

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"

Серія: Інформатика та моделювання

№ 24 (1300) 2018

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

Харків
НТУ "ХПІ", 2018

Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 24 (1300). – 171 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською, російською та англійською мовами.

Вісник Національного технічного університету "ХПІ" внесено до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук", затвердженого наказом Міністерства освіти і науки України № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015 р.

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

Координаційна рада:

Л.Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф., Є.І. Сокол, чл.-кор. НАН України, д-р. техн. наук, проф. (**голова**);

К.О. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; А.В. Бойко, д-р техн. наук, проф.;
Ф.Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М.Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.;
А.І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;
В.Д. Дмитрієнко, д-р техн. наук, проф.; Ю.І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;
П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.;
С.І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В.І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.;
Г.В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О.К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.;
П.Г. Перерва, д-р техн. наук, проф.; В.О. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.;
М.І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: В.Д. Дмитрієнко, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: С.Ю. Леонов, д-р техн. наук, проф.

Члени редколегії: А.Г. Гурин, д-р техн. наук, проф.; Є.Г. Жиликов, д-р техн. наук, проф.; О.Ю. Заковоротний, д-р техн. наук, доц.; Г.А. Кучук, д-р техн. наук, проф.; О.С. Логунова, д-р техн. наук, проф.; О.О. Можаяєв, д-р техн. наук, проф.; А.І. Поворознюк, д-р техн. наук, проф.; С.Г. Семенов, д-р техн. наук, доц.; Г.Є. Філатова, д-р техн. наук, доц.; Г.А. Самігуліна, д-р техн. наук, проф. (Казахстан); О.А. Серков, д-р техн. наук, проф.; А.Г. Трифонов, д-р техн. наук, проф. (Белорусь); Ханлар Гамзаєв, д-р техн. наук, проф. (Азербайджан); Б.А. Худаяров, д-р техн. наук, проф. (Узбекистан); Ihor Zanevsky, PhD, prof. (Polska).

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ "ХПІ"

Протокол № 5 від 25.05.2018 р.

ISSN 2079-0031 (Print)

ISSN 2411-0558 (Online)

© Національний технічний університет "ХПІ", 2018

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

в міжнародних наукометричних базах, репозитаріях та пошукових системах

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

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

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

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

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

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

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

**К 80-летию нашего друга и члена редколлегии
серии "Информатика и моделирование
"Вестника НТУ "ХПИ"
доктора технических наук, профессора
Николая Ивановича Корсунова**



В этом году в сентябре исполняется 80 лет со дня рождения доктора технических наук, профессора Николая Ивановича Корсунова, который внес неоценимый вклад в становление и развитие кафедры "Вычислительная техника и программирование" НТУ "Харьковский политехнический институт". В этом человеке органически соединены многолетний опыт талантливого педагога и научного сотрудника с лучшими человеческими качествами: скромностью, тактичностью, доброжелательностью, позволяющими ему всегда подавать руку помощи и делиться своими идеями, знаниями и жизненным опытом с сотрудниками кафедры, помогая им проводить научные исследования, готовить публикации, защищать диссертации. За годы работы на кафедре

проф. Н.И. Корсунов подготовил более 10 кандидатов и 2 доктора технических наук. Более двух десятков докторов и кандидатов наук подготовлено им вне стен НТУ "ХПИ".

Много сил Н.И. Корсунов вложил в развитие цифровой и аналого-цифровой вычислительной техники при совместных работах с Кишиневским заводом "Счетмаш" для Министерства радиотехнической промышленности СССР, связанных с разработкой аппаратных и программных средств для высокопродуктивных вычислительных систем.

Николай Иванович был идеологом развития методов булевого дифференциального исчисления в K -значное дифференциальное исчисление, на основе чего появился новый класс математических моделей – K -значные дифференциальные и интегральные уравнения, которые нашли свое приложение в работах по созданию систем автоматизированного проектирования цифровых и гибридных устройств на базе K -значных дифференциальных моделей элементов и устройств вычислительной техники.

Николай Иванович много усилий, знаний и энергии вложил в развитие отраслевой научно-исследовательской лаборатории "Электронное моделирование" Министерства электротехнической промышленности СССР и Министерства образования УССР. На аналоговых, аналого-цифровых и аналого-цифро-физических моделях прошли исследования практически все электропередачи тепловозов, которые разрабатывались Харьковским НИИ "Электротяжмаш" для Луганского тепловозостроительного завода. Разработанный десятилетия назад тяговый подвижной состав до сих пор перевозит грузы и пассажиров по железным дорогам Украины и стран СНГ.

Редколлегия Вестника НТУ "ХПИ", сотрудники кафедры вычислительной техники и программирования, факультета компьютерных и информационных технологий НТУ "ХПИ" горячо поздравляют Вас, Николай Иванович, со славным 80-летним юбилеем и желают крепкого здоровья, творческого вдохновения, счастья и успехов в научно-педагогической деятельности, в подготовке новых научных кадров.

Математичні методи та моделі

УДК 621.3.095.21:621.3.018

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.24.01

К. Л. ГОРЯЩЕНКО, канд. техн. наук, доц., Хмельницький національний університет, Хмельницький

МОДЕЛЮВАННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ СПЕКТРУ СИГНАЛУ ОПОРНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ЗАДАЧ ФАЗОВІЙ ДАЛЬНОМЕТРІЇ У СЕРЕДОВИЩІ МАТЛАВ

В статті представлені результати дослідження спектрального аналізу сигналів, що складаються з гармонійних сигналів із нецілими періодами. Створено модель генератора опорного сигналу із заданою шириною спектра. Для аналізу застосовано дискретне перетворення Фур'є (ДПФ). Досліджено зміну спектральних складових при зміні ширини вікна аналізу за рахунок відкидання відліків. Встановлено можливість більш точного визначення спектральних складових сигналу за рахунок накопичення результатів ДПФ. Іл.: 5. Табл.: 1. Бібліогр.: 9 назв.

Ключові слова: спектр; модель генератора; генератор опорного сигналу; дискретне перетворення Фур'є.

Постановка проблеми та аналіз літератури Для аналізу стану провідникової лінії застосовуються різні методи. Найбільш відомі це методи рефлектометрії. Класична та проста в реалізації це імпульсна рефлектометрія або рефлектометрія в часовій області (time dimension reflectometry, TDR). Розвиток цифрової техніки дозволив впроваджувати інший вид рефлектометрії – фазова рефлектометрія або рефлектометрія в частотній області (frequency dimension reflectometry, FDR).

Багаточастотний фазовий метод визначення, що базується на відбиттях від пошкоджень є зручним інструментом для аналізу стану такої лінії. В сучасних дослідженнях неодноразово вказувалось на можливість однозначності в трактуванні отриманої інформації таким методом [1, 2].

В роботах [1, 2] було показано, що незважаючи на те, що сигнали відбиття у фазовому методі на кожній частоті є векторною сумою гармонійних сигналів на частоті зондування, але вектор суми цих сигналів буде змінюватись в залежності від частоти сигналу. Причина полягає у зміні сумарного кута зсуву фази в кожному випадку, для якого він визначається приростом кута зсуву фази для кожного відбиття від частоти. А отже, як це було показано в [2 – 4], має місце так зване обертання вектору відбиття (або еквівалентна йому за сенсом швидкість зміни кута зсуву фази відбиття) від частоти з певною кутовою швидкістю, яка визначається згідно виразу [4]:

$$\Omega = \frac{d\varphi}{d\omega}, \quad (1)$$

де $d\varphi$ – приріст кута зсуву фази, що виникає при зміні частоти зонduючого сигналу на величину $d\omega$.

Отже, в основі виразу (1) знаходиться частота ω опорного генератора. Зазвичай до генератора виставляється вимога забезпечення високої стабільності сигналу в часі, а також мінімальна нерівномірність спектру сигналу на виході такого опорного генератора. Питанням побудови високостабільних опорних генераторів займалися багато авторів та наукових колективів [5]. Такі генератори сильно відрізняються за середньою частотою, рівневі сигналів і відносній нестабільності частоти, яка може змінюватись від 10^{-3} до 10^{-15} . Періодичні коливання автономних генераторів $u(t)$ характеризуються середньою частотою, формою коливання на протязі його періоду і флуктуаціями поточної фази. Стабільність частот таких генераторів оцінюється порівнянням їх сигналів з коливаннями вторинних стандартів частоти. Майже гармонічне коливання опорного автогенератора можна записати у вигляді:

$$u(t) = u_0[1 + \mu(t)]\sin[2\pi f_0 t + \varepsilon(t) + \varphi_0], \quad (2)$$

де u_0 і f_0 – амплітуда і носійна частота опорного сигналу, $\mu(t)$ і $\varepsilon(t)$ – амплітудна та фазові нестабільності опорного сигналу, φ_0 – початкова фаза коливання.

Безпосередньо після увімкнення напруг автогенераторів у змінні $\mu(t)$ і $\varepsilon(t)$ входять регулярні складові, що визначають тривалість встановлення амплітуди та вибіг частоти під час прогріву.

У фіксованому температурному режимі процеси, що викликають амплітудну та фазові нестабільності є випадковими. При довготривалій роботі можливий дрейф середньої частоти, що пов'язаний із старінням стабілізуючого резонатора або деградацією вакууму у колбах атомних стандартів частоти [6]. Форма коливань автогенераторів, будь якої конструкції не є абсолютно гармонічною. Характеристика спотворення форми гармонічного коливання являє собою рівень потужності вищих гармонік в $S_m(f)$ на частотах $2f_0$ і $3f_0$ або потужність усіх паразитних спектральних компонент у широкій смузі частот по відношенню до потужності на носійній частоті. Порівняння параметрів опорних генераторів наведено у таблиці.

Мета статті. Застосування високостабільних за частотою та у часі опорних генераторів дозволяє реалізувати апаратно пристрій для аналізу стану та визначення параметрів пошкоджень в лініях зв'язку на основі виразу (1). Проте в літературі не міститься докладних досліджень щодо

впливу нерівномірності спектру сигналу опорного генератора на результат вимірювання в фазових методах. Тому метою статті є моделювання в середовищі Matlab генератора сигналу, форма сигналу якого наближено до реального, та оцінювання впливу його на вимірювальний сигнал фазової рефлектометрії.

Таблиця

Порівняльні характеристики
високоточних опорних генераторів

	ТКГ	ТСГ	Атомний стандарт	Атомний стандарт CSAC
Фізичний об'єм, см ³	0,07	52	122	16
Потужність при 25 °С, Вт	0,020	3,0	10,0	0,120
Початкова точність	$<1 \times 10^{-6}$	$<1 \times 10^{-7}$	$<5 \times 10^{-11}$	$<5 \times 10^{-11}$
Температурний коефіцієнт	$\pm 3 \times 10^{-7}$	$\pm 3 \times 10^{-8}$	$\pm 3 \times 10^{-10}$	$\pm 1 \times 10^{-9}$
Вартість	низька	висока	висока	висока

ТКГ – термокомпенсовані генератори

ТСГ – термостабілізовані генератори

Основна частина. Для визначення пошкоджень в провідниковій лінії та визначення характеристик цих пошкоджень, в роботі [7] запропоновано застосовувати алгоритм на основі зміни ширини вікна для дискретного перетворення Фур'є.

Проведені моделювання були виконані для ідеального сигналу виду $U_0 \cos(2\pi f_0 t)$, для якого цілком зрозуміло, що спектр такого сигналу містить тільки центральну частоту f_0 . Для моделювання використано середовище MatLab. Для формування спектру сигналу було використано окрему процедуру, лістинг якої показано на рис. 1. SigKoeff – масив коефіцієнтів, що відображують нерівномірність спектру, від 0 до +1. Встановлення відповідних значень дозволяє описати довільну нерівномірність спектру генератора. SigKoeffSt визначає вид характеристики.

Результатом створеного масиву є характеристика, яка за своєю формою відповідає до спектральної характеристики довільного генератора, для якого характерно наявність центральної частоти та бічні частоти. Індекс елементу SigKoeff відповідає певній частоті генератора згідно виразу $f = f_0 \cdot \text{SigKoeff}$. Характеристика спектру генератора показана на рис. 2.

```

FrMax = 20;
SigKoeffSt = 10;
SigKoeff = zeros(FrMax*2+1);
for Fr = -FrMax:1:+FrMax
    SigKoeff(Fr+FrMax+1) = (1-abs(Fr)/FrMax)^SigKoeffSt;
end;

```

Рис. 1. Процедура формування масиву значень нерівномірності спектру сигналу

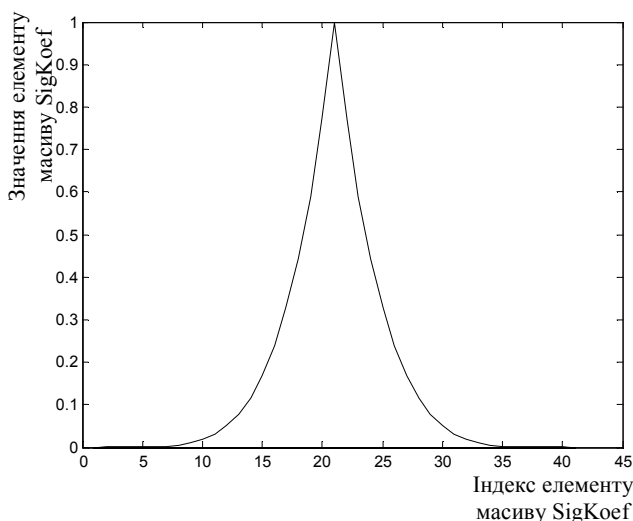


Рис. 2. Характеристика довільного генератора, що описується масивом SigKoeff при SigKoeffSt = 10

Вихідний тестовий сигнал формується згідно до лістингу рис. 3. В даному моделюванні розглядається задача визначення складових сигналу, що мають довільні, нецілі частоти.

Для оцінювання відношення потужності корисного вузькосмугового сигналу (носійної) до потужності найбільш потужної паразитної частотної складової (гармоніки) використовується безрозмірна величина, відома як *SFDR* (Spurious-Free Dynamic Range, динамічний діапазон вільний від паразитних складових) [8]:

$$SFDR = 10 \log(P_{\max}/P_{\text{average}}),$$

де $P_{\max}$ – потужність максимальна; P_{average} – середня потужність по ширині спектру сигналу.

Так, для сигналу генератора з 40 відліків ($FrMax = 20$) та при $SigKoeffSt = 35$, отримаємо *SFDR* в 14,8 дБ. Для сигналу з 100 відліків та $SigKoeffSt = 55$ відповідне значення *SFDR* складе 17,4 дБ. Для прикладу,

дешевий DDS генератор (до 120 МГц) AD9850 забезпечує SFDR на рівні не нижче 50 дБ [9].

Розглянемо сигнал відбиття, що формується для декількох пошкоджень абонентської лінії. Приклад коду наведено на рис. 3.

```
% амплітуда
am1 = +1.2e-1;
am2 = +2.4e+1;
am3 = -4.2e+1;
am4 = +2.9e+1;

% частота
s1 = 10.4;
s2 = 64.1;
s3 = 87.3;
s4 = 106.2;

% початковий зсув фази
p1 = 0.5*pi;
p2 = 0.7*pi;
p3 = 1.2*pi;
p4 = 0.2*pi;

for Fr = -FrMax+1:+FrMax
    y = y + SigKcoef(Fr+FrMax+1)*am1*sin(2*pi*(s1+Fr)*t + p1);
    y = y + SigKcoef(Fr+FrMax+1)*am2*sin(2*pi*(s2+Fr)*t + p2);
    y = y + SigKcoef(Fr+FrMax+1)*am3*sin(2*pi*(s3+Fr)*t + p3);
    y = y + SigKcoef(Fr+FrMax+1)*am4*sin(2*pi*(s4+Fr)*t + p4);
end;
```

Рис. 3. Формування тестового сигналу

Результатом моделювання є відповідний сигнал [4], що представляє собою сукупність миттєвих значень амплітуд сигналів з різними частотами згідно до параметрів амплітуди, частоти та фази.

На рис. 4 показано результат роботи алгоритму, що розроблено у роботі [7] для виявлення складових сигналу з довільним значенням частот та фаз.

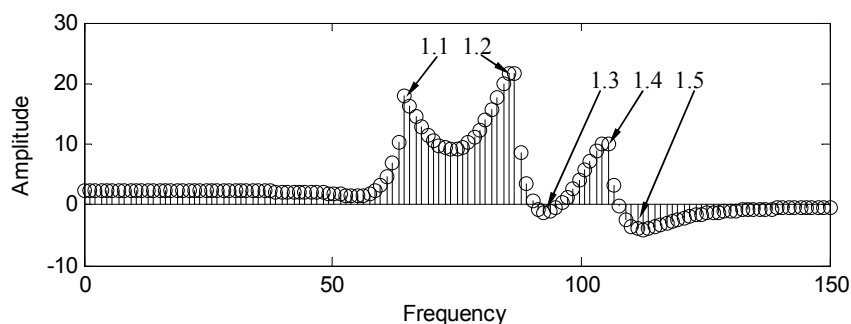


Рис. 4. Спектральний аналіз синтезованого сигналу із застосуванням ДПФ

Для порівняння показано результати ДПФ вхідного сигналу.

Цифрами "5" та "30" показано криві, що відображують спектральні складові при $\text{SigKoeffSt} = 5$ та $\text{SigKoeffSt} = 30$, відповідно. Буквами "А" та "Б" показані найбільш характерні складові.

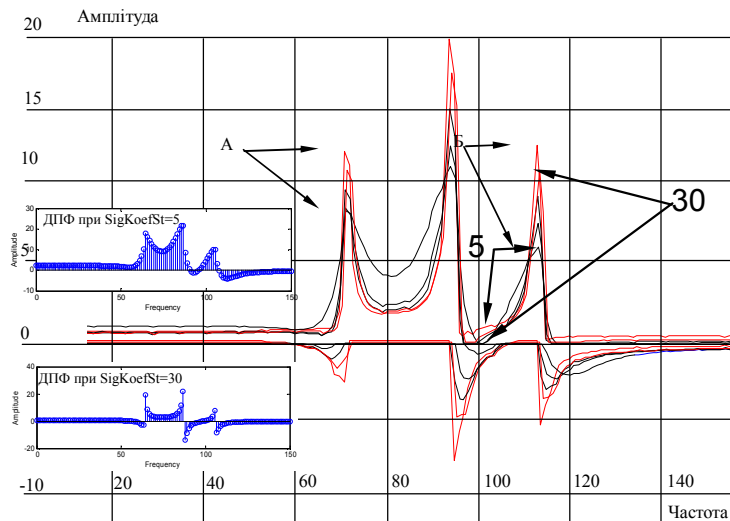


Рис. 5. Виявлення складових сигналу фазової рефлектометрії з довільним значенням частот та фаз при $\text{SigKoeffSt} = 5$ та 30.

Як видно з рисунку, зростання значення SigKoeffSt , а отже і рівня придушення бокових гармонік в спектрі, дозволяє більш вірно виявляти амплітуди сигналів. Для прикладу, сигнал "А" є значно вищим за амплітудою ніж сигнал "Б" (рис. 5) при рівні $\text{SigKoeffSt} = 5$, а вже за рівня $\text{SigKoeffSt} = 30$ сигнал "Б" стає вищим за "А", що коректніше відображує рівні сигналів в початковому модельованому сигналі (рівні 24 та 29 умовних одиниць). Подальше зростання SigKoeffSt наближає значення амплітуд та їх співвідношення до початкового, що задано на початку. Крім того, зменшується розтікання сигналів та покращується їх форма, що дозволяє детектувати сигнали з меншими амплітудами.

Висновки. В результаті проведеного теоретичного дослідження впливу рівня динамічного діапазону вільного від паразитних складових (SFDR) сигналу опорного генератора на сумарний сигнал відбиття в фазовій дальнометрії обґрунтовано можливість застосування спектрального аналізу зі змінною шириною вікна. Отримана модель опорного генератора дозволяє задавати довільний рівень SFDR. В результаті порівняння SFDR моделі опорного генератора із SFDR існуючих генераторів встановлено, що генератори на базі DDS-синтезаторів володіють вищим рівнем SFDR, а отже можуть бути

використані для практичного застосування.

Список літератури:

1. Мазур І. Аналіз сумарного фазового сигналу відбиття на різних частотах методами спектрального аналізу / І. Мазур, К.Л. Горященко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2009. – № 2. – С. 36-40.
2. Горященко К.Л. Імпульсно-фазові вимірювання для лінії із двома неоднорідностями / К.Л. Горященко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький. – 2003. – № 1. – С. 80-82.
3. Горященко К.Л. Аналіз спектральних складових сумарного сигналу для багатоскладового фазового методу аналізу стану лінії зв'язку. Повідомлення 1 / К.Л. Горященко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2007. – Т. 1. – № 6. – С. 115-120.
4. Горященко К.Л. Обертання часових складових сумарного сигналу в фазовій дальнометрії / К.Л. Горященко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – № 1. – С.144-147.
5. Полікаровських О.І. Система передавання цифрових даних / О.І. Полікаровських, І.В. Троцишин, І.В. Любчик // Збірник наукових праць. За результатами IX–НТК "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах". – 2002. – Том.1. – С. 187–190.
6. Бондарев В.Н. Цифровая обработка сигналов: методы и средства.: Учебное пособие для вузов / В.Н. Бондарев, Г. Трестер, В.С. Чернега. – Х. : Конус, 2001. – С. 398.
7. Horiashchenko Kostyantyn. Spectral components definition of the signal with harmonic signal noninteger period components. Khmelnytsky national university, Khmelnytsky, Ukraine. 2014. Issue 1. – P. 195-198.
8. Walt Kester, MT-003: Understand SINAD, ENOB, SNR, THD, THD + N, and SFDR so You Don't Get Lost in the Noise Floor, Analog Devices, Retrieved 26 July 2011.
9. AD9850. CMOS, 125 MHz Complete DDS Synthesizer. Analog Device. // <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9850.pdf>

References:

1. Mazur I., and Horiashchenko K.L. (2009), "Analysis of the total phase reflection signal at different frequencies of the methods of spectral analysis". *Khmelnytsky. Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, Issue 2, pp. 36-40.
2. Horiashchenko K.L. (2003), "Pulse-phase measurements for a line with two inhomogeneous". *Khmelnytsky. Measuring and Computing Devices in Technological Processes. Issue 1*, pp. 80-82.
3. Horiashchenko K.L. (2007), "Analysis of the spectral structures of the total signal for the multi-phase phase analysis of the state of the communication line. Message 1". *Khmelnytsky. Herald of the Khmelnytsky National University. Technical Sciences. Issue 6, Part 1*, pp. 115-120.
4. Horiashchenko K.L. (2007), "Rotation of time components of the total signal in the phase ranging". *Khmelnytsky. Herald of the Khmelnytsky National University. Technical Sciences. Issue 1*. pp.144-147.
5. Polikarovskiy O.I., Trotsishin I.V., and Lyubchik V.R. (2002), Digital data transmitting system. Collection of scientific works. "Measuring and computing engineering in technological processes". Issue 1, pp. 187-190.
6. Bondarev V.N., Trester G., and Chernega V.S. (2001), *Digital Signaling: Methods and Tools.: Textbook for High Schools*. Konus, Kharkov, pp. 398.

7. Horiashchenko Kostyantyn. (2014) "Spectral components definition of the signal with harmonic signal noninteger period components". *Journal of Khmelnytsky National University, Khmelnytsky, Ukraine*, Issue 1. pp. 195-198.
8. Walt Kester, (2011), *MT-003: Understand SINAD, ENOB, SNR, THD, THD + N, and SFDR so You Don't Get Lost in the Noise Floor*, Analog Devices.
9. AD9850. *CMOS, 125 MHz Complete DDS Synthesizer*. Available at www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9850.pdf

Статтю представив д-р техн. наук. проф. ОНАЗ Троцишин І.В.

Надійшла (received): 14.02.2018 р.

Horiashchenko Konstantin, Cand. Tech. Sci, Associate professor
Khmelnytsky national university, Ukraine
Str. Institut'ska, 11, Khmelnytsky, Ukraine, 29016
e-mail: kstvg@yandex.ua
ORCID ID: 0000-0002-7034-8702

УДК 621.3.095.21:621.3.018

Горященко К.Л. Моделирование неравномерности спектра сигнала опорного генератора для задач фазовой дальнометрии в среде Matlab / К.Л. Горященко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 7 – 15.

В статті представлені результати дослідження спектрального аналізу сигналів, що складаються з гармонійних сигналів із нецілими періодами. Створено модель генератора опорного сигналу із заданою шириною спектра. Для аналізу застосовано дискретне перетворення Фур'є (ДПФ). Досліджено зміну спектральних складових при зміні ширини вікна аналізу за рахунок відкидання відліків. Встановлено можливість більш точного визначення спектральних складових сигналу за рахунок накопичення результатів ДПФ. Ил.: 5. Табл.: 1. Бібліогр.: 9 назв.

Ключові слова: спектр; модель генератора; генератор опорного сигналу; дискретне перетворення Фур'є.

УДК 621.3.095.21:621.3.018

Горященко К.Л. Моделирование неравномерности спектра сигнала опорного генератора задач фазовой дальнометрии в среде Matlab / К.Л. Горященко // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 7 – 15.

В статье представлены результаты исследования спектрального анализа сигналов, состоящих из гармонических сигналов с нецелой периодами. Создана модель генератора опорного сигнала с заданной шириной спектра. Для анализа применено дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Исследовано изменение спектральных составляющих при изменении ширины окна анализа за счет отбрасывания отсчетов. Установлена возможность более точного определения спектральных составляющих сигнала за счет накопления результатов ДПФ. Ил.: 5. Табл.: 1. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: спектр; модель генератора; генератор опорного сигнала; дискретное преобразование Фурье.

UDC 621.3.095.21:621.3.018

Horiaschenko K.L. Modeling of the unevenness of the signal spectrum of the reference oscillator generator for phase-distance problems in the Matlab / K.L. Horiaschenko // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2017. – № 24 (1300). – P. 7 – 15.

The article presents the results of research the determination of the spectral analysis of signals consisting of harmonic signals with inexpedient periods. The model of the generator of the reference signal with the given width of the spectrum is created. A discrete Fourier transform (DFT) has been used for analysis. The change of the spectral components in the change of the width of the analysis window due to the counting of the samples was studied. The possibility of more precise determination of the spectral components of the signal due to accumulation of the results of DFT is established. Figs.: 5. Tabl.: 1. Refs.: 9 titles.

Keywords: spectrum; generator model; reference signal generator; discrete Fourier transform.

УДК 514.86

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.24.02

А. А. ДАШКЕВИЧ, канд. техн. наук, доц., докторант, НТУ "ХПИ",
О. В. ШОМАН, д-р. техн. наук, проф., зав. каф., НТУ "ХПИ"

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧЕЧНЫХ МНОЖЕСТВ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ХЕШИРОВАНИЯ

В работе предложен алгоритм для определения меры пространственного распределения точечных множеств на основе алгоритма пространственного хеширования. В работе вводится расширение меры пространственной плотности точечного множества на трехмерное пространство. Разработанный подход позволяет выявлять корреляцию двух точечных множеств как скалярного произведения распределения плотностей индексов ближайшего соседства, что дает возможность решения задачи сегментации точечных множеств. Ил.: 2. Библиогр.: 15 назв.

Ключевые слова: точечное множество; пространственное хеширование; мера пространственной плотности; индекс ближайшего соседства; сегментация точечных множеств.

Постановка проблемы. В задачах компьютерного зрения данные с сенсоров камеры часто представлены в виде точечных множеств: матрицы яркости пикселей при фотосъемке, облака точек в задачах стереозрения. При этом возникает необходимость сегментации таких точечных множеств, т. е. их разбиения на независимые компоненты. Задача сегментации предполагает решение двух связанных подзадач:

1. Нахождение точек, которые находятся в некоторой окрестности от заданной;

2. Нахождение геометрических характеристик точечного множества в локальных окрестностях.

На данный момент точное решение для задачи поиска ближайших соседей дают переборные алгоритмы поиска, которые обладают квадратичной вычислительной сложностью. Выделение геометрических признаков в локальной окрестности основано на анализе пространственного распределения точек и статистических показателях ближайшего соседства. Таким образом, качество определения геометрических признаков тесно связано с эффективностью определения ближайших соседей точек. В связи с этим существует необходимость разработки алгоритмов определения геометрических характеристик на основе пространственного анализа с достаточной точностью и вычислительной сложностью в пространствах произвольной размерности.

Анализ последних исследований. Для поиска ближайших соседей используются специальные структуры данных, например kd -деревья [1, 2], BSP -деревья [3, 4], R -деревья [5] и др., а также алгоритмы по обработке таких структур [6]. Однако, эффективность подобных структур данных и алгоритмов падает при росте числа измерений N [7]. В настоящее время развиваются алгоритмы приблизительного поиска ближайших соседей в многомерных пространствах, среди которых можно выделить методы, основанные на использовании хеширующих функций, которые однозначно указывают на область пространства, которой принадлежит точка.

В работе [8] представлен метод пространственного хеширования, в котором предлагается заменить координаты x , y и z точек множества на одну координату – хеш, который предлагается вычислять по следующему соотношению:

$$h = x/c \cdot 2^k + y/c \cdot 2^m + z/c \cdot 2^n,$$

где c – размер сетки; k , m и n – некоторые константы, такие что, $k > m > n$ (или $k < m < n$).

В работе [9] предложен следующий подход для вычисления хеша:

$$h = ((x \cdot p_1) \text{ XOR } (y \cdot p_2) \text{ XOR } (z \cdot p_3)) \text{ MOD } n,$$

где $p_1 = 73856093$, $p_2 = 19349663$, $p_3 = 83492791$ – большие простые числа, n – общее число точек.

В работе [10] предложен алгоритм приблизительного поиска ближайших соседей на двумерной сетке для применения в решении задач молекулярной динамики.

Одним из преимуществ данного алгоритма является отсутствие коллизий хешей. Однако, данный алгоритм может быть использован для пространств с $N = 2$, что приводит к необходимости его расширения на пространства большей размерности.

В работах [11, 13] изучаются алгоритмы и структуры данных для поиска ближайших соседей в многомерных пространствах. В [13 – 15] рассматриваются различные подходы по выявлению геометрической структуры на плоскости и в пространстве. Работа [15] посвящена пространственным статистикам для задач географии.

Цель работы. Проведение пространственного анализа N -мерных точечных множеств на основе алгоритма упрощенного пространственного хеширования и меры плотности пространственного распределения множества.

Основная часть. В работе предлагается следующее расширение алгоритма, предложенного в работе [10] для пространственного хеширования в пространствах с $N > 2$:

1) пространство разбивается на многомерную сетку с гиперкубическими ячейками с длиной ребра гиперкуба c ;

2) для каждой точки с координатами $(x_1, \dots, x_i, \dots, x_N)$, заданными на интервале $[0, G_i]$ ($G_i \geq c$ – максимальное значение для координатной оси) вычисляются индексы клетки, в которой находится данная точка:

$$i_i = \frac{x_i}{c}, \dots, i_N = \frac{x_N}{c},$$

где N – размерность пространства;

3) по заданным индексам вычисляются значения хеша:

$$h_k = \frac{i_i \cdot 10^{(N-i)d}}{N},$$

где d – максимальное число разрядов хеша, которое приходится на одну пространственную координату x_i ,

$$t = \max\left(\frac{G_i}{c}\right).$$

Был разработан алгоритм разбиения полученного хеша на отдельные индексы по каждой из координатных осей:

$t = N$
 до тех пор, пока $t > 0$, повторять:
 $i_i = h \bmod 10^d$
 $h = h / 10^d$
 $t = t - 1$

Данный алгоритм разбивает пространство на многомерную регулярную сетку и назначает каждой ячейке сетки свой уникальный номер-хеш, который явным образом зависит от координат ограничивающего гиперкуба ячейки.

Для изучения пространственного распределения в ячейках предлагается расширить подход из [15] на трехмерное пространство:

1) расчет плотности точек в i -й ячейке:

$$p_i = \frac{n_i}{V},$$

где n_i – количество точек в ячейке; $V = c^N$ – объем ячейки (одинаковый для всех ячеек);

2) расчет среднего расстояния между парами ближайших точек в ячейках:

$$\tilde{d}_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_P} d_j}{N_P},$$

где N_P – число пар точек в ячейке; d_j – расстояние между парами;

3) ожидаемое среднее (индекс случайного распределения):

$$d_E = \frac{1}{3\sqrt[3]{p_i}},$$

4) индекс ближайшего соседства:

$$R_i = \frac{\tilde{d}_i}{d_E}.$$

Значение индекса ближайшего соседства позволяет делать выводы о распределении точек множества в пределах ячейки: при $R < 1$ точки в ячейке рассеяны, при $R = 1$ – распределены случайно, при $R > 1$ – сгруппированы в кластеры.

В рамках исследования поиск всех пар ближайших точек заменен на случайно выбранные пары точек в пределах ячейки, что может быть эффективно при вычислениях в пространствах большой размерности.

Для проверки приведенных положений был проведен расчет хешей и индексов ближайшего соседства для двух точечных множеств, в качестве которых были использованы данные карт глубины двух различных трехмерных сцен (рис. 1). На картах глубины пространственные координаты x и y соответствуют ширине и высоте изображения, координата z кодируется в виде значения уровня яркости пикселей изображения от 0 (черный цвет) до 255 (белый цвет). На рис. 2 приведены соответствующие хеш-разбиения исходных точечных множеств для $N = 3$ с учетом индекса ближайшего соседства, который показан как диаметр точки. При этом пространственной оси x исходной карты глубин соответствует ось пространственных индексов i_1 , оси y – ось i_2 , оси z – ось i_3 хеш-разбиения. Из анализа разбиений и индексов ближайшего соседства можно увидеть, что точки, соответствующие каждому конкретному объекту исходной сцены имеют близкие значения индекса ближайшего соседства, что позволяет проводить разбиение

точечного множества на отдельные подобласти путем пороговой обработки по критическим значениям таких индексов.

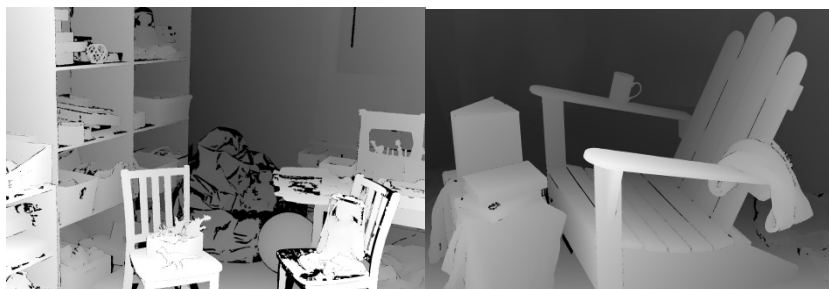


Рис. 1. Карты глубины

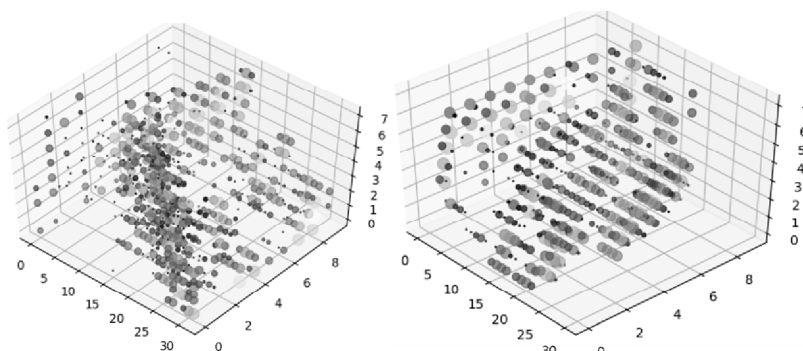


Рис. 2. Хеши множеств с учетом индекса ближайшего соседства

Предложенный подход позволяет оценить глобальную геометрическую структуру точечного множества, однако не позволяет напрямую сравнивать точечные множества между собой. Для выявления сходства точечных множеств предлагается способ вычисления коэффициента корреляции множеств как скалярного произведения нормированных плотностей распределения индексов ближайшего соседства. Для указанных множеств были вычислены гистограммы распределения плотностей и вычислено значение коэффициента корреляции, которое составило $C \approx 0.36$, что позволяет делать выводы о мере различия данных точечных множеств.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Научную новизну предложенной работы составляют:

1. Алгоритм пространственного хеширования для быстрого вычисления приблизительных ближайших соседей точек в N -мерном пространстве.

2. Способ вычисления пространственных характеристик точечных множеств на основе индекса ближайшего соседства.

3. Способ вычисления меры сходства двух множеств как скалярного произведения нормированных плотностей распределения индексов ближайшего соседства.

Практическая ценность подхода заключается в возможности его применения при решении таких задач компьютерного зрения и геометрического моделирования, как сопоставление и объединение карт глубины, классификация и сегментация точечных множеств.

Дальнейшие исследования будут направлены на выделение локальных характеристик точечных множеств и их топологическую сегментацию.

Список литературы:

1. Bentley J.L. Multidimensional Divide and Conquer / J.L. Bentley // Communications of the ACM, 1980. – Vol. 23. – №. 4. – P. 214-229.
2. Friedman J.H. An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time / J.H. Friedman, J.L. Bentley, and R.A. Finkel // ACM Transactions on Mathematical Software, 1977. – Vol. 3. – №. 3. – P. 209-226.
3. de Berg M. Computational Geometry: Algorithms and Applications / M. de Berg // Springer Science & Business Media, 2008. – 259 p.
4. Castelli V. Image Databases: Search and Retrieval of Digital Imagery / V. Castelli, D. Lawrence // John Wiley & Sons, 2004. – 422 p.
5. Guttman A. R-Trees: A Dynamic Index Structure for Spatial Searching / A. Guttman // Proceedings of ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, 1984. – P. 47-57.
6. Liu T. An Investigation Of Practical Approximate Nearest Neighbor Algorithms / T. Liu, A. Moore, A. Gray, K. Yang // Neural Information Processing Systems, 2004. – P. 825-832.
7. Beyer K. When Is "Nearest Neighbor" Meaningful? / K. Beyer, J. Goldstein, R. Ramakrishnan, U. Shaft // In International Conference on Database Theory: Springer, 1999. – P. 217-235.
8. Nguyen H. (ed.). GPU Gems 3 / H. Nguyen // Addison Wesley, 2007. – 1008 p.
9. Ize T. Asynchronous BVH Construction for Ray Tracing Dynamic Scenes on Parallel Multi-Core Architectures / T. Ize, I. Wald, S.G. Parker // Proceedings of the 2007 Eurographics Symposium on Parallel Graphics and Visualization, 2007. – P. 101-108.
10. Ніцин О.Ю. Спрощений алгоритм просторового хешування для задач молекулярної динаміки / О.Ю. Ніцин, А.О. Дашкевич, О.В. Охотська, О.Є. Мацулевич // Науковий вісник таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2016. – Вип. 6. – Т. 1. – С. 287-291.
11. Muja M. Scalable Nearest Neighbor Algorithms for High Dimensional Data / M. Muja, D.G. Lowe // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2014. – Vol. 36. – P. 2227-2240.
12. Megala, R. Hash tree algorithm for centralized cognitive radio networks / R. Megala, S. Sathya // International Journal of Computer Science and Mobile Computing, 2014. – Vol. 3. – № 11. – P. 305-315.
13. Bewley A. Advantages of exploiting projection structure for segmenting dense 3D point clouds / A. Bewley, B. Upcroft // Proceedings of the 2013 Australasian Conference on Robotics and Automation, Australian Robotics & Automation Association, University of New South Wales, Sydney, NSW, 2013. – P. 1-8.

14. Li L. Point Pattern Analysis for Clusters Influenced by Linear Features: An Application for Mosquito Larval Sites / L. Li, L. Bian, P. Rogerson, G. Yan // *Transactions in GIS*, 2015. – Vol. 19. – 835-847.

15. McGrew J. An introduction to statistical problem solving in geography, 2nd ed. / J. McGrew, C. Monroe // Boston : McGraw-Hill, 2000. – 254 p.

References:

1. Bentley, J.L., (1980). "Multidimensional Divide and Conquer". *Communications of the ACM*, 1980, Vol. 23, No. 4, pp. 214-229.
2. Friedman, J.H., Bentley, J.L. and Finkel R.A., (1977). "An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time". *ACM Transactions on Mathematical Software*, 1977, Vol. 3, No. 3, pp. 209-226.
3. de Berg, M., (2008). *Computational Geometry: Algorithms and Applications*. Springer Science & Business Media, 2008, 259 p.
4. Castelli, V., and Lawrence, D., (2004). *Image Databases: Search and Retrieval of Digital Imagery*. John Wiley & Sons, 422 p.
5. Guttman, A. (1984). "R-Trees: A Dynamic Index Structure for Spatial Searching". *Proceedings of ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, 1984, pp. 47-57.
6. Liu, T., Moore, A., Gray, A., and Yang, K., (2004). "An Investigation Of Practical Approximate Nearest Neighbor Algorithms". *Neural Information Processing Systems*, Vol. 2, No. 3, pp. 825-832.
7. Beyer, K., Goldstein, J., Ramakrishnan, R., and Shaft, U., (1999). "When Is "NearestNeighbor" Meaningful?" *In International Conference on Database Theory: Springer*, pp. 217-235.
8. Nguyen, H., (2007). *GPU Gems 3*. Addison Wesley, 2007, 1008 P.
9. Ize, T., Wald, I. and Parker S.G. (2007). "Asynchronous BVH Construction for Ray Tracing Dynamic Scenes on Parallel Multi-Core Architectures". *Proceedings of the 2007 Eurographics Symposium on Parallel Graphics and Visualization*, pp. 101-108.
10. Nitsyn, A., Dashkevich, A., Ohotskaya, E., and Matsulevich A., (2016). "Simplified spatial hashing algorithm for molecular dynamics problems". *Scientific bulletin of the Tavria agrotechnological state university*, No. 6, Vol. 1, pp. 287-291.
11. Muja, M., and Lowe, D.G., (2014). "Scalable Nearest Neighbor Algorithms for High Dimensional Data". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 36, pp. 2227-2240.
12. Megala, R., and Sathya, S. (2014). "Hash tree algorithm for centralized cognitive radio networks". *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, Vol. 3, No. 11, November, pp. 305-315.
13. Bewley, A., and Upcroft, B., (2013). "Advantages of exploiting projection structure for segmenting dense 3D point clouds". *Proceedings of the 2013 Australasian Conference on Robotics and Automation*, University of New South Wales, Sydney, NSW, pp. 1-8.
14. Li, L., Bian, L., Rogerson, P., and Yan, G., (2015). "Point Pattern Analysis for Clusters Influenced by Linear Features: An Application for Mosquito Larval Sites". *Transactions in GIS*, Vol. 19, pp. 835-847.
15. McGrew, J., and Monroe, C., (2000). *An introduction to statistical problem solving in geography*. 2nd ed. McGraw-Hill, Boston, 254 p.

*Статью представил д-р техн. наук, проф. Национального
технического университета "Харьковский политехнический институт"
А.Ю. Ницын*

Поступила (received) 15.04.2018

Повторно 05.05.2018

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

Shoman Olga, Doct. Tech. Sci.
National Technical University "KhPI",
Str. Kyrpychova, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (050) 806-94-74, e-mail: olgasho@ukr.net
ORCID ID:0000-0002-3660-0441

УДК 514.86

Аналіз просторового розподілу точкових множин на основі алгоритму просторового хешування / Дашкевич А.О., Шоман О.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 16 – 24.

В роботі запропоновано алгоритм для визначення міри просторового розподілу точкових множин на основі алгоритму просторового хешування. В роботі вводиться розширення міри просторової густини точкової множини на тривимірний простір. Розроблений підхід дозволяє визначати кореляцію двох точкових множин як скалярного добутку розподілу густини індексів найближчого сусідства, що дозволяє розв'язувати задачі сегментації точкових множин. Ил.: 2. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: точкова множина; просторове хешування; міра просторової густини; індекс найближчого сусідства; сегментація точкових множини.

УДК 514.86

Анализ пространственного распределения точечных множеств на основе алгоритма пространственного хеширования / Дашкевич А.А., Шоман О.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 16 – 24.

В работе предложен алгоритм для определения меры пространственного распределения точечных множеств на основе алгоритма пространственного хеширования. В работе вводится расширение меры пространственной плотности точечного множества на трехмерное пространство. Разработанный подход позволяет выявлять корреляцию двух точечных множеств как скалярного произведения распределения плотностей индексов ближайшего соседства, что дает возможность решать задачи сегментации точечных множеств. Ил.: 2. Библиогр.: 15 назв.

Ключевые слова: точечное множество; пространственное хеширование; мера пространственной плотности; индекс ближайшего соседства; сегментация точечного множества.

UDC 514.86

Analysis of spatial distribution of point sets based on spatial hashing algorithm / Dashkevich A.A., Shoman O.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – № 24 (1300). – P. 16 – 24.

An algorithm for determining the measure of the spatial distribution of point sets based on the spatial hashing algorithm is proposed. In this paper we extend the measure of the spatial density of a point set to a three-dimensional space. The developed approach allows us to identify the correlation of two point sets as a scalar product of the density distribution of nearest neighborhood index, which makes it possible to solve the problems of segmentation of point sets. Figs.: 2. Refs.: 15 titles.

Keywords: point set; spatial hashing; measure of the spatial density; nearest neighborhood index; point set segmentation.

УДК 004.272.2:519.63

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.24.03

О. А. ДМИТРИЕВА, д-р техн. наук, проф., зав. каф. ДонНТУ,
Покровск,

Н. Г. ГУСЬКОВА, асп. ДонНТУ, Покровск, Высшая техническая
школа университета прикладных наук, Бинген, Германия

РАЗРАБОТКА КОЛЛОКАЦИОННЫХ СХЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ШАГОМ В ЭВОЛЮЦИОННЫХ УРАВНЕНИЯХ

Работа посвящена вопросам параллельного управления шагом интегрирования по переменной времени при сведении эволюционных уравнений методом прямых к задаче Коши. Численная реализация осуществляется коллокационными блочными разностными схемами с изменяемыми размерностями опорных и расчетных блоков. Программное формирование расчетных формул позволяет отслеживать динамику вычислительного процесса и автоматически переходить на схемы растяжения – сжатия шага. Приведенные теоретические положения подкреплены экспериментальными исследованиями на тестовых задачах. Ил.: 9. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: управление шагом; эволюционные уравнения; метод прямых; коллокационные блочные разностные схемы; изменяемые размерности.

Постановка проблемы. При численной реализации эволюционных уравнений с частными производными методом прямых в результате дискретизации, которая может значительно усложняться еще и за счет геометрической конфигурации границ, формируется система линейных или нелинейных алгебраических уравнений, размерность которой может достигать порядков 10^{12} – 10^{14} . Решение систем такого порядка не может быть получено без привлечения многопроцессорных компьютеров. При этом возникает дополнительная проблема, связанная с необходимостью управления шагом интегрирования по времени (τ -уточнение), которая, как правило, реализуется последовательно. Поэтому простым увеличением вычислительной мощности полученная задача большой размерности с вариацией времени не может быть эффективно разрешима. Только комбинируя преимущества суперкомпьютеров и современные численные методы моделирования можно ожидать приемлемых результатов решения.

