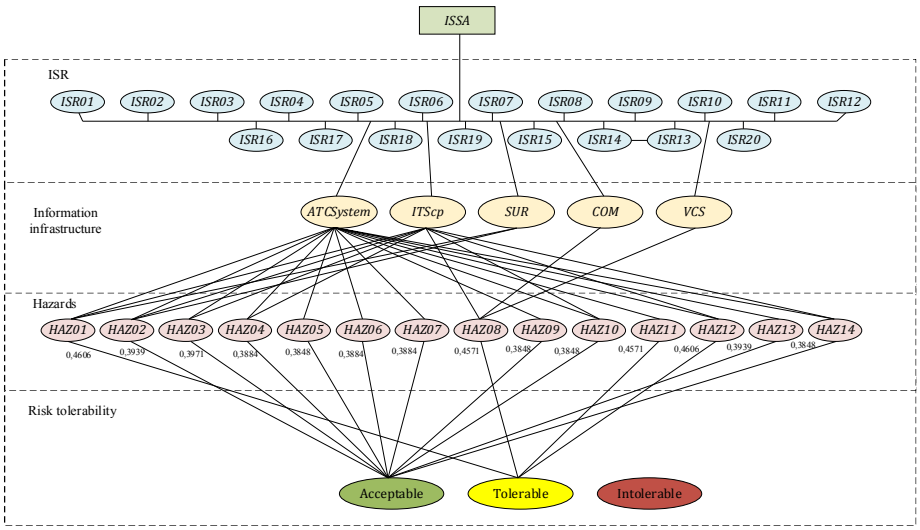


Fig. 8. Hierarchical model of safety risk assessment with implemented ISR

These techniques have potential to solve contemporary problems in safety risk assessment regarding information security. Considering the results obtained from studies evaluating fourteen hazards, it can be concluded that the risk tolerability for ten hazards has become acceptable.

Overall, our results demonstrate a strong effect of ISR. Nevertheless, for *HAZ*01, *HAZ*08, *HAZ*11, *HAZ*12 risk tolerability is still tolerable. This aspect of the research suggested that ANSP must monitor these hazards and causes.

Conclusions

The article indicates that the problem of risk assessment regarding information security is actual at the level of ANSP. As far as we know, no previous research has investigated the influence information security threats on safety. This remains an open problem in this area.

The number of typical safety hazards is possible to identify using the proposed model of functional hazard assessment.

It becomes possible to establish severity classes according to the EUROCONTROL and ICAO scales for all identified hazards.

A qualitative and quantitative hazard assessment, risk tolerability, information security requirements has been carried out.

On this basis, we conclude that the most critical identified hazards for safety are:

*HAZ*01 – complete loss of surveillance systems data;

*HAZ*08 – complete / partial loss of "air-ground" communication for more than 5 minutes;

*HAZ*11 – unavailability information from external time reference system;

*HAZ*12 – loss of automatic radar and planned data correlation.

The software model for safety risk assessment has been developed on MATLAB Fuzzy Logic Toolbox. The model allows obtaining values (quantitative and qualitative) on the acceptability of safety risks in the event of information security threats.

A set of rules for fuzzy inference was formulated and it covers all possible combinations of input variables and contains 125 rules for safety risk assessment.

Additionally, this model is appropriate for safety risk assessment regarding changes in ATM system of ANSP.

The implementation of these risk assessment models allows ANSP to make organizational and technical decisions. Furthermore, the implementation will allow ANSP to:

- increase the level of information security maturity of ANSP operating divisions;
- increase the level of maturity of ATM security system;
- identify of information infrastructure elements vulnerabilities;
- identify of potential safety hazards, their causes and effects;
- organize and protect of ANSP information infrastructure from various types of information and cyber security threats;
- reduce the likelihood of information and cyber threats, conditions or circumstances that can cause an aircraft accident or incident;
- eliminate of incidents and unacceptable risks.

Regardless, future research could continue to develop web-application (online toolkit) for information risk assessment of ANSP.

References

1. *ICAO Safety Management Manual* (2018), Doc.9859 Fourth Edition.
2. *ICAO Air Traffic Management Security Manual* (2013), Doc.9985 First edition.
3. *Air Code of Ukraine* (2011), 19.05.2011 No. 3393-VI.
4. *Rules for Certification of Entities Providing Air Navigation Services* (2007), Order of the Ministry of Transport and Communication of Ukraine No. 42 dated 22.01.2007 (registered, Ministry of Justice of Ukraine on 07.02.2007 No. 104/13371).
5. *Regulation for Safety Oversight in Air Traffic Management System* (2010), approved by the Order of Ministry of Transport and Communications of Ukraine No. 320 dated on 31.05.2010 (registered, Ministry of Justice of Ukraine on 30.06.2010 No. 446/17741).
6. *ICAO Aviation Cybersecurity Strategy* (2019), available at: https://www.icao.int/cybersecurity/Pages/Cybersecurity-Strategy.aspx.
7. *CANSO Standard of Excellence in Cybersecurity* (2020), available at: https://canso.fra1.digitaloceanspaces. com/ uploads/2020/09/CANSO-Standard-of-Excellence-in-Cybersecurity.pdf.
8. *EUROCONTROL; Safety Assessment Methodology* (2006), Version 2.1, November 2006.
9. *ESARR4: Risk Assessment and Mitigation in ATM* (2001), available at: https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-06/esarr4-e10.pdf.
10. *Acceptable means of compliance with ESARR 4* (2009), available at: https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-06/eam4-amc-e4.0.pdf.
11. *ED 125*, Process for Specifying Risk Classification Scheme and Deriving Safety Objectives in ATM "in compliance" with ESARR 4.
12. Chernysh V. I. (2020) "Research of information space and information flows of air navigation service providers", *Telecommunication and information technology,* vol. 2 (2020), pp. 51 – 59.
13. Chernysh V.I., Zamula A.A. (2012) "Analytic hierarchy process for information risks assessment", *Scientific and technical conference with international participation "Computer modeling in high technology (KMNT-2012)". Conference materials*, pp. 145-149.

14. Chernysh V.I. (2012) "Methodology for assessing information risks using Analytic hierarchy process" *Radio electronic and computer systems,* Vol.1 (53), pp. 46 – 50.
15. Saaty, Thomas, Alexander, Joyce (1989), *Conflict Resolution: The Analytic Hierarchy Process*. New York, New York: Praeger.
16. Shtobva S. D. (2007), *Design of fuzzy systems using MATLAB*, Hot line – Telecom, 288 p.
17. Leonenkov A.V. (2005), *Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH*, BHV-Petersburg, 736 p.
18. Jin Y., Seelen W., Sendhoff B. (1999), "On generating flexible, complete, consistent and compact (FC3) fuzzy rules from data using evolution strategies", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, No. 29 (4). pp. 829-845.
19. Sommestad T., Ekstedt M., Johnson P.A. (2010), "Probabilistic relational model for security risk analysis", *Computer & Security*, Vol. 29, No. 6. pp. 659-679.
20. Sug B., Han I. (2003), "The IS risk analysis based on business model", *Information and Management*, Vol. 41, No. 2. pp. 149-158.

