

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ КОМПЛЕКС
«ІНСТИТУТ ПРИКЛАДНОГО СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ»
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

№ 2

2019

ЗАСНОВАНО У ЛИПНІ 2001 р.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Головний редактор

М.З. ЗГУРОВСЬКИЙ, акад. НАН України

Заступник головного редактора

Н.Д. ПАНКРАТОВА, чл.-кор. НАН України

Члени редколегії:

П.І. АНДОН, акад. НАН України

А.В. АНІСІМОВ, чл.-кор. НАН України

Г.-В. ВЕБЕР, проф., Турція

О.Д. ГВІШАНИ, акад. РАН, Росія

П.О. КАСЬЯНОВ, проф., д.ф.-м.н.,
Україна

В.М. КУНЦЕВИЧ, акад. НАН України

О.А. ПАВЛОВ, проф., д.т.н., Україна

Л. САКАЛАУСКАС, проф., Литва

А.М. САЛЕМ, проф., Єгипет

І.В. СЕРГІЄНКО, акад. НАН України

Х.-М. ТЕОДОРЕСКУ, проф., Румунія

Е.О. ФАЙНБЕРГ, проф., США

Я.С. ЯЦКІВ, акад. НАН України

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

03056, м. Київ,

просп. Перемоги, 37, корп. 35,

ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського

Тел.: 204-81-44; факс: 204-81-44

E-mail: journal.iasa@gmail.com

http://journal.iasa.kpi.ua

У номері:

• **Прогресивні інформаційні технології, високопродуктивні комп'ютерні системи**

• **Проблеми прийняття рішень та управління в економічних, технічних, екологічних і соціальних системах**

• **Методи оптимізації, оптимальне управління і теорія ігор**

• **Математичні методи, моделі, проблеми і технології дослідження складних систем**

• **Нові методи в системному аналізі, інформатиці та теорії прийняття рішень**

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE
EDUCATIONAL AND SCIENTIFIC COMPLEX
«INSTITUTE FOR APPLIED SYSTEM ANALYSIS»
OF THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF UKRAINE
«IGOR SIKORSKY KYIV POLYTECHNIC INSTITUTE»

SYSTEM RESEARCH AND INFORMATION TECHNOLOGIES

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

№ 2

2019

IT IS FOUNDED IN JULY 2001

EDITORIAL BOARD:

The editor – in – chief

M.Z. ZGUROVSKY, Academician of
NASU

Deputy editor – in – chief

N.D. PANKRATOVA, Correspondent
member of NASU

Associate editors:

F.I. ANDON, Academician of
NASU

A.V. ANISIMOV, Correspondent
member of NASU

E.A. FEINBERG, Prof., USA

A.D. GVISHIANI, Academician of RAS,

P.O. KASYANOV, Prof., Ukraine

V.M. KUNTHEVICH, Academician of NASU

A.A. PAVLOV, Prof., Ukraine

L. SAKALAIUSKAS, Prof., Lithuania

A.M. SALEM, Prof., Egypt

I.V. SERGIENKO, Academician of NASU

H.-N. TEODORESKU, Prof., Romania

G.-W. WEBER, Prof., Turkey

Ya.S. YATSKIV, Academician of NASU

THE EDITION ADDRESS:

03056, Kyiv,
av. Peremogy, 37, building 35,
Institute for Applied System Analysis
at the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
Phone: **204-81-44**; Fax: **204-81-44**
E-mail: journal.iasa@gmail.com
<http://journal.iasa.kpi.ua>

In the issue:

• **Progressive information technologies, high-efficiency computer systems**

• **Decision making and control in economic, technical, ecological and social systems**

• **Methods of optimization, optimum control and theory of games**

• **Mathematical methods, models, problems and technologies for complex systems research**

• **New methods in system analysis, computer science and theory of decision making**

Шановні читачі!

Навчально-науковий комплекс «Інститут прикладного системного аналізу» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» видає міжнародний науково-технічний журнал

«СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ».

Журнал публікує роботи теоретичного та прикладного характеру в широкому спектрі проблем, пов'язаних із системними дослідженнями та інформаційними технологіями.

Провідні тематичні розділи журналу:

Теоретичні та прикладні проблеми і методи системного аналізу; теоретичні та прикладні проблеми інформатики; автоматизовані системи управління; прогресивні інформаційні технології, високопродуктивні комп'ютерні системи; проблеми прийняття рішень і управління в економічних, технічних, екологічних і соціальних системах; теоретичні та прикладні проблеми інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень; проблемно і функціонально орієнтовані комп'ютерні системи та мережі; методи оптимізації, оптимальне управління і теорія ігор; математичні методи, моделі, проблеми і технології дослідження складних систем; методи аналізу та управління системами в умовах ризику і невизначеності; евристичні методи та алгоритми в системному аналізі та управлінні; нові методи в системному аналізі, інформатиці та теорії прийняття рішень; науково-методичні проблеми в освіті.