Анализ литературы. Известно, что с помощью метода прямых [1, 2], который обеспечивает дискретизацию по пространственным переменным, можно свести исходное эволюционное уравнение с частными производными к задаче Коши (1), описываемой системой обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ)

$$u' = \varphi(t, u(t)), \quad u(t_0) = u_0, \quad t \in [t_0, T]. \quad (1)$$

Однако после сведения уравнения с частными производными к задаче Коши для СОДУ возникают проблемы, которые для исходной задачи не были характерными. Так, если рассматриваются явные шаблоны реализации, то выбор шага интегрирования по времени определяется выполнением условия Куранта [3] и напрямую зависит от величины шага по пространственной переменной. Для случая неявных разностных схем шаг по времени регламентируется физической природой решаемой задачи и порядками аппроксимации разностной схемы (схем) [4]. Когда речь идет о численном решении сформированной системы ОДУ, возникают дополнительные возможности, связанные с аппроксимацией более высокого порядка (p -уточнение), локальным контролем ошибок и автоматическим изменением шага интегрирования (τ -уточнение) [5, 6]. Существенное влияние на погрешность получаемого решения будут оказывать также вопросы, связанные с изменением шага по пространственной переменной (h -уточнение) [7]. Однако в этом случае простое уменьшение пространственного шага на некоторый коэффициент γ приводит к увеличению размерности формируемой СОДУ на этот же коэффициент [8], что значительно усложняет решение. Поэтому в этой статье будут рассматриваться вопросы, связанные только с τ -уточнением, что особенно актуально при численном решении жестких дифференциальных уравнений [8, 9]. При этом актуальными являются вопросы соотношения погрешностей результатов и времени, затрачиваемого на получение решения. Для управления шагом в работе предлагается использовать коллокационные блочные методы [9, 10] и методы типа Биккарта [4, 11], которые позволяют обеспечивать параллельное управление шагом интегрирования для целого блока точек.

Цель статьи состоит в разработке коллокационных блочных разностных схем с изменяемыми размерностями опорных и расчетных блоков для параллельного управления шагом интегрирования по переменной времени при сведении эволюционных уравнений методом прямых к задаче Коши.

Разработка коллокационных схем для управления шагом. Рассмотренный в [9, 10] подход, связанный с контролем локальной погрешности на основе сопоставления решений, полученных с разными порядками в совпадающих точках блока, оказывается очень результативным при решении нежестких уравнений и систем и может быть использован для оценки погрешности полученного решения. Но, к сожалению, такой подход не может обеспечивать изменение шага интегрирования во время счета. Этот вопрос становится наиболее

актуальним, когда искомая функция (функции) на отдельных участках интегрирования характеризуется различными скоростями изменения. В этом случае целесообразно использовать для интегрирования адаптируемый шаг, что не позволяют обеспечить расчетные коллокационные схемы в [10].

Для устранения этого недостатка можно ввести новые расчетные схемы, которые также будут строиться на интерполяционных многочленах, степени которых совпадают с количеством точек коллокации, а значения многочленов в этих точках совпадают с правыми частями дифференциального уравнения в расчетных точках. Но точки коллокации не обязательно будут представлять собой равномерную сетку, хотя, желательно (но не обязательно), чтобы они были связаны между собой какими-либо коэффициентами пропорциональности, например, степенями двойки (рис. 1). Поскольку речь идет о многошаговых методах, выделяется множество точек опорного блока

$$t_{n,i} = t_{n,0} + i\tau_n \in [t_{n,-m+1}, t_{n,0}], \quad i = -(m-1), -(m-2), \dots, 0,$$

а также два множества точек, которые будут формировать расчетные блоки:

$$\begin{aligned} t_{n,i}^{(1)} &= t_{n,0} + i\tau_{n_1} \in [t_{n,0}, t_{n,s_1}], \quad i = 1, 2, \dots, s_1, \\ t_{n,i}^{(2)} &= t_{n,0} + i\tau_{n_2} \in [t_{n,0}, t_{n,s_2}], \quad i = 1, 2, \dots, s_2. \end{aligned}$$

При этом проще всего связать шаги интегрирования τ_{n_1} и τ_{n_2} соотношениями $\tau_{n_1} = 2\tau_{n_2}$. Тогда между размерностями расчетных блоков должно будет выполняться соотношение $s_1 = 2s_2$. Счет, как и для случаев, описанных в [9], будет выполняться параллельно для двух расчетных схем с одинаковыми размерностями опорных блоков и с различающимися в s_2/s_1 раз размерностями расчетных блоков. Канонический вид многошаговых коллокационных методов с числом опорных точек m и числом расчетных точек s_1 и s_2 соответственно, будет иметь вид:

$$\begin{aligned} u_{n,i}^{(1)} &= u_{n,0} + \tau_n \sum_{j=1-m}^0 b_{i,j}^{(1)} F_{n,j} + \tau_{n_1} \sum_{j=1}^{s_1} a_{i,j}^{(1)} F_{n,j}^{(1)}, \quad i = 1, 2, \dots, s_1, \\ u_{n,i}^{(2)} &= u_{n,0} + \tau_n \sum_{j=1-m}^0 b_{i,j}^{(2)} F_{n,j} + \tau_{n_2} \sum_{j=1}^{s_2} a_{i,j}^{(2)} F_{n,j}^{(2)}, \quad i = 1, 2, \dots, s_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где $u_{n,i}^{(1)}, u_{n,i}^{(2)}$ – приближенные значения решения (1) в точках $t_{n,i}^{(1)}, t_{n,i}^{(2)}$

соответственно,

$\tau_n, \tau_{n1}, \tau_{n2}$ – шаги интегрирования в опорном блоке, в блоках размерностью s_1 и s_2 ,

$F_{n,j} = \varphi(t_n + j\tau_n, u_{n,j})$ – правые части уравнения (1) в точках, $j = (m-1), -(m-2), \dots, 0$,

$$F_{n,j}^{(1)} = \varphi(t_n + j\tau_{n1}, u_{n,j}), j = 1, 2, \dots, s_1,$$

$$F_{n,j}^{(2)} = \varphi(t_n + j\tau_{n2}, u_{n,j}), j = 1, 2, \dots, s_2,$$

$a_{i,j}^{(1)}, b_{i,j}^{(1)}, a_{i,j}^{(2)}, b_{i,j}^{(2)}$ – коэффициенты расчетных схем (2).

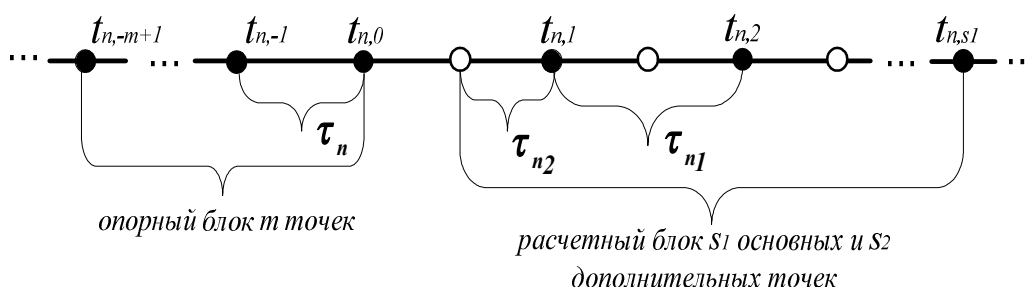


Рис. 1. Схема закрепления опорных, расчетных и промежуточных точек

Для разграничения рассчитанных и искомых точек можно ввести соответствующие обозначения и представить их в виде векторов:

$U_n = \{u_{n,j}\}, n = 1, 2, \dots, j = -(m-1), -(m-2), \dots, 0$ – вектор посчитанных точек,

$U_{n+1} = \{u_{n,j}\}, n = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots, s_1$ – вектор искомых точек для блока s_1 ,

$V_{n+1} = \{u_{n,j}\}, n = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots, s_2$ – вектор искомых точек для блока s_2 ,

$$F_{n,j} = \varphi(t_n + j\tau_n, u_{n,j}), n = 1, 2, \dots, j = -(m-1), -(m-2), \dots, 0,$$

$$F_{n+1,j} = \varphi(t_n + j\tau_{n1}, u_{n,j}), n = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots, s_1,$$

$\Psi_{n+1,j} = \varphi(t_n + j\tau_{n_2}, u_{n,j})$, $n=1,2,\dots$, $j=1,2,\dots,s_2$ – соответственно, вектора правых частей уравнения (1) в известных и искомым точках, $A^{(1)}, B^{(1)}, A^{(2)}, B^{(2)}$ – матрицы коэффициентов разностных схем, $U_{n,0} = (u_{n,0})e$ – решение в точке $t_{n,0}$, e – единичный вектор размерности s .

Тогда в векторной форме система уравнений (2) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} U_{n+1} &= U_{n,0} + \tau_n B^{(1)} F_n + \tau_{n_1} A^{(1)} F_{n+1}, \\ V_{n+1} &= U_{n,0} + \tau_n B^{(2)} F_n + \tau_{n_2} A^{(2)} \Psi_{n+1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для начала расчета необходимо ввести множество опорных значений, которые могут быть определены одношаговым методом, обеспечивающим требуемую точность расчетов. Поиск численного решения может быть сведен к решению на каждом шаге двух нелинейных систем уравнений (3), с последовательным определением векторов $U_1, V_1, U_2, V_2, \dots$. После определения неизвестных коэффициентов и формирования матриц $A^{(1)}, B^{(1)}$ с размерностями $s_1 \times m$ и $s_1 \times s_1$, $A^{(2)}, B^{(2)}$ с размерностями $s_2 \times m$ и $s_2 \times s_2$ вычисления многошаговым блочным методом, представленным в виде систем нелинейных уравнений (3), можно свести к следующим итерационным процессам:

$$\begin{aligned} U_{n+1}^{(1)} &= U_{n,0}e + \tau_n B^{(1)} F_n, \\ U_{n+1}^{(r+1)} &= \left(U_{n,0}e + \tau_n B^{(1)} F_n \right) + \tau_{n_1} A^{(1)} F_{n+1}^{(r)}, \quad n=1,2,\dots, r=1,2,\dots,s_1, \\ V_{n+1}^{(1)} &= U_{n,0}e + \tau_n B^{(2)} F_n, \\ V_{n+1}^{(r+1)} &= \left(U_{n,0}e + \tau_n B^{(2)} F_n \right) + \tau_{n_2} A^{(2)} \Psi_{n+1}^{(r)}, \quad n=1,2,\dots, r=1,2,\dots,s_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Система (4) требует предварительно определения значений вектора U_0 в опорных точках начального блока. Определение начальных значений $U_{n+1}^{(1)}, V_{n+1}^{(1)}$ в расчетных блоках осуществляется на основе многошагового предикторного метода Адамса [3], что позволяет повысить точность начального приближения. Вычисление приближенных значений $U_{n+1}^{(r+1)}, V_{n+1}^{(r+1)}$ решения задачи Коши в каждом следующем

расчетном блоке осуществляется итерационно и независимо. После получения решения в очередном блоке осуществляется сопоставление полученных значений в совпадающих точках. Величина нормы расхождений между значениями приближенных решений в совпадающих узлах основного блока является определяющей для принятия решения о выборе размера шага.

Численная реализация метода прямых с управлением шагом по переменной времени (τ -уточнение). Эксперименты по управлению шагом интегрирования по переменной времени (τ -уточнение) проводились для разных значений шага дискретизации по пространству, исходя из величины которого (h -уточнение) определялось число уравнений n в системе ОДУ ($n = 10, n = 20, n = 40$). Для тестовых задач с известным точным решением точные значения использовались для формирования значений в m начальных точках. Для случаев, когда точное решение отсутствовало, требуемые множества начальных значений определялись одношаговым методом с сопоставимой точностью. В качестве начальных приближений $F_{n,1}, F_{n,2}, \dots, F_{n,s}$ для очередного расчетного блока использовались значения, посчитанные с помощью предикторного метода. При проведении численных экспериментов кроме основных показателей оценивалось также отношение количества результативных шагов к общему числу посчитанных.

В качестве одного из примеров рассматривалась эволюционная тестовая задача [12]

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad t \in [t_0, T], \quad x \in [0, 1] \quad (5)$$

с известным точным решением, с граничными условиями $u(0, t) = u(1, t) = 0$, в начальном условии которого содержится параметр жесткости k

$$u(x, 0) = \sin(\pi x) + \sin(k\pi x). \quad (6)$$

Как показано в [12], методы без управления шагом даже для невысоких значений параметра k не могут обеспечить заявленную точность вычисления. На рис. 2 – 5 приведены графики изменения шага по переменной времени и графики накопленных погрешностей, полученные с помощью разностных схем (4) с размерностями блоков 2×2 и 2×4 . Динамика изменения шага также исследовалась в зависимости от шага дискретизации по пространству, параметра

жесткости k , который принимал значения в интервале $1 \div 10$, и от величины заданной глобальной погрешности ε .

Еще один класс тестов выполнялся для параболического уравнения с известным точным решением, описанного в [13]. Рассматривается однородное уравнение теплопроводности (5) со значениями параметров $L = 1, T = 1, a = 1$ с начальным условием

$$u(x, 0) = \cos(\pi x / L), \quad (7)$$

граничными условиями второго рода

$$\frac{\partial u(0, t)}{\partial x} = \frac{\partial u(L, t)}{\partial x} = 0. \quad (8)$$

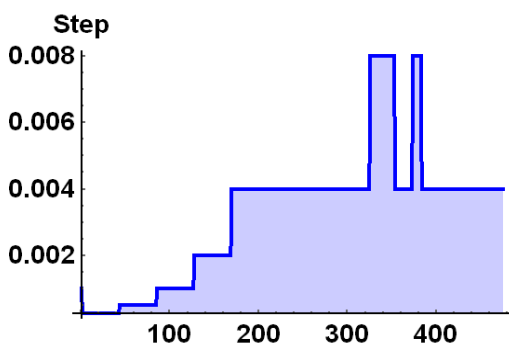


Рис. 2. Автоматическое изменение шага интегрирования для задачи (5-6) в методе прямых, $n = 10, k = 2, \varepsilon = 10^{-6}$

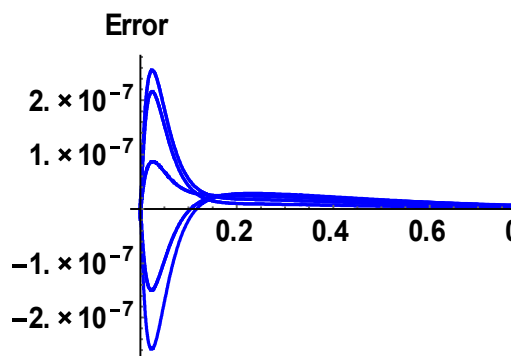


Рис. 3. Графики глобальной погрешности численного решения задачи (5-6) в методе прямых, $n = 10, k = 2, \varepsilon = 10^{-6}$

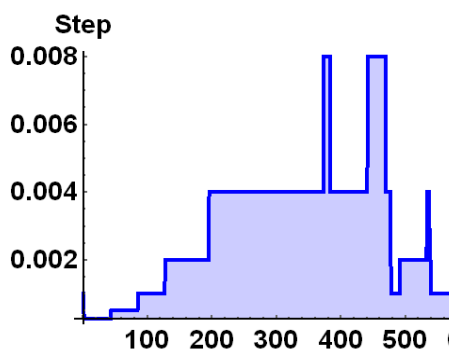


Рис. 4. – Автоматическое изменение шага интегрирования для задачи (5-6) в методе прямых, $n = 10, k = 10, \varepsilon = 10^{-6}$

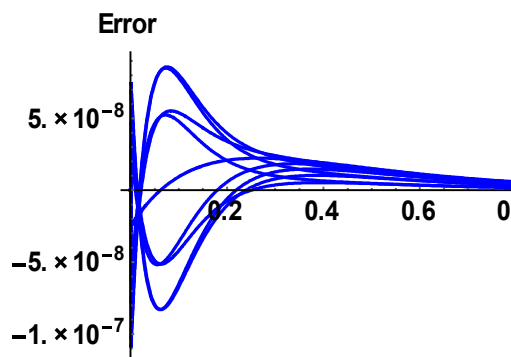


Рис. 5. Графики глобальной погрешности численного решения задачи (5-6) в методе прямых, $n = 10, k = 10, \varepsilon = 10^{-6}$

Шаг дискретизации по пространству определялся размерностью системы обыкновенных дифференциальных уравнений $n = 10, 20, h = L/n$. Величина глобальной погрешности ε задавалась на уровне $\varepsilon = 10^{-6}, 10^{-9}$. Метод прямых реализовывался с помощью разностных схем (4) с размерностями опорного и расчетных блоков 2×2 (2×4) и 3×3 (3×6). Результаты численного моделирования приведены в виде диаграмм изменения шага (рис. 6, 8) и графиков распределения глобальной погрешности численного решения (рис. 7, 9).

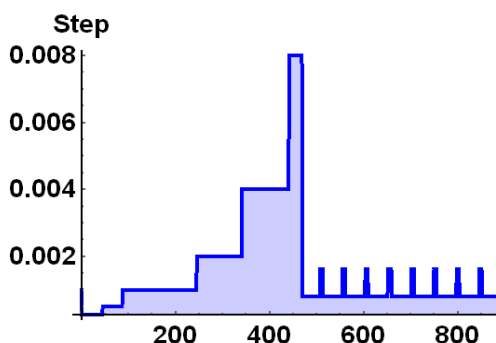


Рис. 6. Автоматическое изменение шага интегрирования для задачи (5,7-8) в методе прямых, $n = 10, \varepsilon = 10^{-6}$

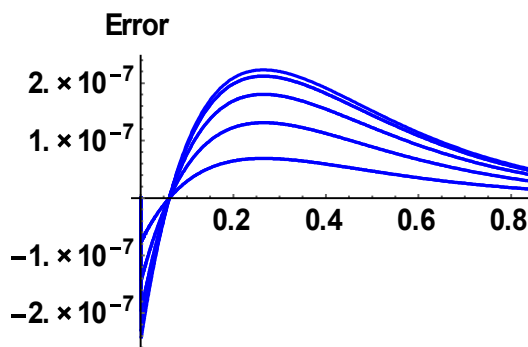


Рис. 7. Графики глобальной погрешности численного решения задачи (5,7-8) в методе прямых, $n = 10, \varepsilon = 10^{-6}$

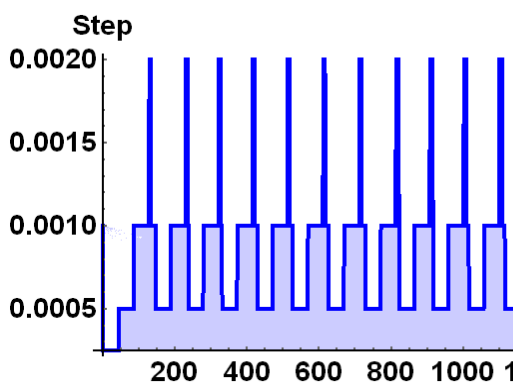


Рис. 8. Автоматическое изменение шага интегрирования для задачи (5,7-8) в методе прямых, $n = 10, \varepsilon = 10^{-9}$

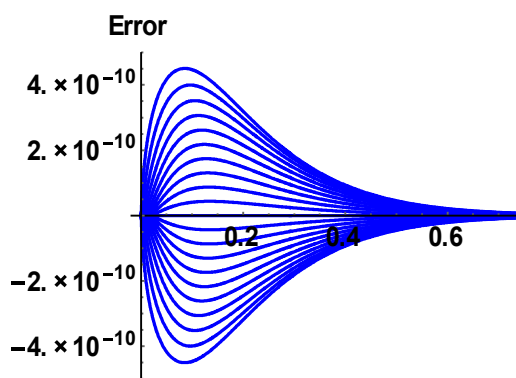


Рис. 9. Графики глобальной погрешности численного решения задачи (5,7-8) в методе прямых, $n = 10, \varepsilon = 10^{-9}$

Результаты проведенного моделирования для этой тестовой задачи показали, что при уменьшении заданного уровня глобальной погрешности значительно сокращается величина шага во переменной времени, соответственно увеличивается общее число шагов, но коэффициент, который определяет отношение принятых шагов к общему количеству, остается практически неизменным и близким к единице, что свидетельствует о высокой эффективности методов управления шагом. При этом сокращение шага дискретизации по пространству из-за граничных условий 2-го рода не дает значительного сокращения погрешности, в то время как из-за увеличения размерности ОДУ наблюдается существенное увеличение времени поиска решения.

Во всех проведенных для этой задачи модельных экспериментах кроме требований по удержанию заданной величины погрешности отслеживались показатели индикаторов, которые обеспечивают принятие решения об изменении размера шага (параметр инерционности, количество итераций для уточнения решения методом Ньютона, близость текущей локальной погрешности к предельному значению, отношения между количеством результативных шагов к общему числу посчитанных и т.п.). Полученные результаты свидетельствуют о высокой результативности предложенного подхода, который основан на использовании многошаговых коллокационных блочных схем с изменяемыми размерностями опорных блоков и расчетных блоков для автоматического управления шагом (τ -уточнения) в методе прямых.

Выводы. Проведенные в данной работе исследования позволили предложить новые подходы к решению проблемы параллельного управления шагом интегрирования по переменной времени. Основная идея, предложенная в работе для управления шагом по переменной времени, основана на использовании многошаговых многоточечных коллокационных блочных схем с изменяемыми размерностями опорных и расчетных блоков с неравномерным расположением узлов, связанных между собой некоторыми коэффициентами пропорциональности. При моделировании с помощью таких схем локальная погрешность численного интегрирования оценивалась как норма расхождений решений, полученных с разными порядками аппроксимации в совпадающих точках расчетных блоков. Величина полученной погрешности и состояния значений индикаторов использовались для принятия решения о размере очередного шага по переменной времени. Это позволило обеспечить заданную точность на каждом участке. При необходимости сокращения длины шага, в расчетных схемах в качестве промежуточных использовались ранее посчитанные значения, что позволило значительно сократить количество вычислительных операций.

Для автоматического формирования вычислительных схем разработана программная система, основанная на использовании интегро-интерполяционного метода, позволяющая генерировать коэффициенты разностных уравнений с произвольными размерностями расчетных и опорных блоков, с возможностью перехода на схемы растяжения – сжатия шага. Численное решение для каждого расчетного блока осуществлялось с помощью итерационного процесса, для ускорения сходимости начальные приближения определялись с помощью предикторного метода Адамса. Теоретические положения, приведенные в работе, подкреплены экспериментальными исследованиями на тестовых задачах с известными точными решениями.

Список литературы:

1. Schiesser W. Method of Lines Analysis of Turing Models / W. Schiesser. – 2017. – Published. – 268 p.
2. Shakeri F. The method of lines for solution of the one-dimensional wave equation subject to an integral conservation condition / F. Shakeri, M. Dehghan // Journal Computers & Math. with Appl. – 2008. – Vol. 56. – № 9. – P. 2175-2188.
3. Фельдман Л.П. Чисельні методи в інформатиці / Л.П. Фельдман, А.І. Петренко, О.А. Дмитрієва. – К.: Видавнича група BHV, 2006. – 480 с.
4. Bickart T.A. An efficient solution process for implicit Runge-Kutta methods / T.A. Bickart // SIAM Journal Numerical Analysis. – 1977. – Vol. 14. – № 8. – P. 1022-1027.
5. Atkinson K. Numerical solution of ordinary differential equations // K. Atkinson, W. Han, D. Stewart. – Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, 2009. – 252 p.
6. Hairer E. Solving Ordinary Differential Equations / E. Hairer, G. Wanner // Second revised edition. – Springer-Verlag. – 2010. – 586 p.
7. Butcher J. Numerical Methods for Ordinary Differential Equations / J. Butcher. – John Wiley & Sons, 2016. – 538 p.
8. Dmytriyeva O. Introduction of an irregular grid with respect to the spatial coordinate for the method of lines / O. Dmytriyeva, N. Huskova // Advanced Information Systems and Technologies: proceedings of the VI international scientific conference, Sumy, May 16–18 2018 / Edited by S. I. Protsenko, V. V. Shendryk – Sumy: Sumy State University, 2018 – P. 30-33.
9. Дмитрієва О.А. Паралельне моделювання динамічних об'єктів зі сконцентрованими параметрами / О.А. Дмитрієва. – Харків: "Ноулідж", 2014. – 335 с.
10. Дмитрієва О.А. Управление шагом интегрирования при параллельной реализации коллокационных методов / О.А. Дмитрієва // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2014. – № 5 (69). – С. 119-123.
11. Дмитрієва О.А. Разработка и обоснование параллельных одношаговых блочных методов типа Биккарта / О.А. Дмитрієва // Системы обработки информации. – 2014. – № 7 (123). – С. 121-126.
12. Cash J. New finite difference schemes for parabolic equations / Cash J. // Society for Industrial and Applied Mathematics J. – 1984. – Vol. 21. – № 3. – P. 433-446.
13. Schiesser W. Differential Equation Analysis in Biomedical Science and Engineering / W. Schiesser. – John Wiley & Sons, 2014. – 440 p.

References:

1. Schiesser, W. (2017), "Method of Lines Analysis of Turing Models", Published, 268 p.

2. Shakeri, F. and Dehghan, M. (2008), "The method of lines for solution of the one-dimensional wave equation subject to an integral conservation condition", *J. Computers & Math. with Appl.*, Vol. 56, № 9, pp. 2175-2188.
3. Feldman, L., Petrenko, A. and Dmytriyeveva, O. (2006), "*Numerical methods in computer science*", Publishing group BHV, Kiev, 480 p.
4. Bickart, T. (1977), "An efficient solution process for implicit Runge-Kutta methods", *SIAM Journal Numerical Analysis*, Vol. 14, № 8, pp. 1022-1027.
5. Atkinson, K., Han, W. and Stewart, D. (2009), "*Numerical solution of ordinary differential equations*", Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, 252 p.
6. Hairer, E. and Wanner, G. (2010), "*Solving Ordinary Differential Equations*", Springer-Verlag, 586 p.
7. Butcher, J. (2016), "*Numerical Methods for Ordinary Differential Equations*", John Wiley & Sons, 538 p.
8. Dmytriyeveva, O. and Huskova, N. (2018), "Introduction of an irregular grid with respect to the spatial coordinate for the method of lines", *Advanced Information Systems and Technologies: proceedings of the VI international scientific conference*, May 16–18, 2018, Sumy, pp. 30-33.
9. Dmytriyeveva, O. (2014), "*The parallel simulation of dynamic objects with concentrated parameters*", Noulidzh, Kharkiv, 335 p.
10. Dmytriyeveva, O. (2014), "Control of integration step for parallel realization of collocation block methods", *J. Radio-electronic and computer systems*, Vol. 69, No. 5, pp. 119-123.
11. Dmitrieva, O.A. (2014), "Development and support of parallel one-step block methods such of Bickart", *Information processing systems*, Vol. 7, No. 123, pp. 121-126.
12. Cash, J. (1984), "New finite difference schemes for parabolic equations", *Society for Industrial and Applied Mathematics J.*, Vol. 21, No. 3, pp. 433-446.
13. Schiesser, W. (2014), "*Differential Equation Analysis in Biomedical Science and Engineering*", John Wiley & Sons, 440 p.

Статью представил д-р техн. наук, проф. ДонНТУ Башков Е.А.

Поступила (received) 05.05.2018

Dmytriyeveva Olga, Dr.Sci.Tech, Professor
Donetsk National Technical University
Pl. Shibankova, 2, Pokrovsk, Ukraine, 85301
Tel.: +38 (050) 998-11-75, e-mail: olha.dmytriieva@donntu.edu.ua
ORCID ID: 0000-0001-8921-8433

Huskova Nadiia, PhD student
Donetsk National Technical University,
Higher Technical School of the University of Applied Sciences,
Berlinstraße, Bingen, Germany 109, 55411,
Tel.: +49 (6721) 4090, e-mail: huskovanadiia@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-5901-4189

УДК 004.272.2:519.63

Розробка колокаційних схем паралельного управління кроком в еволюційних рівняннях / Дмитрієва О.А., Гуськова Н.Г. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 25 – 36.

Робота присвячена питанням паралельного управління кроком інтегрування за змінною часу при зведенні еволюційних рівнянь методом прямих до задачі Коші. Чисельна реалізація здійснюється колокаційними блоковими різницевиими схемами із змінними розмірностями опорних і розрахункових блоків. Програмне формування розрахункових формул дозволяє відстежувати динаміку обчислювального процесу і автоматично переходити на схеми розтягування – стиснення кроку. Теоретичні положення, що наводяться, підкріплені експериментальними дослідженнями на тестових завданнях. Ил.: 9. Бібліогр.: 13 назв.

Ключові слова: управління кроком; еволюційні рівняння; метод прямих; колокаційні блочні різницеві схеми; змінні розмірності.

УДК 004.272.2:519.63

Разработка коллокационных схем параллельного управления шагом в эволюционных уравнениях / Дмитриева О.А., Гуськова Н.Г. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 25 – 36.

Работа посвящена вопросам параллельного управления шагом интегрирования по переменной времени при сведении эволюционных уравнений методом прямых к задаче Коши. Численная реализация осуществляется коллокационными блочными разностными схемами с изменяемыми размерностями опорных и расчетных блоков. Программное формирование расчетных формул позволяет отслеживать динамику вычислительного процесса и автоматически переходить на схемы растяжения – сжатия шага. Приведенные теоретические положения подкреплены экспериментальными исследованиями на тестовых задачах. Ил.: 9. Библиогр.: 13 назв.

Ключевые слова: управление шагом; эволюционные уравнения; метод прямых; коллокационные блочные разностные схемы; изменяемые размерности.

UDC 004.272.2:519.63

Development of collocation schemes for parallel control of step applicable to the evolution equations / Dmytriyeva O., Huskova N. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – №. 24 (1300). – P. 25 – 36.

The paper is devoted to the problems of parallel control of integration step over time variable when evolution equations are reduced by the method of lines to the Cauchy problem. Numerical realization is carried out by collocation block difference schemes using varying dimensions of reference and calculation blocks. The program formation of calculation formulas allows to monitor the dynamics of the computational process and automatically switch to stretching schemes - step compression. These theoretical positions are supported by experimental studies of test problems. Figs.: 9. Refs.: 13 titles.

Keywords: step control; evolution equations; method of lines; collocation block difference schemes; varying dimensions.

УДК 004.415.52

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.24.04

А. Ю. ЗАКОВОРОТНЫЙ, д-р техн. наук, проф., ученый секретарь
НТУ "ХПИ",

М. А. ЗОРЯН, асп., НТУ "ХПИ"

МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ УЯЗВИМОСТЕЙ В ИСХОДНОМ КОДЕ JAVA-ПРИЛОЖЕНИЙ, А ТАКЖЕ БИНАРНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КОДА НА ЕЕ ОСНОВЕ

Статья посвящена проблеме оценки качества исходного кода Java-приложений и библиотек. В работе показано, что исследованный набор из 60956 GitHub репозитория не подчиняется закону нормального распределения по количеству строк исходного кода. Разработанная модель накопления уязвимостей в исходном коде позволила создать бинарную систему оценки качества исходного кода для приложений и библиотек, написанных на Java. Ил.: 3. Табл.: 1. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: качество кода; уязвимость; модель накопления уязвимостей; Java; система оценки качества.

Актуальность и новизна работы. В настоящее время процесс разработки программного обеспечения на языке программирования Java, как и любой другой производственный процесс, нуждается в системе прогнозирования качества продукта, а также в системе оценки указанного качества в форме, удобной для понимания даже непрофильному в сфере разработки программного обеспечения специалисту.

В данной работе впервые представлена модель накопления уязвимостей в исходном коде Java-приложений и библиотек, а также построена бинарная система оценки качества кода на ее основе.

Постановка проблемы. На сегодняшний день практически не существует сфер деятельности, в которых бы не были непосредственно или опосредовано задействованы программные продукты. Программные продукты, как и любые другие произведения человеческой деятельности, имеют дефекты. В большинстве сфер человеческой производственной деятельности существуют системы контроля и оценки качества готовой продукции, а также полупродуктов. Программный код приложений и библиотек также является продуктом интеллектуального производства и нуждается в надлежащей системе контроля качества на всех этапах разработки приложения.

На сегодняшний день существуют системы анализа исходного кода, как, например, SonarQube, позволяющие собирать разнообразные метрики исходного кода, такие как, например, количество строк исходного кода, количество блокирующих, мажорных, минорных и

© А.Ю. Заковоротный, М.А Зорян, 2018

других уязвимостей, количество багов. Тем не менее, подобная система не является удобной в использовании для конечного потребителя готового Java-приложения или библиотеки. Поскольку конечный потребитель, который также может выступать в роли заказчика разработки приложения, далеко не всегда является профильным специалистом в области разработки программного обеспечения, то он нуждается в системе маркировки качества исходного кода, а также в системе оценки затрат инвестиций на разработку вновь создаваемого программного продукта с учетом затрат на устранение возникающих в исходном коде багов и уязвимостей, а также затрат на поддержание и масштабирование готового программного продукта.

Анализ литературы. На сегодняшний день существует множество работ, посвященных исследованию исходного кода приложений, написанных на разных языках программирования [1 – 5]. Основная задача указанных работ заключается, например, в сравнительном анализе применимости языков программирования для решения специализированных задач физики и математики [3] с позиции удобства использования, выразительной силы и, как следствие, минимизации количества допускаемых ошибок в процессе разработки программного продукта.

Значительная часть работ [5] посвящена сбору общих сведений на платформе GitHub о применении языков программирования, таких как количество строк кода, количество проектов, в которых участвует разработчик, скорость исправления багов по запросам и т.д. Из работы [5] следует, что основным источником обнаружения и сигнализирования о возникающих в коде уязвимостях и багах является сообщество пользователей этого кода. Это и не удивительно, поскольку GitHub является крупнейшей на сегодняшний день платформой для размещения исходного кода, как проприетарного, так и открытого [5].

Качество кода в наиболее широком смысле этого термина интересует научное сообщество в не меньшей мере, чем сравнение языков программирования по степени подверженности появлению уязвимостей в исходном коде [6 – 10].

Так, работа [9] посвящена исследованию качества кода на платформе GitHub для различных языков программирования. Методика определения количества уязвимостей и багов, использованная в работе [9], основывается на выявлении ключевых слов, ассоциированных с наличием исправляемой уязвимости, в журнале коммитов. По нашему мнению, подобный подход не дает объективного представления о распространении уязвимостей в исходном коде, поскольку позволяет иметь данные об уязвимостях только постфактум, что не позволит

построить предиктивную модель оценки качества кода. Подобные же методики оценки качества кода используются в работах [6, 7].

Таким образом, возникает проблема выбора подхода для априорной оценки наличия в исходном коде уязвимостей, то есть такого подхода, который укажет на наличие бага или уязвимости еще до того, как этот баг будет обнаружен разработчиками, тестировщиками или, что еще хуже, конечными пользователями программного продукта.

Также обзор как отечественных, так и зарубежных источников, указывает на отсутствие системы оценки качества кода, доступной для использования непрофильными специалистами.

Целью настоящей работы является разработка модели накопления уязвимостей в исходном коде Java-приложений и библиотек с последующим построением бинарной системы оценки качества кода на ее основе.

Источники данных и инструменты. Наиболее популярными платформами для размещения исходного кода являются GitHub, Bitbucket и SourceForge [8]. Для исследования качества кода приложений и библиотек, написанных на Java, нами был выбран именно GitHub, поскольку GitHub имеет хорошее API и огромный объем приложений и библиотек в открытом доступе.

Для сбора статистических данных о качестве кода нами был использован SonarQube, который является, по заявлению авторов, платформой управления качеством с открытым исходным кодом, нацеленным на непрерывный анализ и измерение технического качества исходного кода.

С помощью SonarQube для целей исследования нами были просканированы 60956 репозиторий, содержащих исходный код на Java, общим количеством строк кода 276 015 051. В процессе сканирования нами были измерены такие метрики, как блокирующие уязвимости (V_B), критические уязвимости (V_C), мажорные уязвимости (V_M) и минорные уязвимости (V_m). Исходя из полученных данных нами были составлены такие оценки качества кода, как общая уязвимость (V_T) и удельная уязвимость (V_S):

$$V_T = V_B + V_C + V_M + V_m, \quad (1)$$

$$V_S = \frac{V_T}{SLOC}, \quad (2)$$

где $SLOC$ – количество строк исходного кода.

Визуализация полученных данных. Визуализация распределения сканированных репозиторий с исходным кодом, написанным на Java, представлена на рис. 1.

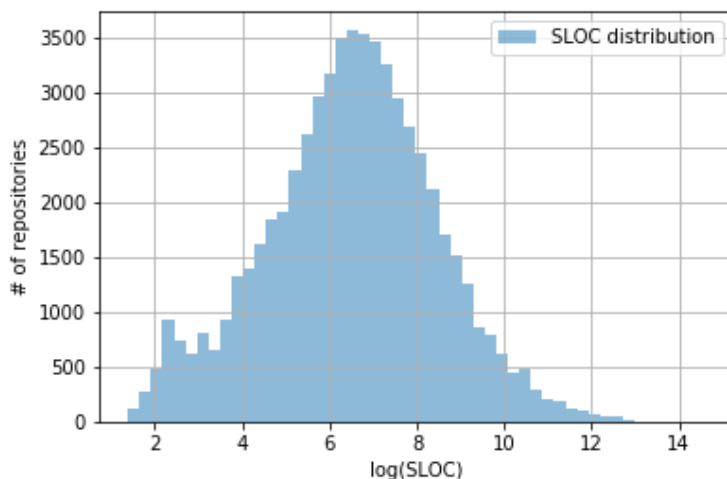


Рис. 1. Распределение просканированных репозиторий по количеству строк исходного кода

Приведённые на рис. 1 данные свидетельствуют, что 50% всех репозиторий имеют количество строк кода от $Q1 = 5.26$ ($SLOC_{Q1} = 192$) до $Q3 = 7.79$ ($SLOC_{Q3} = 2416$), медианное значение составляет $SLOC_m = 713$. Также из рис. 1 очевидно, что распределение просканированных репозиторий по количеству строк кода не является нормальным.

Ключевыми факторами, определяющим вероятность появления уязвимости или бага являются общая структурная и архитектурная сложность проекта, выбранный язык программирования (компилируемый, интерпретируемый), выбранные фреймворк и стек зависимостей и сторонних библиотек. Очевидно, что структурная сложность проекта увеличивается с ростом числа строк кода $SLOC$. В текущем исследовании именно количество строк кода $SLOC$ является основным аргументом, определяющим вероятность появления уязвимости и багов.

Рассмотрим графическое представление зависимости $V_T = f(SLOC)$ и $V_S = f(SLOC)$. На рис. 2 приведены данные сканирования репозиторий приложений и библиотек, написанных на Java.

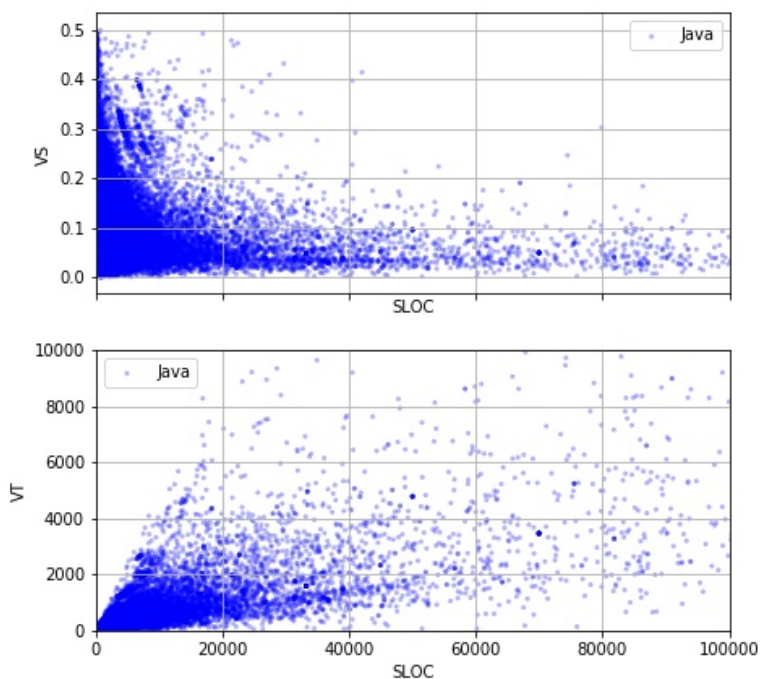
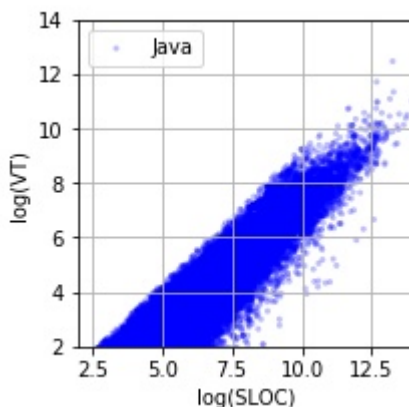


Рис. 2. Зависимости общей уязвимости V_T и удельной уязвимости V_S от количества строк исходного кода $SLOC$

Несмотря на то, что в случае $V_S = f(SLOC)$ наблюдается явная гиперболическая зависимость, мы не можем с уверенностью говорить, что чем больше объем репозитория, тем меньше общее количество уязвимостей, поскольку в данном случае имеет место влияние скрытых переменных [11]. Действительно, если мы рассмотрим уравнение (2), то будет очевидно, что в само определение V_S заложена гиперболическая зависимость от $SLOC$.

Анализ результатов сканирования. Очевидно (рис. 2), что увеличение количества строк кода в репозитории приводит к накоплению количества уязвимостей. Построение модели, описывающей характер накопления уязвимостей, может быть сведено в нашем случае к построению уравнения регрессии, которое опишет линию, проходящую через область с наибольшей плотностью вероятности появления в исходном коде уязвимости.

Зависимость $V_T = f(SLOC)$ может быть линеаризована следующим образом (рис. 3).

Рис. 3. Линеаризация $V_T = f(SLOC)$

Как видно из рис. 3 данные о накоплении уязвимостей в исходном коде Java-приложений и библиотек хорошо линеаризируются в логарифмических координатах и могут быть выражены следующим уравнением:

$$\log(V_T) = c + k \log(SLOC), \quad (3)$$

где c и k – эмпирические константы.

Результаты регрессионного анализа данных на рис. 3 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Регрессионный анализ накопления уязвимостей

Коэффициент	Значение коэффициента	Стандартная ошибка	t -критерий	Доверительный интервал	
c	-1.9681	0.011	-181.019	-1.989	-1.947
k	0.9127	0.002	569.906	0.910	0.916

Статистические параметры уравнения (3), такие как $R^2 = 0.842$, $R_{adj}^2 = 0.842$, $F = 3.248e+05$, $p = 0.000$ (как для c , так и для k), указывают на то, что уравнения (3) адекватно описывает зависимость количества накопленных уязвимостей от количества строк кода репозитория.

Бинарная система оценки качества кода. Полученное уравнение (3) позволяет создать бинарную шкалу оценки (маркировки) качества

кода (А/В-классы), в основе которой лежит сравнение со средним количеством уязвимостей, характерных для указанного количества строк исходного кода Java-приложения. Качество кода в классе А выше, чем в классе В.

Так, например, если для репозитория известно количество строк кода l и количество уязвимостей v , то в случае $\log(v) \leq c + k \log(l)$, то исходному коду может быть присвоен класс А.

Выводы. Анализ открытых данных GitHub-репозитория по языку программирования Java указывает на невозможность описать распределение репозитория по количеству строк кода с помощью нормального распределения. Собранные статистические данные по распределению уязвимостей в Java приложениях позволили разработать модель накопления уязвимостей в исходном коде. Созданная в работе модель накопления уязвимостей послужила основой для разработки бинарной системы оценки качества кода. Бинарная система оценки качества кода позволяет присвоить исходному коду, написанному на Java, класс качества и, следовательно, ранжировать как готовые приложения, так и приложения, находящиеся в активной фазе разработки.

Использование разработанной нами бинарной системы оценки качества кода является удобным даже для неспециалиста в области разработки программного обеспечения.

Список литературы:

1. *Prechelt L.* An empirical comparison of seven programming languages / *L. Prechelt* // Computer. – 2000. – Т. 33. – №. 10. – С. 23-29.
2. *Nanz S.* A comparative study of programming languages in Rosetta Code / *S. Nanz, C.A. Furia* // Software Engineering (ICSE), 2015 IEEE/ACM 37th IEEE International Conference on. – IEEE, 2015. – Т. 1. – С. 778-788.
3. *Sherin B.L.* A comparison of programming languages and algebraic notation as expressive languages for physics / *B.L. Sherin* // International Journal of Computers for Mathematical Learning. – 2001. – Т. 6. – №. 1. – С. 1-61.
4. *Prechelt L.* An empirical comparison of C, C++, java, perl, python, rexx and tcl / *L. Prechelt* // IEEE Computer. – 2000. – Т. 33. – № 10. – С. 23-29.
5. *Geiger R.S.* Summary analysis of the 2017 github open source survey / *R.S. Geiger* // arXiv preprint arXiv:1706.02777. – 2017.
6. *Gyimesi P.* Characterization of source code defects by data mining conducted on GitHub / *P. Gyimesi* // International Conference on Computational Science and Its Applications. – Springer, Cham, 2015. – С. 47-62.
7. *Kapur R.* Estimating defectiveness of source code: A predictive model using GitHub content, 2018 / *R. Kapur, B. Sodhi* // arXiv preprint arXiv:1803.07764.
8. *Counsell S.* Assert Use and Defectiveness in Industrial Code / *S. Counsell* // 2017 IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops (ISSREW). – IEEE, 2017. – С. 20-23.

9. Ray B. A large scale study of programming languages and code quality in github / B. Ray // *Proceedings of the 22nd ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering*. – ACM, 2014. – С. 155-165.
10. Kalliamvakou E. The promises and perils of mining github / E. Kalliamvakou // *Proceedings of the 11th working conference on mining software repositories*. – ACM, 2014. – С. 92-101.
11. Pearl J. Simpson's paradox, confounding, and collapsibility / J. Pearl // *Causality: models, reasoning and inference*. – 2000. – № 7. – С. 173-200.