Надійшла (received) 28.07.2020
Прийнята до друку (accepted for publication) 07.10.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА / ABOUT THE AUTHOR

Черниш Владислав Ігорович– голова правління громадської організації «Цивільна авіація України», Київ, Україна;
Vladyslav Chernysh– Chairman of the Board, Non-governmental organization "Civil Aviation of Ukraine", Kyiv, Ukraine;
e-mail: v.chernysh@aviation.org.ua; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-0443-1946.

Модель функціональної оцінки небезпек в системі організації повітряного руху щодо реалізації загроз інформаційної безпеки

В. І. Черниш

Анотація. Загроза інформаційній безпеці для постачальників послуг з аеронавігаційного обслуговування представляє потенційне порушення інформаційної безпеки елементів інформаційної інфраструктури в системі організації повітряного руху, таких як обладнання зв'язку, навігації та спостереження, а також інформаційно-телекомунікаційних систем. Як правило, загроза виникає внаслідок присутності вразливих компонентів у захисті інформаційних технологій як частини діяльності постачальників послуг з аеронавігаційного обслуговування. Більшість підходів та методів міжнародних авіаційних організацій та найкращих практик постачальників послуг з аеронавігаційного обслуговування зосереджені на розробці методів та моделей ризику щодо безпеки польотів. Загальновідома проблема оцінки ризиків безпеки польотів полягає в тому, що вона не враховує загрози інформаційної та кібер безпеки. **Предметом** статті є дослідження методів та моделей для оцінки ризиків постачальників послуг з аеронавігаційного обслуговування. **Метою** є розробка моделі функціональної оцінки небезпек та набору вимог інформаційної безпеки для постачальників послуг з аеронавігаційного обслуговування. Запропонована модель функціональної оцінки небезпек відрізняється від відомої деталізацією напряму інформаційної безпеки. Програмна модель функціональної оцінки небезпек була розроблена за допомогою MATLAB Fuzzy Logic Toolbox. **Практичне значення** полягає в тому, що отримані результати дозволяють постачальникам послуг з аеронавігаційного обслуговування приймати кращі рішення щодо вдосконалення зрілості систем управління.

Ключові слова: провайдер надання послуг з аеронавігаційного обслуговування; обслуговування повітряного руху; ризик; безпека; організація повітряного руху; інформаційна безпека; загрози.

Модель функциональной оценки опасностей в системе организации воздушного движения относительно реализации угроз информационной безопасности

В. И. Черныш

Аннотация. Угроза информационной безопасности для поставщиков аэронавигационного обслуживания представляет собой потенциальное нарушение информационной безопасности элементов информационной инфраструктуры в системе организации воздушного движения, таких как оборудование связи, навигации и наблюдения, а также информационные и телекоммуникационные системы. Обычно угроза возникает из-за наличия уязвимых компонентов защиты информационных технологий в рамках деятельности поставщиков аэронавигационного обслуживания. Большинство подходов и методов международной авиационных организаций и передовой практики поставщиков аэронавигационного обслуживания сосредоточены на разработке методов и моделей риска в отношении безопасности полетов. Известная проблема оценки рисков для безопасности полетов заключается в том, что она не принимает во внимание угрозы информационной и кибер безопасности. **Предмет** статьи – исследование методов и моделей оценки рисков поставщиков аэронавигационного обслуживания. **Целью** является разработка модели функциональной оценки опасностей и набора требований к информационной безопасности для поставщиков аэронавигационного обслуживания. Предлагаемая модель функциональной оценки опасностей отличается от известных детализацией направления информационной безопасности. Программная модель функциональной оценки опасностей была разработана с помощью MATLAB Fuzzy Logic Toolbox. **Практическое значение** заключается в том, что полученные результаты позволяют поставщикам аэронавигационного обслуживания принимать более обоснованные решения относительно повышения зрелости систем управления.

Ключевые слова: провайдер предоставления услуг по аэронавигационному обслуживанию; обслуживание воздушного движения; риск; безопасность; организация воздушного движения; информационная безопасность; угрозы.

Applied problems of information systems operation

UDC 004.75 **doi: 10.20998/2522-9052.2020.3.18**

Viacheslav Davydov, Daryna Hrebeniuk

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

DEVELOPMENT THE RESOURCES LOAD VARIATION FORECASTING METHOD WITHIN CLOUD COMPUTING SYSTEMS

Abstract. The **subject** of research in the article is the models and methods of resources load forecasting in cloud computing systems using the mathematical apparatus of neural networks. The **aim** of the work is increasing the efficiency of computing systems resources usage (such as RAM, disk space, CPU, network) by developing methods of resources load forecasting. The article addresses the following **tasks**: development of an integrated approach to the problems of resources load forecasting within cloud computing systems, which includes the synthesis of a combining forecasting neural network; development of a forecasting neural network model based on Elman neural network; development of a method for training a neural network based on an artificial immunity algorithm; evaluation of the effectiveness of the developed method. To solve the set tasks, the approaches and **methods** of artificial neural and immune systems were used, as well as methods of theoretical research, which are based on the scientific provisions of the theory of artificial intelligence, statistic, functional and systemic analyzes. The following **results** were obtained: on the basis of the analysis of resources load forecasting methods in cloud computing systems, the main results of the methods were revealed, the advantages and disadvantages were demonstrated. On the basis of the research results analysis, the necessity of improving analytical methods for forecasting the load has been proved. The method of computing resources load forecasting in cloud computing systems has been improved, which makes it possible to obtain more accurate assessment results and prevent overloads in cloud computing systems. The results obtained are confirmed by the experiments carried out using the means of the infrastructure of private infrastructure services. **Conclusions**: improved the resources load forecasting method based on the mathematical apparatus of artificial neural networks to improve the efficiency of their usage.

Keywords: Elman neural network; cloud computing systems; resources load forecasting.

Introduction

In the modern world, the volume of data being operated is increasing. Initially enterprise programs were deployed on a physical server and vertical scaling was used for them. As a result of this physical server scaling, physical resources were added (for example, RAM, HDD, CPU). However, this approach to scaling has come across the problem of the motherboard and processor frequency physical limitation. The next stage in the development of enterprise application administration was horizontal scaling. At the same time, the clustering approach was used for servers. This approach was a short-lived success, as the amount of resources operated was used inefficiently. In addition, with a lack of resources, it was necessary to quickly buy a new hardware, which was not always possible.

An alternative approach to the such systems administration development was the presentation of the cloud computing systems development. Giant corporations such as Amazon, Microsoft have made their data centers in which you can rent the necessary resources amount. The volume of resources to be operated varies almost instantaneously. And at present, this approach is a trend. However, it is increasingly problem for vendor companies to efficiently allocate resources of cloud computing systems (CCS) between virtual machines. One approach to solving this problem is to forecast load change. In turn, this should avoid unwarranted migration of virtual machines during a short-term server overload.