Bibliography:

1. Prechelt, L. (2000), "An empirical comparison of seven programming languages", *Computer*, Vol. 33, No. 10, pp. 23-29.
2. Nanz, S., and Furia, C.A. (2015), "A comparative study of programming languages in Rosetta Code", *Software Engineering (ICSE), IEEE/ACM 37th IEEE International Conference, IEEE*, Vol. 1, pp. 778-788.
3. Sherin, B.L. (2001), "A comparison of programming languages and algebraic notation as expressive languages for physics", *International Journal of Computers for Mathematical Learning*. Vol. 6, No. 1, pp. 1-61.
4. Prechelt, L. (2000), "An empirical comparison of c, C++, Java, Perl, Python, REXX and Tcl", Vol. 33, No. 10, pp. 23-29.
5. Geiger, R.S. (2017), Summary analysis of the 2017 github open source survey, Arxiv preprint arXiv:1706.02777.
6. Gyimesi, P. (2015), "Characterization of source code defects by data mining conducted on GitHub", *International Conference on Computational Science and Its Applications*, Springer, Cham, pp. 47-62.
7. Kapur, R., and Sodhi, B. (2018), Estimating defectiveness of source code: A predictive model using GitHub content, Arxiv preprint arXiv:1803.07764.
8. Counsell, S. (2017), "Assert Use and Defectiveness in Industrial Code", *2017 IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops (ISSREW)*, IEEE, pp. 20-23.
9. Ray, B. (2014), "A large scale study of programming languages and code quality in github", *Proceedings of the 22nd ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering*, ACM, pp. 155-165.
10. Kalliamvakou, E. (2014), "The promises and perils of mining github", *Proceedings of the 11th working conference on mining software repositories*, ACM, pp. 92-101.
11. Pearl, J. (2000), "Simpson's paradox, confounding, and collapsibility", *Causality: models, reasoning and inference*, No. 7, pp. 173-200.

Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПІ" Леонов С.Ю.

Поступила (received) 19.05.2018

Zakovorotnyi Alexandr, Dr. Tech. Sci., Sci. Secretary
National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"
Str. Kirpichova, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (097) 967-32-71, e-mail: zakovorotniy@kpi.kharkov.ua
ORCID ID: 0000-0003-4415-838x

Zorian Max, postgraduate
National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"
Str. Kirpichova, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (097) 560-62-00, e-mail: zorianmax@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-9676-3843

УДК 004.415.52

Модель накопичення вразливостей у вихідному коді JAVA-додатків, а також бінарна система оцінки якості кода на її основі / О.Ю. Заковоротний, М.О. Зорян // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". - 2018. – № 24 (1300). - С. 37 – 46.

Статтю присвячено проблемі оцінки якості вихідного коду Java-додатків і бібліотек. В роботі показано, що досліджений набір з 60956 GitHub репозиторіїв не описується законом нормального розподілу за кількістю рядків вихідного коду. Розроблена модель накопичення вразливостей у вихідному коді від кількості рядків вихідного коду дозволила створити бінарну систему оцінки якості початково коду для додатків і бібліотек, написаних на Java. Ил.: 3. Табл.: 1. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: якість коду, вразливість, модель накопичення уразливості, Java, система оцінки якості.

УДК 004.415.52

Модель накопления уязвимостей в исходном коде JAVA-приложений, а также бинарная система оценки качества кода на ее основе / А.Ю. Заковоротный, М.А. Зорян // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 37 – 46.

Статья посвящена проблеме оценки качества исходного кода Java-приложений и библиотек. В работе показано, что исследованный набор из 60956 GitHub репозиторийев не подчиняется закону нормального распределения по количеству строк исходного кода. Разработанная модель накопления уязвимостей в исходном коде от количества строк исходного кода позволила создать бинарную систему оценки качества исходно кода для приложений и библиотек, написанных на Java. Ил.: 3. Табл.: 1. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: качество кода; уязвимость; модель накопления уязвимостей; Java; система оценки качества.

UDC 004.415.52

Model of vulnerability accumulation in source code of JAVA applications and binary system of estimation of the quality of the source code based on it / A.Yu. Zakovorotnyi, M.A. Zorian // Herald of the National Technical University "KhPI". – 2018. – № 24 (1300). – P. 37 – 46.

The article is devoted to the problem of evaluation of the quality of the source code of Java applications and libraries. The article shows that the investigated set of 60,956 GitHub repositories does not fit the normal distribution law by the number of lines of source code. The developed model of accumulation of vulnerabilities in the source code from the number of lines of source code allowed creating a binary system for assessing the quality of source code for Java-based applications and libraries. Figs.: 3. Tabl.: 1. Refs.: 11 titles.

Keywords: code quality; vulnerability; vulnerability model; Java; quality assessment system.

УДК 621.3.078.3

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.24.05

В. С. СУЗДАЛЬ, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., Институт
сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков,

Ю. М. ЕПИФАНОВ, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., Институт
сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков

СИНТЕЗ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ НЕРАВЕНСТВА ЛЯПУНОВА

Рассмотрен синтез стабилизирующего управления процессом выращивания методом Чохральского щелочно-галоидных монокристаллов, позволяющий обеспечить стабильность скорости роста кристалла за счет адаптивной стабилизации тепловых условий выращивания. Синтез проведен на основе решения неравенства Ляпунова с канонизацией матриц и с использованием матричных делителей нуля. Ил.: 1. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: стабилизирующее управление; метод Чохральского; матрица; монокристалл; матричный делитель нуля.

Постановка проблемы. В качестве объекта управления (ОУ) выбран процесс выращивания щелочно-галоидных монокристаллов (ЩГК) методом Чохральского. При выращивании монокристалл вращается с некоторой угловой скоростью и вытягивается из тигля с расплавом на затравочный кристалл. В процессе роста кристалла в тигле автоматически поддерживается постоянный уровень расплава за счет подпитки его исходным сырьем [1].

Известно, что качество кристалла, при выращивании методом Чохральского, определяется стабильностью массовой скорости его роста. В настоящее время в системах управления кристаллизацией скорость роста косвенно оценивается по диаметру растущего монокристалла, который и стабилизируется в процессе выращивания. Управление диаметром кристалла осуществляется путем изменения тепловых условий выращивания, т.е. объект управления – это многомерное динамическое звено, входом которого являются тепловые условия кристаллизации, а выходом – диаметр монокристалла [2]. Исследования процесса выращивания ЩГК показали, что процесс роста кристаллов диаметром до 300 мм можно условно разбивать на ряд интервалов, в пределах которых тепловые условия кристаллизации являются квазистационарными. Для решения задачи стабилизации температурного поля на выбранных интервалах используются системы стабилизации, а вся система управления ростом ЩГК может проектироваться как таблично-адаптивная.

© В.С. Суздаль, Ю.М. Епифанов, 2018

Современные требования к стабильности диаметра ЩГК очень высоки. Например, для растущего монокристалла диаметром 300 мм точность стабилизации диаметра должна быть не хуже 1% и длительность переходного процесса в канале управления нагреватель – диаметр кристалла, не больше 100 с. В связи с этим актуально совершенствование существующих систем управления процессами выращивания монокристаллов и разработка новых.

Анализ литературы. Для синтеза системы управления кристаллизацией используется модель ОУ в пространстве состояний

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu, & x(t_0) = x_0, \\ y = Cx + Du, \end{cases} \quad (1)$$

где $x \in R^n$ – вектор состояния; $y \in R^l$ – выходной вектор; $u \in R^m$ – вектор управления, подаваемого на вход ОУ; x_0 – начальные условия, т.е. состояние ОУ в начальный момент времени t_0 ; A, B, C – постоянные матрицы соответствующих размеров.

Пусть, для системы (1) существует управление с обратной связью

$$u = Ky = KCx, \quad (2)$$

где $K \in R^{r \times m}$ – матрица регулятора по выходу.

Стабилизация системы (1) с помощью закона (2) является задачей, когда необходимо найти такую матрицу K , что выполняются некоторые требования, например, по размещению полюсов замкнутой системы (собственных значений матрицы $A + BKC$) или требования к переходным процессам в замкнутой системе в смысле минимума некоторого заданного функционала. Путь синтеза стабилизирующих регуляторов, основанный на применении теории линейных матричных неравенств, представлен в [3 – 5]. Такая же задача была решена в [6] на основе специфического преобразования подобия исходной системы и предложенных алгоритмов ее решения. Эти методы связаны со сложностями практического использования.

Метод канонизации матриц для решения матричных уравнений системы предложен в работе [7]. Метод основан на эквивалентных преобразованиях матриц.

Метод канонизация матриц. Канонизацией некоторой матрицы M размера $m \times n$ и ранга r является разложение этой матрицы на четверку матриц $\tilde{M}_{r,m}^L, \bar{M}_{m-r,m}^L, \tilde{M}_{n,r}^R, \bar{M}_{n,n-r}^R$, удовлетворяющих равенству:

$$\begin{bmatrix} \tilde{M}_{r,m}^L \\ \overline{M}_{m-r,m}^L \end{bmatrix} M \begin{bmatrix} \tilde{M}_{n,r}^R & \overline{M}_{n,n-r}^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_r & 0_{r,n-r} \\ 0_{m-r,r} & 0_{m-r,n-r} \end{bmatrix},$$

где $\tilde{M}_{r,m}^L$ – левый канонизатор матрицы M ; $\tilde{M}_{n,r}^R$ – правый канонизатор матрицы M ; $\overline{M}_{m-r,m}^L$ – левый матричный делитель нуля матрицы M ; $\overline{M}_{n,n-r}^R$ – правый матричный делитель нуля матрицы M ; I_r – единичная матрица размера $r \times r$.

Левый $\tilde{M}^L$ (правый $\tilde{M}^R$) канонизатор характеризует все линейно-независимые комбинации строк и столбцов исходной матрицы M в соответствии с тождеством

$$\overline{M}^L M \tilde{M}^R = I_r,$$

т.е. приводят к представлению исходной матрицы в канонических базисах.

Сводный канонизатор $\tilde{M}$, используемый при решении матричных уравнений, вычисляется по формуле

$$\tilde{M} = \tilde{M}^R \tilde{M}^L$$

и описывает всю совокупность линейно-независимых строк и столбцов исходной матрицы.

Матричные делители нуля. Пусть задана некоторая матрица $M_{m,n}$, определяющая преобразование вида

$$y = Mx, \quad x \in R^n, \quad y \in R^m,$$

где x – n -мерный входной сигнал; y – m -мерный выходной сигнал; M – оператор (отображение), ставящий в соответствие каждому сигналу x на входе некоторый сигнал y на выходе.

Делители нуля – особые матрицы, использующие имеющуюся линейную зависимость строк и/или столбцов исходной матрицы [8].

Определение 1. Матрица $\overline{M}^R$ называется правым делителем нуля прямоугольной матрицы $M_{m,n}$, если для этой матрицы выполняются соотношения:

$$M \overline{M}^R = 0, \quad M \neq 0, \quad \overline{M}^R \neq 0.$$

Ранг правого делителя нуля будем полагать максимальным.

Если тождество $M\bar{M}^R = 0$ имеет место только при нулевой матрице $\bar{M}^R$, то принято считать, что у матрицы M правый делитель нуля отсутствует.

Правый делитель нуля, выполняя операцию умножения, справа с исходной матрицей M , осуществляет линейное комбинирование столбцов матрицы M . Тогда нулевое значение произведения $M\bar{M}^R$ указывает на существование линейной зависимости столбцов матрицы M , т.е. характеризует комбинации столбцов матрицы M , которые тождественно равны нулю.

Определение 2. Матрица $\bar{M}^L$ называется левым делителем нуля прямоугольной матрицы $M_{m,n}$, если для этой матрицы выполняются соотношения:

$$M\bar{M}^L = 0, \quad M \neq 0, \quad \bar{M}^L \neq 0.$$

Как и для правого делителя нуля, ранг левого делителя нуля будем полагать максимальным. Левый делитель нуля, умножаясь слева с исходной матрицей M , осуществляет линейное комбинирование строк матрицы M . Тогда нулевое значение произведения $\bar{M}^L M$ указывает на существование линейно зависимых строк исходной матрицы M .

Новый подход к разработке методов стабилизации различных динамических систем представлен в [9]. Его применение перспективно и при управлении процессом выращивания ЦГК.

Цель статьи – разработка стабилизирующего управления процессом выращивания ЦГК путем определения решения задачи стабилизации температурного поля, включающего решение матричных уравнений методом канонизации матриц с использованием матричных делителей нуля.

Синтез стабилизирующего управления. Известно, что если для некоторой матрицы $M \in R^{n \times n}$ выполняется неравенство Ляпунова

$$M^T P + P M < 0, \quad P^T = P > 0, \quad (3)$$

то эта матрица является асимптотически устойчивой.

В [9] доказана следующая теорема.

Пусть для системы (1) выполняется матричное неравенство Ляпунова

$$\left(\begin{array}{c|c} \frac{B^L AB^{LT}}{X} & \frac{B^L AB}{Y} \end{array} \right)^T Z + Z \left(\begin{array}{c|c} \frac{B^L AB^{LT}}{X} & \frac{B^L AB}{Y} \end{array} \right) < 0, \quad (4)$$

где $Z = Z^T > 0$, $X \in R^{s \times (n-s)}$, $Y \in R^{s \times s}$ – искомые матрицы.

Пусть также выполняется условие

$$(XB^L + YB^+ - B^+ A)C^R = 0_{r \times (n-m)}, \quad (5)$$

тогда асимптотически устойчива любая матрица $A + BKC$, где

$$K = (XB^L + YB^+ - B^+ A)C^+, \quad (6)$$

C^+ , B^+ – псевдообратные матрицы Мура-Пенроуза; B^L – левый делитель нуля, который удовлетворяет условию $B^L B = 0_{r \times r}$; B^{LT} – ортогональная матрица, удовлетворяющая условию $B^L B^{LT} = I_{n-r}$.

Из выполнения матричного неравенства Ляпунова (4) следует, что асимптотически устойчива матрица

$$\left(\begin{array}{c|c} \frac{B^L AB^{LT}}{X} & \frac{B^L AB}{Y} \end{array} \right). \quad (7)$$

Пусть матрица преобразования подобия [3]

$$T = \left(\begin{array}{c} B^L \\ B^+ \end{array} \right) \quad (8)$$

обратимая матрица, для которой

$$T^{-1} = \left(\begin{array}{c} B^L \\ B^+ \end{array} \right)^{-1} = (B^{LT} | B), \quad (9)$$

то есть

$$(B^{LT} | B) \left(\begin{array}{c} B^L \\ B^+ \end{array} \right) = B^{LT} B^L + B B^+ = I_n. \quad (10)$$

Тогда преобразование подобия для матрицы $A + BKC$

$$T(A + BKC)T^{-1} = \left(\begin{array}{c|c} \frac{B^L AB^{LT}}{B^+ AB^{LT} + KCB^{LT}} & \frac{B^L AB}{B^+ AB + KCB} \end{array} \right). \quad (11)$$

Приравняем правую часть выражения (11) к матрице (7) и проведем поблочное сравнение этих матриц. В результате получим уравнение относительно матрицы K

$$\left(\frac{0_{(n-r) \times (n-r)}}{X - B^+ AB^{LT}} \middle| \frac{0_{r \times r}}{Y - B^+ AB} \right) = \left(\frac{0_{(n-r) \times (n-r)}}{KCB^{LT}} \middle| \frac{0_{r \times r}}{KCB} \right), \quad (12)$$

или в другом виде

$$(X - B^+ AB^{LT} | Y - B^+ AB) = KC(B^{LT} | B). \quad (13)$$

Используя свойство (9), перейдем от (13) к уравнению

$$(X - B^+ AB^{LT} | Y - B^+ AB) \begin{pmatrix} B^L \\ B^+ \end{pmatrix} = KC. \quad (14)$$

Линейное уравнение (14) разрешимо относительно неизвестной матрицы K тогда и только тогда, когда выполняется условие решения правостороннего матричного уравнения

$$(X - B^+ AB^{LT} | Y - B^+ AB) \begin{pmatrix} B^L \\ B^+ \end{pmatrix} C^R = 0_{r \times (n-m)}, \quad (15)$$

где C^R – матричный правый делитель нуля матрицы C , который удовлетворяет условию $CC^R = 0$.

Преобразуем выражение (2) с учетом (4)

$$XB^L + YB^+ - B^+ A = KC. \quad (16)$$

Следовательно, в силу асимптотической устойчивости матрицы (7) асимптотически устойчива правая матрица выражения (11), при $K = (XB^L + YB^+ - B^+ A)C^+$. Доказательство закончено.

Синтез управления для многомерной системы на основе доказанной теоремы предполагает решение матричного неравенства Ляпунова (4), что вызывает трудности вычислительного характера с ростом размерности пространства состояний. Одним из способов преодоления этого является рандомизация [9]. В [9] предложено, в данном случае, использовать процедуру генерации матрицы вида

$$A_r = \left(\frac{B^L AB^{LT}}{X} \middle| \frac{B^L AB}{Y} \right), \quad (17)$$

где $X \in R^{r \times (n-r)}$, $Y \in R^{r \times r}$ таковы, что все элементы множества собственных значений рассматриваемой матрицы

$$\text{eig}(A_r) = \{\lambda_i \in C : \det(\lambda I_n - A_r) = 0\}$$

лежат в левой полуплоскости.

Проведем синтез стабилизирующего регулятора. Данные для идентификации объекта управления получены в реальном масштабе времени при выращивании монокристалла CsI(Tl). Процесс выращивания рассматривался как двухмерный линейный стационарный объект управления (ЛТИ-объект) с двумя входными величинами – температура основного нагревателя Td и температура дополнительного нагревателя Tb и двумя выходами – диаметр кристалла Ds и температура подпиточного расплава Tr . Объект управления в пространстве состояний имеет следующие матрицы:

$$A = \begin{bmatrix} & x1 & x2 & x3 \\ x1 & -6.1854 & 1.0483 & 0.7374 \\ x2 & 0 & -1.0447 & -0.1902 \\ x3 & 0 & 0 & -0.0864 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} & u1 & u2 \\ x1 & 0.6196 & 5.0748 \\ x2 & -0.9884 & 0.7925 \\ x3 & 0.0511 & -0.2560 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} & x1 & x2 & x3 \\ y1 & 5.1946 & 0.2947 & -0.5443 \\ y2 & -0.1037 & -0.8649 & 0.1055 \end{bmatrix}, D = 0.$$

Объект управления полностью управляем и наблюдаем. Собственные значения ОУ: $\lambda_1 = -6.185$, $\lambda_2 = -1.045$, $\lambda_3 = -0.086$.

Соответственно, необходимые для расчетов псевдообратные матрицы B^+ , C^+ и левый делитель нуля B^L имеют следующий вид:

$$B^+ = \begin{bmatrix} 0.1464 & -0.9167 & 0.0640 \\ 0.1789 & 0.1114 & -0.0154 \end{bmatrix}, C^+ = \begin{bmatrix} 0.1922 & 0.0778 \\ -0.0250 & -1.1510 \\ -0.0162 & 0.1192 \end{bmatrix},$$

$$B^L = \begin{bmatrix} 1.6139 & 0 & 0 \\ 0.1795 & 0.1125 & 0 \end{bmatrix}.$$

Генерация матрицы (17) проводилась итерационным процессом рандомизации в среде MATLAB.

Оптимальной в смысле выполнения требований к переходному процессу в замкнутой системе является матрица

$$A_r = \begin{bmatrix} -0.0846 & -0.1131 & -1.2233 \\ -0.1500 & -0.8360 & -2.4072 \\ 0.4346 & 0.7983 & -0.6924 \end{bmatrix},$$

где матрицы

$$X = \begin{bmatrix} -0.1500 \\ 0.4346 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} -0.8360 & -2.4072 \\ 0.7983 & -0.6924 \end{bmatrix}.$$

Собственные значения матрицы A_r лежат в левой полуплоскости. Регулятор K находился по выражению (6)

$$K = \begin{bmatrix} 0.0905 & 0.7006 \\ 0.2322 & 1.1202 \end{bmatrix}.$$

Собственные значения: $\lambda_1 = -11.720$, $\lambda_2 = -1.175$, $\lambda_3 = -0.061$ матрицы замкнутой системы лежат в левой полуплоскости, что свидетельствует об успешном решении задачи стабилизации.

Для канала температура основного нагревателя Td – диаметр кристалла Ds на рисунке приведена переходная характеристика замкнутой системы.

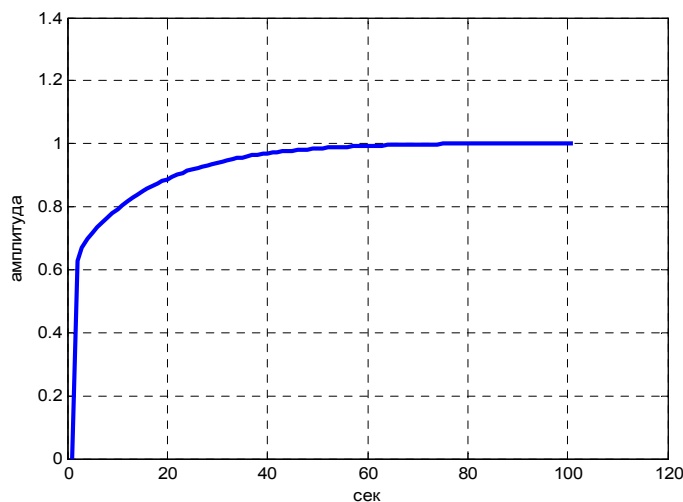


Рис. Переходная характеристика замкнутой системы по каналу $Td - Ds$

Анализ полученных результатов синтеза показывает, что замкнутая система устойчива.

Длительность переходного процесса, которая не превышает 80 с, и отсутствие перерегулирования удовлетворяют требованиям к качеству управления при выращивании ЩГК диаметром 300 мм.

Замкнутая система с синтезированным регулятором имеет в канале управления диаметром монокристалла быстрое доминирующее собственное значение $\lambda_1 = -11,720$, что позволяет замкнутой системе реагировать на кратковременные возмущения тепловых условий и уменьшить их влияние на распределение активатора по длине кристалла.

Выводы. В результате проведенной работы решена задача синтеза стабилизирующего управления диаметром щелочно-галоидного монокристалла. Показано, что использование рандомизации для решения матричного неравенства Ляпунова, позволило обойти трудности вычислительного характера в условиях большой размерности пространства состояний динамической системы. Анализ полученных результатов синтеза показал, что замкнутая система устойчива и удовлетворяет требованиям к качеству управления выращиванием щелочно-галоидных монокристаллов диаметром до 300 мм.

Доминирующее собственное значение $\lambda_1 = -11,720$ замкнутой системы позволило улучшить качество выращиваемого монокристалла за счет уменьшения влияния кратковременных возмущений тепловых условий.

Список литературы:

1. Суздаль В.С. Сцинтилляционные монокристаллы: автоматизированное выращивание / В.С. Суздаль, П.Е. Стадник, Л.И. Герасимчук, Ю.М. Епифанов // Серия: Состояние и перспективы развития функциональных материалов для науки и техники. – Харьков: ИСМА, 2009. – 260 с.
2. Суздаль В.С. Многомерные модели и системы управления выращиванием крупногабаритных монокристаллов / В.С. Суздаль, Ю.М. Епифанов, Ю.С. Козьмин, А.В. Соболев // Серия: Функциональные материалы для сцинтилляционной техники и биомедицины. – Харьков: ИСМА, 2012. – С. 355-381.
3. Баландин Д.В. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. / Д.В. Баландин, М.М. Коган. – М.: Физматлит, 2007. – 280 с.
4. Balandin D.V. LMI-based optimal attenuation of multistory building oscillations under seismic excitations / D.V. Balandin, M.M. Kogan // Structural Control and Health Monitoring, 2005. – V. 12. – №. 2. – P. 213-224.
5. Суздаль В.С. Матричные неравенства в синтезе управления ростовыми установками / В.С. Суздаль, Ю.М. Епифанов, И.И. Тавровский // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 21 (1243). – С. 92-102.
6. Граничин О.Н. Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах / О.Н. Граничин, Б.Т. Поляк. – М.: Наука, 2003. – 200 с.

7. Буков В.Н. Решение матричных уравнений методом канонизации / В.Н. Буков, В.Н. Рябченко, В.В. Косьянчук, Е.Ю. Зыбин // Вестник Киевского ун-та. Серия : Физмат. науки. – Вып. 1. – К.: Изд. КНУ, 2002. – С. 19-28.
8. Буков В.Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем / В.Н. Буков. – Калуга: Изд. научн. лит-ры Н.Ф. Бочкаревой, 2006. – 720 с.
9. Мисриханов М.Ш. Новый метод стабилизации динамической системы / М.Ш. Мисриханов, В.Н. Рябченко // Повышение эффективности работы энергосистем. Труды ИГЭУ. Системы управления и автоматизации. – Вып. IX. – М.: 2009. – С. 413-430.

References:

1. Suzdal, V.S., Stadnik, P.E., Gerasimchuk, L.I., and Yepifanov, Yu.M. (2009), *Scintillation single crystals: automated growing, Series: The state and prospects for the development of functional materials for science and technology*, Sci. Publishing "AKTA", Kharkov, 260 p.
2. Suzdal, V.S., Yepifanov, Yu.M., Kozmin, Yu.S., and Sobolev, A.V. (2012), "Multidimensional models and control systems growing large single crystals", *Series: Functional materials for scintillation techniques, and biomedicine*, Sci. Publishing "AKTA", Kharkov, pp. 355-381.
3. Balandin, D.V., and Kogan, M.M. (2007), *Synthesis of control laws based on linear matrix inequalities*, FIZMATLIT, Moscow, 280 p.
4. Balandin, D.V., and Kogan, M.M. (2005), "LMI-based optimal attenuation of multistory building oscillations under seismic excitations", *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 12, No. 2, pp. 213-224.
5. Suzdal, V.S., Yepifanov, Yu.M., and Tavrovskiy, I.I. (2017), "Matrix inequalities in control synthesis of growth installations", *Herald of the National Technical University "KhPI", Subject issue: Information Science and Modelling*, NTU "KhPI", Kharkov, No. 21(1243), pp. 92-102.
6. Granichin, O.N., and Polyak, B.T. (2003), *Randomized algorithms for estimation and optimization under almost arbitrary interference*, Science, Moscow, 200 p.
7. Bukov, V.N., Ryabchenko, V.N., Kosyanchuk, V.V., and Zybin, E.Yu. (2002), "Solution of matrix equations by the canonization method", *Herald of the Kiev University, Series: Phys. - Mat. Science*, Ed. KNU, Kiev, Issue 1, pp. 19-28.
8. Bukov, V.N. (2006), *Embedding systems. Analytical approach to the analysis and synthesis of matrix systems*, Ed. scientific lit. N.F. Bochkareva, Kaluga, 720 p.
9. Misrikhanov, M.Sh., and Ryabchenko, V.N. (2009), "A new method of stabilization a dynamic system", *Improving of energy systems the efficiency, Proceedings of ISEU, Control and automation systems*, Moscow, Issue IX, pp. 413-430.

Статью представил д-р физ.-мат. наук, зав. отделом 2319 ИСМА НАН Украины Тарасов В.А.

Поступила (received) 15.03.2018

Suzdal Viktor, Dr. Sci. Tech., Senior Researcher,
ISMA NAS of Ukraine,
Nauki Ave., 60, Kharkov, Ukraine, 61072.
Tel.: (057) 341-01-45, email: suzdal@isma.kharkov.ua
ORCID ID: 0000-0002-3816-9886

Yepifanov Yuriy, Dr. Sci. Tech., Senior Researcher,
ISMA NAS of Ukraine,
Nauki Ave., 60, Kharkov, Ukraine, 61072.
Tel.: (057) 341-01-45, email: epiphanov@isma.kharkov.ua
ORCID ID: 0000-0003-2303-9138

УДК 621.3.078.3

Синтез стабілізуючого керування процесом вирощування монокристалів на основі рішення нерівності Ляпунова / Суздаль В.С., Єпіфанов Ю.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 47 – 58.

Розглянуто синтез стабілізуючого керування процесом вирощування методом Чохральського лужно-галоїдних монокристалів, що дозволяє вирішити задачу стабільності швидкості росту за рахунок адаптивної стабілізації теплових умов. Синтез керування проведений на основі рішення нерівності Ляпунова з канонізацією матриць і з використанням матричних дільників нуля стабілізуючого регулятора й системи в цілому. Ил.: 1. Бібліогр.: 9 назв.

Ключові слова: стабілізуюче керування; метод Чохральського; матриця; матричні дільники нуля; монокристал; система.

УДК 621.3.078.3

Синтез стабилизирующего управления процессом выращивания монокристаллов на основе решения неравенства Ляпунова / Суздаль В.С., Епифанов Ю.М. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 47 – 58.

Рассмотрен синтез стабилизирующего управления процессом выращивания методом Чохральского щелочно-галоидных монокристаллов, позволяющий решить задачу стабильности скорости роста за счет адаптивной стабилизации тепловых условий. Синтез управления проведен на основе решения неравенства Ляпунова с канонизацией матриц и с использованием матричных делителей нуля стабилизирующего регулятора и системы в целом. Ил.: 1. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: стабилизирующее управление; метод Чохральского; матрица; матричные делители нуля; монокристалл; система.

UDC 621.3.078.3

The synthesis stabilizing control of the single crystals growth process based on solving the Lyapunov inequality / Suzdal V.S., Yepifanov Yu.M. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – №. 24 (1300). – P. 47 – 58.

The stabilizing control synthesis by the Czochralski method of alkali-halide single crystals the growth process is considered, which makes it possible to solve the problem of the growth rate stability due to adaptive stabilization of thermal conditions. The control synthesis is based on solving the Lyapunov inequality with matrices canonization and using the matrix zero divisors of the stabilizing regulator and the system as a whole. Figs.: 1. Refs.: 9 titles.

Keywords: stabilizing control; the Czochralski method; matrices; matrix zero divisors; a single crystal; system.

UDC 530.145.1

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.24.06

V. I. TIKHONOV, Dr. of Tech. Sciences, professor, "ONAT", Odessa

A UNIFORM GEOMETRICAL PRESENTATION OF A QUANTUM SYSTEM EXPERIMENT

The methods of quantum physics penetrate today into various fields of theoretical disciplines. In this paper, based on quantum mechanics principles, a uniform geometric model of a quantum system experiment introduced. A phase space determined for quantum system experiment in the form of two-dimensional topological torus. On this torus, the math expectation of quantum system track defined as the wave function, along with the tensor of quantum states entanglement. The tensor of quantum entanglement interpreted as the vector basis of a local Euclidian space. The work intends the complex many-body system applications. Refs.: 22 titles.

Keywords: geometric model; quantum system; phase space; tensor of quantum states.

The problem statement. The simulation of surrounding world is, apparently, the number one attribute of intelligent creature inherent to either living matter or artificial machines. This ability appears in simple cells and reaches its height in the modern digital society. Another intrinsic feature of intelligence is communication ability via specific language of symbols. The higher intelligence level is, the richer language becomes. The third key property of intelligence is building communities of interacting cells united by common goals and rules.

The possession of the aforesaid properties transforms an arbitrary manifold of common type intelligent cells into an integrated system. A set of living cells forms a hierarchy of organs and subsystems of the body, which, in turn, acts as an element of a higher rank system (swarm, family, etc.). In general, the intellect as a phenomenon of biological or artificial nature has a multi-level hierarchical character. The law of hierarchy was discovered in ancient times and found its expression in many religious cultures.

Among the known communication languages, the Math language is, perhaps, the most concise, capacious and abstract. Like other languages, the Math arose from experience. Astrology and architecture inspired ancient sages to develop geometry. The study of mechanics brought the infinitesimal calculus. The Math development until the end of the 19-th century had been accompanied by empirical observation, while matter objects of interest and observation tools were commensurable. At that time, the differential and integral calculus had been developed, along with classical functional analysis. These disciplines were based on the concepts of absolute space and time embodied in continuum hypothesis of real numbers.

The Cantor's set theory became the common platform of mathematical

models of that time, though sharp discussions took place among the scientists. On this background, the three-dimensional Cartesian space was transformed to multidimensional Euclidean space. The latter one, in turn, expanded into the complex number domain and the non-Euclidean tensor geometry on smooth manifolds. The concept of Hilbert vector space (admitting generalization to infinite case) played an important role in development the physics of small particles (quanta) in the first half of the 20th century.

Empirical investigations in small particles realm triggered new ideas and principles that contradicted known physical theories and their mathematical description. The statistical uncertainty of experimental observations, the lack of solid identification the small particles, the relativity of matter state monitoring from a subjective point of view, the ill posed "instant" particle state-to-impulse determination, made a lot perplexity in academia. The facts of quantization of the measured values did not fit the classical insight of the continual space and time. The many-body interaction caused a problem with quantum correlations (entanglement). As a consequence, the wave function of the system turned utterly cumbersome to analytical calculations. Experimental physics in the first half of the 20th century desperately needed reorganization the Math foundations to advance the theory of interactions.

The founder of the new mathematical theory of quantum mechanics became the outstanding mathematician of the 20th century, John von Neumann (1903 – 1957). Collaborating with adherents, von Neumann developed the multi-rank set theory and the special sections of functional analysis that absorbed new physical ideas and principles. These and other results became the theoretical foundation of modern quantum physics. The methods of quantum physics penetrate today into related sciences (quantum information theory and coding, biology, medicine, sociology, linguistics, etc.). However, the academic Math discipline still keeps being rather conservative and heavily relies on classical approaches.

This paper aims a cognitive insight on quantum mechanics to aid a multipolar object investigation.

Related publications survey. The genesis of quantum mechanics aids better understanding its role in the modern system analysis. The quantum mechanics was originated from the "matrix mechanics" of W. Heisenberg, M. Born and P. Jordan ([1], 1925) and "wave mechanics" Erwin Schrödinger ([2], [3], 1926). Later, von Neumann showed the equivalence between the wave mechanics built in terms of integral operators and matrix mechanics, ([4], 1932).

However, the new facts of experimental physics were still challenging the classical mathematics based on Cantor's set theory ([5], 1883). An impressive contribution to Math foundation of quantum physics was made by

J. von Neumann. In 1927-29 Neumann published seven articles on math foundation of quantum mechanics; one of them originated new set theory ([6], 1928). These results were generalized by Neumann in his monograph ([4], 1932). Subsequent works by J. von Neumann, C. Gödel, and P. Bernays resulted in a novel axiomatic set theory, aka NBG, ([7], 1937). The Neumann's approach to set theory is distinguished by ranking the sets by ordered classes. That understanding tunes the modern view on systems hierarchy in nature and human life. The hierarchy of classes helps to eliminate known logical contradictions inherent to Cantor "naive sets theory", as well as enables construction of high order grammars with limited complexity at each level.

Authoritative experts consider Neumann's works still being the most rigorous apparatus of quantum physics, although rather cumbersome and complex ([8], 2018). Apparently, this complexity is paid for aspiration to harmonize the Hilbert function analysis with the finite scale reality [9]. The comprehensive study of this issue covers entire section of Neumann's quantum mechanics. Ultimately, a new math discipline was developed by Neumann, aka spectral theory of linear operators in Hilbert space [10].

The key point of Neumann's quantum mechanics focuses the so called eigenvalue problem [11]. This problem arises whenever inverse task of mathematical physics studied for algebraic, differential or integral equations. An accurate solution the eigenvalue problem enables major equation resolution, as well as the wave function of a quantum system acquisition [12]. A non-zero defined Hermitian operator denoted by Neumann as "maximal operator", and the eigenvalue well-posed maximal operator called "hyper maximal operator".

Hermitian operators, which are not hyper maximal, stay beyond the Neumann theory of quantum mechanics. The matter of this "exception" may be understood from Gödel's theorem on the incompleteness of any formal system [13]. Though the complete equivalence of Hilbert functional space and finite-dimensional vector space not finally proved, the operators in context of Hermitian matrix transforms became principal objects in Neumann's quantum mechanics.

A general insight on mathematical models was presented by Neiman in his "Mathematician", ([14], 1947). In this work, geometry emphasized as a principal way of mathematical imagination and abstract thinking. Particular discussed the cognitive relationships between the "logical rigor" and "empirical knowledge" in mathematical theories.

A solid contribution in quantum mechanics made by Feynman's lectures on physics [15]. The eighth chapter of this book highlights the Hamiltonian matrix in the context of particle quantum states presentation. The Chapter 20 outlines the operator calculus as the next step in quantum mechanics

understanding. The key issues in modern quantum mechanics related to measuring system and gauge fields [16 – 18]. The ubiquitous penetration of quantum physics inspired researches on general theory of the open quantum systems [19]. These works correlate with relativistic probability concept [20], [21]. As noted in [22], the quantum mechanics motivates searching for a new "quantum mathematics".

In recent years, the modern mathematics apparently migrates towards artificial and computer intelligence as a powerful driver of prospective technological solutions. In this context, the math language itself gradually evolves to high-level programming language for cognitive automata. Though, a lot of work is still ahead and more researches needed in this realm.

Objective. This paper aims constructing a unified geometric presentation of a quantum system experiment.

The quantum system hierarchy. Consider the "many-body problem" on the basis of quantum mechanics principles. Suppose a cognitive subject monitoring the object particles interaction (denote "*quantum system S experiment*", or *QSE*). Let experiment QSE contains a series of *cyclic tracks*, each formed by a sequence of *system state samples* (SSS). Each sample includes records of one or more *particles* of the object. An ordered set of object particles denote "*ensemble*". Thus, we obtain the following three-level hierarchy of the QSE-terms:

- Particle ξ_n : an element of the 1-st rank set;
- Ensemble $\{\xi_n\}$ (of particles): the 1-st rank set;
- Sample (of particles) $x \subseteq \{\xi_n\}$: the 1-st rank instant subset;
- Track $f(t) = \{x_t\}$: the 2-nd rank sequence of samples;
- Experiment: the 3-rd rank collection of tracks;
- Universe $U = \{u(t)\}$: the 3-rd rank collection of potential tracks.

We adopt the following axioms of quantum system experiment (QSE).

- 1) Separability. Any particle appears solo once at least.
- 2) Duality. Any particle has an antiparticle dual to itself.
- 3) Ergodicity. Each track of QSE observed under the same conditions.
- 4) Cyclicity. Each track starts and ends with the same state.

Let $\hat{f}(t) \in U$ – the mathematical expectation of a track; $\{\tilde{f}(t)\} \in U$ – the set of centered tracks. Consider $\tilde{f}(t)$ a Markov chain; $P(k, l)$ – transition matrix for QSE (entanglement).

Consider symmetric real Hermitian matrix $P(k, l)$. Each row of $P(k, l)$ presents the complete set of conditional probabilities for QSE-states

transition. Therefore, the sum of all the elements in any row of $P(k,l)$ matrix yields unit.

Introduce axiom 5. The QSE states Separability.

Each diagonal element of $P(k,l)$ is greater than zero. It means that any QSE-state appears solo once at least. Thus, any non-diagonal element of $P(k,l)$ is less than unit. Map $P(k,l)$ onto Hermitian matrix $H(k,l)$ by replacing the diagonal of $P(k,l)$ with units; apparently this transformation is a bijective mapping: $P(k,l) \leftrightarrow H(k,l)$.

Presentation Hermitian matrix in eigenvalue spectrum. The quantum system experiment (QSE) itself is an empirical data array beyond any formalized coordinate system of a physical realm. Constructing an abstract math space, which is relevant to given QSE, is the essence of a particular quantum model.

Take a well-posed Hermitian matrix $H(k,l)$, which admits an accurate eigenvalue task solution with real non-zero spectrum of eigenvalues $\{\lambda_k\}$ and unitary real matrix Z of eigenvectors. Let $\Lambda = \text{diag}(\{\lambda_k\})$ the diagonal matrix of eigenvalues. For these notations, the eigenvalue task is known equation:

$$H \cdot Z^* = Z^* \cdot \Lambda, \quad (1)$$

where Z^* is the conjugate matrix towards Z . Let I the diagonal unitary matrix. The following relation is valid for any unitary matrix Z :

$$Z \cdot Z^* = Z^* \cdot Z = I. \quad (2)$$

Evolve the (2) equation as follows:

$$Z : (H \cdot Z^*) \cdot Z = (Z^* \cdot \Lambda) \leftrightarrow H \cdot (Z^* \cdot Z) = (Z^* \cdot \Lambda) \leftrightarrow H \cdot I = (Z^* \cdot \Lambda).$$

This yields the known equation presenting a well-posed Hermitian matrix H in the basis of eigenvectors Z :

$$H = Z^* \cdot \Lambda \cdot Z. \quad (3)$$

The presentation (3) possesses the property

$$\text{tr}(H) = \text{tr}(\Lambda) = \sum_{k=1}^K \lambda_k = K, \quad (4)$$

where $\text{tr}()$ is matrix treasure (the sum of diagonal elements).

Geometric presentation of the quantum system experiment. The core idea of geometric presentation the matrix of quantum states transitions $P(k,l) \leftrightarrow H(k,l)$ is the fact that any well-posed Hermitian matrix H corresponds to particular set of vectors $\vec{V} = \{V_k\}$ in Euclidian space.

Apply the aforesaid number 4 axiom of quantum experiment Cyclicity to introduce the notion of topological time circle Θ_T , and the so called "topological time" $t \in \langle \Theta_T = [0, 1, 2, \dots, T = 0] \rangle$ as a closed chain of time dots. To each point t assign an ordered sample $x_t \subseteq \{\xi_n\}$ of the quantum system state, which is an integer signed number s formed by N ternary digits (any digit refers to particular quantum particle $\xi_n \in \{\xi_n\}$). In case $N = 8$, numbers $\xi_{\min} = -11111111$ and $\xi_{\max} = +11111111$ present the minimal and maximal elements of the set $\xi_n \in \{\xi_n\}$. Next, one axiom more needed to accomplish the topological space of QSE.

Axiom 6. Completeness of the QSE set of states.

A singular state Ω of quantum system exists between the minimal and maximal states: $-111\dots 1 < \Omega < +111\dots 1$.

Include the Ω number into the set $\{x\}$, $x \subseteq \{\xi_n\}$: $\{x\} \rightarrow \langle \{s\}, \Omega \rangle = X$. Present the set X as topological circle Θ_X of QSE states. Thus, the state space of a quantum system takes the form of a two-dimensional torus $\Theta^2 = \Theta_X \times \Theta_T$. Each track $f(t) = \{x_t\}$ refers to a loop set on Θ^2 . The math expected track $\hat{f}(t) = \text{mean}(f(t))$ is a loop on Θ^2 . The torus $\Theta^2 = \Theta_X \times \Theta_T$ denote "the *phase space of quantum system states*" (PSS). The track $\hat{f}(t) \in \Theta^2$ denote "the *wave function* of QSE". Let each point of $\hat{f}(t) \in \Theta^2$ possess a matrix $H_t(k,l)$ originated from $P_t(k,l)$. The form $\langle \hat{f}(t) \in \Theta^2, H_t(k,l) \rangle$ denote "the QSE functional space (QFS)", where $H_t(k,l)$ is Riemann metric tensor of second rank.

If Markov quantum system, the tensor H_t does not depend on the time t . To calibrate the QFS space, construct the first-rank matrix operator V based on matrix H_t . Define the matrix of the so called amplitude eigenvalues spectrum $Y = \pm\sqrt{\Lambda}$. Evolve the equation (3) to

$$H = Z^* \cdot (Y \cdot Y) \cdot Z = (Z^* \cdot Y) \cdot (Y \cdot Z). \quad (5)$$

Insert the neutral math form $Z \cdot Z^* = I$ into (5):

$$\begin{aligned}
(Z^* \cdot Y) \cdot (Y \cdot Z) &= (Z^* \cdot Y) \cdot I \cdot (Y \cdot Z) = \\
&= (Z^* \cdot Y) \cdot (Z \cdot Z^*) \cdot (Y \cdot Z) = \\
&= (Z^* \cdot Y \cdot Z) \cdot (Z^* \cdot Y \cdot Z).
\end{aligned}$$

Denote $V := (Z^* \cdot Y \cdot Z)$. Apparently,

$$V^* = (Z^* \cdot Y \cdot Z)^* = (Z)^* \cdot Y \cdot (Z^*)^* = Z^* \cdot Y \cdot Z = V,$$

i.e. matrix V turns Hermitian one. Hence, $H = V^2$, or

$$V = \sqrt{H} = Z^* \cdot Y \cdot Z. \quad (6)$$

The Hermitian matrix V is the first-rank tensor with respect to H ; it is covariant on vector set $\vec{V} = \{\vec{V}_k\}$. Assume the matrix V is a two-dimensional array of normal projections for vectors $\vec{V} = \{\vec{V}_k\}$, being presented in the orthonormal basis of an Euclidean space (considering H is the scalar product of $\vec{V} : \{\vec{V} \times \vec{V}\} = H$). Thus, matrix H admits geometric interpretation as a set of vectors (6) acquired from the experiment. However, the set of vectors V in (6) is not unique, but a plenty of different vector sets are invariant to any given Hermitian matrix H of vector scalar products. Therefore, equation (6) exhibits a *unified quantum uncertainty* principle.

Ultimately, a unified experiment on quantum system (QSE) is mapped on two-dimensional topological torus $\Theta^2 = \Theta_X \times \Theta_T$, which is built in terms of "*quantum state multiplied by quantum time*", and intends to exhibit the complete set of potential QSE-states. This torus $\Theta^2 = \Theta_X \times \Theta_T$ is understood as QSE phase state space (denoted above PSS). Next, a phase-loop track $\hat{f}(t) = \text{mean}(f(t))$ defined on the torus $\Theta^2 = \Theta_X \times \Theta_T$, to exhibit the math expected QSE-track (called QSE wave function). Finally, tensor function $V(\hat{f}_t)$ determined on the points of math expected track $\hat{f}(t)$, that exhibits the QSE particle entanglement in the form of vector set $\{\vec{V} \times \vec{V}\}_t = H_t$.

The Hermitian matrix $V(\hat{f}_t)$ is understood as the kernel of a first-rank tensor operator for quantum system states transformation (the so called operator equation of physical process observation): $x \cdot V = x_V$. Its geometric form is the vector basis of a local Euclidian space determined on the set of track points $\hat{f}(t)$. The evaluation of unknown state x turns to the known inverse task of Math physics: $x_V = x \cdot V^{-1}$, where the kernel V often ill-posed matrix assumed for renormalization procedure.

Conclusion. The theoretical methods of large system investigation evolve behind empirical researches. Beginning the 20th century a cascade of bizarre empirical facts emerged in experimental physics, resulted in modern quantum mechanics foundation. In recent years, the quantum physics penetrates ubiquitously, though, academia mathematical disciplines often keep inertia.

In this paper, the quantum principles applied to particle interaction analysis in an arbitrary many-body task. A unified geometric model designed for a quantum system experiment, based on the axiomatic approach. The topological space defined for quantum system phase states in the form of two-dimensional torus. The looped tracks on the torus simulate the system state behavior in cyclic time, as well as the wave function of quantum system determined and tensor form of particle entanglement obtained.

The results of this work oriented for a wide class of large object studies, wherein a set of interacting elements observed (telecommunication and information networks, transporting and queuing systems, etc.)

References:

1. Born, M., Heisenberg, W., and Jordan, P. (1925), "Zur Quantenmechanik II", *Zeitschrift für Physik*, No. 35, S. 557-615.
2. Schrödinger, E. (1926), *Quantisierung als Eigenwertproblem* [Electronic resource]. Available: <https://doi.org/10.1002/andp.19263840404>.
3. Schrödinger, E. (1927), *Abhandlungen zur Wellenmechanik*, Barth, 169 p.
4. J. von Neumann, J. (1996), *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Springer Customer Service Center GmbH, Haberstrasse 7, Heidelberg, Germany, 262 p.
5. Cantor G. (1976), "Foundations of a general theory of manifolds" (1st english translation) [Electronic resource], *Journal of the National Caucus of Labor Committees*, Available: <http://wlym.com/archive/campaigner/7602.pdf>.
6. J. von Neumann, J. (1928), "Die Axiomatisierung der Mengenlehre", *Mathematische Zeitschrift*, No. 27, S. 669-752.
7. Bernays, P. (1937), "A System of Axiomatic Set Theory—Part I", *The Journal of Symbolic Logic*, No. 2, pp. 65-77.
8. J. von Neumann, J. (2018), *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, New Edition by John von Neumann Paperback, 328 p.
9. Mejlbro, L. (2009), *Hilbert Spaces and Operators on Hilbert Spaces* [Electronic resource], Available: <http://zums.ac.ir/files/research/site/ebooks/petroleum-gas-oil/hilbert-spaces-and-operators-on-hilbert-spaces.pdf>.
10. Warzel, S., and Reppekus J. (2013), *Spectral Theory in Hilbert Spaces* [Electronic resource] Available: <https://www-m7.ma.tum.de/foswiki/pub/M7/Analysis/VorSpecTheory/SpectralTh.pdf>.
11. Sinayoko, S. (2012), *Eigenvalue problems I: Introduction and Jacobi Method* [Electronic resource] Available: http://www.southampton.ac.uk/~feeg6002/lecturenotes/feeg6002_numerical_methods08.pdf.
12. Lasanen, S. (2014), *Introduction to inverse problems* [Electronic resource] Available: http://cc.oulu.fi/~smaenpaa/inv_pk/inv_pk14_eng.pdf.

-
13. Cellucci, C. (1992), "Gödel's incompleteness theorem and the philosophy of open systems", *Travaux de logique*, No.7, P. 103-127.
 14. Domokos, S. (2011), John von Neumann, the Mathematician [Electronic resource], Available: <http://math.bme.hu/~szasz/files/neumann.pdf>.
 15. Feynman, R., Leighton, R., and. Sands M. (2013), The Feynman Lectures on Physics, Volume III [Electronic resource], Available: http://www.feynmanlectures.caltech.edu/III_toc.html.
 16. Vatsya, S.R. (2017), "Current State of Quantum Theory", *Physics & Astronomy International Journal*, Vol. 1, Issue 4, pp. 1-8.
 17. Carloni, L. (2011), Renormalization in Effective Field Theory and Hidden Radiation [Electronic resource], Available: <http://portal.research.lu.se/ws/files/5611928/1833297.pdf>.
 18. Gripaio, S. B. (2016), Gauge Field Theory [Electronic resource], Available: http://www.hep.phy.cam.ac.uk/~gripaios/gft_lecture_notes.pdf.
 19. Breuer, H., Petruccione, F. (2007), The Theory of Open Quantum Systems [Electronic resource], Oxford Scholarship Online, Available: <http://www.oxfordscholarship.com/view/10.1093/acprof:oso/9780199213900.001.0001/acprof-9780199213900>.
 20. Cresser, J. (2009), Observables and Measurements in Quantum Mechanics [Electronic resource], Available: <http://physics.mq.edu.au/~jcresser/Phys301/Chapters/Chapter13.pdf>.
 21. Khrennikov, A. (2016), *Probability and Randomness. Quantum versus Classical*. Imperial College Press, London, 282 p.
 22. Dijkgraaf, R. (2017), Quantum Questions Inspire New Math [Electronic resource], Quanta Magazine, Available: <https://d2r55xnwy6nx47.cloudfront.net/uploads/2017/03/how-quantum-theory-is-inspiring-new-math-20170330.pdf>.

The article is presented by doctor of technical sciences, professor, the head of "Radio and Television" depart. of the "Institute of Radio, Television and Information Security" of "O.S. Popov ONAT", Honored Worker of Science and Technology of Ukraine Gofiyzen O.V.

Received 18.05.2018

Tikhonov Victor, Dr. Sci. Tech, associate professor
Laureate of the Ukraine State Prize for Science and Technology,
O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications
Str. Kuznechna, 1, Odessa 65029, Ukraine
Tel.: 067-752-13-90
E-mail: victor.tykhonov@onat.edu.ua

УДК 530.145.1

Узагальнене геометричне представлення квантового системного експерименту / Тіхонов В.І. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – 2018. – №. 24 (1300). – Р. 59 – 68.

Методи квантової фізики сьогодні проникають у різні галузі теоретичних дисциплін. В роботі, заснованій на принципах квантової механіки, введено рівномірну геометричну модель експерименту квантової системи. Фазовий простір визначається для експерименту квантової системи у вигляді двовимірного топологічного тору. На цьому торі, математичне очікування квантової системи слід визначатися як хвильова функція поряд з тензором квантових станів завалення. Тензор квантового заплутування трактується як векторна основа локального евклідового простору. Робота передбачає комплексне застосування багатьох систем. Бібліогр.: 22 назв.

Ключові слова: геометрична модель; квантова система; фазовий простір; тензор стану.

УДК 530.145.1

Обобщенное геометрическое представление квантового системного эксперимента / Тихонов В.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – 2018. – №. 24 (1300). – Р. 59 – 68.

Методы квантовой физики сегодня проникают в различные области теоретических дисциплин. В этой статье, основанной на принципах квантовой механики, введена однородная геометрическая модель эксперимента квантовой системы. Фазовое пространство, определенное для квантового системного эксперимента в виде двумерного топологического тора. На этом торе математическое ожидание квантовой траектории системы, определяемое как волновая функция, наряду с тензором сцепления квантовых состояний. Тензор квантовой запутанности интерпретируется как векторный базис локального евклидова пространства. Эта работа предполагает комплексные приложения для многих систем. Библиогр.: 22 назв.

Ключевые слова: геометрическая модель; квантовая система; фазовое пространство; тензор состояния.

UDC 530.145.1

A uniform geometrical presentation of a quantum system experiment / Tikhonov V.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modeling. – 2018. – №. 24 (1300). – P. 59 – 68.

The methods of quantum physics penetrate today into various fields of theoretical disciplines. In this paper, based on quantum mechanics principles, a uniform geometric model of a quantum system experiment introduced. A phase space determined for quantum system experiment in the form of two-dimensional topological torus. On this torus, the math expectation of quantum system track defined as the wave function, along with the tensor of quantum states entanglement. The tensor of quantum entanglement interpreted as the vector basis of a local Euclidian space. The work intends the complex many-body system applications. Refs.: 22 titles.

Keywords: geometric model; quantum system; phase space; tensor of quantum states.

Комп'ютерна інженерія

UDK 004.732.056

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.24.07

S. Yu. GAVRYLENKO, PhD Tech., Associate Professor, National technical university "Kharkiv Polytechnic Institute",

O. S. BABENKO, Post graduate student, National technical university "Kharkiv Polytechnic Institute"

DEVELOPMENT AN ANTIVIRUS SCANNER BASED ON THE NEURAL NETWORK ART-1

In this article, the methods for constructing antivirus programs, their advantages and disadvantages are considered. The PE-structure of malicious and safe software was analyzed. The signs that are typical for classes of malware such as Worm, Backdoor, Trojan and for the safe software were identified. A software model of the device for detecting malicious software based on the neural network ART-1 was developed. This system was trained on the example of the obtained binary vectors. Optimal similarity coefficients were found, and the testing was performed. The test results showed the possibility of using the developed system to detect modified malicious software. Figs.: 3. Tabl.: 4. Refs.: 10 titles.

Keywords: antivirus scanner; malicious; PE-structure; software; neural network; ART-1; coefficients.

Formulation of the problem. It's known that over a year, viruses cause damage to hundreds of billions of dollars, and about the same amount is indirect damage associated with the development of software and other measures to protect against viruses.

The most notable event in 2017 was the virus Petya epidemic. It is the first time in the history of Ukraine, that sites of government and private agencies were struck in a few hours due to hacker's attack. This malware infected computers of many organizations and individuals in 60 countries around the world. The damage from the virus attack is estimated at \$ 8 billion

It becomes obvious that the analysis of such a number of malicious code and the formation of the entire spectrum of virus signature is an almost unrealized task. That is why the actual topic is the development of effective methods and technologies for counteracting computer viruses based on heuristic methods.

Analysis of literature [1 – 4], as well as research on the methods of heuristic analysis in antivirus programs showed a high variety of existing approaches and methods of heuristic analysis: intelligent subsystems based on the theory of artificial intelligence, methods of fuzzy logic, cluster analysis, the theory of neural networks, genetic algorithms and other. The main disadvantage of the heuristic method is the high frequency of false positives.

Statistical methods based on control cards (Shukhart control maps,

CUSUM maps, EWMA cards, etc.) can also be used to solve the set tasks [5]. In addition, methods for statistical data processing, for example, BDS testing [6], can be used for further refine of obtained results.

These methods are based on the assumption that for a computer system (CS) there is a template for normal behavior and any significant deviations from it may be due to the influence of intruders. That is why the very important task is to select or form a template, which would reproduce the functional portrait of the CS and record its abnormal behavior with the given accuracy. At the same time, the more input data is analyzed, the more accurate the result of the evaluation. Meanwhile, if the model or evaluation criterion is chosen incorrectly, parametric methods lose their basic authority, which can lead to an increase in false positives.

The conducted studies have shown that the main way of eliminating these shortcomings is to improve the models of information technology and the reasoned choice of criteria for evaluating abnormal behavior of computer systems.

On the one hand neural networks, can behave as a deterministic machine, on the other as a fuzzy system, evaluating new data that did not participate in the formation of the neural network. Such a result is achieved by learning networks [8, 9] and not by the formation of reaction rules, as is done in classical approaches. Ability of the networks to educate by examples makes them more attractive in comparison to systems that function according to a defined system of rules formulated by experts. The education process can be considered the architectural determination of the network and finding the coefficients of the connections between neurons. The neural network adjusts the weight of the connections depending on the existing training set and is a parallel computing device, since it is based on a set of simple computing elements - the parallel functioning neurons. Such a system is resistant to damage, that is, the network will work even if part of the neurons fails. In the education process, the neural network is capable to detect complex interdependencies between incoming and output data, as well as generalization. This means that in case of successful training, the network will be able to return the correct result based on the data that was missing in the training sample, as well as incomplete or partially distorted data.

An essential disadvantage of most neural networks is the inability to learn at the appearance of new information (lack of stability-plasticity). Therefore, to develop a heuristic analyzer, it was decided to use one of the few types of neural networks that possesses this property: a discrete neural network of adaptive resonance (ART-1). The algorithm for training the neural network is given in [10].

The **purpose of this article** is to develop a system for detecting computer viruses based on the ART-1 neural network.

Results of the development and research. The conducted researches have shown that one of the perspective directions of heuristic analysis of computer viruses is the use of neural networks [7-10].

The input data for training the neural network are based on the analysis of the PE structure of the file.

In the Fig.1 it is showed an example of PE structure of the file and emphasized on the areas for the further analysis.

Offset(h)	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	0A	0B	0C	0D	0E	0F	
00000000	4D	5A	90	00	03	00	00	00	04	00	00	00	FF	FF	00	00	
00000010	B8	00	00	00	00	00	00	00	40	00	00	00	00	00	00	00	1
00000020	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00000030	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	80	00	00	00	
00000040	0E	1F	BA	0E	00	B4	09	CD	21	B8	01	4C	CD	21	54	68	
00000050	69	73	20	70	72	6F	67	72	61	6D	20	63	61	6E	6E	6F	2
00000060	74	20	62	65	20	72	75	6E	20	69	6E	20	44	4F	53	20	
00000070	6D	6F	64	65	2E	0D	0D	0A	24	00	00	00	00	00	00	00	3
00000080	50	45	00	00	4C	01	03	00	8D	FA	81	4D	00	00	00	00	
00000090	00	00	00	00	E0	00	02	01	0B	01	08	00	00	0A	00	00	4
000000A0	00	08	00	00	00	00	00	00	9E	28	00	00	00	20	00	00	
000000B0	00	40	00	00	00	00	40	00	00	20	00	00	00	02	00	00	
000000C0	04	00	00	00	00	00	00	00	04	00	00	00	00	00	00	00	5
000000D0	00	80	00	00	00	02	00	00	01	82	00	00	03	00	40	85	
000000E0	00	00	10	00	00	10	00	00	00	00	10	00	00	10	00	00	
000000F0	00	00	00	00	10	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00000100	4C	28	00	00	4F	00	00	00	00	40	00	00	A8	05	00	00	
00000110	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	6
00000120	00	60	00	00	0C	00	00	00	A4	27	00	00	1C	00	00	00	
00000130	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00000140	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00000150	00	00	00	00	00	00	00	00	00	20	00	00	08	00	00	00	
00000160	00	00	00	00	00	00	00	00	00	08	20	00	00	48	00	00	
00000170	00	00	00	00	00	00	00	00	00	2E	74	65	78	74	00	00	7
00000180	A4	08	00	00	00	20	00	00	00	0A	00	00	00	02	00	00	
00000190	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	20	00	00	60	
000001A0	2E	72	73	72	63	00	00	00	A8	05	00	00	00	40	00	00	8
000001B0	00	06	00	00	00	0C	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
000001C0	00	00	00	00	40	00	00	40	2E	72	65	6C	6F	63	00	00	
000001D0	0C	00	00	00	00	60	00	00	00	02	00	00	00	12	00	00	9
000001E0	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	40	00	42	
000001F0	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	
00000200	80	28	00	00	00	00	00	00	48	00	00	00	02	00	05	00	10
00000210	E4	20	00	00	C0	06	00	00	09	00	00	00	01	00	00	06	
00000220	00	00	00	00	00	00	00	00	50	20	00	00	00	80	00	00	
00000230	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	

Fig 1. An example of PE file structure,

where: 1 – DOS header section; 2 – DOS message section; 3 – PE header; 4 – standard PE fields; 5 – PE NT fields; 6 – Catalogue data; 7 – .text header section; 8 – .rscs header section; 9 – .reloc header section; 10 – .text section.

The PE structure of harmful and secure software was analyzed, namely:

- 290 Worm type files;
- 1050 files such as Trojan;
- 1153 files of type Backdoor;
- 1000 secure files.

As a result of the analysis of the PE structure of the investigated files received:

- a table with API-functions and libraries in which they are included. There were 24945 records received.

- a table with strings. Found in total 175651 rows, their length varied from 6 to 70 characters.

The analysis of the data received from malicious and secure software allowed to highlight functions and rows, and to form the signs (tabl. 1), which are inherent to the considered viruses and to form a table of attributes. For further analysis it was decided to use 49 signs.

These signs were later used as bitmaps for file analysis. The binaries of malicious files like Worm, Backdoor, Trojan and secure software were obtained as a result of searching for selected attributes in files.

For the correct functioning of the state identification system, an optimal coefficient of similarity has been selected experimentally. The optimal coefficient is the coefficient at which there are no false-positives on the learning sample.

At the first stage, 100 signatures of the type Backdoor are taken for basic knowledge of the neural network. The initial similarity factor is intended to be 0.6, since it is the minimum allowable for the neural network. Signatures of 100 secure files were submitted to the input of the neural network for recognition. As a result of the program's operation, some of the input signatures were displayed on the console. Console-derived signatures were attributed to signatures of the type Backdoor, which was a mistake (fig. 2) and required an increase of the coefficient of similarity to the optimal. The optimal coefficient is considered to be the coefficient for which there are no false recognitions. The results of the experimental selection of the optimal similarity coefficient for malicious software of the type Backdoor are given in tabl. 2. Thus, the absence of false positives for malicious software such as Backdoor managed to achieve with a similarity factor of 0.84.

At the second and third stage, 100 signatures of malicious software such as Trojan and Worm are taken for basic knowledge of the neural network. The results of the experimental selection of the optimal coefficient of similarity are given in Table 3 and Table 4.

Table 1

Features malicious signatures

	Functions/lines	Var 1	Var 2	Quantity in the viruses
1	callnexthookex	-	-	42
2	copyfile	CopyFileA	CopyFileW	132
3	createfile	CreateFileA	CreateFileW	178
4	enumcalendarinfo	EnumCalendarInfoA	-	43
5	findfirstfile	FindFirstFileA	FindFirstFileW	127
6	getcurrentprocessid	-	-	70
.....				
37	host	-	-	10
38	admin	-	-	-
39	hostname	-	-	9
40	localhost	-	-	19
41	sendmail	-	-	28
42	userhost	-	-	9
43	wininet	-	-	35
44	wnet	WNetEnumResourceA	WNetOpenEnumA	55
45	getmodulefilename	GetModuleFileNameA	GetModuleFileNameW	206
46	getmodulehandle	GetModuleHandleA	-	247
47	loadlibrary	LoadLibraryA	-	135
48	setfilepointer	SetFilePointerEx	-	158
49	virtualalloc	VirtualAllocEx	-	158

Table 2

Experimental match of the optimal coefficient of similarity for the viruses type Backdoor

Coefficient of similarity	Quantity of false alerts for the safe signatures
0,60	15
0,70	10
0,80	1
0,84	0

At the initial base of Trojan malware, Trojan – 100%, Backdoor – 46%, Worm – 1% were detected.

The results of the identification system showed that when training the neural system by the Backdoor sample, the system also begins to identify harmful Trojan (28%) signatures, since these types of signatures have a high

[illegible]

In the future, 3 experiments with different input data and different similarity coefficients were carried out. The first one uses 100 signatures of the type Backdoor as the base of initial knowledge, 400 signatures are presented to the recognition input, which represent a mixture of all possible signatures (100 Backdoor signatures, 100 Trojan signatures, 100 Worm signatures, 100 signature files of secure files). The second one is the base of 100 signatures of type Trojan, the input is 400 signatures. The third is the base of 100 signatures of type Worm, the input is 400 signatures.

At the initial base of Warm malicious signatures, only signatures from this group were 100%

Experimental match of the optimal coefficient of similarity for the viruses type Trojan

Coefficient of similarity	Quantity of false alerts for the safe signatures
0,6	10
0,65	3
0,7	0

75

of this type are abandoned from Signature Backdoor, Trojan, and secure software.

Table 4

Experimental match of the optimal coefficient of similarity
for the viruses type Worm

Coefficient of similarity	Quantity of false alerts for the safe signatures
0,6	29
0,7	14
0,8	17
0,9	10
0,97	0

Also, when training a neural system with Trojan sampling, in addition to this sample, the system recognizes backdoor signatures (46%) and insignificant number of worm-signatures (1%).

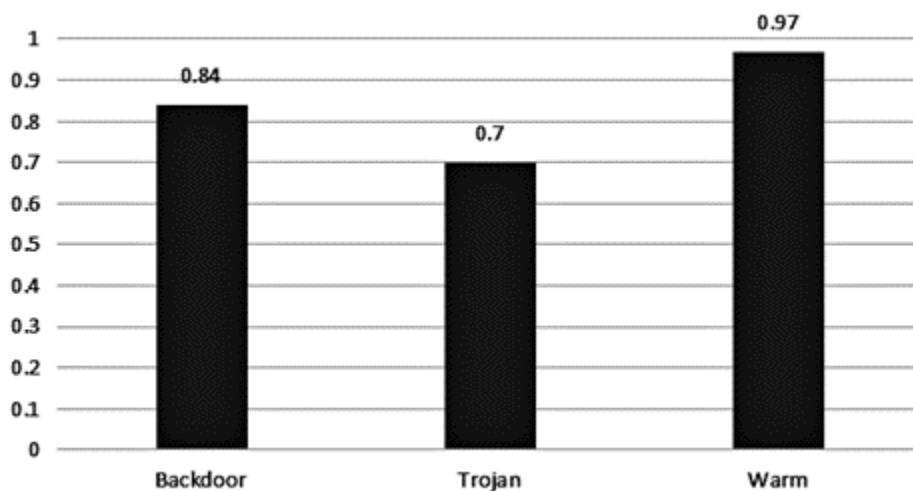


Fig. 3. Optimal coefficients of the similarity

This percentage of signature recognition (Backdoor - Trojan and vice versa) is due to the fact that these types of viruses have similar actions from the point of view of the operating system, namely harm to it: the desire to obtain unauthorized access to data or remote control of the operating system and the computer as a whole; collection of information and its transmission to the attacker, its destruction or malicious change, the disruption of the computer; the use of computer resources for other purposes.

Conclusions. In this article, the methods of constructing antivirus programs are analyzed. The RE structure of harmful and secure software has been analyzed, API functions and rows are found, inherent to these files, and selected part of them for further analysis. The result of the search for highlighted features in files is binary vectors of malicious software such as Worm, Backdoor, Trojan and secure software, and used as inputs for training the neural network.

The software model of the heuristic analyzer on the basis of the ART-1 neural network has been developed, the optimal similarity coefficients were found, and the tested computer virus detection system was tested. System was modified in order to use three parallel ART-1 blocks working in parallel, that were studied with different set of data.

The test results showed that when training the neural system with the Backdoor sample, the system also begins to identify 28% of the malicious Trojan type signatures, since these types of signatures perform such actions from the point of view of the operating system. When learning the system, the worm sample is only susceptible to virus of this type.

The obtained research results showed the possibility of using the developed system of identifying malicious software as an auxiliary method in information security systems of the COP.

References

1. Lukatsky, A. (2001), *Attack Detection*, VHV-Petersburg, St. Petersburg, 624 p.
2. Shelukhin, O., Sakalema Zh., and Filinov A. (2013) *Intrusion Detection into Computer Networks*, Hot line-Telecom, Moscow, 220 p.
3. Semenov, S., Davydov, V., and Gavrilenko S. (2014), *Data Protection in Computer-Aided Control Systems*, "Lap Lambert Academic Publishing", Germany, 236 p.
4. Goshko, S. (2009), *Technologies of fight against computer viruses*, Solon Press, Moscow, 352 p.
5. Gavrilenko, S., Chelak, V., and Hornostal, O. (2016), Intrusion detection in computer systems, *Proceedings of the symposium "Metrology and metrology assurance"*, Sozopol, Bulgaria, pp. 342-347.
6. Semenov, S., Gavrilenko, S., and Chelak, V. (2016), Development of templates for the identification of the state of computer systems based on BDS-testing, *Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling*, Vol. 21, pp.118-125.
7. Grishin, A. (2011), Neural network technologies in the tasks of detecting computer attacks, *Information technologies and computing systems*, Vol. 1, pp. 53-64.
8. Bezobrazov, S., and Golovko, V. (2010), Algorithms of artificial immune systems and neural networks for detecting malware, *Neuroinformatics*, Vol. 7, pp. 273-288.
9. Dmitrienko, V., Zakovrotny, A., Noskov, V., and Mezentsev, M. (2014), *Fundamentals of neurocomputing: educational and methodical manual for practical classes*, Kharkov: HTMT, Kharkov, 140 p.

10. Gavrilenko, S., Semenov, S., and Babenko, A. (2015), Development of a computer virus detection system based on the ART-1 neural network, *Systems of information processing*, Vol. 10 (135), pp 126-129.

Статью представил д-р техн. наук, проф. HTУ "ХПІ" Семенов С.Г.

Received 05.05.2018

Gavrilenko Svitlana, PhD Tech.,
National Technical University " Kharkov Polytechnic Institute",
Str. Kirpicheva, 21, Kharkov, Ukraine, 61002,
Tel.: +38-057-707-01-65, e-mail: gavrilenko08@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0006-4561-8368

Babenko Oleksii, Post-graduate student,
National Technical University " Kharkov Polytechnic Institute",
Str Kirpicheva, 21, Kharkov, Ukraine, 61002,
Tel.: +38-093-301-33-39, e-mail: alex0128.94@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7340-3754

УДК 004.732.056

Розробка антивірусного сканера на основі нейронної мережі ART-1 / Гавриленко С.Ю., Бабенко О.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 70 – 79.

У статті розглядаються методи побудови антивірусних програм, їх переваги та недоліки. Проаналізовано PE-структура файлів шкідливого і безпечного програмного забезпечення. Виділено ознаки, які притаманні для класів шкідливих програм, таких як Worm, Backdoor, Trojan і для безпечного програмного забезпечення. Розроблено програмну модель для виявлення шкідливого програмного забезпечення на основі нейронної мережі ART-1. Виконано навчання системи на прикладі отриманих двійкових векторів. Знайдено оптимальні коефіцієнти подібності, виконано тестування. Результати випробувань показали можливість використання розробленої системи для виявлення модифікованого шкідливого програмного забезпечення. Іл.: 3. Табл.: 4. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: антивірусний сканер; шкідливе програмне забезпечення; PE-структура файлу; нейронна мережа ART-1; оптимальний коефіцієнт подібності.

УДК 004.732.056

Разработка антивирусного сканера на основе нейронной сети ART-1 / Гавриленко С.Ю., Бабенко А.С. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 70 – 79.

В статье рассматриваются методы построения антивирусных программ, их преимущества и недостатки. Проанализирована PE-структура файлов вредоносного и безопасного программного обеспечения. Выделены признаки, типичные для классов вредоносных программ, таких как Worm, Backdoor, Trojan и для безопасного программного обеспечения. Разработана программная модель для обнаружения вредоносного программного обеспечения на основе нейронной сети ART-1. Выполнено обучение системы на примере полученных двоичных векторов. Найдены оптимальные коэффициенты подобия, выполнено тестирование. Результаты испытаний показали возможность использования разработанной системы для обнаружения модифицированного вредоносного программного обеспечения. Ил.: 3. Табл.: 4. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: антивирусный сканер; вредоносное программное обеспечение; PE-структура файла; нейронная сеть ART-1; оптимальный коэффициент подобия.

UDK 004.732.056

Development an antivirus scanner based on the neural network ART-1 / Gavrylenko S. Yu., Babenko O. S. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – №. 24 (1300). – P. 70 – 79.

In this article, the methods for constructing antivirus programs, their advantages and disadvantages are considered. The file PE-structure of malicious and safe software was analyzed. The signs that are typical for classes of malware such as Worm, Backdoor, Trojan and for the safe software were identified. A software model of the device for detecting malicious software based on the neural network ART-1 was developed. This system was trained on the example of the obtained binary vectors. Optimal similarity coefficients were found, and the testing was performed. The test results showed the possibility of using the developed system to detect modified malicious software. Figs.: 3. Tabl.: 4. Refs.: 10 titles.

Keywords: antivirus scanner; malicious; PE-structure; software; ART-1 neural network; optimal similarity coefficients.

УДК 861.5.015.2

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.24.08

В. Д. ДМИТРИЕНКО, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",
А. Ю. ЗАКОВОРOTНЬИЙ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",
Н. В. МЕЗЕНЦЕВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ",
Д. М. ГЛАВЧЕВ, асп., НТУ "ХПИ"

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГРАММНЫХ КОМПОНЕНТ БОРТОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ПРЕОБРАЗОВАНИИ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ К ЭКВИВАЛЕНТНЫМ ЛИНЕЙНЫМ

Исследуются возможности расширения области применения геометрической теории управления (ГТУ). Показано, что применение ГТУ только для части уравнений, описывающих объект, может существенно уменьшить объём вычислений при поиске эквивалентных линейных моделей в форме Бруновского для нелинейных аффинных систем с векторным управлением в пространстве "вход-состояние". Ил.: 1. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: геометрическая теория управления; эквивалентные линейные модели; форма Бруновского; пространство "вход-состояние".

Постановка проблемы и анализ литературы. Геометрическая теория управления ГТУ является перспективным методом при поиске оптимальных управлений различными техническими объектами [1 – 10]. В частности, при компьютерном управлении процессами движения дизель-поезда с тяговым асинхронным приводом. Широкому применению этой теории мешают громоздкие аналитические преобразования, связанные с необходимостью вычислений производных и скобок Ли, определением инволютивности распределений, функций преобразования, связывающих переменные в исходных нелинейных моделях объектов управления с переменными моделей в форме Бруновского, и т.д. Большую часть этих преобразований удалось автоматизировать с помощью разработанного специализированного программного обеспечения, позволяющего синтезировать законы управления для нелинейных объектов, в частности, для дизель-поездов, описываемых системами обыкновенных дифференциальных уравнений, содержащих десятки уравнений [11]. Однако, правые части почти всех систем обыкновенных дифференциальных уравнений содержали не более одного-двух одночленов. Это было связано с тем, что при определении функций преобразования, связывающих переменные линейных и нелинейных уравнений, необходимо решать систему уравнений в частных производных, что в общем случае не является тривиальной

задачей. Поэтому актуальна проверка возможности работы программных компонент при увеличении сложности правых частей уравнений, описывающих нелинейный объект управления.

При разработке программного обеспечения для бортовой вычислительной системы дизель-поезда всё внимание было уделено получению линейных моделей с помощью ГТУ для полных нелинейных моделей исходных объектов управления [3, 5, 10, 11]. Возможности применения ГТУ только для части каналов управления объектом или только для части уравнений, описывающих объект управления, не рассматривались, однако такой подход может существенно уменьшать объем вычислений при поиске эквивалентных линейных моделей (и дальнейшем поиске оптимальных управлений).

Одним из необходимых условий получения линейных эквивалентов в форме Бруновского для нелинейных аффинных систем размерности n с векторным управлением в пространстве "вход-состояние" с помощью статической обратной связи является требование инволютивности распределений $M^j (j = \overline{0, p})$, где $p = k_{\max} - 1$, $k_{\max}$ – наибольший индекс управляемости для клеток Бруновского [1, 11]. Если это требование не выполняется, тогда точная линеаризация нелинейной аффинной системы с помощью статической обратной связи невозможна и необходимо проверять условия возможности линеаризации исходной нелинейной системы в расширенном пространстве, получаемом за счёт введения в систему уравнений объекта управления дополнительных дифференциальных уравнений (интеграторов в цепи управления). Этот подход к получению линейных эквивалентов нелинейных систем называют динамической линеаризацией в пространстве "вход-состояние" с помощью обратной связи. Он фактически сводит динамическую линеаризацию с помощью обратной связи к статической линеаризации в расширенном пространстве. При этом введение интегратора в один из каналов управления меняет свойства пространства, в котором ищется решение задачи статической линеаризации, что приводит к требованиям инволютивности более простых распределений, причём эти требования зависят от числа управлений, входящих в нелинейную математическую модель объекта управления [1, 11]. В связи с этим, в программное обеспечение бортовой информационно-управляющей системы, автоматизирующей процессы управления дизель-поездом, необходимо ввести новые программные компоненты, позволяющие уменьшить объём необходимых вычислений при определении управлений дизель-поездом.

Целью статьи является исследование возможностей программных компонент бортовой вычислительной системы при преобразовании

нелинейных систем к эквивалентным линейным и обоснование разработки новых программных компонент, расширяющих область применения ГТУ и минимизирующих объём необходимых вычислений при определении управлений нелинейными динамическими объектами с помощью ГТУ.

Раздел 1. Применение ГТУ при линеаризации полной математической модели объекта управления.

Пусть объект управления описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{aligned}\frac{dx_1}{dt} &= a_{11}x_2; \\ \frac{dx_2}{dt} &= a_{21}x_3x_5 + a_{22} + a_{23}x_2 + a_{24}x_2^2 + a_{25}x_1 + a_{26}x_1^2 + a_{27}x_1^3; \\ \frac{dx_3}{dt} &= a_{31}x_3 + a_{32}x_4; \\ \frac{dx_4}{dt} &= a_{41}x_4 + a_{42}x_3 + u_1; \\ \frac{dx_5}{dt} &= a_{51}x_2 + a_{52}\frac{x_6}{x_3}; \\ \frac{dx_6}{dt} &= a_{61}x_6 + a_{62}x_2x_3 + u_2,\end{aligned}\tag{1}$$

где $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_6)$ – вектор фазовых переменных исходного объекта; $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{62}$ – постоянные коэффициенты; u_1, u_2 – управления.

С системой объекта управления связаны следующие векторные поля:

$$X(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} g_1 = a_{11}x_2 \\ g_2 = a_{21}x_3x_5 + a_{22} + a_{23}x_2 + a_{24}x_2^2 + a_{25}x_1 + a_{26}x_1^2 + a_{27}x_1^3 \\ g_3 = a_{31}x_3 + a_{32}x_4 \\ g_4 = a_{41}x_4 + a_{42}x_3 \\ g_5 = a_{51}x_2 + a_{52}\frac{x_6}{x_3} \\ g_6 = a_{61}x_6 + a_{62}x_2x_3 \end{pmatrix},$$

$$Y_1 = |0, 0, 0, 1, 0, 0|^T, \quad Y_2 = |0, 0, 0, 0, 0, 1|^T.$$

Из вида системы уравнений (1) следует, что наибольший индекс управляемости для клеток Бруновского k_{max} должен быть не меньше четырёх. Поэтому для получения математической модели объекта управления в форме Бруновского необходимо выполнение условия инволютивности для распределений $M^j, j = \overline{0, k_{max} - 1}$.

Распределение $M^0 = \text{span}(Y_1, Y_2)$, где $\text{span}(Y_1, Y_2)$ – линейная оболочка векторов Y_1 и Y_2 , инволютивно в силу постоянства компонент рассматриваемых векторов.

Проверим теперь инволютивность распределения $M^1 = \text{span}\{Y_1, Y_2, L_X Y_1, L_X Y_2\}$, где $L_X Y_1, L_X Y_2$ – производные Ли соответствующих векторов вдоль векторного поля X :

$$L_X Y_1 = [X, Y_1] = \frac{\partial Y_1}{\partial x} X - \frac{\partial X}{\partial x} Y_1 = -\frac{\partial X}{\partial x} Y_1 =$$

$$= - \begin{vmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_6} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_2}{\partial x_6} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_6}{\partial x_1} & \frac{\partial g_6}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_6}{\partial x_6} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} =$$

$$= - \begin{vmatrix} 0 & a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{25} + 2a_{26}x_1 + 3a_{27}x_1^2 & a_{23} + 2a_{24}x_2 & a_{21}x_6 & 0 & 0 & a_{21}x_3 \\ 0 & 0 & a_{31} & a_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{42} & a_{41} & 0 & 0 \\ 0 & a_{51} & -(a_{52}x_6 / x_3^2) & 0 & 0 & a_{52} / x_3 \\ 0 & a_{62}x_3 & a_{62}x_2 & 0 & 0 & a_{61} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -a_{32} \\ -a_{41} \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}^T,$$

$$L_X Y_2 = [X, Y_2] = \frac{\partial Y_2}{\partial x} X - \frac{\partial X}{\partial x} Y_2 = -\frac{\partial X}{\partial x} Y_2 = \begin{vmatrix} 0 & -a_{21}x_3 & 0 & 0 & -\frac{a_{52}}{x_3} & -a_{61} \end{vmatrix}^T.$$

Для проверки инволютивности распределения M^1 необходимо вычислить скобки Ли $[L_X Y_1, L_X Y_2]$:

$$[L_X Y_1, L_X Y_2] = \frac{\partial L_X Y_2}{\partial x} L_X Y_1 - \frac{\partial L_X Y_1}{\partial x} L_X Y_2 =$$

$$= \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -a_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{52} / x_3^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ -a_{32} \\ -a_{41} \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ a_{31}a_{32} \\ 0 \\ 0 \\ -(a_{32}a_{52} / x_5^2) \\ 0 \end{vmatrix}$$

и сформировать матрицу распределения M^1 с дополнительным столбцом.

$$M^1 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -a_{21}x_3 & a_{21}a_{32} \\ 0 & 0 & -a_{32} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -a_{41} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{a_{52}}{x_3} & -\frac{a_{32}a_{52}}{x_5^2} \\ 0 & 1 & 0 & -a_{61} & 0 \end{vmatrix}.$$

Проверка инволютивности распределения M^1 показывает, что оно не является инволютивным. Вводим в систему уравнений объекта (1) дополнительное уравнение $\frac{dx_7}{dt} = v_2$, $u_2 = x_7$. В результате получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= a_{11}x_2; \\ \frac{dx_2}{dt} &= a_{21}x_3x_5 + a_{22} + a_{23}x_2 + a_{24}x_2^2 + a_{25}x_1 + a_{26}x_1^2 + a_{27}x_1^3; \\ \frac{dx_3}{dt} &= a_{31}x_3 + a_{32}x_4; \\ \frac{dx_4}{dt} &= a_{41}x_4 + a_{42}x_3 + v_1; \\ \frac{dx_5}{dt} &= a_{51}x_2 + a_{52} \frac{x_6}{x_3}; \\ \frac{dx_6}{dt} &= a_{61}x_6 + a_{62}x_2x_3 + x_7; \\ \frac{dx_7}{dt} &= v_2. \end{aligned} \tag{2}$$

где $v_1 = u_1$.

С системой уравнений (2) связаны следующие векторные поля:

$$X^*(x^*) = \begin{pmatrix} g_1 = a_{11}x_2 \\ g_2 = a_{21}x_3x_5 + a_{22} + a_{23}x_2 + a_{24}x_2^2 + a_{25}x_1 + a_{26}x_1^2 + a_{27}x_1^3 \\ g_3 = a_{31}x_3 + a_{32}x_4 \\ g_4 = a_{41}x_4 + a_{42}x_3 \\ g_5 = a_{51}x_2 + a_{52} \frac{x_6}{x_3} \\ g_6 = a_{61}x_6 + a_{62}x_2x_3 + x_7 \\ g_7 = 0 \end{pmatrix},$$

$$Y_1^* = |0, 0, 0, 1, 0, 0, 0|^T, \quad Y_2^* = |0, 0, 0, 0, 0, 0, 1|^T,$$

где $x^* = (x_1, x_2, \dots, x_7)$.

Проверки инволютивности распределений M^0 , M^1 показали, что они инволютивны. Инволютивны и распределения $M_{Y_1}^2 = \text{span}\{Y_1^*, L_{X^*}Y_1^*, L_{X^*}^2Y_1^*\}$, $M_{Y_2}^2 = \text{span}\{Y_2^*, L_{X^*}Y_2^*, L_{X^*}^2Y_2^*\}$, где Y_1^* , Y_2^* – векторы управлений для расширенной системы дифференциальных уравнений (2).

Из инволютивности распределений M_1^0 , M_1^1 , $M_{Y_1}^3$, $M_{Y_2}^3$ следует, что система уравнений (2) может быть преобразована к канонической форме Бруновского, которая имеет две клетки с индексами управляемости $k_1 = 4$ и $k_2 = 3$:

$$\begin{aligned} \frac{dz_i}{dt} &= z_{i+1}, \quad i=1, 2, 3, 5, 6; \\ \frac{dz_4}{dt} &= u_1^*, \quad \frac{dz_7}{dt} = u_2^*. \end{aligned} \quad (3)$$

Для системы уравнений (3), существуют преобразования: $z_1 = T_1(x) = T_1(x_1, x_2, \dots, x_7)$ и $z_5 = T_2(x) = T_2(x_1, x_2, \dots, x_7)$, с помощью которых, выполняя дифференцирование функций $T_1(x)$ и $T_2(x)$ вдоль векторного поля $X_1 = X^* + u_1^*Y_1^* + u_2^*Y_2^*$, несложно определить $z_2, z_3, \dots, z_7$:

$$\frac{dz_1}{dt} = z_2 = L_{X_1}T_1(x^*) = L_{X^*}T_1(x^*) + u_1^*L_{Y_1^*}T_1(x^*) + u_2^*L_{Y_2^*}T_1(x^*); \quad (4)$$

$$\frac{dz_2}{dt} = z_3 = L_{X_1}(L_{X^*} T_1(x^*)) = L_{X^*}^2(T_1(x^*)) + u_1^* L_{Y_1^*}(L_{X^*}(T_1(x^*))) + u_2^* L_{Y_2^*}(L_{X^*}(T_1(x^*))); \quad (5)$$

$$\frac{dz_3}{dt} = z_4 = L_{X_1}(L_{X^*}^2 T_1(x^*)) = L_{X^*}^3(T_1(x^*)) + u_1^* L_{Y_1^*}(L_{X^*}^2(T_1(x^*))) + u_2^* L_{Y_2^*}(L_{X^*}^2(T_1(x^*))); \quad (6)$$

$$\frac{dz_4}{dt} = u_1^* = L_{X_1}(L_{X^*}^3 T_1(x^*)) = L_{X^*}^4(T_1(x^*)) + u_1^* L_{Y_1^*}(L_{X^*}^3(T_1(x^*))) + u_2^* L_{Y_2^*}(L_{X^*}^3(T_1(x^*))); \quad (7)$$

$$\frac{dz_5}{dt} = z_6 = L_{X_1} T_2(x^*) = L_{X^*} T_2(x^*) + u_1^* L_{Y_1^*} T_2(x^*) + u_2^* L_{Y_2^*} T_2(x^*); \quad (8)$$

$$\frac{dz_6}{dt} = z_7 = L_{X_1}(L_{X^*} T_2(x^*)) = L_{X^*}^2(T_2(x^*)) + u_1^* L_{Y_1^*}(L_{X^*} T_2(x^*)) + u_2^* L_{Y_2^*}(L_{X^*} T_2(x^*)); \quad (9)$$

$$\frac{dz_7}{dt} = u_2^* = L_{X_1}(L_{X^*}^2 T_2(x^*)) = L_{X^*}^3(T_2(x^*)) + u_1^* L_{Y_1^*}(L_{X^*}^2(T_2(x^*))) + u_2^* L_{Y_2^*}(L_{X^*}^2(T_2(x^*))), \quad (10)$$

где $L_{X_1} T_k(x^*)$, $L_{X^*} T_k(x^*)$, $L_{Y_1^*} T_k(x^*)$, $L_{Y_2^*} T_k(x^*)$, $k = 1, 2$ – производные Ли функций $T_k(x^*)$ вдоль векторных полей X_1 , X^* , Y_1^* , Y_2^* ; L_G^m – кратные производные Ли вдоль векторного поля G ($G = X^*, Y_1^*, Y_2^*$), $m = 2, 3$.

Из системы уравнений в форме Бруновского (3) следует, что переменные z_1 , z_2 , z_3 , z_5 и z_6 не зависят от управлений u_1^* и u_2^* . Исходя из этого, следует что в выражениях (4) – (6), (8), (9) коэффициенты при управления u_1^* и u_2^* равны нулю:

$$\begin{aligned} L_{Y_1^*} T_1(x^*) &= L_{Y_2^*} T_1(x^*) = L_{Y_1^*}(L_{X^*} T_1(x^*)) = \\ &= L_{Y_2^*}(L_{X^*} T_1(x^*)) = L_{Y_1^*}(L_{X^*}^2 T_1(x^*)) = L_{Y_2^*}(L_{X^*}^2 T_1(x^*)) = 0; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} L_{Y_1^*} T_2(x^*) &= L_{Y_2^*} T_2(x^*) = L_{Y_1^*}(L_{X^*} T_2(x^*)) = \\ &= L_{Y_2^*}(L_{X^*} T_2(x^*)) = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

При этом, коэффициенты при управлениях u_1^* и u_2^* в уравнениях (7) и (10) не равны нулю:

$$L_{Y_1^*}(L_{X^*}^3 T_1(x^*)) = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x^*}, L_{X^*}^3 Y_1^* \right\rangle \neq 0; \quad (13)$$

$$L_{Y_2^*}(L_{X^*}^3 T_1(x^*)) = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x^*}, L_{X^*}^3 Y_2^* \right\rangle \neq 0;$$

$$L_{Y_1^*}(L_{X^*}^2 T_2(x^*)) = \left\langle \frac{\partial T_2}{\partial x^*}, L_{X^*}^2 Y_1^* \right\rangle \neq 0; \quad (14)$$

$$L_{Y_2^*}(L_{X^*}^2 T_2(x^*)) = \left\langle \frac{\partial T_2}{\partial x^*}, L_{X^*}^2 Y_2^* \right\rangle \neq 0.$$

Соотношения (11) – (14) в компактной форме описывают 10 дифференциальных уравнений в частных производных и четыре дифференциальных неравенства, с помощью которых можно определить функции преобразования $T_1(x^*)$ и $T_2(x^*)$. Эти функции в общем случае могут зависеть от семи компонент вектора $x^* = (x_1, x_2, \dots, x_7)$. Из первых двух дифференциальных уравнений имеем:

$$L_{Y_1^*} T_1(x^*) = \left\langle \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x^*}, Y_1^* \right\rangle = \sum_{i=1}^7 \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_i^*} y_{1i} = \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_1} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_2} \cdot 0 +$$

$$+ \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_3} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_4} \cdot 1 + \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_5} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_6} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_7} \cdot 0 = 0.$$

$$L_{Y_2^*} T_1(x^*) = \left\langle \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x^*}, Y_2^* \right\rangle = \sum_{i=1}^7 \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_i^*} \cdot y_{2i} = \sum_{i=1}^6 \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_i} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(x^*)}{\partial x_7} \cdot 1 = 0.$$

Отсюда следует, что функция $T_1(x^*)$ не зависит от аргументов x_4 и x_7 .

Для дальнейшего анализа функции $T_1(x^*)$ используют из соотношения (11) следующие четыре дифференциальных уравнения в частных производных, в которых используются производные Ли первого и второго порядка:

$$L_{Y_1^*}(L_{X^*} T_1(x^*)) = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x^*}, L_{X^*} Y_1^* \right\rangle = 0; \quad (15)$$

$$L_{Y_2^*}(L_{X^*} T_1(x^*)) = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x^*}, L_{X^*} Y_2^* \right\rangle = 0; \quad (16)$$

$$L_{Y_1^*}(L_{X^*}^2 T_1(x^*)) = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x^*}, L_{X^*}^2 Y_1^* \right\rangle = 0; \quad (17)$$

$$L_{Y_2^*}(L_{X^*}^2 T_1(x^*)) = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x^*}, L_{X^*}^2 Y_2^* \right\rangle = 0, \quad (18)$$

где

$$L_{X^*} Y_1^* = [X^*, Y_1^*] = \frac{\partial Y_1^*}{\partial x^*} X^* - \frac{\partial X^*}{\partial x^*} Y_1^* = -\frac{\partial X^*}{\partial x^*} Y_1^* =$$

$$= |0, 0, -a_{32}, a_{41}, 0, 0, 0|^T;$$

$$L_{X^*} Y_2^* = [X^*, Y_2^*] = -\frac{\partial X^*}{\partial x^*} Y_2^* = |0, 0, 0, 0, 0, -1, 0|^T.$$

Теперь можно вычислить $L_{X^*}^2 Y_1^*$ и $L_{X^*}^2 Y_2^*$:

$$L_{X^*}^2 Y_1^* = [X^*, L_{X^*} Y_1^*] = \frac{\partial L_{X^*} Y_1^*}{\partial x} X^* - \frac{\partial X^*}{\partial x} L_{X^*} Y_1^* = -\frac{\partial X^*}{\partial x} L_{X^*} Y_1^* =$$

$$= - \begin{vmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_7} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_2}{\partial x_7} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial g_7}{\partial x_1} & \frac{\partial g_7}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_7}{\partial x_7} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ -a_{32} \\ -a_{41} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} =$$

$$= - \begin{vmatrix} 0 & a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{25} + 2a_{26}x_1 + 3a_{27}x_1^2 & a_{23} + 2a_{24}x_2 & a_{21}x_5 & 0 & a_{21}x_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{31} & a_{32} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{42} & a_{41} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{51} & -a_{52} \frac{x_6}{x_3^2} & 0 & 0 & \frac{a_{52}}{x_3} & 0 \\ 0 & a_{62}x_3 & a_{62}x_2 & 0 & 0 & a_{61} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ -a_{32} \\ -a_{41} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} =$$

$$= - \left| 0, a_{21}x_5a_{32}, -(a_{31}a_{32} + a_{32}a_{41}), -(a_{32}a_{42} + a_{41}^2), (a_{32}a_{52} \frac{x_6}{x_3^2}), -(a_{32}a_{62}x_2), 0 \right|^T.$$

Аналогичным образом вычисляется $L_{X^*}^2 Y_2^*$:

$$L_{X^*}^2 Y_2^* = [X, L_{X^*} Y_2^*] = \frac{\partial L_{X^*} Y_2^*}{\partial \mathbf{x}} X - \frac{\partial X}{\partial \mathbf{x}} L_{X^*} Y_2^* = \left| 0, 0, 0, 0, \frac{a_{52}}{x_3}, a_{61}, 0 \right|^T.$$

Далее, становится возможным вычислить $L_{X^*}^3 Y_1^*$ и $L_{X^*}^3 Y_2^*$. Поскольку эти выражения громоздки, то мы их не приводим.