Analysis of recent research and publications. Existing forecasting methods are divided into five main groups [4]:

1) heuristic forecasting methods;
2) mathematical methods of temporal and spatial extrapolation;
3) methods of modeling development processes;
4) logical and structural methods of artificial intelligence.

For a similar task, article [1] described the solution to the problem of predicting resource consumption in CCS using the exponentially weighted moving average (EWMA) method. However, this method, like other statistical forecasting methods, allows for significant simplification and does not allow identifying implicit patterns, which leads to low accuracy of forecasts when analyzing the complex systems behavior.

Based on the principle of "necessary diversity" by W. R. Ashby [2], since the cloud system is a complex system [5] with an extensive set of indicators, methods that take into account the full variety of available parameters are needed to predict its behavior [6]. In this regard, the application of a forecasting model based on artificial intelligence methods, in particular, artificial neural networks, is justified. This networks have proven to be good for predictive tasks by the following reasons:

1) the ability of artificial neural networks to carry out multivariable forecasting taking into account the urgency of forecasted processes;
2) artificial neural networks forecasting speed, achieved by maximum parallelism of the information processing;
3) insensitivity to lack of a priori dynamics information compensated by precedent information;
4) ability to process data presented in different scale types by reducing to a logical scale without compromising predictive speed;
5) ability to solve poorly formalized problems by

© Davydov V., Hrebeniuk D., 2020

identifying implicit analogies of observational protocol precedents;

6) "Holography" or the ability to preserve properties when a randomly selected part of artificial neural networks is destroyed due to complete connectivity and a large number of artificial neurons;

7) ability for further training. Input information can be used to further train the forecast model without having to modify it for new conditions adapting [10];

8) possibility of forecasting jumps and events not previously observed in the training sample of the observed object.

Among the variations of neural networks, Elman networks should be distinguished as promising [1] when using resource allocation and their forecasting in CCS.

For training the Elman network, the reverse error propagation method is traditionally used. However, this method is inevitably characterized by a high level of error, which significantly reduces the accuracy of the neural network forecast [12].

Another common approach is to use genetic algorithms to match optimal network weights. The use of genetic algorithms for Elman network training is described in detail in [1]. However, this approach has two drawbacks: firstly, for a genetic algorithm, the probability of finding a locally significant solution is high, this can lead to the incorrect forecast; secondly, the genetic algorithm is quite resource intensive and cloud computing system indicators entire set analysis can lead to a time increase in the significant calculation of weights for each network [11], which again can lead to an unacceptable delay in forecasting the functioning parameters of the CCS and by this way decrease the resource allocation process efficiency [12].

A variety of evolutionary algorithms are artificial immune systems (AIS). Among the AIS advantages, it should be noted high execution speed, which is especially relevant for the solved problem due to the large number of simultaneously analyzed parameters [10], as well as a lower probability of finding locally optimal values compared to genetic algorithms. Artificial immune systems are successfully used for machine learning [6-8].

The aim of the article. In order to effectively balance the CCS load, it is necessary to evaluate how it will change over time, since, based only on the current load, it is quite difficult to prevent a lack of resources - we can only eliminate it in fact. Moreover, in some situations, the virtual machines migration is not required and only increases the cost of computing resources for migration. Literature analysis showed the promise of using neural networks to the CCS load change forecast. Thus, the purpose of the work is to improve the existing forecasting algorithms load variation based on the Elman neural network.

Materials and methods

Solving the problem of the predicting load variation method in CCS using artificial neural networks is divided to the following stages [7]:

– initial data collection and presentation in a single form in precedents table;

– synthesis of forecasting neural network architecture;

– forecasting model synthesis by the neural network train on training sample situations;

– obtaining a forecast for the required advance period;

– forecast model verification according to the selected criterion.

We need to use a set of statistics to predict the actual state of CCS resources over a time interval [10].

The forecasting neural network model should be able not only to continuously process the CCS technical state (TS) dynamic parameters large number [10], forecast background factors, but also to take into account heterogeneous information about the current and planned operating modes of the cloud computing system. The neural network forecasting system, in turn, should take into account information about the system logic, as well as expert information. To solve the problem of forecasting, it is necessary to take into account a large range of parameters that can be decomposed into the following types [8]:

– information about the object TS previous dynamics;

– information about the object forecast background dynamics;

– information about object elements reliability;

– expert information;

– morphological information (information about precedents);

– additional information about operation logic of the object and its elements.

At the same time, the input values are a set of indicators and characteristics for each CCS host over the last day with a time interval of 5 minutes. This value was selected because the specified time interval is usually sufficient to perform a virtual machine live migration. Such characteristics include:

- Static host:
  - CPU characteristics I_{CPU}: F_{CPU} - CPU clock frequency, N_{CPU} - CPU number, N_{core} CPU cores number, V_{cache} - L2 cache capacity, F_{MIPS} - count of millions integer operations per second, F_{MFLOPS} count of millions floating point operations per second.
  - RAM characteristics I_{mem}: V_{mem} - RAM capacity, F_{mem} - RAM clock frequency, $N_{channel}$ - RAM channel; Disk subsystem features I_{disk} (drive type); Network subsystem characteristics I_{net} (network bandwidth).
- Host dynamic characteristics (load indicators):
  - CPU load for *i* core $L^i_{CPU}: \{L^i_{CPU_{t=1}}, L^i_{CPU_{t=2}}, .., L^i_{CPU_{t=n}}\}$;
  - RAM load $L_{mem}: \{L_{mem_{t=1}}, .., L_{mem_{t=n}}\}$;
  - disk subsystem load $L_{disk}: \{L_{disk_{t=1}}, .., L_{disk_{t=n}}\}$;
  - disk subsystem response time $T_{disk}: \{T_{disk_{t=1}}, T_{disk_{t=2}}, .., T_{disk_{t=n}}\}$;

- network load on each *j*-th network interface $L^j_{net}:\{L^j_{net_{t=1}}, L^j_{net_{t=2}},..,L^j_{net_{t=n}}\}$;
- network response time on each *k*-th network interface $T^k_{net}:\{T^k_{net_{t=1}}, T^k_{net_{t=2}},..,T^k_{net_{t=n}}\}$.

The output values are dynamic load indicators forecast values.

Cloud computing systems load modeling using a hybrid approach. Obtaining an accurate forecast in a computational environment with dynamically changing parameters is a non-trivial task. Existing approaches are not sufficiently accurate and do not satisfy the requirements. Thus, a load analysis and forecasting algorithm was developed that allowed to obtain more accurate estimation results and ensure the cloud computing systems congestion prevention.

To this end, a CCS load prediction model has been developed with a hybrid approach usage. Based on the proposed approaches, a hybrid algorithm for load balancing in the cloud computing system has been built, which has confirmed its effectiveness. The generalized algorithm scheme includes solving clustering and forecasting problems and contains of the following steps:

– obtaining historical values of dynamic cloud parameter x_i per day;

– performing parameter values clustering using *c*-means values. The output is a set of *C* clusters;

– artificial neural network synthesis and training for each cluster. The output is a set of *C* neural networks;

– neural network-cluster pairs selection with the lowest mean square error σ_{MSE};

– obtaining a forecast parameter x_i value using the selected neural network-cluster pair.