Из соотношения (5) $L_{Y_1^*}(L_{X^*} T_1(\mathbf{x}^*)) = 0$ имеем:

$$\begin{aligned} L_{Y_1^*}(L_{X^*} T_1(\mathbf{x}^*)) &= \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial \mathbf{x}^*}, L_{X^*} Y_1^* \right\rangle = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial \mathbf{x}^*}, \left| 0 \ 0 \ -a_{32} \ -a_{42} \ 0 \ 0 \ 0 \right| \right\rangle = \\ &= \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_3} (-a_{32}) + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_4} (-a_{41}) = 0. \end{aligned}$$

Поскольку $T_1(\mathbf{x}^*)$ не зависит от x_4 , то оно не зависит и от x_3 .

Теперь используем из соотношений (5) и (11) равенство $L_{Y_2^*}(L_{X^*}^2 T_1(\mathbf{x}^*)) = 0$:

$$\begin{aligned} L_{Y_2^*}(L_{X^*}^2 T_1(\mathbf{x}^*)) &= \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial \mathbf{x}^*}, L_{X^*}^2 Y_2^* \right\rangle = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial \mathbf{x}^*}, \left| 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \right| \right\rangle = \\ &= \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 6}}^7 \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_6} (-1) = 0. \end{aligned}$$

Отсюда следует, что $T_1(\mathbf{x}^*)$ не зависит и от x_6 (а также и от x_3, x_4, x_7).

Далее, используем последние два соотношения (11). В первую очередь берём более простое:

$$\begin{aligned} L_{Y_2^*}(L_{X^*}^2 T_1(\mathbf{x}^*)) &= \left\langle \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^*}, L_{X^*}^2 Y_2^* \right\rangle = \\ &= \left\langle \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^*}, \left| 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \frac{a_{52}}{x_3} \ a_{61} \ 0 \right| \right\rangle = \\ &= \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_1} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_2} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_5} \cdot \frac{a_{52}}{x_3} = 0. \end{aligned}$$

Отсюда следует, что $T_1(\mathbf{x})$ не зависит от x_5 . Рассмотрим следующее соотношение:

$$L_{Y_1^*}(L_{X^*}^2 T_1(\mathbf{x}^*)) = 0 = \left\langle \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^*}, L_{X^*}^2 Y_1^* \right\rangle.$$

Поскольку $T_1(\mathbf{x})$ может зависеть только от x_1 и x_2 , а первая компонента производной $L_{X^*}^2 Y_1^*$ нулевая, то $T_1(\mathbf{x})$ не зависит от x_2 , то есть $T_1(\mathbf{x}^*) \equiv T_1(x_1)$.

Непосредственная проверка неравенств (13) с помощью производных Ли $L_{X^*}^3 Y_1^*$ и $L_{X^*}^3 Y_2^*$ показывает, что неравенства выполняются.

Зная, что $T_1(\mathbf{x}^*) = z_1$ и зависит от x_1 можно предположить, что $z_1 = x_1$. При этом выполняются все соотношения (11) и (13). Из равенства $z_1 = x_1$ и соотношений (4) – (6) несложно получить соотношения, связывающие переменные z_2 , z_3 , z_4 линейной модели и переменные модели (2):

$$z_1 = x_1;$$

$$z_2 = a_{11}x_2;$$

$$z_3 = a_{11}(a_{27}x_1^3 + a_{26}x_1^2 + a_{25}x_1 + a_{24}x_2^2 + a_{23}x_2 + a_{22} + a_{21}x_3x_6);$$

$$z_4 = a_{11}^2x_2(3a_{27}x_1^2 + 2a_{26}x_1 + a_{25}) + a_{11}(a_{23} + 2a_{24}x_2) \cdot (a_{27}x_1^3 + a_{26}x_1^2 + a_{25}x_1 + a_{24}x_2^2 + a_{23}x_2 + a_{22} + a_{21}x_3x_6) + a_{11}a_{21}x_3(x_7 + a_{61}x_6 + a_{62}x_2x_3) + a_{11}a_{21}x_6(a_{31}x_3 + a_{32}x_4).$$

Аналогичным образом определяется функция $T_2(\mathbf{x}^*)$ и соотношения, связывающие переменные z_5 , z_6 и z_7 линейной модели в форме Бруновского с переменными модели (2). Только при определении функции $T_2(\mathbf{x}^*)$ вместо соотношений (4) – (7) и (12), (13), которые применялись при определении функции преобразования $T_1(\mathbf{x}^*)$, используются выражения (8) – (10), (12) и (14).

Для проверки адекватности линейной модели объекта управления в форме Бруновского, сравнивались результаты моделирования объекта в различных его режимах работы, полученные с помощью исходной

модели (1) и линейной модели. Во всех экспериментах результаты моделирования с помощью двух различных моделей совпадали. В качестве примера на рис. 1 приведены кривые изменения скорости дизель-поезда при его разгоне до скорости 60 км/час, на ровном участке пути, Цифрой 1 на рис.1 обозначены результаты моделирования с помощью модели (1), а цифрой 2 – с помощью линейной модели в форме Бруновского. Результаты моделирования подтверждают эквивалентности полученной линейной модели в форме Бруновского исходной модели (1) объекта управления.

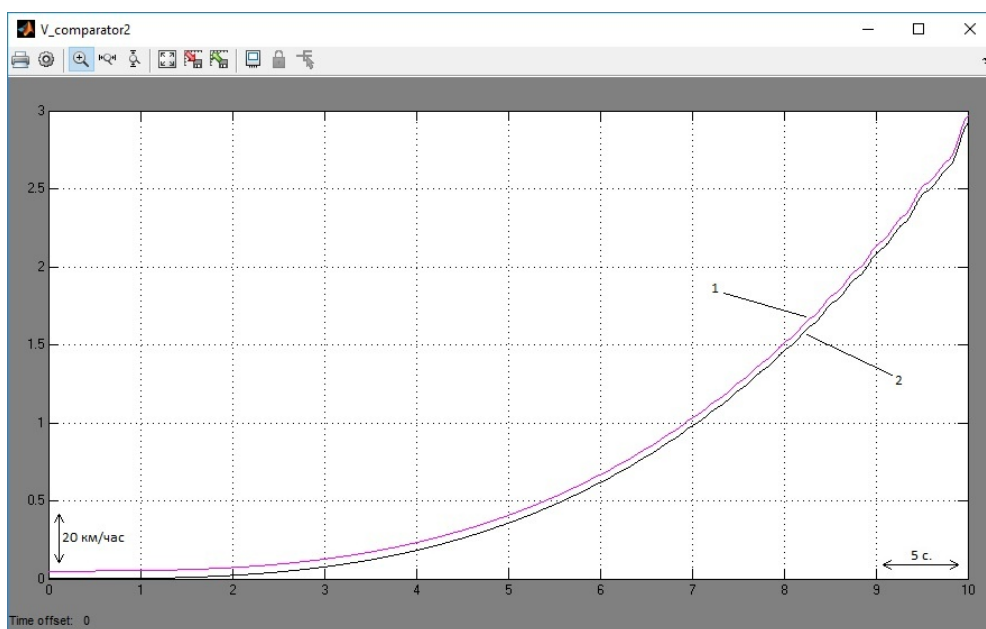


Рис. 1. Кривые изменения скорости дизель-поезда при его разгоне до 60 км/час. Кривая 1, получена с помощью исходной модели (1), а кривая 2 получена с помощью эквивалентной линейной модели в форме Бруновского. Поскольку кривые 1 и 2 совпадают и на рисунке они были бы неотличимы, то они искусственно сдвинуты по вертикали друг относительно друга.

Таким образом, приведённые расчёты, связанные с получением эквивалентной линейной модели в форме Бруновского, показывают, что увеличение минимального числа одночленов в правых частях почти всех уравнений исходного объекта до двух-трёх (вместо одного-двух) не сказывается на работоспособности ГТУ при получении эквивалентных линейных моделей в форме Бруновского. Разработанные программные компоненты позволяют не только расширить область применения ГТУ на

объекты, содержащие десятки уравнений, но и расширить ограничения, накладываемых на число одночленов в правых частях этих уравнений.

Раздел 2. Исследование по применению ГТУ к части уравнений объектов управления.

Применение ГТУ с целью приведения к форме Бруновского только части уравнений объекта управления может существенно уменьшить объём необходимых вычислений. Покажем это на примере объекта (1). Первое уравнение в системе (1) является линейным и соответствует форме Бруновского, поэтому исключим его из процесса линеаризации. С объектом линеаризации будут связаны следующие векторные поля:

$$X^1(x^1) = \begin{pmatrix} f_2 = a_{21}x_3x_5 + a_{22} + a_{23}x_2 + a_{24}x_2^2 + a_{25}x_1 + a_{26}x_1^2 + a_{27}x_1^3 \\ f_3 = a_{31}x_3 + a_{32}x_4 \\ f_4 = a_{41}x_4 + a_{42}x_3 \\ f_5 = a_{51}x_2 + a_{52} \frac{x_6}{x_3} \\ f_6 = a_{61}x_6 + a_{62}x_2x_3 \end{pmatrix},$$

$$Y_1^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad Y_2^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T,$$

где $x^1 = (x_2, x_3, \dots, x_6)$.

Определяем возможность преобразования указанной нелинейной системы уравнений с полями X^1 , Y_1^1 , Y_2^1 к линейной форме Бруновского. Для этого необходимо, чтобы последовательность распределений M^0 , M^1 и M^2 была инволютивна. Поскольку векторные поля Y_1^1 и Y_2^1 постоянны, то распределение $M^0 = \text{span}(Y_1^1, Y_2^1)$ инволютивно. Условие инволютивности распределения M^1 не выполняется. Поэтому, необходимо вводить интегратор, введём его во второй канал, связанный с управлением $u_2 : u_2 = x_7$, $\frac{dx_7}{dt} = u_2^*$. В результате получим следующую систему уравнений:

$$\frac{dx_2}{dt} = a_{21}x_3x_5 + a_{22} + a_{23}x_2 + a_{24}x_2^2 + a_{25}x_1 + a_{26}x_1^2 + a_{27}x_1^3;$$

$$\frac{dx_3}{dt} = a_{31}x_3 + a_{32}x_4;$$

$$\frac{dx_4}{dt} = a_{41}x_4 + a_{42}x_3 + u_1^*;$$

$$\frac{dx_5}{dt} = a_{51}x_2 + a_{52} \frac{x_6}{x_3};$$

$$\frac{dx_6}{dt} = a_{61}x_6 + a_{62}x_2x_3 + x_7;$$

$$\frac{dx_7}{dt} = u_2^*,$$

где $u_1^* = u_1$.

С расширенной системой уравнений связаны векторные поля:

$$X_1^1 = \begin{pmatrix} f_2 = a_{21}x_3x_5 + a_{22} + a_{23}x_2 + a_{24}x_2^2 + a_{25}x_1 + a_{26}x_1^2 + a_{27}x_1^3 \\ f_3 = a_{31}x_3 + a_{32}x_4 \\ f_4 = a_{41}x_4 + a_{42}x_3 \\ f_5 = a_{51}x_2 + a_{52} \frac{x_6}{x_3} \\ f_6 = a_{61}x_6 + a_{62}x_2x_3 + x_7 \\ f_7 = 0 \end{pmatrix},$$

$$Y_1^{I*} = |0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0|^T, \ Y_2^{I*} = |0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1|^T.$$

Для расширенной модели объекта управления распределение M^0 инволютивно, а для определения инволютивности распределения M^1 необходимо вычислить производные Ли: $L_{X_1^1}Y_1^{1*}$, $L_{X_1^1}Y_2^{1*}$:

$$L_{X_1^1}Y_1^{1*} = [X_1^1, Y_1^{1*}] = \frac{\partial Y_1^{1*}}{\partial x} X_1^1 - \frac{\partial X_1^1}{\partial x} Y_1^{1*} = -\frac{\partial X_1^1}{\partial x} Y_1^{1*} =$$

$$= - \begin{vmatrix} a_{25} + 2a_{24}x_2 & a_{21}x_5 & 0 & 0 & a_{31}x_3 & 0 \\ 0 & a_{31} & a_{32} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{42} & a_{41} & 0 & 0 & 0 \\ a_{51} & -\frac{a_{52}x_6}{x_3} & 0 & 0 & \frac{a_{52}}{x_3} & 0 \\ a_{62}x_3 & a_{62}x_2 & 0 & 0 & a_{61} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ -a_{32} \\ -a_{41} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix};$$

$$L_{x'_i} Y_2^{1*} = [X_1^1, Y_2^{1*}] = \frac{\partial Y_2^{1*}}{\partial x} X_1^1 - \frac{\partial X_1^1}{\partial x} Y_2^{1*} = -|0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0|^T.$$

Поскольку все компоненты распределения M^1 постоянны, то оно инволютивно.

Проверка распределения M^2 на инволютивность, показывает, что оно инволютивно.

Из инволютивности вышеуказанных распределений следует, что система уравнений рассматриваемого объекта может быть приведена к канонической форме Бруновского, которая имеет две клетки с индексами управляемости $k_1 = k_2 = 3$:

$$\begin{aligned} \frac{dq_k}{dt} &= q_{k+1}, \quad k = 2, 3, 5, 6; \\ \frac{dq_4}{dt} &= u_1^*, \quad \frac{dq_7}{dt} = u_2^*. \end{aligned} \quad (19)$$

Для этой системы уравнений в форме Бруновского существуют функции преобразования $T_1^* = (x_2, x_3, \dots, x_7)$ и $T_2^* = (x_2, x_3, \dots, x_7)$, с помощью которых по аналогии с первым разделом статьи несложно определить связь между переменными исходной нелинейной модели и эквивалентной модели в форме Бруновского. Метод определения этих функций преобразования описан выше для линейной модели (3) и объекта управления (2). Поскольку в рассматриваемом случае получены две клетки Бруновского с индексами управляемости, равными трём, то объём вычислений в этом случае существенно меньше, поскольку нет необходимости определять инволютивность распределения M^3 , вычислять производные Ли третьего порядка и решать систему уравнений в частных производных более высокого порядка. Это позволяет сделать вывод, что применение ГТУ с целью приведения к форме Бруновского только части уравнений объекта управления может существенно уменьшить объём необходимых вычислений при получении эквивалентной линейной модели. В связи с этим в программное

обеспечение бортовой вычислительной системы, обеспечивающее диалоговый режим работы необходимо включить программные компоненты, позволяющие выделять из полных моделей объекта его части, к которым возможно применение геометрической теории управления.

Выводы. Проведенные исследования, связанные с получением линейных моделей в форме Бруновского эквивалентных нелинейным моделям, показали, что существующие программные компоненты бортовой вычислительной системы позволяют не только расширить область применения ГТУ на объекты управления, описываемые десятками обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, но и ослабить ограничения, накладываемые на число одночленов в правых частях этих уравнений.

Исследование возможностей применения ГТУ только для части уравнений, описывающих нелинейный объект управления, показало, что такой подход может существенно уменьшить объем вычислений при поиске эквивалентных линейных моделей в форме Бруновского. Кроме того, такой подход расширяет и область применения ГТУ на объекты, преобразования математических моделей которых к нелинейной форме невозможно или трудоёмко. В связи с этим, в программное обеспечение бортовой вычислительной системы, обеспечивающее диалоговый режим работы, необходимо включить программные компоненты, обеспечивающие выделение из полных моделей подсистем дифференциальных уравнений, к которым эффективно применение средств ГТУ.

Список литературы:

1. Краснощёченко В.Н. Нелинейные системы: геометрический метод анализа и синтеза / В.И. Краснощёченко, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2005. – 520 с.
2. Kim D.P. Automatic Control. Theory Nonlinear and Multivariable System / D.P. Kim. – Seal: Harnol, 2000. – 558 p.
3. Дмитриенко В.Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. – Харьков: НТМТ, 2013. – 248 с.
4. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 2 Многомерные нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учебное пособие / Д.П. Ким. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 464 с.
5. Дмитриенко В.Д. Преобразование нелинейных систем управления к эквивалентным линейным в канонической форме Бруновского / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Электротехнические системы и комплексы. – Магнитогорск: МГТУ, 2014. – № 4 (25). – С. 8 – 14.
6. Аграчев, А.А. Геометрическая теория управления / А.А. Аграчев. – М.: Физматлит, 2005. – 392 с.

7. Блох А.М. Введение в аспекты теории геометрического управления / Механика и управление. Междисциплинарная прикладная математика, том 24. Спрингер, Нью Йорк, 2015. – С. 199-233.
8. Сачков Ю. Геометрическая теория управления / Ю. Сачков. – М.: СИНТЕГ, 2013. – 394 с.
9. Зоефельд, Джефффри А., Теория геометрического управления: нелинейная динамика и приложения. Университет штата Сан-Хосе, 2016. – 150 с.
10. Дмитриенко В.Д. Линеаризация математической модели, описывающей процессы управления подвижным составом, методами дифференциальной геометрии / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, Д.М. Главчев // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2017. – Вип. 21 (1243). – С. 38-53.
11. Заковоротный А. Ю. Синтез автоматизированной системы управления подвижным составом на основе геометрической теории управления и нейронных сетей: дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.13.07 / Александр Юрьевич Заковоротный; Нац. техн. ун-т "Харьков. политехн. ин-т". – Харьков, 2017. – 433 с.

References:

1. Krasnoshechenko, V.N., and Krishenko, A.P. (2005), *Nonlinear systems: geometrical method of analysis and synthesis*, Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, 520 p.
2. Kim, D.P. (2000), *Automatic Control. Theory Nonlinear and Multivariable System*, Harnol, Seal: 558 p.
3. Dmitrienko, V.D., and Zakovorotny, A.Y. (2013), *Modelling and optimization of management processes of diesel trains*, HTMT, Kharkiv, 248 p.
4. Kim, D.P. (2004), *Theory of automatic control. T. 2 Multidimensional nonlinear, optimal and adaptive systems*, FYSMATLIT, Moscow, 464 p.
5. Dmitrienko, V.D., and Zakovorotny, A.Y. (2014), "Converting the nonlinear control systems equivalent to the linear canonical Brunovsky form", *Electrical systems and complexes*, MSTU, Magnitogorsk; No 4 (25), pp. 8-14.
6. Agrachev, A.A. (2005), *Geometric control theory*. Agrachev, Fizmatlit, Moscow, 392 p.
7. Bloch, A.M. (2015) "An Introduction to Aspects of Geometric Control Theory", *Nonholonomic Mechanics and Control. Interdisciplinary Applied Mathematics*", Vol 24. Springer, New York, pp. 199-233.
8. Sachkov, Y. (2013), *Geometric control theory*, SYNTEG, Moscow, 394 p.
9. Zoehfeld, Geoffrey, A. (2016), *Geometric Control Theory: Nonlinear Dynamics and Applications*, University of San Jose, Master's Theses, 150 p.
10. Dmitrienko, V.D., Zakovorotny, A.Yu., and Glavchev D.M. (2017), "Linearization of a mathematical model describing the processes of control of a rolling stock, methods of differential geometry", *Herald of NTU "KhPI"*, NTU "KhPI", Kharkiv, No. 21 (1243), pp. 38-53.
11. Zakovorotny, A.Y. (2017), Synthesis of an automated control system for rolling stock on the basis of geometric control theory and neural networks [Electronic resource]: dis. ... Dr. techn. Sciences: spec. 05.13.07, Alexander Yuryevich Zakovorotny; NTU "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, 433 p.

Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПІ" Серков А.А.

Поступила (received) 29.04.2018

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

Zakovorotniy Alexandr, Dr. Tech. Sci., Docent
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (097) 967-32-71, e-mail: arcade@i.ua
ORCID ID: 0000-0003-4415-838X

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

Dmytro Hlavchev, master
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel: +380993049807, e-mail: dmitriyglavchev@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-4248-4819

УДК 861.5.015.2

Дослідження можливостей програмних компонент бортової обчислювальної системи при перетворенні нелінійних систем до еквівалентних лінійних / Дмитрієнко В.Д., Заковоротний О.Ю., Мезенцев Н.В., Главчев Д.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 80 – 98.

Досліджуються можливості розширення області застосування геометричної теорії керування (ГТК). Показано, що застосування ГТК тільки для частини каналів управління об'єктом або для частини рівнянь, що описують об'єкт, може істотно зменшити обсяг обчислень при пошуку еквівалентних лінійних моделей в формі Бруновського для нелінійних афінних систем з векторним керуванням в просторі "вхід-стан". Ил.: 1. Бібліогр. : 11 назв.

Ключові слова: геометрична теорія керування; еквівалентні лінійні моделі; форма Бруновського; простір "вхід-стан".

УДК 861.5.015.2

Исследование возможностей программных компонент бортовой вычислительной системы при преобразовании нелинейных систем к эквивалентным линейным / Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю., Мезенцев Н.В., Главчев Д.М. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 80 – 98.

Исследуются возможности расширения области применения геометрической теории управления (ГТУ). Показано, что применение ГТУ только для части уравнений, описывающих объект, может существенно уменьшить объём вычислений при поиске эквивалентных линейных моделей в форме Бруновского для нелинейных аффинных систем с векторным управлением в пространстве "вход-состояние". Ил.: 1. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: геометрическая теория управления; эквивалентные линейные модели; форма Бруновского; пространство "вход-состояние".

UDK 861.5.015.2

Investigation of the capabilities of software components of an on-board computer system in the transformation of nonlinear systems to equivalent linear / Dmitrienko V.D., Zakovorotny A.Y., Mezentsev N.V., Hlavchev D.M. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modeling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – № 24 (1300). – P. 80 – 98.

The possibilities of expanding the scope of the geometric control theory (GCT) are being investigated. The article shows that the use of GCT only for part of the control channels of the object or for part of the equations describing the object can significantly reduce the amount of computation when searching for equivalent linear models in the form of Brunovsky for nonlinear affine systems with vector control in the input-state space. Figs.: 1. Refs.: 11 titles.

Keywords: geometric control theory; equivalent linear models; the form of Brunovsky; space "input-state".

*Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології*

УДК 004.82:322(075):621.311.004 DOI: 10.20998/2411-0558.2018.24.09

А. А. АЗАРЯН, д-р техн. наук, проф., ДВНЗ "КНУ", Кривий Ріг,
І. А. КОТОВ, канд. техн. наук, проф., ДВНЗ "КНУ", Кривий Ріг

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕЗАУРУСА ПРОФЕСІЙНОЇ ЛЕКСИКИ В ОНТОЛОГІЯХ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ РІШЕНЬ ДЛЯ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Розглянуті основні типи тезаурусів і сфери їх застосування в системах професійних онтологій. Досліджені формальні моделі синтезу онтологій професійних областей, в тому числі, професійної галузі керування режимами енергосистем. Детально досліджена проблема інтегрованого подання знань в експертних системах підтримки рішень оперативного диспетчерського персоналу енергосистем. Поставлено завдання розробки и застосування методів оцінки ефективності тезауруса професійної лексики уніфікованої онтології подання знань. Результатами роботи є дослідження статистичних залежностей ефективності тезауруса професійної лексики від об'єму вибірки і ступеня її спеціалізованості, формальна система подання професійного тезауруса висловлювань галузі управління режимами енергооб'єктів. Іл.: 2. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: онтологія; тезаурус; лексика; висловлювання; енергосистема; керування; експертна система; диспетчерський персонал.

Постановка проблеми. В даний час оперативне керування складними технічними комплексами в режимі реального часу протікання технологічних процесів набуває особливої актуальності. Виникнення аварійних ситуацій значно ускладнює завдання оперативного управління. Особа, яка приймає управлінські рішення, не в змозі адекватно реагувати на розвиток нештатної ситуації через психофізіологічні обмеження і емоційне перевантаження внаслідок суттєвої відповідальності. Отже, проблема оперативного керування таким складним об'єктом як енергосистема, повинна бути розв'язана шляхом автоматизації засобів інтелектуальної підтримки рішень диспетчерського персоналу. Таким засобом автоматизації управління є спеціалізовані експертні системи підтримки рішень. Останні повинні інтегруватися в оперативні інформаційно-керуючі комплекси автоматизованої системи диспетчерського управління енергосистеми – SCADA. Центральною ланкою будь-яких інтелектуальних систем є бази знань і, разом з ними, моделі подання та обчислення професійної лексики. Уніфікованої моделлю подання професійних знань може служити онтологія, побудована на базі професійного тезауруса. Ефективність роботи системи підтримки рішень в значній мірі залежить від ефективності використання професійного тезауруса. Таким чином, завдання оцінки ефективності тезауруса професійної лексики в онтологіях системи підтримки рішень

для керування режимами енергосистем є актуальним.

Аналіз літератури. У науковій області теоретичного і практичного створення експертних систем, в тому числі, систем підтримки рішень працюють вітчизняні та зарубіжні вчені. Перш за все, слід відзначити роботи Башликова А.А., Вагіна В.Н., Венделіна А.Г., Геловані В.А., Евланова Л.Г., Заде Л.А., Крєтова В.С., Ларичева О.І., Любарського Ю.Я., Лорьєра Ж.Л., Люгєра Дж.Ф., Поспєлова Д.А., Саати Т., Самойлова В.Д., Таунсенда К., Терелянського П.В., Ульмана Дж., Уотермена Д., Фішберна П.К., Форсайта Ф., Чаплінського Ю.П. та багато інших. Окремо необхідно відзначити наукові результати в галузі інтелектуалізації управління режимами електроенергетичних систем – роботи Баркалова С.А., Баркан Я.Д., Бартоломея П.І., Башликова А.А., Бердникова Р. Н., Буткевича А.Ф., Глазунової А.М., Гришанова С.О., Любарського Ю. Я., Місріханова М.Ш., Панасецкого Д.А., Поспєлова Г.Є., Чебана В.М. та інших [1 – 7].

Проведений аналіз досліджень і публікацій показує актуальність і великий інтерес до проблеми побудови та використання баз знань при побудові АСДУ енергосистем. З іншого боку, стає очевидною відсутність єдиних підходів до вирішення даної проблеми. У роботі пропонується рішення на основі об'єднання (уніфікації) онтологій професійних знань і проводиться оцінка їх ефективності.

Мета статті – розробка математичної моделі професійного тезауруса і оцінка його ефективності в рамках загальної моделі онтології.

Багато існуючих технічних рішень по використанню різних форм подання знань представляють науковий інтерес, однак, не відрізняються значною ефективністю. Додаткові обмеження на використання тих чи інших форм подання знань вносять специфічні професійні області. Аналіз показав, що сьогодні не існує єдиної методології подання і використання знань в системах підтримки рішень [8]. На основі проведених досліджень було поставлено завдання розробки і впровадження в структуру підсистем SCADA енергосистем узагальнюючих інкорпорованих моделей подання професійних знань, реалізованих через формалізми онтологій [9, 10]. Природно, що при цьому виникає супутнє завдання оцінки ефективності використання професійного тезауруса.

Оцінка ефективності професійного тезауруса. Визначимо систему атомарних висловлювань та їх властивості як множину першого шару системи інкорпорації знань [8, 11, 12].

Задаємо безліч символів загальної лексики.

Множина цифр: $A_d = \{0, 1, \dots, 9\}$.

Множина символів спеціальної професійної лексики – спеціальні знаки: $A_p = \{\text{†}, \text{⊗}, \text{⌢}, \text{♠}, \text{⌘}, \text{⦶}, \text{⚡}, \text{⚓}, \frac{\text{ }}{\text{w4}}, \text{⊕}, \text{⏞}, \text{⊛}\} \cup \{\square_p\}$, де $\{\square_p\}$ – множина інших символів спеціальної професійної лексики.

Множина символів абревіатур професійної області: $A_{ab} = \{\text{ABP}$ (Автоматичне включення резервного живлення і обладнання), АЛАР (Автоматика ліквідації асинхронного режиму), АПВ (Автоматичне повторне включення), АПНУ (Автоматика запобігання порушенню стійкості), АСКОЕ (Автоматизована система комерційного обліку електроенергії), АЧР (Автоматична частотна розвантаження), ВЛ (повітряна лінія), КВП (Контрольно-вимірювальні прилади і автоматика), ТСН (трансформатор власних потреб), ПРВВ (пристрій резервування відмови вимикача) $\} \cup \{\square_{ab}\}$, де $\{\square_{ab}\}$ – множина інших символів абревіатур професійної області.

$$A_N = \{\text{буква, символ, знак, цифра, число, слово, лексема, висловлювання}\}.$$

102

$$S^{c_i} = S_1^{c_i} \cup S_2^{c_i} \cup \dots \cup S_m^{c_i} \cup \dots \cup S_{n_g}^{c_i} = \bigcup_{m=1}^{n_g} S_m^{c_i}, \quad (1)$$

$$S_1^{c_i} \cap S_2^{c_i} \cap \dots \cap S_m^{c_i} \cap \dots \cap S_{n_g}^{c_i} = \bigcap_{m=1}^{n_g} S_m^{c_i} = \emptyset, \quad (2)$$

$$\forall S_m^{c_i} (S_m^{c_i} \subseteq S^{c_i}), \quad (3)$$

$$\forall S_p^{c_i} \forall S_q^{c_i} (S_p^{c_i} \neq S_q^{c_i}), \quad (4)$$

де $c_i \in C$, $i = \overline{1, n_c}$, C – множина контекстів; n_c – кількість контекстів; n_g – кількість висловлювань, які відносяться до контексту c_i .

Синтаксис атомарних висловлювань:

$\langle \text{вислів} \rangle ::= \langle \text{лексема} \rangle \mid \langle \text{вислів} \rangle \langle \text{лексема} \rangle$;
 $\langle \text{лексема} \rangle ::= \langle \text{число} \rangle \mid \langle \text{слово} \rangle$;
 $\langle \text{число} \rangle ::= \langle \text{число} \rangle \mid \langle + \rangle \langle \text{число} \rangle \mid \langle - \rangle \langle \text{число} \rangle$;
 $\langle \text{число} \rangle ::= \langle \text{цифра} \rangle \mid \langle \text{число} \rangle \langle \text{цифра} \rangle \mid \langle . \rangle \langle \text{число} \rangle$;
 $\langle \text{цифра} \rangle ::= 0 \mid 1 \mid 2 \mid 3 \mid 4 \mid 5 \mid 6 \mid 7 \mid 8 \mid 9$;
 $\langle \text{слово} \rangle ::= \langle \text{буква} \rangle \mid \langle \text{символ} \rangle \mid \langle \text{знак} \rangle \mid \langle \text{слово} \rangle \langle \text{буква} \rangle$,

де $\forall \langle \text{буква} \rangle (\langle \text{буква} \rangle \in A_l)$;

$\forall \langle \text{символ} \rangle (\langle \text{символ} \rangle \in A_s)$;

$\forall \langle \text{знак} \rangle (\langle \text{знак} \rangle \in (A_p) \vee \langle \text{знак} \rangle \in (A_{sl}) \vee \langle \text{знак} \rangle \in (A_{ab}))$.

Всі висловлювання атомарні і не пов'язані один з одним. Тому вони не утворюють графової структури [13, 14] –

$$\forall s_k^{c_i}, k = \overline{1, n_s} (\bigvee_{k=1}^{n_s} s_k^{c_i} \in S_m^{c_i}). \quad (5)$$

Тоді мова атомарних висловлювань для предметної області і деякого m -го класу контексту визначиться в такий спосіб

$$L(G)^{c_i} = \langle \Sigma, N, P, S \rangle, \quad (6)$$

де G – формальна граматика;

Σ – основний кінцевий термінальний алфавіт;

N – допоміжний кінцевий нетермінальний алфавіт;

P – правила підстановки (продукції) формальної граматики:

$$\exists a, \exists b, (a, b) \in P : a \rightarrow b ;$$

S – стартовий нетермінальний символ граматики G ;

$$N \cap \Sigma = \emptyset \text{ и } P \subset ((N \cup \Sigma)^+ \times (N \cup \Sigma)^*).$$

Визначимо правила формальної граматики – P з урахуванням 8 нетерміналів в формальній мові $L(G)^{c_i}$:

$S \rightarrow \langle \text{лексема} \rangle$
 $S \rightarrow \langle \text{лексема} \rangle \langle \text{вислів} \rangle$
 $\langle \text{лексема} \rangle \rightarrow \langle \text{число} \rangle$
 $\langle \text{лексема} \rangle \rightarrow \langle \text{слово} \rangle$
 $\langle \text{число} \rangle \rightarrow \langle + \rangle \langle \text{число} \rangle$
 $\langle \text{число} \rangle \rightarrow \langle - \rangle \langle \text{число} \rangle$
 $\langle \text{число} \rangle \rightarrow \langle \text{цифра} \rangle$
 $\langle \text{число} \rangle \rightarrow \langle \text{число} \rangle \langle \text{цифра} \rangle$
 $\langle \text{слово} \rangle \rightarrow \langle \text{буква} \rangle$
 $\langle \text{слово} \rangle \rightarrow \langle \text{слово} \rangle \langle \text{буква} \rangle$
 $\langle \text{слово} \rangle \rightarrow \langle \text{символ} \rangle$
 $\langle \text{слово} \rangle \rightarrow \langle \text{слово} \rangle \langle \text{символ} \rangle$
 $\langle \text{слово} \rangle \rightarrow \langle \text{знак} \rangle$
 $\langle \text{слово} \rangle \rightarrow \langle \text{слово} \rangle \langle \text{знак} \rangle$

Модель професійної онтології для шару бази знань атомарних висловлювань – тезауруса професійної лексики визначиться трійкою:

$$O = \langle X, R, F \rangle. \quad (7)$$

Визначимо складові кортежу

$$X^{c_0} = S^{c_0} = \{s_k^{c_0} \mid k = \overline{1, n_s}\}$$

або

$$X^{c_0} = \{s_k^{c_0} \mid k = \overline{1, n_s}\},$$

де c_0 – один певний (будь-який) контекст, до якого відносяться висловлювання, які беруть участь у виразах. Так як розглядається приклад єдиного контексту для всіх висловлювань, він далі не вказується.

Так як для даного шару відносини між висловлюваннями відсутні (тобто – висловлювання використовуються ізольовано один від одного), то $R = \emptyset$.

Визначимо множину функцій інтерпретації F :

$$S = \{\{S_1\}, \{S_2\}\}, \quad (8)$$

де $S_1 \cup S_2 = S$, $S_1 \cap S_2 = \emptyset$.

Тоді

$$\exists (s_{1i} \in S_1, s_{21}, s_{22}, \dots, s_{2k} \in S_2), \quad (9)$$

$$s_{1i} = f(s_{21}, s_{22}, \dots, s_{2k}), f \in F.$$

У більш загальному випадку кількість тих, що інтерпретують і інтерпретованих підмножин може бути довільна. Тоді вони можуть бути розбиті на ситуаційні пари в залежності від специфіки модельованих завдань:

$$S = \{[\{S_{11}\}, \{S_{21}\}], [\{S_{12}\}, \{S_{22}\}], \dots, [\{S_{1j}\}, \{S_{2j}\}], \dots, [\{S_{1N}\}, \{S_{2N}\}]\}, \quad (10)$$

$$\bigcup_{j=1}^N [S_{1j} \cup S_{2j}] = S. \quad (11)$$

Для кожної j -ої пари отримаємо:

$$\exists (s_{1ij} \in S_{1j}, s_{21j}, s_{22j}, \dots, s_{2kj} \in S_{2j}),$$

$$s_{1ij} = f_j(s_{21j}, s_{22j}, \dots, s_{2kj}), f_j \in F.$$

Для реалізації функції інтерпретації конкретний підхід буде залежати від предметної області, вимог до бази знань і семантики концептуального шару. В якості одного з варіантів приймемо

$$S_2 = \{(s_{2j}, I_j) \mid j = \overline{1, n}; n < N\}, \quad (12)$$

де I_j – індекс релевантності між підмножиною термінів S_{2j} і концептом s_{1j} ; N – кількість висловлювань, які відносяться до даного контексту.

Тоді функція інтерпретації

$$f_j : Op(\{(s_{2j}, I_j)\}) \rightarrow (s_{1j}, I_j), \quad (13)$$

де Op – операція агрегації термінів, наприклад, перерахування з упорядкуванням, конкатенація, вибір найбільш ймовірного, вибір найбільш значимого, вибір самого нового, логічні зв'язки, логічне слідування і т. і.

Таким чином, в результаті отримана формальна модель уніфікованої онтології для рівня 0 ієрархії професійних онтологій типу "активний словник" з наступною узагальненою структурою

$$O = \langle \bigcup_{j=1}^N [S_{1j} \cup S_{2j}], \emptyset, \{F\} \rangle. \quad (14)$$

Як приклад джерела знань професійної області використовуємо фрагменти з документа [15]. Введемо безлічі атомарних висловлювань професійного тезауруса із зазначенням індексу релевантності

$$S = \{[\{S_1\}, \{S_2\}]\}.$$

Очевидно, що професійний контекст може бути визначений таким чином

$$c_i \in C,$$

де $c_i = \{\text{"Дії оперативного персоналу при втраті власних потреб на ПС"}\}.$

Визначимо підмножину концептів.

$S_1 = \{s_{11} = \text{"номер розділу"}, 1; s_{12} = \text{"відключення робочого трансформатора власних потреб"}, 2; s_{13} = \text{"напруги немає на одній із секцій (можлива відмова у включенні від АВР секційного вимикача)"}, 3; s_{14} = \text{"після відновлення напруги на секціях власних потреб черговий зобов'язаний"}, 4; s_{15} = \text{"при відсутності резерву (перевірка показала, що відключення сталося не від внутрішніх пошкоджень, а внаслідок перевантаження, зовнішнього к. з. або несправності в ланцюгах захисту)"}, 5\}.$

Аналогічним чином визначаються інші елементи підмножини концептів.

Визначимо підмножину термінів.

$S_2 = \{s_{21} = \text{"12"}, 1; s_{22} = \text{"в разі"}, 2; s_{23} = \text{"необхідно перш за все перевірити"}, 2; s_{24} = \text{"відновлення напруги на секціях в результаті дії АВР 0,4 кВ"}, 2; s_{25} = \text{"якщо"}, 2; s_{26} = \text{"на секціях немає напруги"}, 2; s_{27} = \text{"черговий персонал зобов'язаний"}, 2; s_{28} = \text{"включити резервний тр-р і тим самим подати напругу на секцію 0,4 кВ"}, 2; s_{29} = \text{"слід"}, 3; s_{210} = \text{"відключити вступної автомат"}, 3; s_{211} = \text{"включити секційний вимикач ключем управління"}, 3; s_{212} = \text{"по блінкерам які спрацювали визначити, від якого захисту відключився тр-р"}, 4; s_{213} = \text{"провести огляд тр-ра і його приєднань і повідомити диспетчеру і керівництву підрозділу"}, 4; s_{214} = \text{"тр-р може бути включений повторно"}, 5\}.$

Аналогічним чином визначаються інші елементи підмножини термінів.

В якості класифікатора обрана одна ознака – семантична приналежність до документа [15].

Наведемо приклади деяких функцій інтерпретації в рамках отриманої онтології:

$$f_1 : Op(\{(s_{21}, 1)\}) \rightarrow (s_{11}, 1);$$

$$f_2 : Op(\{(s_{23}, 2), (s_{24}, 2), (s_{25}, 2), (s_{26}, 2), (s_{27}, 2), (s_{28}, 2)\}) \rightarrow (s_{12}, 2);$$

$$f_3 : Op(\{(s_{29}, 3), (s_{210}, 3), (s_{211}, 3)\}) \rightarrow (s_{13}, 3);$$

$$f_4 : Op(\{(s_{212}, 3), (s_{213}, 3)\}) \rightarrow (s_{14}, 4);$$

$$f_5 : Op(\{(s_{214}, 5)\}) \rightarrow (s_{15}, 5).$$

Аналогічним чином визначаються інші елементи підмножини функцій інтерпретації F .

У роботі був побудований більш детальний тезаурус професійної лексики.

Прийmemo, що потужність множини тезауруса професійної лексики не перевищує 0xFFFF. Тоді зберігання кодів висловлювань тезауруса можна робити, наприклад, в даних типу unsigned short int. При цьому були отримані наступні співвідношення обсягів вихідних висловлювань професійної лексики, кодів тезауруса онтології і ефективності тезауруса, характерних для розглянутої фрагментарною моделі професійної області, які наведені в табл.

У табл. використовуються наступні позначення: n – кількість розділів (по наростаючій); V_P – обсяг вибірки професійної лексики; V_S – обсяг висловлювань тезауруса; ΔV – текстова надмірність; V_T – обсяг кодів тезауруса; $E_T = \frac{V_P - V_T}{V_P} * 100\%$ – ефективність тезауруса.

Графіки, що ілюструють показники ефективності використання тезауруса онтологічної моделі професійної області диспетчерського управління енергосистемою (рис. 1, рис. 2), наведені нижче.

Ефективність графіків на рис. 1 і рис. 2 полягає в можливості наочної оцінки залежності зростання ефективності тезауруса розробленої моделі онтології від початкового об'єму професійної лексики бази знань. Крім цього, проілюстроване зростання ліквідованої надмірності вихідного професійного тексту по відношенню до обсягу тезауруса.

Таблиця

Кількісні характеристики фрагменту тезауруса

n	V_P , байт	V_S , байт	ΔV , байт	V_T , байт	E_T , %
1	226	198	28	8	12,39
2	312	274	38	12	12,18
3	508	428	80	16	15,75
4	834	648	186	18	22,30
5	1256	872	384	26	30,57
6	1612	1088	524	28	32,51
7	2164	1354	810	28	37,43
8	3224	1536	1688	32	52,36
9	4178	1682	2496	32	59,74
10	5854	1728	4126	34	70,48

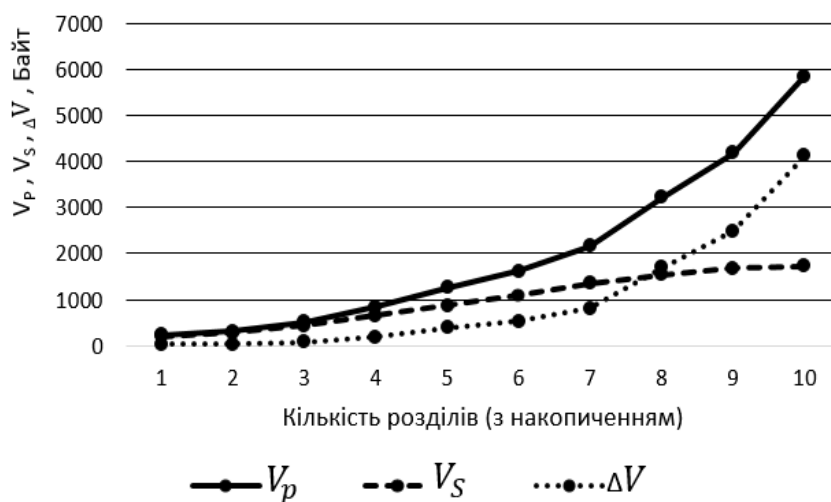


Рис. 1. Обсяги вибірки професійного тезауруса

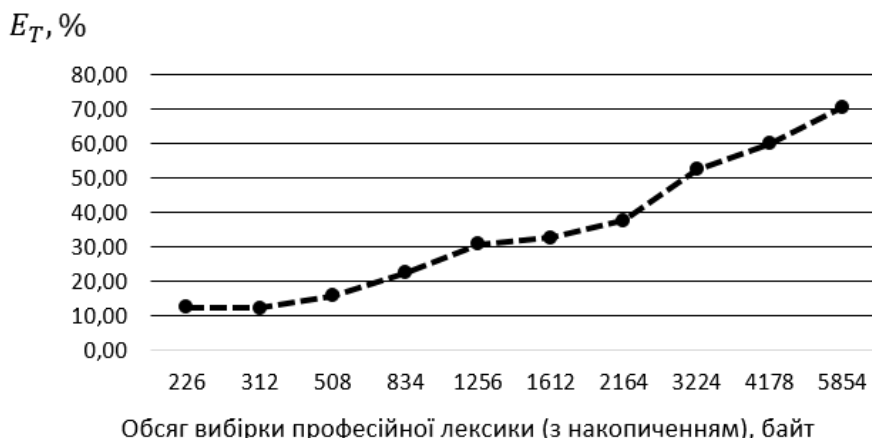


Рис. 2. Оцінка ефективності професійного тезауруса в залежності від обсягу вибірки

Продемонструємо практичну корисність отриманих результатів для трьох перших рядків табл.

Вибірка професійної лексики для розділу 1:

"12.1. У разі відключення робочого трансформатора власних потреб необхідно перевірити відновлення напруги на секціях в результаті дії АВР 0,4 кВ. Якщо на секціях немає напруги, черговий персонал зобов'язаний включити резервний тр-р і подати напругу на секцію 0,4 кВ".

Обсяг вибірки – 226.

Тезаурус:

"відключення робочого трансформатора власних потреб
перевірити відновлення напруги на секціях
дії АВР 0,4 кВ
черговий персонал зобов'язаний включити резервний тр-р
подати напругу на секцію
на секціях немає напруги
необхідно
якщо".

Обсяг тезауруса: 198. Текстова надмірність $226 - 198 = 28$. Кількість необхідних кодів: 8. Ефективність тезауруса в процентах: $28/226 \cdot 100 = 12,39\%$.

Вибірка професійної лексики для розділів 1 і 2:

"12.1. У разі відключення робочого трансформатора власних потреб необхідно перевірити відновлення напруги на секціях в результаті дії АВР 0,4 кВ. Якщо на секціях немає напруги, черговий персонал зобов'язаний включити резервний тр-р і подати напругу на секцію 0,4 кВ.

12.2. Якщо напруги немає на одній із секцій відключити вступної автомат і включити секційний вимикач".

Обсяг вибірки – 312.

Тезаурус:

"відключення робочого трансформатора власних потреб
перевірити відновлення напруги на секціях
дії АВР 0,4 кВ
черговий персонал зобов'язаний включити резервний тр-р
подати напругу на секцію
на секціях немає напруги
необхідно
якщо
на одній із секцій
відключити вступної автомат
включити секційний вимикач
напруги немає".

Обсяг тезауруса: 274. Текстова надмірність $312 - 274 = 38$. Кількість необхідних кодів: 12. Ефективність тезауруса в процентах: $38/312 \cdot 100 = 12,18\%$.

Вибірка професійної лексики для розділів 1, 2 і 3:

"12.1. У разі відключення робочого трансформатора власних потреб необхідно перевірити відновлення напруги на секціях в результаті дії АВР 0,4 кВ. Якщо на секціях немає напруги, черговий персонал зобов'язаний включити резервний тр-р і подати напругу на секцію 0,4 кВ.

12.2. Якщо напруги немає на одній із секцій відключити вступної автомат і включити секційний вимикач.

12.3. Після відновлення напруги на секціях власних потреб черговий зобов'язаний по блінкеру визначити, від якого захисту відключився тр-р, провести огляд тр-ра і його приєднань і повідомити диспетчеру і керівництву підрозділу".

Обсяг вибірки – 508.

Тезаурус:

"відключення робочого трансформатора власних потреб
перевірити відновлення напруги на секціях
дії АВР 0,4 кВ
черговий персонал зобов'язаний включити резервний тр-р
подати напругу на секцію
на секціях немає напруги
необхідно
якщо
на одній із секцій
відключити вступної автомат
включити секційний вимикач
напруги немає
після відновлення напруги на секціях власних потреб
черговий зобов'язаний по блінкеру визначити
провести огляд тр-ра і приєднань
повідомити диспетчеру і керівництву підрозділу".

Обсяг тезауруса: 428. Текстова надмірність $508 - 428 = 80$. Кількість необхідних кодів: 16. Ефективність тезауруса в процентах: $80/508 \cdot 100 = 15,75\%$.

З наведених прикладів видно, що для професійної лексики є доцільною побудова онтологій на основі тезаурусів термінів і лексичних концептів. Причому з ростом обсягу бази знань V_p значно збільшується обсяг ліквідованої текстової надмірності ΔV , і зростає ефективність тезауруса E_T . Ця обставина дозволить на практиці будувати компактні, уніфіковані бази знань професійних областей і ефективні системи підтримки рішень.

Висновки. Наукова новизна полягає в наступному:

1. Розроблено модель онтології атомарних висловлювань, яка може використовуватися в якості базису для подання практично будь-яких форм знань без додаткових змін (відповідно до моделі, запропонованої автором в статті [8]).

2. На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що для вузько спеціалізованих лексичних областей є доцільним перехід від алфавітного до професійно-ієрогліфічного подання інформації.

3. Запропоновано будувати тезауруси професійної лексики на основі лінгвістичних змінних, змістом яких є переважно професійний сленг (з урахуванням їх можливої фазифікації).

4. Обґрунтовано необхідність врахування поняття і моделі контексту в формальних моделях мови тезауруса (атомарних

висловлювань) і онтології професійної лексики, так як інтерпретація висловлювань тезауруса залежить від навколишнього контексту і його потужності (в теоретико-множинному сенсі).

5. Досліджено ефективність використання тезауруса спеціальної лексики в вузько професійної області. Показане пропорційне зростання ефективності використання тезауруса від ступеня специфічності (спеціалізованості) професійної області та обсягу лексичного матеріалу.

Практична корисність отриманих результатів полягає в наступному:

1. Обсяг тезауруса набагато менше обсягу вихідного лексичного матеріалу, тому побудова, подання, сприйняття і розуміння (інтерпретація) висловлювань на основі тезауруса значно спрощується.

2. Використання тезауруса стандартизує комп'ютерну автоматизацію побудови і використання баз знань в інтелектуальних системах.

3. Розроблений підхід дає можливість будувати уніфіковані системи підтримки рішень для різних професійних областей.

4. Як наслідок п. 3, запропоновані моделі дозволяють скоротити час розробки систем підтримки прийняття рішень та суттєво знизити їх вартість.

Можна зробити висновок про те, що використання моделі онтології по відношенню до професійної області є доцільним внаслідок специфічної структури професійної лексики. Застосування онтологічних моделей для різних професійних областей дозволяє уніфікувати форми подання знань і на їх основі будувати ефективні інтелектуальні системи підтримки рішень. Отримані залежності показують, що з ростом обсягу задіяної професійної лексики текстова надмірність зростає швидше, ніж обсяг тезауруса, чим пояснюється зростання ефективності останнього. Очевидно, можна очікувати, що для загальнонавчальної лексики ефект використання онтологічних моделей буде значно нижче внаслідок необхідності використання тезауруса набагато більшого обсягу. Тому онтологічні моделі доцільно застосовувати в специфічних професійних галузях, що відрізняються наявністю широкого спектру професійної термінології (професійного сленгу). Використовуючи отримані результати дослідження, в подальшому планується побудова онтологічних моделей не тільки на базі тезауруса атомарних висловлювань професійної лексики, але також на семантичних і продукційних онтологічних моделях.

Список літератури:

1. *Башильков А.А.* Основы конструирования интеллектуальных систем поддержки принятия решений в атомной энергетике: учебник / *А.А. Башильков, А.П. Еремеев.* – М.: ИНФРА-М – 2017 – 350 с.
2. *Daniel J. Power* Support, Analytics And Business Intelligence, 3rd Edition / *J. Power*

Daniel, Heavin Decision Ciara. – NY: Business Expert Press, LLC. – 2017. – 182 p.

3. Глазунова А.М. Решение задач диспетчерского управления интеллектуальными электроэнергетическими системами на базе методов оценивания состояния / А.М. Глазунова, И.Н. Колосок // Сб. докл. Всерос. научно-практической конф. "Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление". – Иркутск. – 2015. – С. 1-8.

4. Negnevitsky M. Intelligent Approach for Preventing Large-Scale Emergencies in Electric Power Systems / M. Negnevitsky, N. Tomin, D. Panasetsky, V. Kurbatsky // IEEE International Conference on Electric Power Engineering PowerTech. – 2013. – Grenoble, France, 16-20 June. – 2013. – P. 1-6.

5. Гришанов С.О. Реалізація експертної системи для діагностування генераторів теплових електричних станцій / С.О. Гришанов, М.О. Канашиевич // Збірник наукових праць X Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті (Кременчук 28-29 березня 2012р.). – Кременчук: КНУ, 2012. – С. 305-306.

6. Баркалов С.А. Введение в системное проектирование интеллектуальных баз знаний / С.А. Баркалов, А.В. Душкин, С.А. Колодяжный. – М.: Горячая линия-Телеком. – 2017. – 108 с.

7. Антамошин А.Н. Интеллектуальные системы управления организационно-техническими системами / А.Н. Антамошин, О.В. Блинова, А.А. Большаков и др. – М.: Горячая линия – Телеком. Издание 2-е, стер. – 2016. – 160 с.

8. Котов І.А. Автоматизація інтелектуальних систем підтримки рішень оперативного керування шляхом інкорпорації професійних онтологій / І.А. Котов // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 63-76

9. Величко В.Ю. Комплексные инструментальные средства инженерии онтологий / В.Ю. Величко, К.С. Малахов, В.В. Семенов, А.Е. Стрижак // International Journal "Information Models and Analyses". – Vol. 3. – № 4. – 2014. – С. 336-360.

10. Самойлов Ю.В. Обзор программных приложений для реализации онтологического подхода к управлению знаниями / Ю.В. Самойлов // Сборник статей VI Международной научно-практической конференции "Инновационные научные исследования". – М.: МЦНС "Наука и просвещение". – 2017. – С. 82-86

11. Морозова В.А. Представление знаний в экспертных системах: учебное пособие / В.А. Морозова, В.И. Паутов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. – 2017. – 120 с.

12. Кравченко Ю.А. Онтологический подход формирования информационных ресурсов на основе разнородных источников знаний / Ю.А. Кравченко, В.В. Марков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 7 (144). – С. 116-120.

13. Зыков А.Г. Математическая логика / А.Г. Зыков, В.И. Поляков, В.И. Скорубский. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 131 с.

14. Колмогоров А.Н. Математическая логика. Введение в математическую логику / А.Н. Колмогоров, А.Г. Драгалін. – М.: Ленанд. – 2017. – 240 с.

15. Инструкция ДС-8 по предотвращению и ликвидации технологических нарушений в электрической части электростанций и электрических сетей региона Днепропетровской ЭС / Министерство топлива и энергетики Украины. Государственное предприятие Национальная энергетическая компания "Укрэнерго". – Запорожье: Днепропетровская электроэнергетическая система. – 2008. – 67 с.

References:

1. Bashlykov, A.A., and Ereemeev, A.P. (2017), *Fundamentals of designing intelligent decision support systems in nuclear power engineering: textbook*, Moskow, INFRA-M, 350 p.

2. Daniel, J. Power, and Ciara Heavin Decision (2017), *Support, Analytics And Business*

Intelligence, 3rd Edition, NY, Business Expert Press, LLC, 182 p.

3. Glazunova, A.M., and Kolosok, I.N. (2015), "Solving the problems of dispatching control of intelligent electric power systems on the basis of methods for estimating the state", *The collection of reports of the All-Russian scientific-practical. Conf. "Energy of Russia in the XXI century. Innovative Development and Management"*, Irkutsk, pp. 1-8.
4. Negnevitsky, M., Tomin, N., Panasetsky, D., and Kurbatsky, V. (2013), "Intelligent Approach for Preventing Large-Scale Emergencies in Electric Power Systems", *IEEE International Conference on Electric Power Engineering PowerTech*, Grenoble, France, 16-20 June, pp. 1-6.
5. Grishanov, S.O. (2012), "Implementation of an expert system for the diagnosis of generators of thermal power plants", *The collection of scientific works X International scientific and technical conference young students and specialists at the Kremenchuk 28-29 March 2012 p.*, Kremenchuk, KNU, pp. 305-306.
6. Barkalov, S.A., Dushkin, A.V., and Kolodyazhny, S.A. (2017), *Introduction to the system design of intellectual knowledge bases*, Moscow, Hot line-Telecom, 108 p.
7. Antamoshin, A.N., Bliznova, O.V., and Bolshakov, A.A. (2016), *Intellectual systems of management of organizational and technical systems*, Moscow, Hot line-Telecom, Edition 2nd, 160 p.
8. Kotov, I.A. (2016), "Automation of intelligent systems of decision support for operational control by incorporating professional ontologies", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Informatics and Modeling*, Kharkiv, NTU "KhPI", No. 44 (1216), pp. 63-76.
9. Velychko, V.Yu., Malakhov, K.S., Semenov, V.V., and Strizhak, A.E. (2014), "Integrated instrumental tools for ontology engineering", *International Journal "Information Models and Analyzes"*, Vol. 3, No. 4, pp. 336-360.
10. Samoilov, Yu.V. (2017), "An overview of software applications for the implementation of an ontological approach to knowledge management", *A collection of articles of the VI International Scientific and Practical Conference "Innovative Scientific Research"*, Moscow, ICPS "Science and Education", pp. 82-86.
11. Morozova, V.A., and Pautov, V.I. (2017), *"Representation of knowledge in expert systems: training manual"*, Yekaterinburg, News of the Ural University, 120 p.
12. Kravchenko, Yu.A., and Markov, V.V. (2013), "Ontological approach of formation of information resources on the basis of heterogeneous sources of knowledge", *Izvestiya SFU. Technical sciences*, No. 7 (144), pp. 116-120.
13. Zykov, A.G., Polyakov, V.I., and Skorubsky, V.I. (2013), *Mathematical logic*, SPb, NIU ITMO, 131 p.
14. Kolmogorov, A.N., and Dragalin, A.G. (2017), *Mathematical logic. Introduction to Mathematical Logic*, Moscow, Lenand, 240 p.
15. *Instruction DC-8 on prevention and liquidation of technological violations in the electric part of power plants and electric networks of the region of the Dnieper Electric Power System* (2008), Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. State Enterprise National Energy Company "Ukrenergo", Zaporozhye: Dnieper Electric Power System, 67 p.

Статтю представив д-р техн. наук, проф. ДВНЗ "Криворізький національний університет", зав. кафедрою автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті Сінчук О.М.

Поступила (received) 22.03.2018

Повторно 23.04.2018

Kotov Igor Anatoliyovich, Cand. Tech Sciences, Associate Professor
State Higher Educational Institution "Kryvy Rih National University"
Str. Vyacheslav Chornovil, 41, fl. 23, Kryvy Rih, Ukraine, 50093
Tel.: (067) 970-17-17, e-mail: rioexito@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-2445-6259

Azaryan Albert Aramaysovich, Doctor of Techn. Sciences, Prof.
State Higher Educational Institution "Kryvy Rih National University"
Str. Krivbasovskaya, 54, fl. 12, Kryvy Rih, Ukraine, 50093
Tel. (067) 391-05-43, e-mail: aazaryan325@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-1381-579X

УДК 004.82:322(075):621.311.004

Оцінка ефективності тезауруса професійної лексики в онтологіях систем підтримки рішень для керування режимами енергосистем / Азарян А.А., Котов І.А. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 100 – 116.

Розглянуті основні типи тезаурусів і сфери їх застосування в системах професійних онтологій. Досліджені формальні моделі синтезу онтологій професійних областей. Детально досліджена проблема подання знань в експертних системах підтримки рішень оперативного диспетчерського персоналу енергосистем. Результатами роботи є дослідження статистичних залежностей ефективності тезауруса професійної лексики від об'єму вибірки і ступеня її спеціалізованості, формальна система подання тезауруса висловлювань галузі управління режимами енергооб'єктів. Іл.: 2. Табл.: 1. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: онтологія; тезаурус; лексика; висловлювання; енергосистема; керування; експертна система; диспетчерський персонал.

УДК 004.82: 322 (075): 621.311.004

Оценка эффективности тезауруса профессиональной лексики в онтологиях систем поддержки решений для управления режимами энергосистем / Азарян А.А., Котов И.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 100 – 116.

Рассмотрены основные типы тезаурусов и сферы их применения в системах профессиональных онтологий. Исследованы формальные модели синтеза онтологий профессиональных областей. Подробно исследована проблема представления знаний в экспертных системах поддержки принятия решений оперативного диспетчерского персонала энергосистем. Результатами работы является исследование статистических зависимостей эффективности тезауруса профессиональной лексики от объема выборки и степени ее специализированности, формальная система представления тезауруса высказываний в области управления режимами энергообъектов. Ил.: 2. Табл.: 1. Библиогр.: 15 назв.

Ключевые слова: онтология; тезаурус; лексика; высказывания; энергосистема; управление; экспертная система; диспетчерский персонал.

UDC 004.82: 322 (075): 621.311.004

Assessment of the effectiveness of the thesaurus of professional vocabulary in ontologies of decision support systems for managing power system regimes / Azaryan A.A., Kotov I. A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – №. 24 (1300). – P. 100 – 116.

The main types of thesauri and their application in professional ontology systems are considered. Formal models for the synthesis of ontologies of professional fields. The problem of representation of knowledge in expert decision support systems for operational dispatch personnel of power systems has been thoroughly investigated. The task is to develop and apply methods for assessing the effectiveness of the thesaurus of professional vocabulary of the unified ontology of knowledge representation. The results of the research are the statistical dependencies of the vocabulary vocabulary effectiveness on the sample size and the degree of its specialization, the formal system of representation of the thesaurus of the utterances of the management area of the modes of power facilities. Figs.: 2. Tabl.: 1. Refs.: 15 titles.

Keywords: ontology; thesaurus; vocabulary; utterances; power system; management; expert system; dispatcher system.

УДК 004.4+007.51:681.518

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.24.10

О. В. МНУШКА, ас., ХНАДУ, Харків

АРХІТЕКТУРА ВЕБ-ОРІЄНТОВАНОЇ SCADA-СИСТЕМИ

Проаналізовано особливості застосування систем SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) та технологій Інтернету речей в умовах переходу промисловості до Індустрії 4.0. Показано, що використання веб SCADA забезпечує більшість вимог до таких систем та є масштабованим рішенням на всіх її рівнях. Розроблено та реалізовано веб-SCADA, компоненти якої працюють на одноплатних комп'ютерах типу Raspberry Pi, визначені вимоги до технічних характеристик компонентів системи. Іл.: 5. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: веб; SCADA; Інтернет речей; Індустрія 4.0; Raspberry Pi.

Постановка проблеми. Модернізація бізнесу на шляху до Індустрії 4.0 здійснюється за рахунок впровадження інформаційно-комп'ютерних технологій (ІКТ) на всіх етапах виробництва та сервісу. Завдяки ІКТ життєвий цикл продуктів буде починатися від вибору моделі, кольору, складу та інших характеристик виробів до повсякденної взаємодії персоналізованих пристроїв поміж собою [1].

Першим етапом переходу від Індустрії 3.0 до Індустрії 4.0 є автоматизація технологічних процесів на основі технологій Інтернету речей (IoT) та промислового Інтернету речей (IIoT) [2, 3]. Такому переходу сприяє в першу чергу розвиток двох груп технологій:

- технологій бездротового зв'язку (Wi-Fi (802.11) LPWAN(LoRa, Sigfox), 802.15.3, 802.15.4 (ZigBee, 6LoWPAN, WirelessHART) та ін.);
- технологій мобільного зв'язку четвертого (4G) і п'ятого (5G) поколінь (в умовах України – третього (3G) та четвертого). Мережі 4G за можливостями передавання даних є на рівні локальних мереж Ethernet (802.3). Якісно новий рівень сервісів IoT мають забезпечити технології 5G як за рахунок ще більших швидкостей, так і за рахунок нових можливостей безпосередньої комунікації між пристроями (device-to-device), що дозволить їм об'єднуватися у самокеровані мережі.

Розвиток означених технологій дозволяє використовувати Інтернет як канал для передачі технологічних даних та використовувати веб-технології для побудови автоматичних систем керування технологічними процесами (або SCADA) та надання доступу до даних на будь-яких пристроях в будь-якій точці Землі за умови наявності Інтернету [4].

На транспорті за допомогою SCADA розв'язують складні логістичні питання перевезення вантажів та пасажирів. В енергетиці – для віддаленого керування енергетичними установками; для контролю

перебігу технологічних процесів добування нафти та газу; для автоматизації різних технологічних процесів, в т.ч. для контролю холодильного обладнання, облаштування "розумного будинку", процесів збирання інформації про спожиті енергоносії тощо [5 – 7].

Велике різноманіття віддалених систем контролю, автоматизації та телематики обумовлене масштабами та комплексністю задач, що вирішуються. У зв'язку з цим необхідна побудова універсальної системи віддаленого контролю та управління на основі використання веб-технологій з можливістю її адаптації під потреби малого та середнього бізнесу.

Аналіз літератури. Умовно функціонал SCADA-систем ділять на декілька рівнів, у найпростішому випадку на два – верхній (ВР), на якому аналізується інформація та приймаються рішення (оператором або автоматично), та нижній (НР), що забезпечує збирання даних від пристроїв або датчиків та передавання їх на верхній рівень.

За оцінками одного з розробників програмно-апаратних комплексів диспетчеризації технологічних процесів (<http://www.redpine.pro>) для такої архітектури на долю базових компонентів верхнього рівня приходить до 55 – 60 % (в тому числі програмне забезпечення (ПЗ) – до 40%), а на долю компонентів нижнього рівня – 40 – 45 відсотків (ПЗ – до 25%). Таким чином, загальна значимість ПЗ складає до 65 відсотків. Для зменшення витрат на підтримання інфраструктури верхнього рівня можуть використовуватися хмарні рішення та сервіси [8, 9]. Найбільше поширення подібні системи отримали в нафтогазовій галузі за необхідності здійснювати сервісний моніторинг та керування обладнанням, що розташовано у важкодоступних місцях та на великих відстанях від населених пунктів. Поступово вони поширюються на комунальне господарство та різні види виробництва, в т.ч. для тваринництва, агропромислового бізнесу, систем логістики, телематики тощо. Використання хмарних сервісів для потреб великого та середнього бізнесу може бути економічно невиправданим за рахунок високих цін на подібні послуги, особливо коли потрібно здійснювати моніторинг та керування у режимі 24/7.

У [10] проаналізовано можливість реалізації SCADA у архітектурі "клієнт-сервер" на основі використання веб-технологій. Запропоновано трирівневу архітектуру системи, що складається: з серверу бази даних, веб-серверу (серверу додатків) та клієнтів. У якості клієнтів системи використовують веб-браузери та інтелектуальні віддалені термінальні модулі, що забезпечують збирання даних із датчиків та передавання даних на сервер.

Всі функції SCADA розподілено на відповідні набори компонентів

веб-сервера додатків, що забезпечує гнучкість запропонованої системи. Основними проблемами запропонованої архітектури є питання безпеки та забезпечення керування у режимі реального часу. Для вирішення першої проблеми запропоновано використати можливості IIS та Windows, а другої – за допомогою відповідних real-time розширень операційної системи. Серверна частина реалізована за допомогою технологій ASP та REST API.

Перевагою запропонованого підходу є те, що система може бути гнучкою та масштабованою за рахунок декомпозиції, доступ до системи забезпечено з декількох комп'ютерів через локальну або глобальну мережу. Недоліки: проблеми з розподіленням доступу та одночасним доступом у систему, проблеми безпеки даних, що знаходяться у кеші браузера, складність із обмеженням дій користувача, що не пов'язані із роботою у SCADA, негарантовані канали зв'язку, у випадку підключення контролерів через мобільні мережі.

У [11] наведено архітектуру та проаналізовано можливості застосування системи HP, що складається із сенсорної мережі ZigBee, контролера мережі на основі FPGA та комунікаційного модуля Sim300, що забезпечує передавання даних на сервер за допомогою GPRS Інтернету. Перевагами наведеного підходу є мініатюрна конструкція, що дозволяє класифікувати контролер як вбудовану систему, можливість побудови масштабованих рішень та відсутність з'єднувальних ліній між контролером та сенсорами. Недолік – мала пропускна здатність каналу зв'язку між контролером та сервером, не описані протоколи взаємодії між сервером та контролером.

У [12] запропоновано ресурсно-орієнтовану архітектуру для побудови веб-орієнтованої SCADA та наведено приклад її реалізації в Mango M2M. У розрізі запропонованої архітектури ресурси – це набір компонентів системи, доступ до яких здійснюють за допомогою відповідних URL. Показано, що можливо використовувати принципи REST для побудови такої системи. Показано, що веб-орієнтовані системи не можуть використовуватися для систем із гарантованим часом реакції на події у системі. Для побудови серверної частини та протоколу обміну використані REST API, що дозволяє використовувати стандартні засоби розробки та протокол обміну на основі HTTP. Недоліком запропонованої архітектури є те, що використання для захисту протоколу HTTPS вимагає з'єднання типу "точка-точка", що вимагає додаткових засобів захисту для компонентів.

У [13] запропоновано сервіс-орієнтований підхід до побудови SCADA-систем для задач керування, контролю та візуалізації різнорідних систем. Система складається із трьох рівнів: доступу до даних,

сервісного та відображення. На рівні подання клієнти взаємодіють із системними сервісами за допомогою SOAP XML або RESTful JSON веб-сервісів. Для побудови інтерфейсу користувача використано AJAX та JQuery, що дозволило побудувати інтерактивний динамічний інтерфейс користувача. Для того, щоб мати можливість використовувати AJAX, було розроблено сервісний контролер, що використовується для виконання міждомених викликів callback-функцій. До переваг запропонованого підходу віднесемо: узагальнений підхід на основі сервісів, що дозволяє використовувати подібну систему для розв'язання різнотипних задач моніторингу та керування; можливість економити трафік на клієнті та знизити навантаження на сервер системи. До недоліків – обов'язкове використання JavaScript у браузері клієнта; складності із контролем цілісності даних; ускладнена інтеграція із стандартними засобами браузера.

У [14] наведено приклад використання платформи Raspberry Pi у якості програмованого контролера (PLC). Для забезпечення процесу керування використано ПЗ Codesys IEC 61131-3. Для збирання даних із об'єкта керування використано наявні на платі контролера GPIO, додаткові реле та комунікаційні порти. Система складається із інтерфейсу користувача (HMI), побудованого за допомогою CODESYS WebVisu, що дозволяє керувати системою віддалено, за допомогою веб-браузера. ПЗ контролера розроблено на підмножині IEC 61131-3 – мові LD (мові релейних схем). Перевагами запропонованого підходу є реалізований локальний контролер, що забезпечує автоматизацію керування, до недоліків – відсутність централізованої SCADA, що не дозволяє керувати одночасно декількома об'єктами. Запропонований варіант є прототипом для реалізації обладнання нижнього рівня в нашій системі.

Таким чином, існує багато різних підходів до побудови веб-орієнтованих SCADA-систем. Загальним є розділення функцій системи на декілька, здебільшого три рівня, та використання сучасних технологій побудови інтерактивних сторінок (AJAX, JavaScript та ін.). Для платформ на основі Microsoft Windows здебільшого використовують веб-сервіси на основі платформи ASP.NET та MS SQL Server, для інших – різні поєднання систем керування базами даних (PostgreSQL, MySQL та ін.) та мов програмування (python, php, node.js – для серверної частини, JavaScript (React, Angular, Vue та ін.) для клієнта). Найбільшими проблемами подібних систем є захищеність даних та коду, а також практична неможливість працювати у режимі "реального часу".

Мета статті. Розробка та аналіз архітектури та прототипу веб-орієнтованої SCADA-системи на основі використання технологій бездротової передачі даних у мережах другого-четвертого поколінь.

Архітектура веб-орієнтованої SCADA-системи. Проаналізуємо потоки даних у системі, що проектується (рис. 1). Клієнтами системи будуть як звичайні користувачі пристроїв IOT, так підприємці, яким потрібно керувати деяким виробничим процесом. Мінімальний набір даних, що буде передаватися у системі "Параметри (значення)" та "Параметри (уставки)". Інші потоки даних можуть бути реалізованими у будь-яких комбінаціях. "Аналітика" може бути представленою у вигляді таблиць та графіків із візуальними маркерами. Формування умов для прийняття рішення в даному випадку – основна задача системи. Для спрощення системи автоматичне прийняття рішень є функцією тільки програмованих логічних контролерів (ПЛК), це ж дозволяє вирішити проблему реакції на події системи у режимі "реального часу".

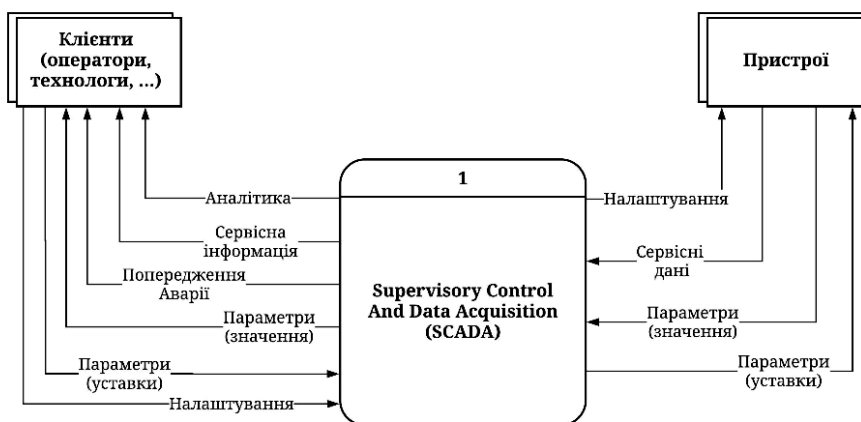


Рис. 1. Потоки даних у системі

Діаграми потоків даних для параметрів (значень, рис. 2 і уставок, рис. 3) дозволяють визначити набір функціональних модулів системи.

Для прискорення обміну як на стороні пристрою, так і на стороні клієнтів передбачено кешування даних. Зважаючи на те, що обладнання НР є менш потужним, кешування на цьому рівні може бути реалізованим у вигляді черг (FIFO).

Використання REST API визначає набір операцій, типів даних та шаблонів проектування, тому при проходженні між різними функціональними блоками, дані трансформуються у найбільш зручну форму (текстова, бінарна, JSON тощо).

За винятком потоку даних "Аналітика", всі інші потоки функціонують аналогічно розглянутим.

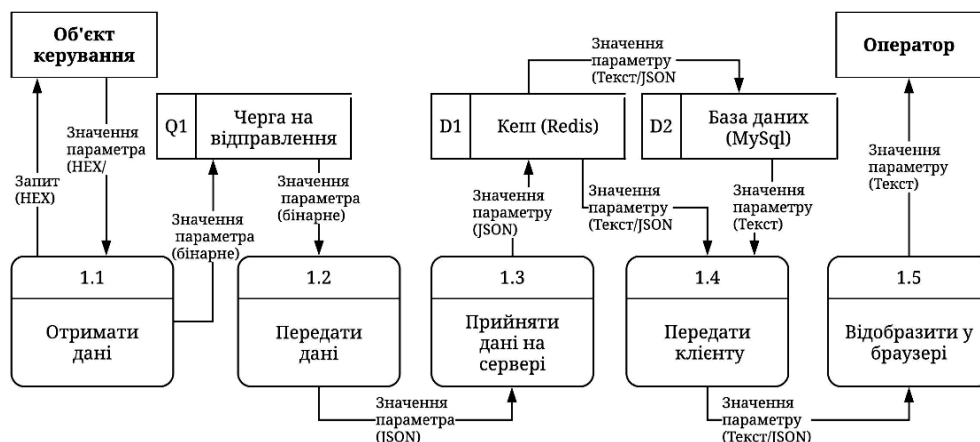


Рис. 2. Потоки даних у системі для передавання поточних значень

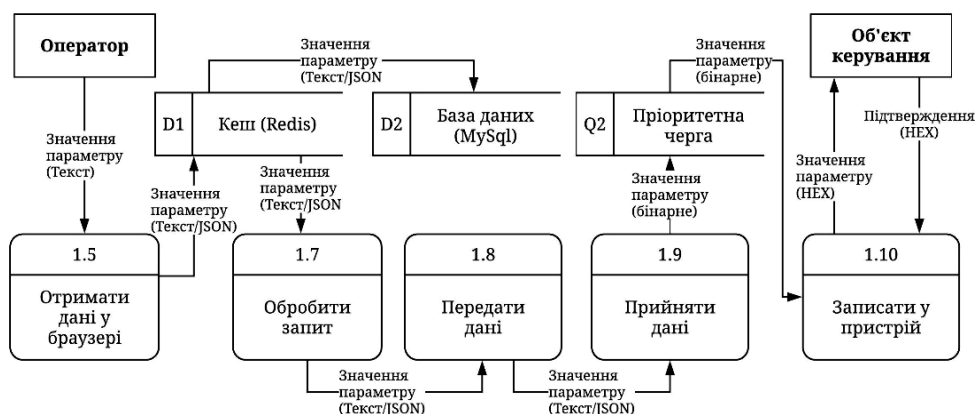


Рис. 3. Потоки даних у системі для передавання поточних уставок

Для розробленої системи об'єктом керування може бути будь-яке обладнання, що підтримує один із стандартних промислових протоколів обміну (реалізовано підтримку Modbus). В залежності від призначення апаратне забезпечення нижнього рівня може мати декілька портів Modbus, аналогові входи ($\pm 20\text{mA}$, $0 - 20\text{mA}$, $4 - 20\text{mA}$) та виходи, цифрові входи та виходи, що дозволяє підключити не тільки устаткування, але й різні сенсори та модулі розширення інтерфейсів.

Для таких систем велику значимість має середовище передавання даних. Для віддалених об'єктів єдиним прийнятним засобом передачі даних є мережі мобільного зв'язку та Інтернету. Наразі в Україні за зоною

покриття переважають технології 2G (до 89 кбіт/с) та 3G (до 3 Мбіт/с і вище). З урахуванням вище сказаного, структуру клієнтської частини – інтеграційно-комунікаційного контролера (ІКК) приведено на рис. 4. ІКК складається з одноплатного комп'ютера (нижні моделі Raspberry Pi або Orange Pi Lite), портів введення/виведення, інтерфейсів WiFi та Bluetooth, зовнішнього радіомодуля. Одноплатний комп'ютер керується ОС Linux, що дозволяє значно скоротити процес розробки та перенесення програмного забезпечення ІКК.

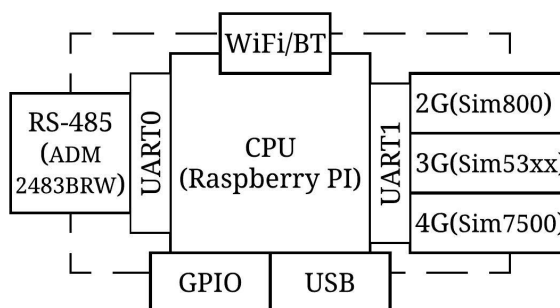


Рис. 4. Структура інформаційно-комунікаційного контролера

Модуль мобільного зв'язку можна виконати на чіпах SimCom 800/5300/5320/5360/7500, Telit xE866, Telit xE910 та ін. У нашому випадку – це один із трьох модулів на вибір – 2G, 3G, 4G. За рахунок використання можливостей самих модулів, що підтримують стек TCP/IP, FTP, FTPS, HTTP, HTTPS, SMTP, POP3, DNS на рівні вбудованих АТ-команд, спрощується програмування комунікаційної частини ІКК.

ІКК може працювати у слейв- або майстер-режимі. Слейв-режим забезпечує вирішення наступних задач: ініціалізація з'єднання із сервером; прийом команд із сервера і трансляція їх на підключений пристрій; прийом відповіді від пристрою та передавання даних на сервер. У майстер-режимі додатково можливо забезпечити попередню обробку та тимчасове зберігання даних на час відсутності зв'язку із сервером, а також керування під'єднаними пристроями за заданими алгоритмами (функції ПЛК). Для спрощення керування ІКК можна використовувати можливості операторів з організації закритих корпоративних мереж, які інтегруються із локальною мережею підприємства за допомогою фізичного з'єднання або за допомогою технологій VPN.

У розробленій системі ІКК працює у майстер-режимі, програмне забезпечення ІКК написано на мові програмування C++ та python. Для спрощення налаштування реалізовано локальний веб-інтерфейс на JavaScript та node.js.

Архітектура серверної частини (рис. 5) містить набір із трьох сервісів – накопичення, обробки та комунікацій. Останній забезпечує зв'язок з оператором (людиною) та з інтеграційно-комунікаційним контролером. Ці сервіси виконуються на одному сервері, надалі планується рознести їх на декілька, що має підвищити надійність системи та зробити її архітектуру більш гнучкою.

Для організації комунікації між сервером та контролером необхідний певний прикладний протокол на основі XML, JSON тощо. В розробленій системі використовується закритий протокол обміну на основі JSON, що дозволяє зекономити ресурси на додаткових перетвореннях типів даних та зменшити можливі похибки перетворення між форматами даних. Для підключення стороннього обладнання планується сервіс конвертації протоколів, що забезпечує підключення протоколу MQTT.

Взаємодію між клієнтом (людиною) та сервером організовано із використанням веб-технологій (REST API) та мов програмування python на сервері та HTML/CSS/JavaScript на клієнті (у браузері).

Для підвищення надійності системи передбачено механізми реплікації даних на зовнішні сервіси.

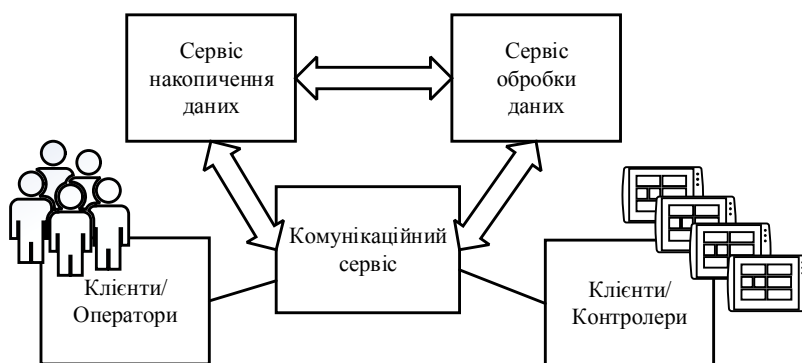


Рис. 5. Структура серверної частини системи

Серверна частина системи реалізована також на одноплатному комп'ютері Orange Pi Win Plus із наступними характеристиками: CPU A64 Quad-core Cortex-A53 64 біт, 1 Гб ОЗП, підтримка карт пам'яті до 32 Гб, Ethernet, WiFi, HDMI. Підтримка вільних ОС – Android, Ubuntu, Debian, Raspbian.

Проведено експериментальні дослідження на макеті розробленої SCADA для віддаленого керування стендом, що імітує систему керування антенними пристроями [15]. Повна собівартість системи (без урахування ПЗ) не перевищує \$150, що робить її конкурентною на ринку аналогічних

пристроїв для потреб середнього та малого бізнесу.

Реалізація ІКК на основі OrangePi 2G IOT показала недостатню надійність платформи, тому на наступному етапі вирішено спробувати платформу на основі i.MX6 від Freescale.

Висновки. Запропоновано архітектуру інтегрованої універсальної системи віддаленого контролю та управління, основаної на використанні веб-технологій, що дозволяє розділити функції за рівнями системи та розмежувати функціональне навантаження кожного модуля системи. Проаналізовано структуру інтеграційно-комунікаційного контролера та сервера системи. Виділено та проаналізовано функції основних модулів системи. Реалізовано веб-SCADA, основні компоненти якої працюють на одноплатних комп'ютерах типу Raspberry Pi. Розроблену систему неможна застосовувати для контролю за технологічними процесами, де є підвищені вимоги до безпеки та безперебійної роботи.

Перспективами подальших досліджень є побудова розширення ІКК за рахунок додавання функцій ПЛК, що дозволить розв'язати проблему реального часу та підвищити надійність всієї системи.

Список літератури:

1. Zhou K. Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges / K. Zhou, T. Liu, L. Zhou // 12th Int. Conf. on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD). – Zhangjiajie, 2015. – P. 2147-2152.
2. Weyrich M. Reference Architectures for the Internet of Things / M. Weyrich, C. Ebert // IEEE Software. – 2016. – Vol. 33. – №. 1. – P. 112-116.
3. The Industrial Internet of Things Volume G1: Reference Architecture. – IIC, 2017. – 58 p. – IIC:PUB:G1:V1.80:20170131.
4. Karnouskos S. Architecting the next generation of service-based SCADA/DCS system of systems / S. Karnouskos, A.W. Colombo // 37th Ann. Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2011). – Melbourne, 2011. – P. 359-364.
5. SCADA Systems for Oil and Gas, 2018. – Режим доступу : <http://www.emerson.com/en-us/automation/control-and-safety-systems/scada-systems/scada-systems-for-oil-and-gas>.
6. Overvis, 2018. – Industrial equipment control through Internet. – Режим доступу: <https://www.overvis.com>.
7. Мнушка О.В. Хмарно-орієнтована мікро Scada моніторингу параметрів транспортних засобів спеціального призначення / О.В. Мнушка // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXV міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2017. – Харків: НТУ "ХПІ", 2017. – С. 98.
8. FAST/TOOLS SCADA and Enterprise Automation Solution (EAS), 2018. – Режим доступу: <https://www.yokogawa.com/us/solutions/products-platforms/control-system/supervisory-control-and-data-acquisition-scada/fast-tools>.
9. Cloud Based Oilfield Automation | PetroCloud, 2018. – Режим доступу: <http://petrocloud.com>.
10. Li D. Concept Design for a Web-based Supervisory Control and Data-Acquisition (SCADA) System / D. Li, Y. Serizawa, M. Kiuch // IEEE/PES Transmission and Distribution Conf. and Exhib. – 2002. – Vol. 1. – P. 32-36.

11. *Fu C.* The Application of Embedded System in Supervisory Control and Data Acquisition System (SCADA) Over Wireless Sensor and GPRS Networks / *C. Fu , Z. Ni* // 9th IEEE Int. Conf. on Anti-counterfeiting, Security and Identification (ASID). – IEEE, Xiamen, 2015. – P. 81-85.
12. *Polonia P.V.* A Resource Oriented Architecture for Web-Integrated SCADA Applications / *P.V. Polonia, L.F.B. Melgarejo, M.H. de Queiroz* // IEEE World Conference on Factory Communication Systems (WFCS). – Palma de Mallorca, 2015. – P. 1-8.
13. *Osmic N.* Design of a Simple Service Oriented Supervisory Control and Data Acquisition System / *N. Osmic, J. Velagic* // 59th Int. Symp. ELMAR-2017. – Zadar, Croatia, 2017. – P. 245-248.
14. *John A.* Automation of 11 kv substation using Raspberry Pi / *A. John, R. Varghese, S.S. Krishnan* // Int. Conf. on Circuit, Power and Comp. Technol. (ICCPCT). – Kollam, 2017. – P. 1-5.
15. *Мнушка О.В.* Адаптивна система керування позиціонуванням супутниковою антеною / *О.В. Мнушка, О.Я. Ніконов, В.М. Савченко* // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". 36. наук. праць. Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 32 (1141). – С. 120-127.

References:

1. Zhou, K., Liu, T., and Zhou, L. (2015), "Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges", *12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, Zhangjiajie, pp. 2147-2152.
2. Weyrich, M., and Ebert, C. (2016), "Reference Architectures for the Internet of Things," *IEEE Software*, Vol. 33, No. 1, pp. 112-116.
3. Industrial Internet Consortium, (2017), "The Industrial Internet of Things Volume G1: Reference Architecture", IIC, 58 p.
4. Karnouskos, S., and Colombo, A.W. (2011), "Architecting the next generation of service-based SCADA/DCS system of systems", *37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2011*, Melbourne, VIC, pp. 359-364.
5. SCADA Systems for Oil and Gas, (2018), available at: www.emerson.com/en-us/automation/control-and-safety-systems/scada-systems/scada-systems-for-oil-and-gas (accessed 24 March 2018).
6. Overvis – Industrial equipment control through Internet, (2018), available at: www.overvis.com (accessed 24 March 2018).
7. Mnushka, O.V., (2017), " Cloud-oriented micro Scada monitoring parameters of special-purpose vehicles ", *Information technology: science, technology, education, health: Theses of the XXV reports of the international scientific-practical conference MicroCAD-2017*, NTU "KhPI", Kharkiv, P. 98.
8. FAST/TOOLS SCADA and Enterprise Automation Solution (EAS), (2017), available at: www.yokogawa.com/us/solutions/products-platforms/control-system/supervisory-control-and-data-acquisition-scada/fast-tools (accessed 20 March 2018).
9. Cloud Based Oilfield Automation | PetroCloud, (2018), available at: <http://petrocloud.com> (accessed 10 March 2018).
10. Li, D., Serizawa, Y., and Kiuchi, V. (2002), "Concept design for a Web-based supervisory control and data-acquisition (SCADA) system", *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, Vol. 1, pp. 32-36.
11. Fu, C., and Ni, Z. (2015), "The application of embedded system in Supervisory Control and Data Acquisition System (SCADA) over wireless sensor and GPRS networks", *9th International Conference on Anti-counterfeiting, Security, and Identification (ASID)*, IEEE, Xiamen, pp. 81-85.

-
- 12.** Polonia, P.V., Melgarejo, L.F.B., and de Queiroz, M.H. (2015), "A resource oriented architecture for Web-integrated SCADA applications", *IEEE World Conference on Factory Communication Systems (WFCS)*, Palma de Mallorca, pp. 1-8.
- 13.** Osmić, N., and Velagić, D. (2017), "Design of a simple service oriented supervisory control and data acquisition system", *2017 International Symposium ELMAR*, Zadar, pp. 245-248.
- 14.** John, A., Varghese, R., Krishnan, S.S., Thomas, S., Swayambu, T.A., and Thasneem, P. (2017), "Automation of 11 kv substation using raspberry pi", *2017 International Conference on Circuit , Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, Kollam, pp. 1-5.
- 15.** Mnushka, O.V., Nikonov, O.Ya., Savchenko, V.M. (2015), "Adaptyvna systema keruvannia pozytsionuvanniam suputnykovoju", *Herald of NTU "KhPI". Series: Informatics and modeling*, Kharkov: NTU "KhPI", No 32 (1141), pp. 120-127.

Статтю представив д-р техн. наук, проф. ХНАДУ, зав каф. Клец Д.М.

Надійшла (received) 10.05.2018.

Mnushka Oksana, assistant
Kharkiv National Automobile and Highway University,
Str. Yaroslava Mudrogo, 25, Kharkov, Ukraine.
Tel.:(+38057)707-37-47, e-mail: mnushka.ov@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-7756-9260

УДК 004.4+007.51:681.518

Архітектура веб-орієнтованої SCADA-системи / Мнушка О.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 117 – 128.

Проаналізовано особливості застосування систем SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) та технологій Інтернету речей в умовах переходу промисловості до Індустрії 4.0. Показано, що використання веб-SCADA забезпечує більшість вимог до таких систем та є масштабованим рішенням на всіх її рівнях. Розроблено та реалізовано веб-SCADA, компоненти якої працюють на одноплатних комп'ютерах типу Raspberry Pi, визначені вимоги до технічних характеристик компонентів системи. Іл.: 5. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: web; SCADA; Інтернет речей; Індустрія 4.0; Raspberry Pi.

УДК 004.4 + 007.51: 681.518

Архитектура веб-ориентированной SCADA-системы / Мнушко О.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – №. 24 (1300). – С. 117 – 128.

Проанализированы особенности применения систем SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) и технологий Интернета вещей в условиях перехода промышленности к Индустрии 4.0. Показано, что использование веб-SCADA обеспечивает большинство требований к таким системам и является масштабируемым решением на всех ее уровнях. Разработана и реализована веб-SCADA, компоненты которой работают на одноплатных компьютерах типа Raspberry Pi, определены требования к техническим характеристикам компонентов системы. Ил.: 5. Библиогр.: 15 назв.

Ключевые слова: web; SCADA; Интернет вещей; Индустрия 4.0; Raspberry Pi.

UDC 004.4+007.51:681.518

The architecture of a web-based SCADA system / Mnushko O.V. // Herald of NTU "KhPI". Series: Informatics and modeling. - Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – No. 24 (1300). – P. 117 – 128.

The specifics of the application of SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) systems and information technologies based on Internet of things in conditions of industry transition to Industry 4.0 are analyzed. It is shown that the use of web SCADA provides the majority of requirements for such systems and is a scalable solution at all its levels. A web-based SCADA was developed and implemented, the components of which operate on single-board computers such as Raspberry Pi, requirements for the technical characteristics of the system components are defined. Figs.: 5. Refs.: 15 titles.

Keywords: web; SCADA; Internet of things; Industry 4.0; Raspberry Pi.

Інформаційні технології

УДК 519.246.8

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.24.11

И. В. АНТОНОВА, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ",

Н. А. ЧИКИНА, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

СТРУКТУРНО-ЛИНГВИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

В работе рассматриваются вопросы, связанные с применением структурно-лингвистического подхода к анализу временных рядов, характеризующих динамику заболеваемости в Украине различными кожными патологиями. Нечеткое моделирование реализуется на основе анализа нечетких тенденций временного ряда. Такая модель позволяет получить качественную информацию о динамике показателей для использования ее в задачах прогнозирования. Ил.: 2. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: структурно-лингвистический подход; временной ряд; динамика заболеваемости; нечеткое моделирование; анализ нечетких тенденций, прогнозирование.