In the algorithm first step, historical data on the indicator values (load) is clustered using the basic algorithm of fuzzy c-means (FCM) [9]. This is necessary in order to more accurately classify the current situation and thus improve the forecast efficiency [10]. The clustering algorithm input uses load patterns extracted from historical data using the overlapping floating window method [10], the essence of which is to identify similar trends in changing parameter values in historical data. Thus, during the algorithm operation, a set of clusters is forming, united by the similarity of load [8].

In order to forecast the load, an Elman neural network is used for each resulting cluster. It has quite high flexibility due to the fact that the number of Elman network contextual neurons is determined not by the output dimension, but by the hidden neurons number, which, in turn, made it possible to adapt the Elman neural network to solve a specific practical problem [1]. At the same time, the network is configured using the artificial immunity algorithm (AIS-WElman [7]) using the available historical values in the cluster. To perform the forecast, such a neural network-cluster pair is selected, for which the forecastion error is minimized.

In this algorithm, L data points are given for each CCS host each dynamic characteristic on the timeline: $s_n, s_n \in R, n = 1,2,..,L$. The end goal is to forecast the value s_{L+1}, that is, the next characteristic value in the timeline. Clustering and forecasting using the FCM algorithm and AIS-WElman networks occurs as follows:

– overlapping fixed-size sliding window is used to highlight the values sequences $s_1,..,s_k$ of the next dynamic characteristic x_i (load on the cloud *i*-th component). This reveals similar load patterns;

– based on identified patterns, N data points are created with a d-dimensional vector x_i, where $x_i = \{s_1, s_2,..,s_{i+d+1}\} \in R, n = 1,2,..,N$, where $N = L - d + 1$;

– Elman networks creation for each cluster by clustering N data points in C indistinct sets, i.e. member u compliance degree definition for each sequence values s of characteristic x_i, $0 \le u_{ic} \le 1$ in different clusters of c, $1 \le c \le C$, so $\sum_{c=1}^{C} u_{ic} = 1$;

– forecasting dynamic characteristic value obtaining x_i for each cluster using an Elman network. Each Elman network is trained using an artificial immunity algorithm using data point values within each cluster;

– calculation of the forecasting mean square error σ_{MSE} for each neural network-cluster pair of the Elman network and network with the lowest mean square error selection;

– parameter s_{L+1} forecasting value calculation using the selected network;

– go to the next parameter.

Load forecasting is performed separately for each of the host dynamic parameters. The forecasting algorithm input value is a vector of historical data about this parameter i-th value (for example, the load of the first host first CPU core

$$L^i_{CPU}:\{L^i_{CPU_{t=1}}, L^i_{CPU_{t=2}},..,L^i_{CPU_{t=n}}\}.$$

It is worth noting that different parameters values forecasting can be performed simultaneously.

Load clustering based on fuzzy c-means algorithm. Clustering is a method of multivariate data points collections separating into significant groups, where all group members have similar characteristics, and data points between different groups are not similar to each other. Clustering is widely used in various tasks, such as marketing research, image segmentation, biological species determination, and urban planning. Classical clustering methods, such as k-means and c-means, operate on clusters with a clear division, that is, each object belongs strictly to the one group. This property makes such clusters impractical for real applications, since many objects class attributes may be fuzzy, especially for multidimensional data analysis [3]. Fuzzy clustering is a method that allows to determine the samples similarity to each other degree and organize clusters by similarity. Thus, fuzzy clustering methods allow to build a more adequate load model in a cloud computing system.

However, most conventional fuzzy clustering techniques, such as fuzzy c-means and fuzzy k-means, can only operate on linearly separated data points in the observation space. These cloud computing system resources loadings are multidimensional, therefore have to be subjected to basic nonlinear transformation Φ. Let $X = \{x_1, x_2, .., x_n\}$ is a set of historical data size N in d-dimensional space R^d, Φ - nonlinear function of this entrance space and multidimensional space H display: $\Phi : R^d \to H, x \to \Phi(x)$.

The input data for clustering is historical data about load on each of the cloud computing system resources. The basic fuzzy c-means algorithm (KFCM) can divide a set of historical data into C clusters by minimizing the distance index using the mapping function Φ in the observing space:

$$\min J_{KFCM} = \sum_{c=1}^{C}\sum_{i=1}^{N} u_{ic}^{p} \cdot \left\| \Phi(x_i) - \Phi_{v_c} \right\|^2, \quad (1)$$

where $$\sum_{c=1}^{C} u_{ic}^{p} = 1, 2, .., N, \quad (2)$$

where u_{ic}^{p} is the membership of the data point x_i in cluster c, defined in the range $[0,1]$, as well as the ic-th member of the membership matrix U, p is a number that determines the cluster fuzziness; $\left\| \Phi(x_i) - \Phi_{v_c} \right\|^2$ is the distance between x_i and centroid v_c in a given multidimensional space with the mapping function Φ. of Cluster c centroid in the mapped space is obtained by:

$$\Phi_{v_c} = \sum_{j=1}^{N} u_{jc}^{p} \Phi(x_j) \Big/ \sum_{j=1}^{N} u_{jc}^{p}. \quad (3)$$

The distance $\left\| \Phi(x_i) - \Phi_{v_c} \right\|^2$ in space is calculated as:

$$\left\| \Phi(x_i) - \Phi_{v_c} \right\|^2 = \left[\Phi(x_i) - \frac{\sum_{j=1}^{N} u_{jc}^{p} \Phi(x_j)}{\sum_{j=1}^{N} u_{jc}^{p}} \right]^2 =$$
$$= \Phi(x_i) \cdot \Phi(x_i) - 2 \cdot \Phi(x_i) \frac{\sum_{j=1}^{N} u_{jc}^{p} \Phi(x_j)}{\sum_{j=1}^{N} u_{jc}^{p}} +$$
$$+ \frac{\sum_{j=1}^{N} u_{jc}^{p} \Phi(x_j)}{\sum_{j=1}^{N} u_{jc}^{p}} \cdot \frac{\sum_{j=1}^{N} u_{jc}^{p} \Phi(x_j)}{\sum_{j=1}^{N} u_{jc}^{p}} = K_{ij} - \quad (4)$$
$$-2 \cdot \frac{\sum_{j=1}^{N} u_{jc}^{p} \Phi(x_j) K_{ij}}{\sum_{j=1}^{N} u_{jc}^{p}} + \frac{\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} w_{mc}^{p} w_{nc}^{p} K_{mn}}{\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N} w_{mc}^{p} w_{nc}^{p}},$$

where $K_{ij} = K(x_i, x_j)$ is the basic function. The radial base function (RBF) is used because it is proven to be the most efficient [1]. By minimizing the equation using the E-M algorithm with the restriction U, we obtain:

$$v_c = \sum_{i=1}^{N} u_{ic}^{p} K(x_i, v_c) x_i \Big/ \sum_{i=1}^{N} u_{ic}^{p} K(x_i, v_c), \quad (5)$$

$$u_{ic} = \frac{\left(1/\left(1 - K(x_i, v_c)\right)\right)^{1/(p-1)}}{\sum_{j=1}^{C}\left(1/\left(1 - K(x_i, v_c)\right)\right)^{1/(p-1)}}, \quad (6)$$

where $c = 1, 2, .., C$, $i = 1, 2, .., N$.