Постановка проблемы. Как правило, динамика социально-биологических систем характеризуется слабоструктурированным случайным процессом, а соответствующие им временные ряды (ВР) обладают высокой степенью неопределенности. Одной из причин этой неопределенности является слабовыраженная или отсутствующая тенденция в динамике развития. При статистическом подходе к моделированию таких ВР не удастся построить модель, которая адекватно описывала имеющийся ВР и давала бы приемлемую точность прогнозирования. Еще один недостаток статистических моделей состоит в том, что такие модели не предполагают лингвистической интерпретации как самих данных, так и прогнозных значений. Уровень требований, предъявляемых к результатам анализа ВР с высокой степенью неопределенности, способствует развитию нечеткого подхода к задаче прогнозирования. В случаях, когда прогнозное значение невозможно получить с требуемым уровнем точности, становится важной с практической точки зрения информация об ожидаемых тенденциях в динамике системы. Это делает актуальным анализ ВР с применением структурно-лингвистического подхода, реализующего анализ нечетких тенденций.

Анализ литературы. В представленной работе рассматриваются вопросы, связанные с анализом временных рядов, характеризующих динамику заболеваемости в Украине различными кожными патологиями. Источником информации о состоянии здоровья населения являются данные, содержащиеся в официальной статистической отчетности МОЗ

© И.В. Антонова, Н.А. Чикина, 2018

Украины [1]. В исследованиях [2] отмечалось отсутствие тренда в динамике показателей заболеваемости некоторыми кожными патологиями, что делает практически невозможным прогнозирование уровня заболеваемости статистическими методами.

Наличие указанных свойств в поведении ВР, описывающего динамику объекта изучения, определяет причины, по которым исследование рядов проводится методами нелинейной динамики (фрактальная геометрия, теория хаоса [3, 4] и др.). Наиболее известным приложением теории нелинейных систем с хаотическим поведением является прогнозирование динамики порождаемых ими ВР.

Обозначенная авторами проблематика тесно связана с задачами извлечения знаний из ВР на основе интеллектуальных технологий. Нечеткие модели ВР не претендуют на высокую точность прогнозирования. Они ориентированы на достаточно простое получение качественной информации о динамике изучаемой системы.

Нечеткое моделирование поведения сложных систем по имеющемуся ВР базируется на модели нечеткого динамического процесса, получившей название нечеткий ВР (НВР). Математическую основу НВР составляет, в частности, знаменитая теорема FAT (Fuzzy Approximation Theorem), доказанная Kosko B., в соответствии с которой любая функциональная зависимость, заданная на компактном множестве, может быть аппроксимирована нечеткой моделью [5]. Практически одновременно в [6] Wong L. показал, что нечеткие модели вида "Если-То" являются универсальным аппроксиматором, т.е. модель может приближать любую непрерывную функцию с произвольной точностью. Однако, доказательства аппроксимирующих свойств нечетких систем являются чисто теоретическими, поскольку не дают конструктивного метода построения нечеткой модели с требуемой точностью. Лингвистическим нечетким правилам соответствуют аппроксимирующие нечеткие модели Мамдани, точность в которых может быть повышена при условиях, указанных в [7].

Song Q. и Chissom B., Sah M. и Degtiarev K.Y. в работах [8, 9] предложили прогнозные модели НВР первого порядка, нечеткие значения которого представляют фазифицированные первые разности исходного ВР. Таким образом был введен в изучение новый объект НВР – нечеткая тенденция, выражающая изменения в динамике системы в нечетких значениях ВР.

Целью настоящих исследований является изучение вопросов, связанных с построением модели временного ряда на основе анализа нечетких тенденций, позволяющей получить качественную информацию

о динамике показателя заболеваемости некоторым классом кожных патологий в Украине для использования ее в задачах прогнозирования.

Основной раздел. Под моделью ВР будем понимать формализованную процедуру, позволяющую по прошлым значениям $x(t_i)$, $i = \overline{1, n}$ ВР прогнозировать его будущие значения $Y(t)$, $t > t_n$.

Метод представления ВР в виде НВР основан на предположении о реальной возможности построения лингвистической интерпретации значений $x(t_i)$ $i = \overline{1, n}$ ВР, соответствующей понятию нечеткого множества. При этом НВР формируется в результате интервального качественного оценивания уровней ВР. Изменения в НВР рассматриваются как результат значимого или незначимого влияния факторов, в общем случае исследователю неизвестных. Значимые влияния факторов приводят к качественному изменению (нечетким приращениям) поведения ВР, которые получили название нечеткие тенденции.

Моделирование таких нечетких объектов, как значения исходного ВР и нечетких тенденций, основано на следующих положениях [10]:

- 1) модель НВР представлена распределением нечеткости с помощью лингвистической переменной с заданным количеством нечетких термов;
- 2) результат моделирования ВР: НВР значений (а) и НВР нечетких тенденций (б);
- 3) каждому значению ВР (а) и (б) соответствует определенный нечеткий терм.

Нечеткая тенденция содержит информацию о ВР, выраженную в значениях лингвистической переменной, таких как "Рост", "Снижение", "Стабильность" и др. Последовательность нечетких тенденций НВР порождает НВР с нечеткой тенденцией.

Пусть задан скалярный эквидистантный временной ряд $\{x(t_i)\}_{i=1}^n$, $x(t_i) \in X \subset R$, $i = \overline{1, n}$, измерения которого $x(t_i)$ в моменты наблюдений t_i , $i = \overline{1, n}$, характеризуют заболеваемость в Украине некоторым классом кожных патологий [1].

Главной частью модели прогноза НВР является база знаний, получаемая на основе анализа и обработки имеющихся данных в ВР $X(t) = \{x(t_i)\}_{i=1}^n$.

Для нечеткой входной переменной $X(t)$ – уровня заболеваемости – определим терм-множество со значениями: низкий (Н), средний (С),

высокий (В). Для прогнозируемого (выходного) параметра $Y(t)$, который также является нечеткой переменной, определим пятиуровневую градацию с таким терм-множеством: значительное уменьшение (ЗУ), уменьшение (У), стабильность (С), рост (Р), значительный рост (ЗР). Такой уровень градации значений выходного параметра обеспечивает достаточный уровень дифференциации прогноза.

Нечеткие шкалы терм-значений $X(t)$ изучаемого показателя динамики заболеваемости и терм-значений прогнозируемого показателя $Y(t)$ строятся на основе экспертных оценок.

Для иллюстрации метода обнаружения нечетких тенденций выберем ВР, характеризующий уровень заболеваемости в Украине различными кожными патологиями, изображенный на рис. 1.

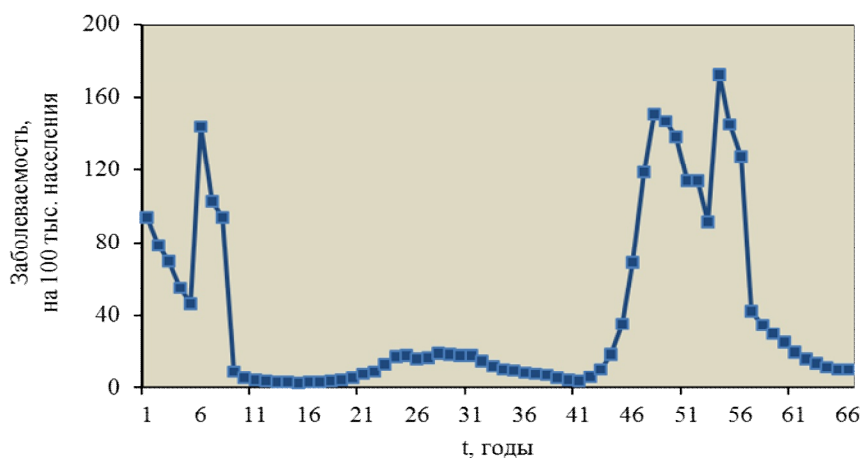


Рис. 1. Динамика показателя заболеваемости кожными патологиями в Украине

Алгоритм обнаружения нечетких тенденций НВР, используемый авторами, состоит в следующем [11]. Интервал наблюдения ВР с помощью нечетких ассоциативных правил разбивается на m интервалов ω_k , $k = \overline{1, m}$ монотонности $[t_{i_k}, t_{i_{k+1}}]$, при этом $t_{i_1} = t_1$, а $t_{i_{m+1}} = t_n$, т.е. интервалов его монотонного убывания или возрастания. Обозначим через $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_m$ длины интервалов монотонности, т.е. $\Delta_k = t_{i_{k+1}} - t_{i_k}$, $k = \overline{1, m}$.

На каждом из этих интервалов $\omega_k (k = \overline{1, m})$ отрезок ВР аппроксимируется прямой $T_k (k = \overline{1, m})$.

Тангенс угла наклона прямой T_k к положительному направлению оси OX характеризует величину тренда ВР на участке ω_k , длина Δ_k участка ω_k монотонности ВР – его продолжительность. Один из вариантов такого разбиения представлен на рис. 2.

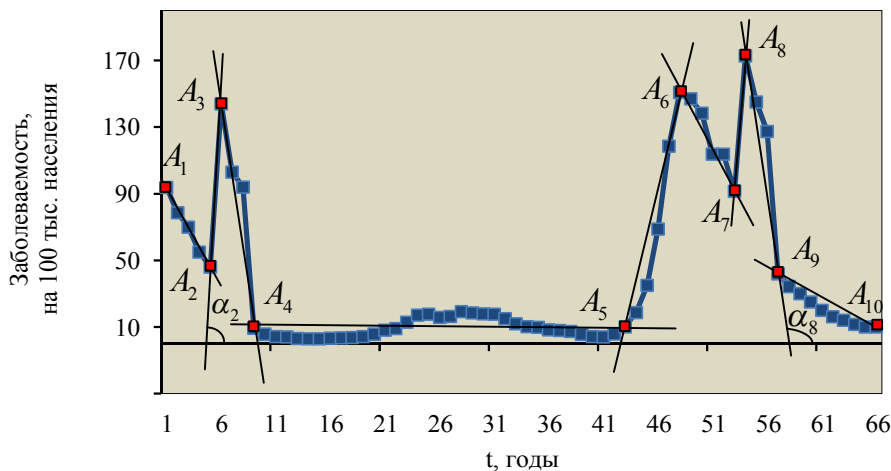


Рис. 2. Разбиение ВР на интервалы монотонности и соответствующие им аппроксимации прямыми линиями

Для формализации введенных признаков определим нечеткие переменные – "Тренд" и "Продолжительность". Нечеткой переменной "Тренд" соответствуют нечеткие термы $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ – тангенсы углов наклона прямых T_k , $k = \overline{1, m}$, а нечеткой переменной "Продолжительность" – нечеткие термы $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_m$.

Единицей представления информации о ВР на каждом промежутке монотонности $[t_{i_k}, t_{i_{k+1}}]$, $k = \overline{1, m}$ является нечеткое высказывание вида:

$$I_k(t_{i_k}, t_{i_{k+1}}) = (Tr(t_{i_k}, t_{i_{k+1}}) = \alpha_k) \cap (t_{i_{k+1}} - t_{i_k} = \Delta_k). \quad (1)$$

Смысл этого высказывания состоит в следующем: на временном интервале $[t_{i_k}, t_{i_{k+1}}]$ с нечеткой продолжительностью Δ_k наблюдается тренд ВР с нечетким значением α_k . Это высказывание имеет также и геометрическую интерпретацию: информация о ВР представляет собой

нечеткое множество векторов $\overrightarrow{A_{i_k} A_{i_{k+1}}}$, характеризующих тренд временного ряда на интервалах $[t_{i_k}, t_{i_{k+1}}]$, $k = \overline{1, m}$.

Прогнозирование НБР осуществляется на основе алгоритма нечеткого логического вывода. База знаний формируется по промежуткам ω_k , $k = \overline{1, m}$ интервала наблюдения $[t_1, t_n]$. Единицей представления знаний в модели являются нечеткие правила вида:

$$\text{"Если } I_1 \text{ и } I_2 \text{ и } \dots \text{ и } I_m, \text{ то } Y(t_p) = I_{m+1}(t_n, t_p)\text{"}, \quad (2)$$

где I_k , $k = \overline{1, m+1}$ – нечеткое высказывание вида (1), t_p – точка прогноза.

Следует отметить, что наибольшими проблемами исследователя в реализации алгоритма нечетких тенденций являются выбор интервала наблюдения ВР, в наибольшей степени характеризующего динамику изучаемой системы, и выбор точек изменения нечетких тенденций.

Выводы. Идея использования аппарата нечеткой логики является перспективной для оценки информации, содержащейся во ВР. Метод прогнозирования нечетких тенденций ВР динамики показателей заболеваемости различными кожными патологиями в Украине обеспечивает получение более точных результатов прогноза и может быть рекомендован для проведения краткосрочных прогнозов.

Моделирование ВР с нечеткими тенденциями позволит прогнозировать не только числовые значения ВР, но и направления их изменения, а также получить информацию о поведении ВР в лингвистической форме.

Такой подход позволит обнаружить новые закономерности изучаемого случайного процесса и извлечь из ВР информацию, недоступную другим подходам к моделированию.

Список литературы:

1. Показники лікувально-профілактичної допомоги хворим шкірними і венеричними захворюваннями в Україні у 2015 році / відповідальний за випуск М. В. Голубчиков; ДЗ "Центр медичної статистики МОЗ України". – К., 2016. – 113 с.
2. Волкославская В.Н. О квазипериодичности в динамике заболеваемости сифилисом и основных направлениях организации борьбы с ИППП в Украине / В.Н. Волкославская, А.Л. Гутнев, Н.А. Чикина // Труды науч.-практ. конф. "Актуальные проблемы дерматологии и венерологии". – Одесса: ОГМУ, 2003. – С. 25-26.
3. Антонова И.В. Применение методов фрактального анализа к исследованию временных рядов / И.В. Антонова, Н.А. Чикина // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2015. – № 32 (1141). – С. 4-10.
4. Антонова И.В. Применение характеристик квазициклов фазовых портретов в предпрогножном анализе временных рядов / И.В. Антонова, Н.А. Чикина // Вестник

- НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2017. – № 21 (1243). – С. 5-13.
5. Kosko B. Fuzzy Systems as Universal Approximators / B. Kosko // IEEE Trans. on Computers, 1994. – Vol. 43. – № 11. – P. 1329-1333.
6. Wang L.X. Fuzzy systems are universal approximators / L.X. Wang // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems. San Diego, 1992. – P. 1163-1169.
7. Кукса П.П. Обеспечение точности в нечетких системах / П.П. Кукса // Информатика и системы управления в XXI веке. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – С. 152-156.
8. Song, Q. Fuzzy time series and its models / Q. Song, B. Chissom // Fuzzy sets and Systems, 1993. – № 54. – P. 269-273.
9. Sah M. Forecasting Enrollment Model Based on First Order / M. Sah, K.Y. Degtiarev // Proct. Int. Conf. Computational Intelligence (ICCI), 2004. – P. 375-378.
10. Афанасьева Т.В. Моделирование нечетких тенденций временных рядов / Т.В. Афанасьева. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 215 с.
11. Тукаева З.М. Модель прогнозирования нечетких данных для решения бизнес задач предприятий ТЭК / З.М. Тукаева, И.З. Мухаметзянов // Управление экономическими системами: электронный научный журнал, 2013. – № 56, available at: www.uecs.ru/uecs56-562013/item/2299-2013-08-27-07-57-10 (accessed data 02.05.2018).

References:

1. Golubchikov, M.V. (2016), "*Indexes of medical and preventive help to the patients with skin and venereal diseases at Ukraine in 2015*", state establishment "Center of medical statistics of ministry of health Ukraine", Kyiv, 113 p.
2. Volkoslavskaya, V.N., Gutnev, A.L., and Chikina, N.A. (2003), "About quasi periodicity in the dynamics of the syphilis morbidity and basic directions of organization of fight with IPPP in Ukraine", *Actual problems of dermatology and venereology*, Proceedings of the Science and Practical Conference, Odessa, pp. 25-26.
3. Chikina, N.A., and Antonova, I.V. (2015), "Application of fractal analysis methods to the study of time series", *Herald of NTU "KhPI", Series: Informatics and modeling*, Kharkov, NTU "KhPI", No 32 (1141), pp. 4-10.
4. Chikina, N.A., and Antonova, I.V. (2017), "Application of quasi-cycle characteristics of phase portraits in the prediction of time series analysis", *Herald of NTU "KhPI", Series: Informatics and modeling*, Kharkov, NTU "KhPI", No 21 (1243), pp. 5-13.
5. Kosko, B. (1994), "Fuzzy Systems as Universal Approximators", *IEEE Trans. on Computers*, Vol. 43, No. 11, pp. 1329-1333.
6. Wang L. X. (1992), "Fuzzy systems are universal approximators", *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, San Diego, pp. 1163-1169.
7. Kouxa, P.P. (2004), "Approximation Accuracy of Fuzzy Systems", *Informatics and Control Systems in 21st century*, Moscow, BMSTU Press, pp. 152-156.
8. Song, Q., and Chissom, B. (1993), "Fuzzy time series and its models", *Fuzzy sets and Systems*, No 54, pp. 269-273.
9. Sah, M., and Degtiarev, K.Y. (2004), "Forecasting Enrollment Model Based on First Order", *Proct. Int. Conf. Computational Intelligence (ICCI)*, pp. 375-378.
10. Afanas'yeva, T.V. (2013), *Simulation of fuzzy tendencies of time series*, Ulyanovsk, 215 p.
11. Tukaeva, Z.M. and Mukhametzyanov, I.Z. (2013), "Model of forecasting of fuzzy data for a decision of business tasks of TEK enterprises", *Management of the economic systems: electronic scientific magazine*, available at: www.uecs.ru/uecs56-562013/item/2299-2013-08-27-07-57-10 (accessed data 02.05.2018).

*Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ"
Поворознюк А.И.*

Поступила (received) 07.05.2018

Повторно 14.05.2018

Antonova Irina, PhD Tech., Associate Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (057) 707-60-87, e-mail: antonova2601@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-1268-8223

Chikina Natalia, PhD Tech., Associate Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (057) 707-66-93, e-mail: nachikina56@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-1746-1271

УДК 519.246.8

Структурно-лінгвістичний підхід до аналізу часових рядів / Антонова І.В., Чікіна Н.О. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 130 – 138.

У роботі розглядаються питання, пов'язані із застосуванням структурно-лінгвістичного підходу до аналізу часових рядів, що характеризують динаміку захворюваності в Україні різними шкірними патологіями. Нечітке моделювання реалізується на основі аналізу нечітких тенденцій часового ряду. Така модель дозволяє отримати якісну інформацію про динаміку показників для використання її в завданнях прогнозування. Іл.: 2. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: структурно-лінгвістичний підхід; часовий ряд; динаміка захворюваності; нечітке моделювання; аналіз нечітких тенденцій; прогнозування.

УДК 519.246.8

Структурно-лингвистический подход к анализу временных рядов / Антонова И.В., Чикина Н.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 130 – 138.

В работе рассматриваются вопросы, связанные с применением структурно-лингвистического подхода к анализу временных рядов, характеризующих динамику заболеваемости в Украине различными кожными патологиями. Нечеткое моделирование реализуется на основе анализа нечетких тенденций временного ряда. Такая модель позволяет получить качественную информацию о динамике показателей для использования ее в задачах прогнозирования. Ил.: 2. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: структурно-лингвистический подход; временной ряд; динамика заболеваемости; нечеткое моделирование; анализ нечетких тенденций; прогнозирование.

UDC 519.246.8

Structurally linguistic method of the analysis of time series / Antonova I.V., Chikina N.A. // Herald of NTU "KhPI". Series: Informatics and modeling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – No. 24 (1300). – P. 130 – 138.

The problems, linked with the use of the structurally linguistic method of the analysis of time series, which characterize the morbidity dynamics in Ukraine by different skin pathologies, are considered. Fuzzy simulation is realized on the basis of fuzzy tendencies analysis of time series. Such model allows getting quality information about the dynamics of the indexes to use it in the tasks of forecasting. Figs.: 2. Refs.: 11 titles.

Keywords: structurally linguistic method; time series; dynamics of morbidity; fuzzy simulation; analysis of fuzzy tendencies; forecasting.

УДК 51–74:66.01

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.24.12

А. О. БОБУХ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ",
О. М. ДЗЕВОЧКО, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ",
А. М. ПЕРЕВЕРЗЄВА, асп., НТУ "ХПІ"

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЙ

Виконаний аналіз методів параметричної ідентифікації технологій може бути використаний для отримання їх адекватного математичного опису із періодичним коригуванням алгоритмів за відомими вхідними і вихідними параметрами в умовах перешкод та ефективного управління технологіями. Одними із найкращих є знакові алгоритми, на роботу яких практично не впливають перешкоди на вході технологій. Лл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: параметрична ідентифікація; технологія; коригування; алгоритм; перешкода; ефективне управління; знакові алгоритми.

Постановка проблеми. При дослідженні різних технологій зустрічаються задачі обробки експериментальних даних з метою вилучення з них залежностей, що описують різні процеси і явища. Ці залежності представляються у вигляді математичних моделей, які не потребують фізичної реалізації, а зводяться до чисто математичної задачі пошуку екстремуму функціонала заданого виду. Тобто, проблема математичного опису технологій зводиться до проблеми отримання інформації про стан технологій, оцінювання їх параметрів і характеристик, інакше цю проблему називають ідентифікацією технологій. Методи розробки математичних моделей (ідентифікації) розбиваються на три групи:

1) Методи регресійного аналізу: найменших квадратів; множинної регресії; виділення трендів; кореляційного аналізу.

2) Методи структурної ідентифікації: усіх регресій; покрокової регресії; Ефрімсона; групового врахування аргументів; частних кореляцій; множинної кореляції.

3) Методи параметричної ідентифікації: рекурентний найменших квадратів; стохастичної апроксимації; Робінсоно-Монро; Качмажа; Нагумо-Ноди.

Можливість використання кожного методу ідентифікації залежить від технологічної готовності технологій до застосування цих методів для підвищення техніко-економічних показників. Під технологічною готовністю технологій розуміють насичення його технологічним обладнанням, для якого за допомогою сучасних приладів контролю

параметрів та мікропроцесорних контролерів можна отримати всю необхідну інформацію для вирішення, в першу чергу, завдань управління і пошуку оптимальних режимів, які відповідають заданим критеріям управління. Для вирішення таких завдань потрібні величезні капітальні вкладення, а також наявність хоча б попередніх технічних рішень з ідентифікації технологій. При цьому необхідно провести статистичний аналіз основних збурень і параметрів досліджуваної технології, щоб віднести їх до конкретного класу випадкових процесів.

Все це обумовлює необхідність періодичної корекції параметрів отриманої математичної моделі.

Аналіз літератури. Рішення задач ідентифікації на основі методу найменших квадратів (МНК) дозволяє отримати значення параметрів, використовуваних в якості початкових при роботі алгоритмів ідентифікації [1 – 8]. Це дозволяє найбільш повному використанню інформації про технологію, істотно поліпшити якість інформації, а, отже, і управління, забезпечуючи оперативність зміни керуючих впливів [9, 10].

В загальному вигляді задачу параметричної ідентифікації технології можна описати рівнянням [1 – 8]

$$y_n = h_n^T x_n + \varepsilon_n, \quad (1)$$

де y_n – вихідний (керований) параметр; $x_n = (x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{Nn})^T$ – вектор вхідних (керуючих) параметрів; $h_n = (h_{1n}, h_{2n}, \dots, h_{Nn})^T$ – розшукувані значення вектору параметрів технології; ε_n – перешкоди на виході; T – символ транспонування; $n = 1, 2, \dots, n$ – дискретний час.

Задача параметричної ідентифікації полягає у визначенні невідомого вектора параметрів h_n за результатами вимірювань вхідних x_n і вихідних y_n параметрів і зводиться, в загальному випадку, до мінімізації деякого наперед обраного функціоналу якості.

Відомо багато методів вирішення цього завдання в умовах нормального функціонування технології. Найбільший інтерес представляють методи, засновані на використанні рекурентних алгоритмів. Слід зазначити, що більшість алгоритмів пов'язано з рекурентною формою МНК [3].

Мета статті – виконати аналіз методів параметричної ідентифікації для отримання адекватного математичного опису технологій із періодичним коригування алгоритмів за відомими вхідними і вихідними параметрами технологій та ефективного управління ними.

Матеріали та результати аналізу. Практична реалізація рекурентних алгоритмів супроводжується досить великим обсягом обчислень, викликаних необхідністю використання великого обсягу інформації. Інший різновид алгоритмів, що використовують не всю попередню інформацію, а лише частину її, дозволяє обійти ці труднощі. До таких алгоритмів в першу чергу відносяться алгоритми, засновані на ідеях стохастичною апроксимації [2] у вигляді

$$k_n = k_{n-1} + \Gamma_n (y_n - k_{n-1}^T x_n) x_n, \quad (2)$$

де при відповідному виборі матриці коефіцієнтів Γ_n буде забезпечуватися збіжність послідовності $\{k_n\}$ – векторів значень оцінок параметрів моделі технології на $(n - 1)$ -му та n -му кроках, за правилом (2) до h , а y_n та x_n дивись (1).

Найчастіше ця матриця обирається у вигляді $\Gamma_n = \gamma_n I$, де I – одинична матриця, γ_n – скалярний коефіцієнт. Збіжність процедури (2) з ймовірністю одиниця та в середньоквадратичному доводиться при досить широких припущеннях щодо коефіцієнтів γ_n , вимагається тільки збіжність і розбіжність відповідних рядів, члени яких залежать від γ_n , тобто $\sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n = \infty$, $\sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n^2 < \infty$, $\lim_{n \rightarrow \infty} \gamma_n = 0$.

Слід зазначити, що вибір γ_n істотно впливає на властивості алгоритму (2), оскільки спроможність процедури і швидкість її збіжності визначаються цим єдиним вільним параметром. При практичній реалізації ітераційних алгоритмів ідентифікації найважливішим показником їх працездатності є швидкість збіжності, що впливає на тривалість процесу ідентифікації.

Таким чином, параметр γ_n повинен вибиратися із умов найбільш швидкої збіжності алгоритму.

Швидкість збіжності (Q_n) алгоритму характеризується величиною

$$Q_n = \|\theta_{n-1}\|^2 - \|\theta_n\|^2, \quad (3)$$

де $\theta_n = k_n - h$ (різниця між значенням оцінюючого і розшукуваного векторів), $\|\theta_n\|^2 = \sum_{i=1}^N \theta_{in}^2$.

Для збіжності алгоритму необхідно виконання нерівності

$$Q_n > 0. \quad (4)$$

У загальному випадку через випадковість величин, що входять в алгоритми (корисних сигналів і перешкод, а часто і h), якість оцінки швидкості збіжності процедур доцільно характеризувати величиною

$$\tilde{Q}_n = M \left\{ \|\theta_{n-1}\|^2 - \|\theta_n\|^2 \right\}, \quad (5)$$

де M – символ математичного очікування.

Будемо користуватися критерієм (5) при дослідженні роботи алгоритмів в умовах перешкод, тобто в тих випадках, коли властивості алгоритмів будуть в значній мірі залежати від статистичних властивостей перешкод. У разі відсутності перешкод властивості алгоритму легше досліджувати за допомогою (5).

Розглянемо найбільш простий в обчислювальному відношенні алгоритм Роббінса-Монро [1, 7], що визначається з (5) заміною матриці

Γ_n на $\frac{\gamma_0}{n}$, де γ_0 – константа. Визначимо для цього алгоритму величину

Q_n , що характеризує спадання помилки визначення розшукуваних коефіцієнтів на кожному кроці ітераційного процесу ідентифікації. Для цього відніmemo з обох частин (2) h , отримаємо

$$\theta_n = \theta_{n-1} - \frac{\gamma_0}{n} (\theta_{n-1}^T x_n) x_n. \quad (6)$$

Зведемо (6) в квадрат

$$\|\theta_n\|^2 = \|\theta_{n-1}\|^2 - 2 \frac{\gamma_0}{n} (\theta_{n-1}^T x_n)^2 + \frac{\gamma_0^2}{n^2} (\theta_{n-1}^T x_n)^2 \|x_n\|^2,$$

звідки визначимо

$$Q_n = \frac{\gamma_0}{n} (\theta_{n-1}^T x_n)^2 \left[2 - \frac{\gamma_0}{n} \|x_n\|^2 \right]. \quad (7)$$

Із (7) видно, що для виконання умови (4) необхідно, щоб

$$0 < \gamma_0 < \frac{2n}{\|x_n\|^2}, \quad (8)$$

тобто для алгоритму Роббінса-Монро Q_n залежить від величини вхідного параметру, параметру γ_0 та може мати різні знаки при довільному наперед обраному γ_0 . Таким чином, залежність Q_n від $\|x_n\|^2$ та γ_0 може призводити до порушення умов збіжності алгоритму при малих n та до появи великих коливань на початку процесу ідентифікації.

Визначимо для цього алгоритму оптимальне значення γ_0^{opt} , що забезпечує максимальне спадання помилки ідентифікації на кожному кроці ітераційного процесу налаштування коефіцієнтів. Для цього виконаємо диференціювання (7) за γ_0 і прирівняємо отриманий вираз нулю

$$\frac{\partial Q_n}{\partial \gamma_0} = \frac{2}{n} (\theta_{n-1}^T x_n)^2 - 2 \frac{\gamma_0}{n^2} (\theta_{n-1}^T x_n)^2 \|x_n\|^2 = 0, \quad (9)$$

Звідки

$$\gamma_0^{opt} = \frac{n}{\|x_n\|^2}. \quad (10)$$

Дійсно, отримане значення γ_0^{opt} максимізує Q_n оскільки $\frac{\partial^2 Q_n}{\partial \gamma_0^2} = \frac{2}{n^2} (\theta_{n-1}^T x_n)^2 \|x_n\|^2 < 0$. Підстановка (10) в алгоритм (2) призводить до наступної процедури

$$k_n = k_{n-1} + \frac{(y_n - k_{n-1}^T x_n) x_n}{\|x_n\|^2}, \quad (11)$$

відомої як алгоритм Качмажа [4, 9], найбільш швидкодіючий серед простих в обчислювальному відношенні алгоритмів (позначення дивись формули (1) та (2)). Виконаємо дослідження наступної модифікації цього алгоритму

$$k_n = k_{n-1} + \rho_n \frac{(y_n - k_{n-1}^T x_n) x_n}{\|x_n\|^2}, \quad (12)$$

де $0 < \rho_n < 2$. Геометрична ілюстрація роботи модифікованого алгоритму (12) приведена на рис. 1, де показаний процес переходу значень коефіцієнтів із точки k_{n-1} в точку k_n . Залежно від вибору ρ_n ці значення потрапляють: 1) в точку k_n'' , якщо $\rho_n < 1$; 2) в точку k_n' , якщо $\rho_n = 1$; 3) в точку k_n''' , якщо $\rho_n > 1$. При цьому:

$$\begin{aligned} \|\theta_n'\|^2 &< \|\theta_n''\|^2 < \|\theta_{n-1}\|^2, & 0 < \rho_n < 1, \\ \|\theta_n'\|^2 &< \|\theta_n'''\|^2 < \|\theta_{n-1}\|^2, & 1 < \rho_n < 2. \end{aligned}$$

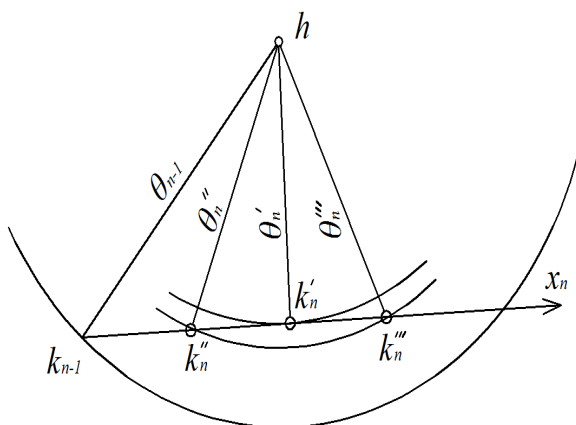


Рис. 1. Геометрична ілюстрація роботи модифікованого алгоритму, де показаний процес переходу з точки k_{n-1} в точку k_n .

Розглянуті вище алгоритми ідентифікації були отримані з умови мінімуму квадратичного критерію ідентифікації. Однак, як відомо, застосування такого критерію призводить до отримання алгоритмів, властивості яких значною мірою залежать від статичних характеристик корисних сигналів та перешкод. При цьому випадку необхідно скористатися модульним критерієм $|y_n - k_{n-1}^T x_n|$, мінімізація якого призводить до алгоритмів ідентифікації, що містить нелінійне перетворення вхідної величини $\text{sign } x_n$. Широко відомим алгоритмом цього класу є алгоритм Нагумо-Ноди [1 – 4]

$$k_n = k_{n-1} + \rho_n \frac{y_n - k_{n-1}^T x_n}{x_n^T \text{sign} x_n} \text{sign} x_n, \quad (13)$$

$$\text{де } \text{sign} x_n = \begin{cases} -1, & x_n < 0, \\ 0, & x_n = 0, \\ 1, & x_n > 0. \end{cases} \quad 0 < \rho_n < 2,$$

Знаковий алгоритм, що володіє найбільшою швидкістю збіжності (3) серед знакових алгоритмів, має вигляд

$$k_n = k_{n-1} + \rho_n \frac{\hat{y}_n - k_{n-1}^T \text{sign} x_n}{\|\text{sign} x_n\|^2} \text{sign} x_n, \quad (14)$$

$$\text{де } \hat{y}_n = h^T \text{sign} x_n; \quad \|\text{sign} x_n\|^2 = (\text{sign} x_n)^T \text{sign} x_n.$$

Істотною перевагою даного алгоритму є ще й те, що на його роботу практично не впливають перешкоди на вході технології x_n , якщо вони тільки не перевершують за величиною корисний сигнал. В інших же алгоритмах перешкоди, що накладаються на x_n , призводять до зміщення одержуваних оцінок.

Висновок. Виконаний аналіз методів параметричної ідентифікації технологій може бути використаний для отримання їх адекватного математичного опису із періодичним коригування алгоритмів за відомими входними і вихідними параметрами в умовах перешкод та ефективного управління технологіями. Приведений аналіз модифікованого алгоритму з геометричною ілюстрацією роботи при переході з точки k_{n-1} в точку k_n . Розглянутий знаковий алгоритм, що володіє найбільшою швидкістю збіжності серед знакових алгоритмів. Істотною перевагою цього алгоритму є ще й те, що на його роботу практично не впливають перешкоди на вході технологій.

Список літератури:

1. Советов Б.Я. Математическое моделирование / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высшая школа, 2001. – 343 с.
2. Kushner H.J. Stochastic Approximation and Recursive Algorithms and Applications. / H.J. Kushner, G.G. Yin. – New-York: Springer-Verlag-New-York-Inc., 2003. – 498 p.
3. Isermann R. Identification of Dynamic Systems / R. Isermann, M.: – Munchhof: Springer, 2011. – 454 p.

4. Жиров М.В. Идентификация и адаптивное управление технологическими процессами с нестационарными параметрами / М.В. Жиров, В.В. Макаров, В.В. Солдатов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 203 с.
5. Переверзева А.М. Розробка математичної моделі статички технології насичення очищеного розсолу газами виробництва соди / А.М. Переверзева, А.О. Бобух // Вісник НТУ "ХПІ". – Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 42 (1214). – С. 68-73.
6. Елисеева И.И. Статистика / И.И. Елисеева. – М.: ТК Велби, 2005. – 448 с.
7. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика / А.И. Кобзарь. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.
8. Kandethody M., Ramachandran Mathematical Statistics with Applications / M. Ramachandran Kandethody, P. Tsokos Chris. – Elsevier, 2014. – 848 с.
9. Richard C. Dorf. Modern control systems / C. Dorf Richard, H. Bishop Robert. – Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001. – 831 p.
10. Тюкин И.Ю. Адаптация в нелинейных динамических системах: монография / И.Ю. Тюкин, И.Ю. Терехов. – СПб.: ЛКИ, 2008. – 384 с.

References:

1. Sovetov, B.Ya., and Yakovlev, S.A. (2001), *Mathematical modeling*. High School, Moscow, 2001, 343 p.
2. Kushner, H.J., and Yin, G.G. (2003), *Stochastic Approximation and recursive Algorithms and Applications*. Springer-Verlag-New-York-Inc., New-York, 498 p.
3. Isermann, R., and Munchhof, M. (2011), *Identification of Dynamic Systems*. Springer, 454 p.
4. Zhiron, M.V., and Makarov, V.V. (2011), *Identification and adaptive control of technological processes with non-stationary parameters*., MGTU N.E. Bauman, Moscow, 203 p.
5. Pereverzieva, A.M., Bobuh, A.O. (2017), "Development of a mathematical model of static technologies purified brine saturation gas production of sod" // Herald of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies, Kharkov, No. 32 (1254), pp. 68-73.
6. Eliseeva, I.I (2005), *Statistics*. TK Velby, Moscow, 448 p.
7. Kobzar A.I. (2006), *Applied mathematical statistics*. Physical and mathematical literature, Moscow, 816 p.
8. Kandethody M., Ramachandran, and Chris P. Tsokos (2014), *Mathematical Statistics with Applications*. Elsevier, 848 p.
9. Richard C. Dorf, and Robert H. Bishop (2001), *Modern control systems*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 831 p.
10. Tjukin I.Ju., Terehov, V.A. (2008), *Adaptation in the nonlinear dynamic systems: monograph*, LKI, SPb, 384 p.

Статтю представив д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПІ" зав. каф. АТС та ЕМ Подустов М.О.

*Поступила (received) 07.05.2018
Повторно 20.05.2018*

Bobukh Anatoly, PhD Tech.,
National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute",
Str. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel. +38-096-233-47-96, e-mail: aabobukh@ukr.net
ORCID ID 0000-0002-3405-386X

Pereverzieva Alevtyna, postgraduate,
National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute",
Str. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel. +38-095-253-12-63 e-mail: pereverzieva_alya@ukr.net
ORCID ID 0000-0003-2072-2521

Dzevochko Alexander, PhD Tech.,
National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute",
Str. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel. +38-096-937-46-68. e-mail: sashadzevochko2@mail.ru
ORCID ID 0000-0002-1297-1045

УДК 517.1:004.942

Аналіз методів параметричної ідентифікації технологій / Бобух А.О., Дзевочко О.М., Переверзева А.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 24 (1300). – С . 139 – 148.

Виконаний аналіз методів параметричної ідентифікації технологій може бути використаний для отримання їх адекватного математичного опису із періодичним коригуванням алгоритмів за відомими входними і вихідними параметрами в умовах перешкод та ефективного управління технологіями. Одними із найкращих є знакові алгоритми на роботу, яких практично не впливають перешкоди на вході технологій. Ил.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: параметрична ідентифікація; технологія; коригування; алгоритм; перешкода; ефективне управління; знакові алгоритми.

УДК 517.1:004.942

Анализ методов параметрической идентификации технологий / Бобух А.А., Дзевочко А.М., Переверзева А.Н. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 139 – 148.

Выполненный анализ методов параметрической идентификации технологий может быть использован для получения их адекватного математического описания с периодической корректировкой алгоритмов с известными входными и выходными параметрами в условиях помех и эффективного управления технологиями. Одними из лучших являются знаковые алгоритмы на работу, которых практически не влияют помехи на входе технологий. Ил.: 1. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: параметрическая идентификация; технология; корректирование; алгоритм; помеха; эффективное управление; знаковые алгоритмы.

UDC517.1:004.942

Analysis of the methods of parametric identification of technologies / Bobukh A.A. Dzevochko A.M., Pereverzieva A.N. // Herald of NTU "KhPI". Series: Informatics and modeling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – № 24 (1300). – P. 139 – 148.

An analysis of the methods of parametric identification of technologies can be used to obtain an adequate mathematical description with periodic correction of algorithms with known input and output parameters under interference conditions and efficient technology control. One of the best are sign algorithms for work, which are practically not affected by input impediments. Figs.: 1. Refs.: 10 titles.

Keywords: parametric identification; technology; correction; algorithm; efficient technology control; sign algorithms.

УДК 004.942:045

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.24.13

Т. А. ГОНЧАРЕНКО, ст. викл., КНУБА, Київ,

В. М. МІХАЙЛЕНКО, д-р техн. наук, проф., зав. каф., Київ

ТЕОРЕТИКО-МНОЖИННИЙ ОПИС ПРОСТОРОВИХ ДАНИХ У СКЛАДІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ТЕРИТОРІЇ ПІД ЗАБУДОВУ

Розглянуто проблему спільного опису різнотипної просторової інформації в складі інформаційної моделі території під забудову та запропоновано концептуальну модель подання геооб'єктів, розташованих на поверхні будівельного майданчика. Для вирішення проблеми запропоновано застосування теоретико-множинного підходу для опису просторових даних, який подає в єдиному формалізованому вигляді множини різнотипних геооб'єктів, необхідних для побудови вищезазначеної моделі. Такий підхід відповідає сучасним вимогам інформаційного моделювання у будівництві – BIM-технології і дозволяє вирішувати завдання, пов'язані з підготовкою території під забудову, на новому технологічному рівні. Іл.: 2. Табл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: просторова інформація; інформаційна модель; територія під забудову; теоретико-множинний підхід; геооб'єкт; BIM-технологія.

Постановка проблеми. Однією із особливостей будівельної діяльності є те, що зведення будь-якого об'єкта будівництва прив'язане до земельного простору та починається з організації рельєфу території під забудову. Сучасні геодезичні, картографічні, фотограмметричні та дистанційні технології збору інформації дають змогу швидко та з необхідною точністю отримувати дискретні дані про поверхню рельєфу. Такі методи і підходи постійно вдосконалюються. Безліч типів джерел вихідних даних для створення моделі досліджуваної території спричинена розмаїттям способів отримання й організації первинних даних та їх похідних. Серед них – данні лазерного сканування, геодезичні (топографічні) вишукування тахометричної зйомки, фотограмметрична обробка фототеодолітних, аеро- і космічних знімків, альтиметрична зйомка рельєфу суші, промірні роботи та ехолотування підводного рельєфу акваторій водойм, радіолокаційна зйомка тощо [1, 2]. Різноманітними є і вторинні джерела даних про поверхню рельєфу, такі як топографічні карти і плани – топоплани, які можуть бути представлені як у векторному так і у растровому вигляді. Виникає проблема інтеграції різнотипної інформації, отриманої з різноманітних джерел даних про територію, відведену під забудову. Тому актуальною є задача формалізації опису інформації, отриманої з різнорідних джерел для побудови інформаційної моделі території під забудову та моделей

геооб'єктів, що входять до її складу.

Аналіз літератури. Аналіз характерних завдань, пов'язаних з організацією рельєфу території під забудову, виконаний у роботах [1 – 5], виявив три основних види просторових даних, робота з якими повинна підтримуватися можливостями сучасної інформаційної технології. Це традиційні цифрові моделі об'єктів, цифрові моделі для подання просторово-розподілених даних та моделі тривимірних об'єктів. В роботах [6 – 8] викладені основні методологічні принципи побудови цих моделей. Для розв'язання проблеми дослідження доцільно виділити основні з них. Це забезпечення концептуальної цілісності, адекватність завданням будівельного комплексу та відповідність сучасним BIM-моделям на уявлення моделі геопросторових даних. Відповідно до цих принципів інформаційна технологія повинна базуватися на єдиній моделі представлення просторових даних, мати достатню для розглянутих прикладних задач [9, 10] потужність і бути сумісною із провідними розробками по стандартизації BIM-технології.

Мета статті – застосування теоретико-множинного підходу для опису різнотипної просторової інформації для розробки інформаційної моделі території під забудову, який буде заснований на формалізації представлення геооб'єктів, що входять до її складу, і який дозволить описати моделі цих геооб'єктів в єдиній математичній формі.

Застосування теоретико-множинного підходу для опису просторових даних у складі інформаційної моделі території під забудову. Інформаційна модель території під забудову має вбирати інформацію про всі ресурси будівельного майданчика, такі як земельна ділянка, наявні будівлі та споруди, дороги, підземні та наземні комунікації, природне оточення тощо та відображати просторове розташування цих об'єктів відносно поверхні землі та один до одного. Як зазначалось вище, існують різноманітні джерела отримання та форми подання інформації про ці об'єкти. Для створення найбільш наближеною до реальності інформаційної моделі території під забудову необхідно забезпечити інтеграцію всіх типів даних, що входять до її складу. Вони можуть бути представлені у векторному, растровому форматі, а також у вигляді тріангуляційних поверхонь.

Інформаційна модель території під забудову M може бути описана наступним чином:

$$M = \{R_{\text{растр}}\} \cup \{V_{\text{вект}}\} \cup T_{\text{триан}}\}, \quad (1)$$

де $R_{\text{растр}}$ – растрова модель даних, що описує множину геооб'єктів, представлених у вигляді растрів. Дана модель уявлення просторових даних може бути використана для відображення супутникового знімка, креслення топографічного плану тощо (рис. 1а), її можна представити як сукупність комірок (Ncell), яку можна описати наступним відношенням:

$$R_{\text{растр}} = \{N_{\text{cell}}\}, \quad (2)$$

$T_{\text{триан}}$ – триангуляційна модель даних, може бути представлена у вигляді TIN-моделі (з нерегулярним розташуванням точок) або GRID-моделі (з регулярним розташуванням точок) поверхонь (рис. 1, в), які утворюються вершинами ($T_{\text{верш}}$), ребрами ($T_{\text{ребр}}$) та гранями ($T_{\text{гран}}$) в тривимірному просторі:

$$T_{\text{триан}} = \{T_{\text{верш}}, T_{\text{ребр}}, T_{\text{гран}}\}, \quad (3)$$

$V_{\text{вект}}$ – векторна модель даних, описує інформацію про геооб'єкти, розташовані на земельній ділянці (рис. 1, б).

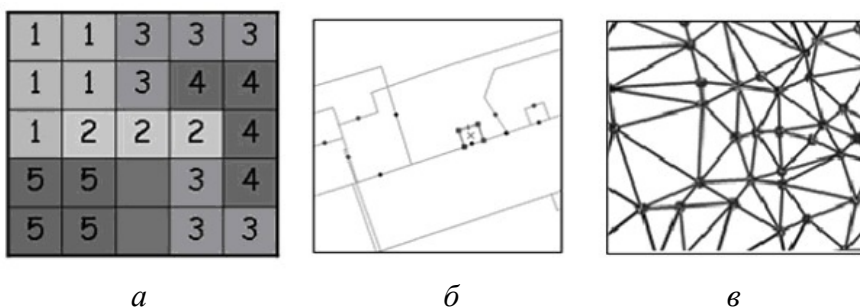


Рис. 1. Моделі даних території під забудову:

а – растрова; б – векторна; в – триангуляційна

Ці об'єкти зберігаються у вигляді класів просторових об'єктів і включають в себе просторову та атрибутивну (непросторову) інформацію:

$$V_{\text{вект}} = \{A_j, I_j\}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (4)$$

де n – кількість геооб'єктів, розташованих на поверхні території під забудову; A_j – множина атрибутивної (непросторової) інформації, яка відображає якісні та кількісні характеристики j -геооб'єкта:

$$A_j = \{a_i\}_j, \quad i = \overline{1, m_a}, \quad (5)$$

де m_a – кількість атрибутів для j -геооб'єкта, I_j – множина просторової інформації, характеризує розташування j -геооб'єкта на території забудови згідно просторової прив'язки

$$I_j = \{X, Y, Z\}_j. \quad (6)$$

Векторним способом подання просторових даних, або векторною моделлю, називають спосіб формалізації просторових даних, що ґрунтується на використанні набору графічних об'єктів, або "графічних примітивів" [4].

Для створення векторної моделі території під забудову, яка б відповідала сучасним вимогам інформаційного моделювання в будівництві – ВІМ-технології, необхідно атрибутивну інформацію певного геооб'єкту прив'язати до його метричної (просторової) компоненти. Детально застосування ВІМ-вимог до створення таких моделей було розглянуто раніше в роботі [3]. Для вирішення цієї задачі пропонується застосувати теоретико-множинний підхід для формалізованого подання різнотипних геооб'єктів, який дозволяє описати геооб'єкти в єдиному уніфікованому вигляді.

В залежності від геометричної форми реального геооб'єкта просторова інформація може бути представлена у вигляді точкових (7), полілінійних (8), полігональних (9) або комплексних моделей (10).

Розглянемо більш детально формалізацію кожного виду моделі в єдиній математичній формі.

1) Точковий об'єкт – це нуль-вимірний об'єкт, який розташовано в одній планарній точці простоту. Такою моделлю можуть бути представлені такі об'єкти поверхні будівельного майданчика, як дерево, стовп, люк та ін. Множину точкових геооб'єктів P пропонується формалізувати наступним відношенням

$$P = \left\{ \left\{ (x_j^p, y_j^p, z_j^p) \right\} \right\}_j \quad j = \overline{1, n_p}, \quad (7)$$

n_p – кількість точкових об'єктів; (x_j^p, y_j^p, z_j^p) – геометричні координати j -го точкового об'єкту; A_j^p – множина атрибутивної інформації для j -го точкового об'єкту.

2) Полілінійний об'єкт – це одновимірний об'єкт, утворений впорядкованим списком вершин, які визначають форму та тип сегменту лінії, які задаються між кожною парою вершин. Сегменти можуть бути представлені прямими лініями або параметрично заданими кривими. Прикладами таких моделей є інженерні комунікації, огорожі, підпірні

стілки. Множину полілінійних геооб'єктів L можна формалізувати наступним відношенням

$$L = \left\{ \left\{ \left(x_q^l, y_q^l, z_q^l \right) \right\}_j, \left\{ A_j^l \right\} \right\}, \quad j = \overline{1, n_l}, \quad q = \overline{1, b_j}, \quad (8)$$

n_l – кількість лінійних об'єктів; b_j – кількість вершин у l -му лінійному об'єкті; (x_q^l, y_q^l, z_q^l) – геометричні координати j -ої вершини l -го полілінійного об'єкту; A_j^l – множина атрибутивної інформації для j -го полілінійного об'єкту.

3) Полігональний об'єкт – це двовимірний об'єкт, обмежений замкнутою послідовністю поліліній та заповнений всередині контуру однотиповою інформацією. Такими моделями можуть бути описані зони певного ландшафту, однорідної рослинності, існуючі будівлі та споруди, паркувальні майданчики. Множину полігональних геооб'єктів S можна формалізувати наступним відношенням

$$S = \left\{ \left\{ \left(x_t^s, y_t^s, z_t^s \right) \right\}_q, \left\{ A_j^s \right\} \right\}, \quad j = \overline{1, n_s}, \quad q = \overline{1, b_j}, \quad t = \overline{1, c_q}, \quad (9)$$

де (x_t^s, y_t^s, z_t^s) – геометричні координати i -ої вершини j -го лінійного об'єкту; A_j^s – множина атрибутивної інформації для j -го полігонального об'єкту; n_s – кількість полігональних об'єктів; c_q – кількість ліній у j -му полігоні; b_j – кількість вершин у q -й лінії.

4) Комплексний об'єкт – це такий об'єкт, який створюється за допомогою комбінації або поєднання попередніх (7) – (9) базових форм. Принцип створення окремого комплексного об'єкту формалізується певним набором правил. Прикладом моделювання об'єктів такого типу може виступати укiс, який за своєю природою має верхню та нижню бровки, тому складається з двох полілінійних об'єктів. Комплексним об'єктом є дорожній проїзд, який складатися мінімум з трьох (і більше) полілінійних об'єктів, які відповідно моделюють вісь, правий та лівий бордюр проїзної частини. Прикладом комплексної моделі може виступати каналізаційна мережа, яка складається з комбінації трубопроводу (полілінійного об'єкту) та люків (точкових об'єктів). Множину комплексних геооб'єктів K можна формалізувати наступним відношенням

$$K = \left\{ \left\{ \left\{ \left\{ \left\{ x_m^K, y_m^K, z_m^K \right\} \right\}_t, \{ \text{Rules} \} \right\}_q \right\}_j, \{ A_j^K \} \right\}, \quad (10)$$

$$j = \overline{1, n_K}, \quad q = \overline{1, b_j}, \quad t = \overline{1, c_q}, \quad m = \overline{1, a_t},$$

де Rules – набір правил поєднання або інтеграції базових форм (7) – (9); A_j^K – множина атрибутивної інформації для K -го комплексного об'єкту; n_K – кількість комплексних об'єктів; b_j – кількість полігонів в j -об'єкті; c_q – кількість ліній в q -полігоні; a_t – кількість вершин в t -лінії.

Інформаційна модель території під забудову має містити максимально точний опис розташування реальних об'єктів в прийнятій системі координат та їх атрибутивних характеристик. Властивості об'єктів описуються з застосуванням єдиних класифікаторів (довідників) і мають своє умовне зображення, що забезпечує автоматизований обмін і обробку даних. В таблиці наведені приклади моделей різнотипних об'єктів території під забудову.

Таблиця

Приклади моделей геооб'єктів території під забудову

Найменування реального об'єкту території збудови	Векторна модель даних, (формула)	Графічне зображення об'єкта згідно ДСТУ Б А.2.4-2:2009	Множина атрибутів об'єкта A_j
Дерево	Точковий об'єкт (7)		- найменування породи - висота - діаметр крони - вік, параметри росту - умови догляду
Дренаж	Полілінійний об'єкт (8)		- найменування - призначення, - матеріал - діаметр труби
Квітник	Полігональний об'єкт (9)		- найменування - площа покриття - умови догляду
Будівля наземна	Комплексний (10)		- призначення, стан - експлікаційний номер - кількість входів - відмітка нуля
ЛЄП	Комплексний (10)		- найменування - кількість опор - висота опори

Тепер формально векторну модель території під забудову можна подати як сукупність моделей геооб'єктів, описаними виразами (7) – (10) та множинами просторових зв'язків:

$$V_{\text{БЕКТ}} = \langle P, L, S, K, F, \sigma \rangle \quad (11)$$

де F – множина просторових зв'язків між об'єктами (7) – (10) території забудови, σ – множина типів зв'язків (топологічних, метричних, морфологічних та ін.).

Для вирішення задачі моделювання поверхні території під забудову від адекватності, повноти і точності векторного способу подання просторових даних (11) залежить точність та адекватність побудови триангуляційних моделей поверхонь (3).

Моделі даних території під забудову – це формалізована система подання інформації про реальні геооб'єкти, як природного, так і антропогенного походження, які мають просторову прив'язку до земельного простору та топологічно пов'язані між собою. На концептуальному рівні вона подається у вигляді сукупності трьох основних елементів, представлених на рис. 2:

- просторова компонента, що складається із геометричних об'єктів та просторової прив'язки;
- атрибутивна компонента, що визначає змістовну сутність об'єктів і їх частин у термінах моделі реального світу. При цьому використовуються каталоги і класифікатори об'єктів. Сюди входять також якісні або кількісні негеометричні дані, які представлені у вигляді властивостей або характеристик геооб'єкту;
- метадані, що дають додаткову інформацію, яка необхідна для інтерпретації об'єктів: зміст, якість та інші характеристики і властивості даних.

Відповідні геометричні дані також поділяються на два види, які показані на рис. 2. Дані першого виду – об'єктно-локалізовані – описують відокремлені геооб'єкти (будова, дорога, інженерна комунікація та ін.). Призначенням даних цього виду є передача просторової геометрії геооб'єкта, що описується. Дані другого виду – просторово-розподілені – описують рельєф території, вимірювання на місцевості та інші подібні дані. Призначення даних цього виду полягає у передачі просторового каркасу, який може бути представлений у вигляді набору точок, ізоліній (горизонталей), TIN- або GRID-поверхонь.

Всі геооб'єкти створюються формалізуються в єдиній системі, і в незалежності від типу та інформаційного наповнення належать до однієї з цих моделей.

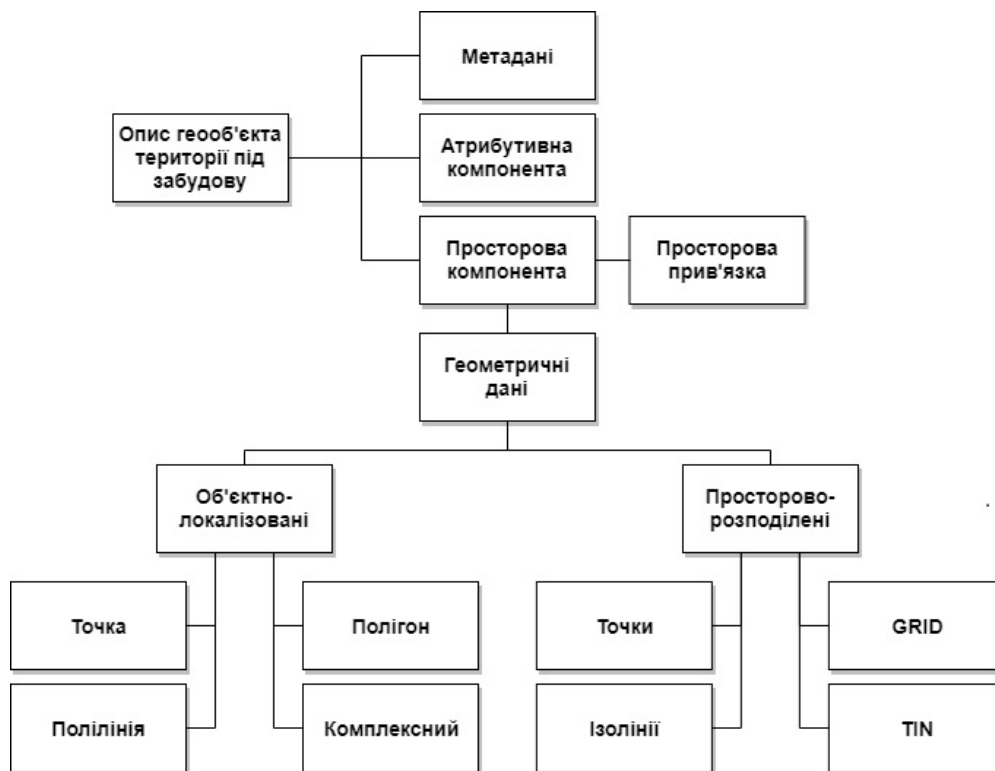


Рис. 2. Концептуальна модель опису об'єкта території під забудову

Висновки. Розглянуто проблему подання різнотипної просторової інформації в складі інформаційної моделі території під забудову. Для вирішення цієї проблеми запропоновано використання теоретико-множинного підходу, який дозволяє в єдиному математичному вигляді описати множини різнотипних геооб'єктів. Наукова новизна дослідження полягає в застосуванні теоретико-множинного підходу для уніфікованого формалізованого опису просторової інформації. Практична цінність результатів дослідження полягає в застосуванні запропонованого способу формалізації для створення векторних та цифрових моделей геооб'єктів. Такі моделі відповідають сучасним вимогам інформаційного моделювання у будівництві BIM-технології і в залежності від задачі дослідження можуть носити самостійний характер або ставати вихідними даними для побудови триангуляційної моделі поверхні території під забудову.

Список літератури:

1. Михайленко В.М. Интеллектуальная информационная технология диагностики технического состояния зданий / В.М Михайленко, А.А. Терентьев, М.И. Цюцюра. – К.: Компринт, 2015. – 162 с.
2. Зацерковний В. І. Моделі, методи та програмно-технічні засоби геоінформаційної підтримки прийняття рішень у системах управління територіями / автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.13.06. – К., Інститут ПММС, 2013. – 40 с.
3. Кейк Д. Геоінформаційні технології та інфраструктура геопросторових даних. Том 2: Системи керування базами геоданих для інфраструктури геопросторових даних. Монографія / Д. Кейк, А.А. Лященко, В.В. Путренко, Ю. Хмелевський, К.С. Дорошенко, М. Говоров. – Харків: Планета-Прінт, 2017. – 456 с.
4. Гончаренко, Т.А. Застосування BIM-технології для створення цифрової моделі території під забудову / Т.А. Гончаренко // Управління розвитком складних систем. – 2018. – № 33. – С. 131 – 138.
5. Гончаренко Т.А. Аналіз та постановка задачі моделювання поверхні території під забудову / Т.А. Гончаренко, І.А. Пороховніченко // Управління розвитком складних систем. – 2017. – № 31. – С. 138 – 144.
6. Карпінський, Ю.О. Еталонна модель бази топографічних даних / Ю.О. Карпінський, А.А. Лященко, Р.М. Рунець // Вісник геодез. та картогр. – 2010. – № 2. – С. 28-36.
7. Penn, S. The BIM Project Execution Planning Guide (Penn State). – 2016. – [Електронний ресурс] // URL: <http://bim.psu.edu/uses>.
8. Brink L. Establishing a national standard for 3D topographic data compliant to CityGML / L. Brink, J. Stoter, S. Zlatanova // International Journal of Geographical Information Science. – 2013. – Vol. 27 (1). – P. 92-113.
9. Biljecki F. The concept of level of detail in 3D city models. – 2013. – [Електронний ресурс] // URL: <http://www.gdmc.nl/publications/reports/GIS62.pdf>.
10. Ямалов И.У. Трехмерное моделирование пространственных объектов в Геоинформационной системе органов исполнительной власти Республики Башкортостан / И.У. Ямалов и др. // Материалы 15-ой Междунар. науч.-практ.конф. "Компьютерные науки и информационные технологии". – Т.2. – Уфа: 2013. – С. 66-70.

References:

1. Mikhaylenko, V., Terentyev, O., and Tsutsura, M. (2015), *Intellectual information technology for diagnosing the technical condition of buildings*, TSB Komprint, Kyiv, 162 p.
2. Zatserkovny, V.I. (2013), *Models, methods and software and technical means of geoinformational support for decision-making in territorial management systems: Author's thesis*, Kyiv, 40 p.
3. Cake, D., Lyaschenko, A., Putrenko, V., Khmelevsky, Y., Doroshenko, K., and Govorov, M. (2017), *Geoinformation Technologies and Infrastructure of Geospatial Data. Volume 2: Geospatial database management systems for geospatial data infrastructure*, Planet-Print, Harkiv, 456 p.
4. Honcharenko, T., and Porohovnichenko, I. (2018), "The use of BIM-technology to create an information model territories for construction", *Management of Development of Complex Systems*, Vol. 33, pp.131-138.
5. Honcharenko, T. (2017), "Analysis and resolution of the surface modeling task for construction territory", *Management of Development of Complex Systems*, Vol. 31, pp.138-144.
6. Karpinsky, Yu., Lyashchenko, A., and Runec, R. (2010), "Standard model of topographic data base", *Herald surveyor and cartogram*, Vol. 2, pp. 28-36.

7. Penn, S. (2016), "The BIM Project Execution Planning Guide", available at: <http://bim.psu.edu/uses>.
8. Brink, L., Stoter, J., and Zlatanova, S. (2013). "Establishing a national standard for 3D topographic data compliant to CityGML", *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 27 (1), pp. 92–113.
9. Biljecki, F. (2013), "The concept of level of detail in 3D city models", available at: <http://URL: http://www.gdmc.nl/publications/reports/GIS62.pdf>.
10. Yamalov, I. (2013), "Three-dimensional modeling of spatial objects in the Geoinformation system of executive bodies of the Republic of Bashkortostan", *Materials of the 15th International scientific-pract.conf. "Computer Science and Information Technologies, Vol. 2, Ufa*, pp. 66-70.

Статтю представив д-р техн. наук, проф. КНУБА Терентьев О.О.

Поступила (received) 10.05.2018

Honcharenko Tetyana, Senior Lecturer
Kyiv National University of Construction and Architecture
Avenue Povitroflotsky, 31, Kyiv, Ukraine, 03037
Tel: +38 093 022-82-01, e-mail: geocad@ukr.net
ORCID ID: 0000-0003-2577-6916

Mihaylenko Victor, Dr.Sci.Tech, Professor
Kyiv National University of Construction and Architecture
Avenue Povitroflotsky, 31, Kyiv, Ukraine, 03037
Tel: (044) 360-55-09, e-mail: kpm_knuba@ukr.net
ORCID ID: 0000-0002-9573-9873

УДК 004.942+045

Теоритико-множинний опис просторових даних у складі інформаційної моделі території під забудову / Гончаренко Т.А., Михайленко В.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 149 – 159.

Розглянуто проблему спільного опису різнотипної просторової інформації в складі інформаційної моделі території під забудову та запропоновано концептуальну модель подання геооб'єктів, розташованих на поверхні будівельного майданчика. Для вирішення проблеми запропоновано застосування теоритико-множинного підходу для опису просторових даних, який подає в єдиному формалізованому вигляді множини різнотипних геооб'єктів, необхідних для побудови вищезазначеної моделі. Такий підхід відповідає сучасним вимогам інформаційного моделювання у будівництві – BIM-технології і дозволяє вирішувати завдання, пов'язані з підготовкою території під забудову, на новому технологічному рівні. Ил.: 2. Табл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: просторова інформація; інформаційна модель; територія під забудову; теоритико-множинний підхід; геооб'єкт; BIM-технологія.

УДК 004.942+045

Теоритико-множественное описание пространственных данных в составе информационной модели территории под застройку / Гончаренко Т.А., Михайленко В.М. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 149 – 159.

Рассмотрена проблема общего описания разнотипной пространственной информации в составе информационной модели территории под застройку и предложена концептуальная модель представления геообъектов, расположенных на поверхности строительной площадки. Для решения проблемы предложено применение теоритико-множественного подхода для описания пространственных данных, который подает в едином формализованном виде множества разнотипных геообъектов, необходимых для построения вышеупомянутой модели. Такой подход соответствует современным требованиям информационного моделирования в строительстве – BIM-технологии и позволяет решать задачи, связанные с подготовкой территории под застройку, на новом технологическом уровне. Ил.: 2. Табл.: 1. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: пространственная информация; информационная модель; территория под застройку; теоритико-множественный подход; геообъект; BIM-технология.

UDK 004.942+004.045

Set-theoretic description of spatial data in the information model of the construction territory // Honcharenko T.A., Mihaylenko V.M. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI" – 2018. – № 24 (1300). – P. 149 – 159.

The problem of joint description of different types of spatial information in the composition of the information model of the territory under construction is considered and a conceptual model of representation of geobjects located on the surface of the construction site is proposed. To solve the problem, we propose the application of multiplicative theoretical approach for the description of spatial data, which presents in a single formalized form a plurality of different types of geobjects necessary for constructing the aforementioned model. This approach meets the modern requirements of information modeling in construction - BIM-technology and allows you to solve tasks related to the preparation of the territory for development, at a new technological level. Figs.: 2. Tabl.: 1. Refs.: 10 titles.

Keywords: spatial information; information model; the construction territory; set-theoretic approach; geobject; BIM-technology.

УДК 004.052.42

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.24.14

О. А. КОЗИНА, канд. техн. наук, доц. НТУ "ХПІ",

В. І. ПАНЧЕНКО, ст. викл. НТУ "ХПІ"

КАРТА НЕСУПЕРЕЧНОСТІ ДАНИХ ДЛЯ БАГАТОКОРИСТУВАЦЬКИХ ОНЛАЙН РОЛЬОВИХ ІГОР

У статті проаналізовано можливості використання існуючих змішаних моделей несуперечності даних для підвищення якості багатокористувацьких онлайн ігор. Запропоновано протомолекулярний підхід до формування моделі змішаної несуперечності даних ігор, що розташовані в хмарних системах. Розроблена структура карти несуперечності дозволяє адаптувати рівень строгості несуперечності даних до очікуваної клієнтами якості гри. Іл.: 1. Табл.: 1. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: змішана модель; несуперечливість даних; багатокористувацькі онлайн ігри.

Постановка проблеми і аналіз літератури. Використання хмарних систем в розгортанні і обслуговуванні відео-ігор дало новий поштовх в розвитку багатокористувацьких онлайн ролевих ігор (БОРІ). Будь-яка відео-ігра є моделюванням якого-небудь процесу, тобто змін параметрів в часі. Але, вся логіка і сенс БОРІ побудовані на виконанні взаємопов'язаних взаємозалежних дій географічно рознесених користувачів, що знаходяться в ігровому світі в одній точці і одному проміжку безперервного плину часу. Архітектурно БОРІ розглядаються як розподілені системи, в яких віддалені сервера повинні синхронізувати свої дані і погоджувати дані, що отримано від клієнтів. В БОРІ основна проблема – латентність, тобто затримка відображення змін в ігровому світі, які сталися як з самим гравцем, так і з іншими віддаленими гравцями [1]. Це може призвести до абсолютної непридатності до гри таких застосунків і, відповідно, втрати клієнтів.

З одного боку, зусиллями розробників БОРІ використовуються різноманітні архітектурно-програмні методи компенсації лагів, але вони не повністю вберігають від появи алогічних неможливих, з точки зору реального світу, ситуацій в мережевих іграх [2, 3]. З іншого боку, виробники БОРІ сподіваються вирішити проблеми латентності силами та засобами провайдерів хмарних сервісів, за рахунок розширення географії і збільшення кількості розподілених дата-центрів. Однак, в останній час провайдери хмарних сервісів все частіше говорять про підвищення собівартості утримання хмар, які пропонують високий рівень якості обслуговування. Йдеться про підвищення енергоспоживання дата-центрами в яких реалізовані механізми синхронізації зі строгими

моделями узгодженості даних, тобто для надійності яких застосовується додаткова кількість реплікацій і операцій читання-запису. У роботі [4] метрика моделі безперервної несуперечності базується на векторі, до складу якого входять: параметр помилки кількості, помилки порядку та рівня застою. Помилка кількості вказує на загальну вагу усіх операцій запису, які можуть бути виконані до оновлення поточної репліки в усіх інших репліках. Другий параметр визначає максимальну кількість операцій запису, які можуть залишитися неврегульованими на будь-якій репліці. Рівень застою обмежує час затримки у просуванні реплік. Така модель несуперечності даних може бути ефективною для оновлень, ініційованих будь-яким сервером хмари, але при умові, що для всіх даних застосовується лише один рівень несуперечності.

Використання в БОРІ однієї моделі з максимально можливим рівнем несуперечності для всіх типів даних також призводить до збільшення витрат на обслуговування хмарного розміщення. Пошук компромісного рішення цієї дилеми виведе ігрову індустрію на новий рівень.

Ідея про корисність використання змішаної моделі несуперечності даних в розподілених географічно хмарних застосунках обговорюється в роботах [5 – 7]. В роботі [8] при створенні змішаної моделі несуперечності функцією мети виступає вартість експлуатаційних витрат на підтримку строгих рівнів узгодженості даних в дата-центрах хмари. Для зниження експлуатаційних витрат дата-центрів пропонується виділити 3 категорії строгості і відповідно всі дані, що розташовані на серверах, згрупувати в 3 категорії. Категорія А відповідає найстрогішим рівням несуперечності, тому дані, що мають відповідну категорію потребують найвищої вартості обслуговування та мають максимальні гарантії узгодженості. Інша крайність – мінімальні гарантії несуперечності з низькою вартістю операцій, які забезпечуються для даних з категорії С. Між категоріями А та С розташовано дані, рівень несуперечності яких може бути змінений в процесі розвитку хмарного проекту. Це категорія гарантій В. Для даних з цієї категорії політики нормування несуперечності визначаються за імовірнісних гарантій (процентилей) з використанням тимчасової статистики. Такий загальний підхід до формування змішаної несуперечності даних у хмарних дата-центрах реалізує моделі несуперечності даних, що орієнтовані на протоколи просування (push-based protocols) [9]. Для оновлення даних, ініційованих клієнтами, така змішання модель не підходить.

В роботі [10] для виділення однакових рівнів несуперечності в мережесхемних іграх класу стратегій реального часу розроблено модель VFC. Метрика моделі несуперечності VFC описана тривимірним вектором

$\kappa = (\theta, \sigma, \nu)$. До складу цього вектору входять: інтервал, протягом якого об'єкт може використовуватися без застосування поновлення (θ); кількість оновлень статусу чи положення, які можливо не застосовувати послідовно для обраного об'єкту (σ), а також різниця між поточним і новим змістом даних, що виражена у процентах (ν). Зрозуміло, що така метрика не може працювати у багатокористувацьких шутерах, де швидкість відображення змін положення персонажів є основною характеристикою QoS гри.

Мета статті – розробка адаптивної моделі змішаної несуперечності даних в мережевих ігрових застосунках.

Модель змішаної несуперечності даних у БОРІ. БОРІ об'єднують в собі різні за жанром масові багатокористувацькі рольові онлайн-ігри. Основна причина розробки змішаних моделей несуперечності даних в БОРІ криється в швидкій зміні положень/станів безлічі персонажів, що становлять основну тактику гри. Особливістю БОРІ є те, що в ігровому світі можуть існувати різні об'єкти: головні "герої-воїни", "вороги різних рас", "тварини-учасники подій" і відволікаючі, статичні об'єкти, "статисти-роззяви" і т. і. Самі об'єкти можуть розміщуватися на рівнях, в "містах", "планетах", між якими розташовані точки трансформації: "портали", "тунелі", переходи і т. і.

Ігровий процес можна представити у вигляді дискретно-безперервного процесу. Пропонована модель змішаної несуперечності базується насамперед на угрупованні об'єктів ігрового процесу, стани яких повинні узгоджуватися зі станами інших об'єктів, залежно від рівня строгості несуперечності даних про них. Так формуються групи об'єктів з однаковим рівнем узгодженості даних, в той час як самі групи можуть мати абсолютно різні рівні строгості моделей несуперечності. Наприклад, для ігрових об'єктів типу "статистів-роззяв", тобто об'єктів, розташованих поза зоною прямої дії головних персонажів БОРІ, можна застосувати тільки останні оновлення з серії послідовних змін положення на ігровому полі. У той же час, для головного персонажа така модель узгодженості даних явно неприйнятна: якщо оновлювати положення персонажа, акумулюючи ці зміни в серії, то його плавний біг, наприклад, буде перемежовуватися несподіваними стрибками. Для головного персонажа БОРІ типу "шутер" (Shooter game) може використовуватися модель несуперечності монотонного запису.

Для формування груп об'єктів для БОРІ пропонується скористатися протомолекулярним підходом, згідно з яким об'єкти з однаковим рівнем несуперечності називаються "атомами" A_x^j . "Атоми" складають

"молекули" M_i , тобто групи об'єктів. Сукупність "молекул" формує карту несуперечності всього застосунку. На рисунку карта несуперечності складається з трьох "молекул" M_{17} , M_j и M_N .

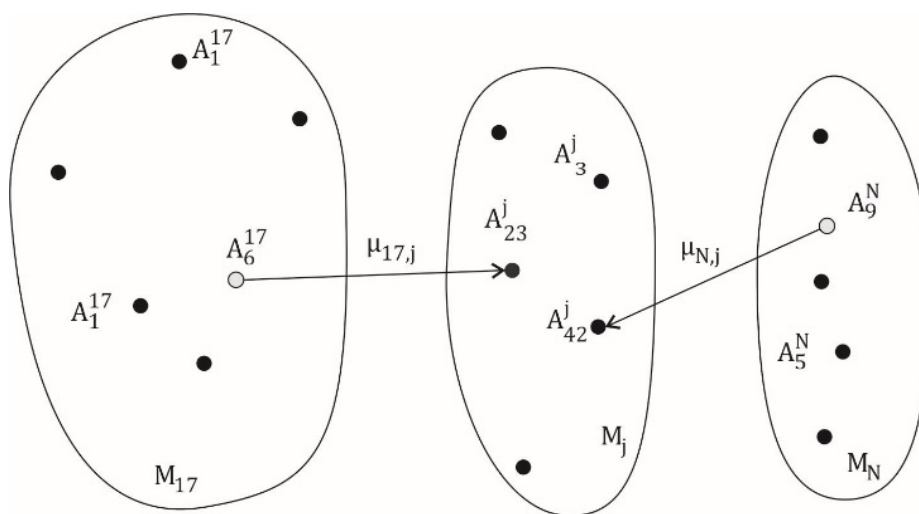


Рис. Карта несуперечності БОРІ як сукупність "молекул"

Слід зазначити, що залежно від логіки гри об'єкти можуть міняти свої стани, наприклад, із здорового стати інфікованим. Відповідно при зміні стану, виникненні-народженні або загибелі об'єкти повинні переміщатися між групами моделей несуперечності, наприклад, об'єкт покинув групу "здорові" і виник в групі "інфіковані". На карті несуперечності на рисунку показані можливі переміщення "атомів" між "молекулами" в ході гри. Нехай, наприклад, "атом" A_6^{17} змінює ігровий статус. У карті несуперечності ця подія відображається смертю "атома" A_6^{17} в "молекулі" M_{17} і народженням нового "атома" A_{23}^j в "молекулі" M_j . Історія перетворень "атомів" між цими "молекулами" зберігається в змінної $\mu_{17,j}$.

Особливістю застосування протомолекулярного підходу при формуванні карти несуперечності в БОРІ в порівнянні з іншими застосунками, розташованими в хмарах, є те, що ступінь впливу поновлення положення або статусу одного об'єкта на інші об'єкти в ігровому світі закладена в самій логіці застосунку, реалізованого на сервері і, отже, може не відображатися окремо в матриці моделей несуперечності.

Метрики карти несуперечності в БОРІ. Кожна "молекула" повинна мати метрику несуперечності. Початкові метрики моделей повинні формуватися розробниками БОРІ. У зв'язку з тим, що "атоми" можуть переміщатися між "молекулами" в ході гри, то початкові значення метрики кожного "новонародженого" об'єкта в групі повинні формуватися шляхом успадкування початкових метрик групи. Таким чином, карта несуперечності є динамічною характеристикою БОРІ.

Реалізація в одній БОРІ всіх протоколів для виділених моделей несуперечності даних дозволить знизити навантаження на сервера, полегшити мережевий трафік, а також знизити вартість хмарного сервісу, при якому оплата проводиться за кількість операцій читання-запису.

Адаптивність карти несуперечності даних. В роботі [11] пропонується автоматично змінювати рівень строгості моделі несуперечності даних залежно від статистики звернень до тих або інших даних. Однак для БОРІ такий підхід не зовсім коректний. Запропонований протомолекулярний підхід до формування карти несуперечності даних для БОРІ дозволяє адаптивно змінювати рівень строгості несуперечності даних залежно від очікувань гравця за якістю реалізації гри.

Для прикладу розглянемо ситуацію, описану в роботі [12]. Стартовий варіант архітектури гри War Robots мав на увазі контроль показників здоров'я на стороні клієнта з подальшою синхронізацією значень даних на серверах хмари між усіма гравцями. Навіть пілотний запуск гри показав, що проблема "літерів", тобто гравців-шахраїв, які нечесно завищують показники здоров'я своїх персонажів, може повністю позбавити розробників ігрової аудиторії. Фактично це означало, що для показників здоров'я персонажів була потрібна більш строга модель несуперечності даних, при якій у "літерів" не було б можливості шахрайства. Для вирішення цієї проблеми командою розробників були внесені зміни в протокол узгодження даних від клієнтів про завдану шкоду: кожен з клієнтів відстежував попадання не тільки по своєму персонажу, а й по іншим персонажам і відсилав ці дані на сервер. На сервері стала проводитись реєстрація та агрегація показників шкоди від усіх клієнтів, обчислення поточного здоров'я кожного персонажа і розсилка підсумкового значення всім учасникам бою. Розробники визнають, що реалізація протоколу синхронізації ID кожного пострілу викликала труднощі, але вони зуміли адаптувати рівень строгості несуперечності даних у своїй грі на основі очікувань якості гри своїми клієнтами. В результаті адаптації моделі несуперечності даних кількість скарг гравців на "літерів" зменшилась в 4 рази, а, відповідно, ступінь задоволеності ігровим процесом зростає.

Використання карти несуперечності в БОРІ дозволить більш просто адаптувати якість гри до рівня очікувань QoS клієнтами. Залежно від очікувань гравців, що в першу чергу визначається типом і семантикою кожної конкретної БОРІ, розробникам необхідно сформулювати список цінностей. Цей список містить "атоми" карти несуперечності, тобто такі характеристики ігрових об'єктів, некоректне відображення положення/текстури/пересування яких призводить до істотної втрати інтересу до гри. Кожному "атому" необхідно поставити у відповідність початковий ранг цінності RV , чисельне значення якого може змінюватися від 0 до 1. До списку цінностей вносять лише ті "атоми", чисельне значення ранга цінності яких більше 0.

Таблиця

Приклад списку цінностей БОРІ

"Атом"	Початковий ранг цінності, RV_0	Шаг рангу цінності, ΔRV	Поточний ранг цінності
A_5^{14}	0,72	0,10	0,93
A_7^{14}	0,03	0,10	0,23
A_{12}^6	0,50	0,10	0,86
A_7^{16}	0,01	0,33	0,67

На етапі проектування БОРІ відповідність між "атомами" і початковими рангами $RV_0(A_i^j)$ виставляється командою розробників на підставі своїх власних думок і інтересів. Але в процесі росту числа користувачів і збільшення кількості відгуків про БОРІ значення рангів, як і самі елементи списку цінності, можуть змінюватися. Величина шагу зміни рангів $\Delta RV(A_i^j)$ дорівнює умовній вазі однієї скарги клієнта на неналежну якість реалізації "атома" A_i^j . Наприклад, нехай фірма-розробник БОРІ має 10000 клієнтів та вважає, що скарги 1000 гравців (10% від загальної кількості) на "атом" A_{12}^6 є критичною кількістю, тобто умовна вага кожної скарги $\Delta RV(A_{12}^6) = 0,001$. Це означає, що кожного разу при появі нової скарги $RV(A_{12}^6)$ буде збільшуватися на 0,001 та коли 500 гравців висловлять своє незадоволення, то ранг цінності буде дорівнювати $0,5 + 500 \times 0,001 = 1,0$. Якщо поточний ранг цінності

якогось "атома" $RV(A_i^j) \geq 1$, то розробникам БОРІ треба змінювати модель несуперечності відповідних даних.

Зміни в рангах цінності "атомів" дозволяють автоматично переводити "атоми" в "молекули" з більш строгою моделлю несуперечності, іншими словами, здійснювати адаптацію QoS гри до очікувань клієнтів.

Висновки. Розроблено новий протомолекулярний підхід до формування змішаної моделі несуперечності даних БОРІ, що дозволяє врахувати очікування клієнтів за якістю ігрового процесу. Основна практична значущість розробленої карти несуперечності даних БОРІ, що є адаптивною моделлю змішаної несуперечності, полягає у тому, що її використання надає механізм зниження вартості хмарного обслуговування БОРІ, хоча й вимагає додаткового опрацювання логіки і архітектури гри.

Список літератури:

1. PatientZero. Синхронизация состояний в многопользовательских играх [Електронний ресурс]. URL: <https://habr.com/post/328702/> – Дата доступа 22.05.2018 р.
2. Gatoools. Основы многопользовательской игры на Unity3D [Електронний ресурс]. URL: <https://habr.com/post/211202/> – Дата доступа 22.05.2018 р.
3. Marsermd. Мультиплеер в быстрых играх (части I, II) [Електронний ресурс]. URL: <https://habr.com/post/302394/> – Дата доступа 22.05.2018 р.
4. Yu H. Design and evaluation of a continuous consistency model for replicated services / H. Yu, A Vahdat // Proceedings of the 4th Conference on Symposium on Operating System Design & Implementation. – 2000. – Vol. 4. – P. 21-35.
5. Lu Y. Adaptive Consistency Guarantees for Large-Scale Replicated Services / Y. Lu, Y. Lu, H. Jiang // Networking, Architecture, and Storage, 2008. NAS'08. International Conference on. – IEEE, 2008. – P. 89-96.
6. Chihoub H.-E. Consistency in the Cloud: When Money Does Matter! / H.-E. Chihoub, S. Ibrahim, G. Antoniu, M.S. Perez // Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid), 13th IEEE/ACM International Symposium on. – IEEE, 2013. – P. 352-359.
7. Wada H. Data Consistency Properties and the Trade-offs in Commercial Cloud Storage: the Consumers' Perspective / H. Wada, A. Fekete, L. Zhao, K. Lee, A. Liu // Proceedings of the 5th biennial Conference on Innovative Data Systems Research. – 2011. – Vol. 11. – P. 134-143.
8. Kraska T. Consistency rationing in the cloud: Pay only when it matters / T. Kraska, M. Hentschel, G. Alonso, D. Kossmann // Proceedings of the VLDB Endowment. – 2009. – Vol. 2. – № 1. – P. 253-264.
9. Таненбаум Э. Распределенные системы. Принципы и парадигмы / Э. Таненбаум, М. ван Стен. – СПб.: Питер, 2003. – 877 с.
10. Veiga L. Unifying divergence bounding and locality awareness in replicated systems with vector-field consistency / L. Veiga, A. Negrão, S. Nuno // Journal of Internet Services and Applications. – 2010. – Vol. 1. – № 2. – P. 95-115.
11. Esteves S.. Quality-of-service for consistency of data geo-replication in cloud computing / S. Esteves, J. Silva, L. Veiga // Proceedings of the 18th International Conference: European Conference on Parallel Processing. – Rhodes Island, Greece: Springer, 2012. – P. 285-297.

12. Skzloy Как расправиться с читерами и не переписать весь код [Електронний ресурс]. URL: <https://habr.com/company/pixonix/blog/343306/> – Дата доступа 22.05.2018 р.

References

1. PatientZero (2017), "Synchronization of states in multi-player games", available at: <https://habr.com/post/328702/> (accessed May 22, 2018).
2. Gatools (2014), "The basics of multiplayer games on Unity3D", available at: <https://habr.com/post/211202/> (accessed May 22, 2018).
3. Marsermd (2016), "Multiplayer in fast games (parts I, II)", available at: <https://habr.com/post/302394/> (accessed May 22, 2018).
4. Yu, H., and Vahdat, A. (2000), "Design and evaluation of a continuous consistency model for replicated services", *Proceedings of the 4th Conference on Symposium on Operating System Design & Implementation*, Vol. 4, pp. 21-35.
5. Lu, Y., Lu, Y., and Jiang, H. (2008), "Adaptive Consistency Guarantees for Large-Scale Replicated Services", *Networking, Architecture, and Storage*, pp. 89-96.
6. Chihoub H.-E., Ibrahim S., Antoniu G., and Perez M.S. (2013), "Consistency in the Cloud: When Money Does Matter!", *13th IEEE/ACM International Symposium "Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid)"*, – pp. 352-359.
7. Wada, H., Fekete, A., Zhao, L., Lee, K., and Liu, A. (2011), "Data Consistency Properties and the Trade-offs in Commercial Cloud Storage: the Consumers' Perspective", *Proceedings of the 5th biennial Conference "Innovative Data Systems Research"*, Vol. 11, pp. 134-143.
8. Kraska, T., Hentschel, M., Alonso, G., and Kossmann, D. (2009), "Consistency rationing in the cloud: Pay only when it matters", *Proceedings of the VLDB Endowment*, Vol. 2, No. 1, pp. 253-264.
9. Tanenbaum, A., and Van Steen, M. (2003), *Distributed systems: principles and paradigms*, Publishing house "Piter", Saint Petersburg, 877 p.
10. Veiga, L., Negrão, A., and Nuno, S. (2010), "Unifying divergence bounding and locality awareness in replicated systems with vector-field consistency", *Journal of Internet Services and Applications*, Vol. 1, No. 2, pp. 95-115.
11. Esteves, S., Silva, J., and Veiga, L. (2012), "Quality-of-service for consistency of data geo-replication in cloud computing", *Proceedings of the 18th International Conference "European Conference on Parallel Processing"*, pp. 285-297.
12. Skzloy "How to deal with cheaters and not rewrite all the code", available at: URL <https://habr.com/company/pixonix/blog/343306/> (accessed May 22, 2018).

Статтю представив д-р техн. наук, проф. кафедри електронно-обчислювальних машин ХНУРЕ Корабльов М.М.

Надійшла (received) 16.05.2018

Kozina Olha, PhD Tech., Associate Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",
Str. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002,
Tel.: +38-057-707-01-65, e-mail: kozina@kpi.kharkov.ua;
ORCID ID: 0000-0003-0740-7068

Panchenko Volodymyr, Senior Lecturer, Senior Lecturer
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",
Str. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002,
Tel.: +38-057-707-01-65, e-mail: panchenko.vladimir@gmail.com;
ORCID ID: 0000-0003-3364-3398

УДК 004.052.42

Карта несуперечності даних для багатокористувацьких онлайн рольових ігор / Козіна О.А., Панченко В.І. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 160 – 168.

У статті проаналізовано можливості використання існуючих змішаних моделей несуперечності даних для підвищення якості багатокористувацьких онлайн ігор. Запропоновано протомолекулярний підхід до формування моделі змішаної несуперечності даних ігор, що розташовані в хмарних системах. Розроблена структура карти несуперечності дозволяє адаптувати рівень строгості несуперечності даних до очікуваної клієнтами якості гри. Ил.: 1. Табл.: 1. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: змішана модель; несуперечливість даних; багатокористувацькі онлайн ігри.

УДК 004.052.42

Карта непротиворечивости данных для многопользовательских онлайн ролевых игр / Козина О.А., Панченко В.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 24 (1300). – С. 160 – 168.

В статье проанализированы возможности использования существующих смешанных моделей непротиворечивости данных для повышения качества многопользовательских онлайн игр. Предложен протомолекулярный подход к формированию модели смешанной непротиворечивости данных игр, расположенных в облачных системах. Разработанная структура карты непротиворечивости позволяет динамически адаптировать уровень строгости непротиворечивости данных к ожидаемому клиентами качеству игры. Ил.: 1. Табл.: 1. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: смешанная модель; непротиворечивость данных; многопользовательские онлайн игры.

UDC 004.052.42

Consistency data map for multiplayer online role games / Kozina O.A., Panchenko V.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – № 24 (1300). – P. 160 – 168.

The possibilities of using existing mixed data consistency models to improve the quality of multiplayer online games had analyzed in the article. The protomolecular approach to the formation of a model of mixed data consistency of cloud games is proposed. The developed structure of the consistency map allows you to dynamic adapt the level of strictness of data consistency corresponding to clients' expectations of game quality. Figs.: 1. Tabl.: 1. Refs.: 12 titles.

Keywords: mixed data consistency models; data consistency; multiplayer online games.

ЗМІСТ

<i>Розміщення Вісника НТУ "ХПІ" серії "Інформатика та моделювання" в міжнародних наукометричних базах, репозитаріях та пошукових системах</i>	3
---	---

<i>К 80-летию нашего друга и члена редколлегии доктора технически наук, профессора Николая Ивановича Корсунова</i>	4
--	---

Математичні методи та моделі

<i>Горященко К.Л. Моделирование неравномерности спектра сигнала опорного генератора для задач фазовой дальнометрии у середовищі Matlab</i>	7
--	---

<i>Дашкевич А.А., Шоман О.В. Анализ пространственного распределения точечных множеств на основе алгоритма пространственного хеширования</i>	16
---	----

<i>Дмитриева О.А., Гуськова Н.Г. Разработка коллокационных схем параллельного управления шагом в эволюционных уравнениях</i>	25
--	----

<i>Заковоротный А.Ю., Зорян М.А. Модель накопления уязвимостей в исходном коде Java-приложений, а также бинарная система оценки качества кода на ее основе</i>	37
--	----

<i>Суздаль В.С., Епифанов Ю.М. Синтез стабилизирующего управления процессом выращивания монокристаллов на основе решения неравенства Ляпунова</i>	47
---	----

<i>Tikhonov V.I. A Uniform geometrical presentation of a quantum system experiment</i>	59
--	----

Комп'ютерна інженерія

<i>Gavrylenko S.Yu., Babenko O.S. Development an antivirus scanner based on the neural network ART-1</i>	70
--	----

<i>Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю., Мезенцев Н.В., Главчев Д.М. Исследование возможностей программных компонент бортовой вычислительной системы при преобразовании нелинейных систем к эквивалентным линейным</i>	80
--	----

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Азарян А.А., Котов І.А. Оцінка ефективності тезауруса професійної лексики в онтологіях систем підтримки рішень для керування режимами енергосистем	100
Мнушка О.В. Архітектура веб-орієнтованої SCADA-системи	117

Інформаційні технології

Антонова І.В., Чикина Н.А. Структурно-лінгвістический підход к анализу временных рядов	130
Бобух А.О., Дзевочко О.М., Переверзева А.М. Аналіз методів параметричної ідентифікації технологій	139
Гончаренко Т.А., Михайленко В.М. Теоретико-множинний опис просторових даних у складі інформаційної моделі території під забудову	149
Козіна О.А., Панченко В.І. Карта несуперечності даних для багатокористувацьких онлайн рольових ігор	160

НАУКОВЕ ВИДАННЯ
**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"**

Збірник наукових праць
Серія
Інформатика та моделювання
№ 24 (1300)

Науковий редактор д.т.н. Дмитрієнко В.Д.
Технічний редактор д.т.н. Леонов С.Ю.
Відповідальний за випуск к.т.н. Обухова І.Б.

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Кірпічова, 2, НТУ "ХПІ".
Кафедра обчислювальної техніки та програмування,
тел. (057) 7076198, E-mail: serleomail@gmail.com

Обл. вид. № 15 – 18

Підп. до друку 13.06.2018 р. Формат 70х100/16. Папір офсетний.
Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,8. Облік. вид. арк. 10,0.
Наклад 300 прим.
Ціна договірна

НТУ "ХПІ", 61002, Харків, вул. Кірпічова, 2,

Видавничий центр НТУ "ХПІ"
Свідоцтво ДК № 116 від 10.07.2000 р.

Виготовлено у ТОВ ВПП "Контраст".
Україна, 61166, м. Харків, пр. Науки, 40, оф. 221.
Св-во: ДК №1778 від 05.05.2004