Thus, with the fuzzy c-means mathematical apparatus help, it is possible to obtain an intermediate result used in the subsequent forecasting process.

Cloud computing system load forecast using the Elman network. Elman neural network is a partially recurved neural network model, first proposed by Elman in 1990 [11]. It represents something between a multi-layered perseptron and a purely recurring network. Unlike the forward propagation cycle, the hidden layer and the output layer with variable weights connecting the two neighboring layers, the backward propagation cycle uses a context layer, which is sensitive to the input data history, so the connections between the context layer and the hidden layer are fixed. The Elman network dynamic characteristics are provided only by internal connections, so the network does not need to transmit the state as an input or training signal.

To solve the problem, a modified Elman network is used to CCS parameters future values forecasting [11]. Fig. 1 shows the modified network structure.

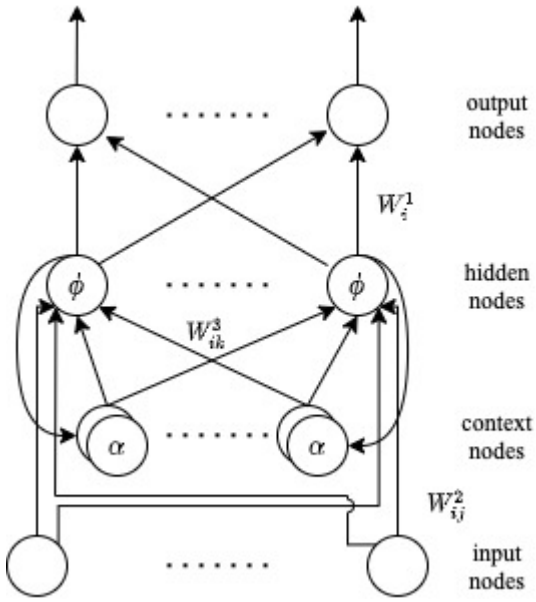


Fig. 1. Modified Elman Network (4)

The modified Elman network differs from the original one in that it has dedication connections with fixed gain α in context nodes. Thus, the context nodes output value at time t is:

$$x_{ck}(t) = \alpha x_{ck}(t-1) + H_k(t-1), \quad (7)$$

where $x_{ck}(t-1)$ and $H_k(t-1)$ are the outputs of the k-th context nodes and k-th hidden nodes respectively, $\alpha(0 < \alpha < 1)$ is a gain in the internal connections dedication. There are n input layer nodes, m hidden and context layers nodes, as well as r output layer nodes. $x_j(t)$ are inputs at time t, and $y_j(t)$ are

outputs, respectively, $W_i^1(t)$, $W_{ij}^2(t)$, $W_{ik}^3(t)$ are weights between the hidden and output layer, the input and hidden layer, the hidden and context layer respectively. The modified Elman network mathematical model the can be represented as:

$$y(t)=\sum_{i=1}^{m} W_i^1(t-1)H_i(t), \quad (8)$$

$$H_i(t)=\varphi\left(\left(h_i(t)-b_i(t)\right)/a_i(t)\right), \quad (9)$$

$$h_i(t)=\sum_{j=1}^{n} W_{ij}^2(t)x_j(t-1)+ +\alpha\sum_{k=1}^{m} W_{ik}^3(t-1)\cdot\left(x_{ck}(t-1)+H_k(t-1)\right), \quad (10)$$

where $a_i(t)$ is the expansion factor, $b_i(t)$ is the translation factor.

CCS functioning parameters forecasting neural network system generalized block diagram is shown in Fig. 2. It reflects the following basic information processing steps: CCS operation current parameters measurement; indicators historical values collection; load classification according to suitable clusters; decisive rule implementation based on the neural network.

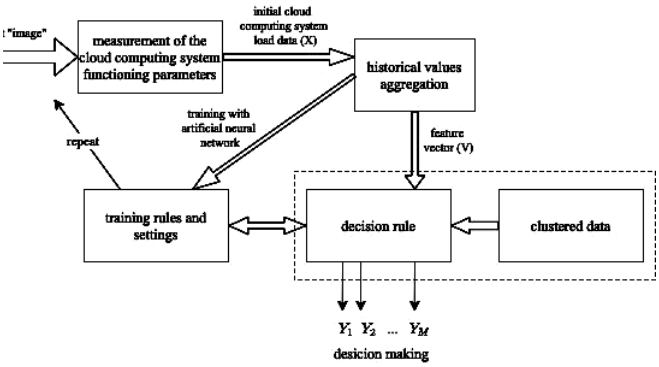


Fig. 2. CCS functioning parameters forecasting neural network system

Thus, to solve the selecting weight coefficients problem in Elman forecasting networks the artificial immune systems usage is justified. Artificial immune systems, along with genetic algorithms, are the evolutionary algorithms form; the principle of their work is similar to the mechanisms for adapting the human immune system to changing external factors. It has been proved that artificial immune systems, as a rule, are characterized by less convergence time than genetic algorithms, as well as their use significantly decreases the probability of finding locally significant solutions [1].

Solving the Elman neural network training problem with the artificial immune system help. The studies [10] of artificial neural (ANS) and immune (AIS) systems made it possible to distinguish their distinctive features, presented in Table 1.

As can be seen from the above table, AIS building concept and principles differ markedly from the ANS building concept and principles, primarily due to the greater variety (variability) of immune defense mechanisms, since the goal set for the AIS is extremely complex - to ensure the self-preservation (survival) of the observed system in an aggressive (hostile) external environment.

Table 1 – ***Distinctive features of AIS and INS***

	Artificial immune system	Artificial neural network
Basic elements	Lymphocytes and antibodies.	Artificial neurons.
Elements count	Isn't strictly fixed, their position changes dynamically.	Number of neurons and their location is fixed.
Network behavior	Self-organization and behavior evolution of are characteristic.	Largely depends on the accepted algorithm.
Interaction between elements	Isn't constant and can dynamically change.	Is constant and set when connected.
Mana-gement	There is no centralized management.	A single mechanism for adjusting connec-tion weights is used.

According to modern ideas, the functioning of the human immune system is based on the principle of comparing some "patterns" with bodies that have fallen into the body and detecting differences between them. The mechanisms of innate and acquired immunity are used as basic protection mechanisms. Innate immunity has little specificity and is based on the devouring and destruction of foreign bodies by macrophages and white blood cells. At this stage, only known pathogens are recognized and destroyed, the knowledge of which was acquired by the immune system in the evolution process. The acquired immunity is responsible for the recognition of specific "strangers" (molecules (antigens) not known to the system in advance), and is associated with the activity of lymphocytes - cells that play the above-mentioned patterns role. The total number of lymphocytes in the human body is about 2×10^{12}; by cell weight the human immune system is comparable to the brain. Lymphocytes are carried by the body through the lymph nodes, constantly moving and thus controlling the body as a whole, and not its individual areas. Each type of lymphocyte is responsible for detecting some limited number of antigens.

There are two main groups of lymphocytes: B-lymphocytes and T-lymphocytes. B-lymphocytes produce antibodies - special proteins from the immunoglobulins class that bind to antigens and prepare them for subsequent destruction. For successful operation, the immune system must generate a huge number of diverse antibodies capable to contact with any molecule. T-lymphocytes, like B-lymphocytes, initially originate in the spinal cord, after which they enter the thymus - an environment rich in the body's own antigens. T-lymphocytes do not produce free antibodies. There are several types of T-lymphocytes: T-helpers - cells that recognize foreign bodies, and T-killers - cells that destroy antigens identified by helpers.

An important mechanism of the immune system is negative selection. This process essence is that T-lymphocytes located in large quantities in the thymus interact with each of their own antigens, and if the T-lymphocyte "recognized" its own antigen, i.e. reacted to

it as if it was a foreign cell, then lymphocyte is removed. Thus, lymphocytes "learn" not to respond to their own cells in order to recognize only foreign antigens in the future. Thus, negative selection creates "patterns" containing the information that is absent from the body, and if some body fits this pattern, it means that it is clearly "alien".

Another equally important immune response mechanism underlying immune system behavior is the clonal selection mechanism. According to this mechanism, if any of the B-lymphocytes detected a certain antigen, then the cloning process of the corresponding lymphocytes is immediately activated. The more antigens of this type enter the body, the more corresponding B-lymphocytes are formed, which produce antibodies responsible for these antigens destruction. High degree of lymphocyte and antigen affinity increases its cloning intensity and decreases lymphocyte mutations intensity. Lymphocytes with the greatest affinity degree are preserved in the form of long-lived memory cells. The life of the remaining lymphocytes is short. Thus, clonal selection provides a kind of B-lymphocytes (and their corresponding antibodies) natural selection: only those, that fit this antigen as much as possible, - survive. The AIS is based on the following natural immune systems properties:

– recognition. The immune system is able to recognize and classify different molecular structures and respond selectively to them. Recognition of one's and another's [5] is one of the main tasks solved by the immune system;

– diversity. The immune system uses a combinatorial mechanism (genetically conditioned process) to form many different lymphocyte configurations to ensure that at least one lymphocyte in the entire population can interact with any predetermined (known or unknown) antibody;

– training. The immune system evaluates the structure of a particular antigen using its random contacts with cells constituting this system. Training consists in changing the lymphocyte concentration that occurs in the primary response (as a result of the first contact with the antigen). The immune system ability to learn is mainly embedded in the mechanism of clones' replenishment, leading to the new immunocompetent cells formation, taking into account the system current state;

– memory. Using short-term and long-term immune memory mechanisms, the immune system maintains an ideal balance between resource savings and function performance by maintaining minimal but sufficient memory of previous antigen contacts;

– distributed search. In essence, the immune system is a distributed system. Immune system cells, mainly lymphocytes, are continuously recycled through the blood, lymph, lymphoid organs and other tissues. In the case of encountering an antigen, they carry out a specific immune response;

– self-regulation. The immune system has the property of self-regulation. There is no central organ that controls the immune system functions. Depending on the method of penetration into the body and other antigen properties, the immune response regulation can be both local and systemic;

– threshold mechanism. Immune response and multiplication of immunocompetent cells occur only after overcoming some threshold depending on the strength of chemical bonds;

– co-stimulation. B-lymphocyte activation is tightly controlled by an additional stimulating signal. The second signal (from helper T-lymphocytes) helps to ensure tolerance and distinguishes between a serious threat and a "false call" (i.e., dangerous and non-dangerous antigens);

– dynamic protection. The immune system not only detects and removes antigens from the body, but also participates in the body self-maintenance process in a dynamically changing environment by interactions between lymphocytes and antibodies. Thus, the immune system has a methodology for solving dynamic rather than static problems in an unknown and hostile environment. The following actions are used to build the training AIS: immune cells set generation (antibodies); generated antibodies cloning (ancestors); bowed antibodies growing (hypermutation analogue); antibodies and reference values interaction assessment (antigens); antibodies with a similarity or adaptability low value getting rid (lymphocytes).

The antibody population is initialized with binary strings representing the Elman neural network weights and displacements. Weights are calculated using the fit values. Fitness is calculated as follows:

$$fitness^{j}(k) = 1 \Big/ \left(1 + e(t)^{2}\right), \qquad (11)$$

where e is the error value during t;

$$e(t) = y(t) - d(t), \qquad (12)$$

where y is the forecast result and d is the expected result at time t.

Each antibody from the initial set is cloned several times to create a temporary clone population. The number of each antibody clones is calculated as follows:

$$N \bullet fitness^{j}(k) \Big/ \sum_{i=1}^{N} fitness^{j}(i), \qquad (13)$$

where N is the number of antibodies of the same type, $fitness(k)$ is the value of the adaptability function of the k-th antibody relative to the j-th neuron. This clone population is designed to carry out the process of growing up through the hypermutation mechanism. Hypermutation is carried out based on the similarity degree value: the lower it is, the higher the hypermutation coefficient, and vice versa. The number of bits to be hypermuted is calculated as:

$$M \bullet \frac{\max(fitness^{j}) - fitness^{j}(k)}{\max(fitness^{j}) - \min(fitness^{i})}, \qquad (14)$$

A new antibody population of the same size as the original is then selected and the operation is repeated until the desired weight values are achieved.

Thus, an algorithm is obtained that is effective for training the Elman neural network and combines all the advantages of artificial immune systems.

Research results and discussions

Two well-established approaches are proposed to evaluate the prediction results - the analysis of mean square error (σ_{MSE}) and the mean absolute error (σ_{MAE}) [7].

$$\sigma_{MSE} = \sum_{t=1}^{h}(y_t - \hbar_t)^2 \Big/ \sum_{t=1}^{h}(y_t)^2 , \quad (15)$$

$$\sigma_{MAE} = \sum_{t=1}^{h}|y_t - \hbar_t| \Big/ h , \quad (16)$$

where $\hbar_t$ is the parameter forecast value, y_t is the real value, h is the number of time points whose forecast value should be calculated (in our case $h = 1$).

The training sample consisted of 300 examples, in which the number of instances varied from 2 to 1000, the number of servers from 1 to 100. The mean square error averaged for all training examples was 0.042. The average absolute error averaged for all test examples was 0.4. The mean square error and mean absolute error measurements for each forecasting method are shown in Fig. 3. The results of the error comparison with other forecasting algorithms for 15 randomly selected measurements are shown in Fig. 4. Thus, the proposed method of forecasting the change in host load in the cloud computing system allowed planning to reallocate cloud resources in order to increase their use efficiency.

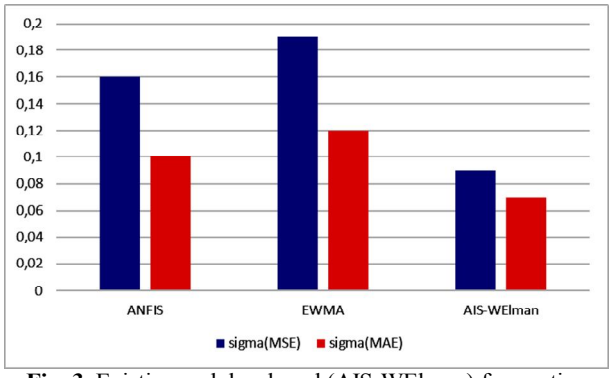


Fig. 3. Existing and developed (AIS-WElman) forecasting algorithms efficiency comparison on the mean square and mean absolute error calculation example

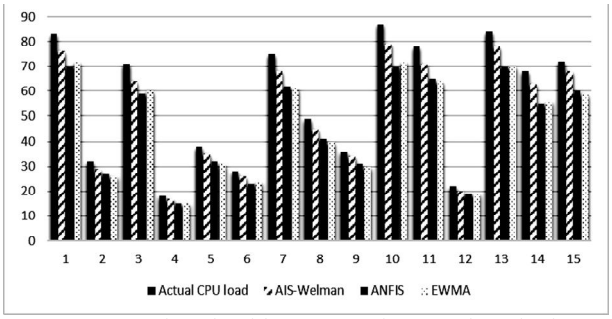


Fig. 4. Forecasting algorithms comparison results. Abscissa - CPU usage, %. Ordinate - experiment number

Conclusions and prospects for further development

1. A system analysis of existing forecasting the load on CCS resources methods has been carried out. The main differences in forecasting features, advantages and disadvantages of methods were identified. The forecasting method and algorithm based on Elman artificial neural networks selection for further improvement is justified.

2. A method for forecasting the CCS resources load has been developed, which hallmark is the use of the fuzzy c-means method for clustering historical data, as well as the use of artificial immune systems for training the neural network, which provides high accuracy in predicting the functioning parameters of a distributed computing complex taking into account the dynamics of their change. To improve forecasting efficiency, an approach based on artificial immune systems has been applied, which provides increased efficiency.

Resource load variance forecasting algorithm creation has resulted in significant improvements in cloud utilization efficiency, as well as in the ability of cloud computing systems to run new instances with minimal degradation in the already running applications performance.

The further research direction is to improve the decision-making system in order to obtain more accurate results of forecasting the CCS resources load.

References

1. Xiao, Z., Song, W. and Chen, Q. (2013), "Dynamic Resource Allocation Using Virtual Machines for Cloud Computing Environment," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Vol. 24, No. 6, pp. 1107-1117/.
2. Ashby, W. (2016), *An Introduction to Cybernetics* (in Russian), URSS, 432 p.
3. J. Vandebon, J. G. F. Coutinho, W. Luk and T. Chau (2019), "Transparent Heterogeneous Cloud Acceleration," *IEEE 30th International Conference on Application-specific Systems, Architectures and Processors (ASAP)*, New York, NY, USA, pp. 33-33, DOI: https://doi.org/10.1109/ASAP.2019.00-40.
4. Volkova, A., Shyshkunov, V. (2019), *System analysis and modeling of processes in the technosphere* (in Russian), Ural University Publishing House, Ekaterinburg, 243 p.
5. Berketov, G., Mikryukov A., Fedoseev, S. and Golovko, D. (2013), "Models and patterns recognition algorithms in life-cycle management problems of technical systems", *Innovative Information Technologies*, Vol. 3, No. 2, pp. 41-50.
6. Berketov G., Mikryukov A. and Tsurkin A. (2014), "Solving the problems of forecasting the state and managing the life cycle of complex technical complexes by methods of image recognition" (in Russian), *Statistics and Economics*, No. 1, pp. 138-143, DOI: https://doi.org/10.21686/2500-3925-2014-1-138-143.
7. Xu, D., Yang, Sh., and Luo, H. (2013), "A Fusion Model for CPU Load Prediction in Cloud Computing", *Journal of Networks*, Vol. 8, No. 11, 2506-2511, DOI: https://doi.org/10.4304/jnw.8.11.2506-2511.
8. Ramezani, F., Lu, J., Hussain, F. (2013), "A Fuzzy Predictable Load Balancing Approach in Cloud Computing", *Proceedings of the International Conference on Grid Computing and Applications (GCA)*, p. 108.
9. Bey, K.B., Benhammadi, F., Sebbak, F. (2013), "Fuzzy Subtractive Clustering Based Prediction Approach for CPU Load Availability", *The Fourth International Conference on Cloud Computing, GRIDs, and Virtualization.*
10. Saranya.S, Murugan. B.S (2014), "Intelligent Scheduling System for Dynamic Resource Allocation in Cloud Computing", *International Journal of Advanced Research in Computer Science & Technology*, Vol. 2, Issue Special 1, pp. 284-288.

11. Elman, J. (1990), “Finding structure in time”, *Cognitive Science*, Vol. 14, No. 2, pp. 179-211.
12. Hrebeniuk, D. (2018), “Analysis of methods of distribution of resources in the virtualization media”, *Control, Navigation and Communication Systems*, No. 6(52), pp. 98-103, DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.6.098.

Received (Надійшла) 14.09.2020
Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.10.2020

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ ABOUT THE AUTHORS

Давидов Вячеслав Вадимович – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Viacheslav Davydov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: vyacheslav.v.davydov@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-2976-8422.

Гребенюк Дарина Сергіївна– аспірантка кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Daryna Hrebeniuk – graduate student of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: darina.gg1@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-5331-2444.

Розробка методу прогнозування зміни навантаження ресурсів в системах хмарних обчислень

В. В. Давидов, Д. С. Гребенюк

Анотація. Предметом дослідження в статті є моделі і методи прогнозування навантаження в умовах хмарних обчислень з використанням математичного апарату нейронних мереж. **Метою** роботи є підвищення ефективності використання ресурсів системах хмарних обчислень (таких, як оперативна пам'ять, дисковий простір, ЦПУ, мережа) шляхом розробки методів прогнозування використання навантаження ресурсів. У статті вирішуються такі **задачі**: розробка комплексного підходу до завдань прогнозування навантаження ресурсів хмарних систем, що включає в себе синтез комбінованої прогнозуючої нейронної мережі; розробка прогнозної нейросетевої моделі на базі нейронної мережі Елмана; розробка методу навчання нейронної мережі на основі алгоритму штучного імунітету; оцінка ефективності розробленого методу. Для вирішення поставлених завдань були використані підходи і **методи** штучних нейронних та імунних систем, а також методи теоретичних досліджень, які засновані на наукових положеннях теорії штучного інтелекту, статистичного, функціонального і системного аналізів. Отримані наступні **результати**: на основі проведеного аналізу методів прогнозування різних навантажень в системах систем обчислень були виявлені основні особливості існуючих методів, продемонстровані їх переваги і недоліки. На основі проведеного аналізу результатів дослідження доведено доцільність вдосконалення аналітичних методів прогнозування навантаження. Удосконалено метод прогнозування навантаження обчислювальних ресурсів в системах хмарних обчислень, що дозволяє отримати більш точні результати оцінки і забезпечити перевантажень в системах хмарних обчислень. Отримані результати підтверджені проведеними експериментами при використанні коштів інфраструктури приватних інфраструктурних сервісів. **Висновки**: удосконалення методу прогнозування навантаження на базу математичного апарату штучних нейронних мереж. Забезпечити планування розмежування ресурсів з метою підвищення ефективності їх використання.

Ключові слова: нейронна мережа Елмана; системи хмарних обчислень; прогнозування визначення навантаження.

Разработка метода прогнозирования варьирования нагрузки ресурсов в системах облачных вычислений

В. В. Давыдов, Д. С. Гребенюк

Аннотация. Предметом исследования в статье являются модели и методы прогнозирования варьирования нагрузки в системе облачных вычислений с использованием математического аппарата нейронных сетей. **Целью** работы является повышение эффективности использования имеющихся ресурсов в системах облачных вычислений (таких, как оперативная память, дисковое пространство, ЦПУ, сеть) путем разработки метода прогнозирования варьирования нагрузки. В статье решаются следующие **задачи**: разработка комплексного подхода к прогнозированию варьирования нагрузки ресурсов облачных системах, которая включает в себя синтез комбинирующей прогнозирующей нейронной сети; разработка прогнозной нейросетевой модели на базе нейронной сети Элмана; разработка метода обучения нейронной сети на основе алгоритма искусственного иммунитета; оценка эффективности разработанного метода. Для решения поставленных задач были использованы подходы и **методы** искусственных нейронных и иммунных систем, а также методы теоретических исследований, которые основаны на научных положениях теории искусственного интеллекта, статистического, функционального и системного анализов. Получены следующие **результаты**: на основе проведенного анализа существующих методов прогнозирования варьирования нагрузки ресурсов в системах облачных вычислений были выявлены основные особенности существующих методов, приведены их достоинства и недостатки. На основе проведенного аналитического исследования доказана необходимость совершенствования существующих методов прогнозирования нагрузки. Усовершенствован метод прогнозирования нагрузки вычислительных ресурсов в системах облачных вычислений, позволяющий получить более точные результаты оценки и обеспечить предотвращение перегрузок в системах облачных вычислений. Полученные результаты подтверждены проведенными экспериментами при использовании программного обеспечения для создания частных инфраструктурных облачных сервисов и облачных хранилищ. **Выводы**: усовершенствование метода прогнозирования варьирования нагрузки на базе математического аппарата искусственных нейронных сетей Элмана в системах облачных вычислений позволило обеспечить планирование разграничения облачных ресурсов с целью повышения эффективности их использования.

Ключевые слова: нейронная сеть Элмана; системы облачных вычислений; прогнозирование варьирования нагрузки.

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Александров Є. Є. (Eugene Aleksandrov) 33
Александрова Т. Є. (Tetiana Aleksandrova) . 33
Андрєєв С. М. (Sergey Andrieiev) 11
Бабешко Є. В. (Ievgen Babeshko) 77
Байрамов А. А. (Azad Agalar oğlu Bayramov) 23
Барсов В. І. (Valeriy Barsov) 64
Гамзаєв Р. О. (Rustam Gamzayev) 39
Гасанов А. Г. (Arzuman G. oğlu Gasanov) 23
Гребенюк Д. С. (Daryna Hrebeniuk) 128
Давидов В. В. (Viacheslav Davydov) 128
Жилін В. А. (Volodymyr Zhilin) 11
Ісаков О. В. (Oleksandr Isakov) 84
Клімов О. П. (Alexej Klimov) 84
Коваленко А. А. (Andriy Kovalenko) 77
Корда М. В. (Mykyta Korda) 84
Костерна О. Ю. (Olena Kosterna) 64
Костяник І. В. (Iryna Kostianyk) 33
Крепич С. Я. (Svitlana Krepych) 102
Кучук Г. А. (Heorhii Kuchuk) 48
Левашенко В. Г. (Vitaly Levashenko) 48
Лещинська І. О. (Iryna Leshchynska) 114
Лещинський В. О. (Volodymyr Leshchynskyi) 114
Ляшенко О. С. (Oleksii Liashenko) 48
Макогон О. А. (Helen Makogon) 84
Можаєв М. О. (Mykhailo Mozhaiev) 27
Моргун Я. Ю. (Yaroslav Morgun) 33
Мосійчук М. В. (Mykhaylo Mosiychuk) 84
Ніколаєва К. Г. (Kateryna Nikolaieva) 89
Плахотний О. В. (Oleksandr Plakhotnyi) 64
Поворознюк А. І. (Anatoly Povoroznyuk) 109
Поворознюк О. А. (Oksana Povoroznyuk) ... 109
Порошенко А. І. (Anton Poroshenko) 77
Приставка П. О. (Pylyp Prystavka) 70
Пуйденко В. О. (Vadym Puidenko) 57
Ручков Є. В. (Eugene Ruchkov) 77
Сидоренко Є. А. (Yevhen Sydorenko) 84
Співак І. Я. (Iryna Spivak) 102
Ткачук М. В. (Mykola Tkachuk) 39
Харченко В. С. (Vyacheslav Kharchenko) 77
Хорошун Г. М. (Ganna Khoroshun) 5
Чалий С. Ф. (Serhii Chalyi) 114
Черниш В. І. (Vladyslav Chernysh) 120
Чолишкіна О. Г. (Olha Cholyshkina) 70
Шевкопляс Д. О. (Daria Shevkoplias) 39
Шехна Х. (Khaled Shekhna) 109
Яковлева О. В. (Olena Yakovleva) 89

Наукове видання

Сучасні інформаційні системи

Advanced Information Systems

Науковий журнал
Том 4, № 4

Відповідальний за випуск *С. Г. Семенов*
Технічний редактор *Д. С. Гребенюк*
Комп`ютерна верстка *Н. Г. Кучук*

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 22522-12422Р від 13.01.2017 р.

Підписано до друку 16.11.2020 Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 17,0. Тираж 120 прим. Зам. 1116-20

Адреса редакції: Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”
Кафедра ОТП, вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків, Україна, тел. 707-61-65

Віддруковано з готових оригінал-макетів у друкарні ФОП Петров В.В.
Єдиний державний реєстр юридичних осіб та фізичних осіб-підприємців.
Запис № 24800000000106167 від 08.01.2009.

61144, м. Харків, вул. Гв. Широнінців, 79в, к. 137, тел. **(057) 778-60-34**
e-mail: **bookfabrik@mail.ua**