Головний редактор журналу — ректор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», академік НАН України Михайло Захарович Згуровський.

Журнал «Системні дослідження та інформаційні технології» включено до переліку фахових видань ВАК України.

Журнал «Системні дослідження та інформаційні технології» входить до таких наукометричних баз даних: EBSCO, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, реферативна база даних «Україніка наукова», український реферативний журнал «Джерело», наукова періодика України, ВІНІТІ РАН.

Статті публікуються українською, російською та англійською мовами.

Журнал можна передплатити. **Наш індекс 23918.** Якщо ви не встигли передплатити журнал, його можна придбати безпосередньо в редакції. Наша адреса: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корп. 35.

Завідуюча редакцією **С.М. Шевченко**

Редактор **Р.М. Шульженко**

Молодший редактор **Л.О. Тарин**

Комп'ютерна верстка, дизайн **А.А. Патіоха**

Підписано до друку 25.06.2019. Формат 70x108/16.

Папір офс. Офс. друк. Ум. друк. арк. 14. Ціна договірна.

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 23234–13074 ПР від 22.03.2018 р.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Свідоцтво про державну реєстрацію: серія ДК № 5354 від 25.05.2017 р.
Просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Видавництво «Політехніка»
вул. Політехнічна, 14, корп. 15, м. Київ, 03056. Тел. (044) 204-81-78
Наклад 136 пр. Зам. №

Dear Readers!

Educational and Scientific Complex «Institute for Applied System Analysis» of the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» is published of the international scientific and technical journal

**«SYSTEM RESEARCH AND
INFORMATION TECHNOLOGIES».**

The Journal is printing works of a theoretical and applied character on a wide spectrum of problems, connected with system researches and information technologies.

The main thematic sections of the Journal are the following:

Theoretical and applied problems and methods of system analysis; theoretical and applied problems of computer science; automated control systems; progressive information technologies, high-efficiency computer systems; decision making and control in economic, technical, ecological and social systems; theoretical and applied problems of intellectual systems for decision making support; problem- and function-oriented computer systems and networks; methods of optimization, optimum control and theory of games; mathematical methods, models, problems and technologies for complex systems research; methods of system analysis and control in conditions of risk and uncertainty; heuristic methods and algorithms in system analysis and control; new methods in system analysis, computer science and theory of decision making; scientific and methodical problems in education.

The editor-in-chief of the Journal is rector of the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», academician of the NASU Michael Zaharovich Zgurovsky.

The articles to be published in the Journal in Ukrainian, Russian and English languages are accepted. Information printed in the Journal is included in the Catalogue of periodicals of Ukraine.

СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

2 • 2019

ЗМІСТ

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ВИСОКОПРОДУКТИВНІ КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ

Мельник І.В., Починок А.В. Алгоритм розрахунку фокальних параметрів профільних електронних пучків, які формуються газорозрядними гарматами 07

Matsuki Yoshio, Bidiuk Petro I. Empirical investigation on influence of moon's gravitational-field to earth's global temperature 18

Naderan Maryam, Zaychenko Yuriy. Methods for improving accuracy of the dementia diagnosis using feature dimension reduction 25

ПРОБЛЕМИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ТА УПРАВЛІННЯ В ЕКОНОМІЧНИХ, ТЕХНІЧНИХ, ЕКОЛОГІЧНИХ І СОЦІАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Гуськова В.Г., Бідюк П.І. Оцінювання кредитоспроможності позичальників кредитів методами інтелектуального аналізу даних 31

Литвинов В.А., Майстренко С.Я., Хурцилава К.В., Костенко С.В. Оцінювання контролювальних і коригувальних властивостей референтного словника системи перевірки і виправлення орфографії 49

Махорт А.П. Алгоритми визначення станів рівноваги економічної системи за наявності монополістів та з різними типами поведінки споживачів 65

Марценюк В.П., Сверстюк А.С. Експоненціальна оцінка для рекурентної нейронної мережі з дискретним запізненням 83

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ, ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ І ТЕОРІЯ ІГОР

Капустян О.А., Наконечний О.Г. Наближене мінімаксне оцінювання функціоналів від розв'язку параболічної задачі зі швидкоколивними коефіцієнтами під час нелінійних спостережень 94

МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ, МОДЕЛІ, ПРОБЛЕМИ І ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

Поліщук О.Д., Яджак М.С. Мережеві структури та системи. IV. Паралельне опрацювання результатів неперервного моніторингу 105

НОВІ МЕТОДИ В СИСТЕМНОМУ АНАЛІЗІ, ІНФОРМАТИЦІ ТА ТЕОРІЇ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Kislenko Y.I. On the way to solving the problem of "Semantic Web – Data Base" 115

Реферати 141

Відомості про авторів 148

SYSTEM RESEARCH AND INFORMATION TECHNOLOGIES

2 • 2019

CONTENT

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES, HIGH-EFFICIENCY COMPUTER SYSTEMS

- Melnyk I.V., Pochynok A.V.* Algorithm of calculation of focal parameters of profile electron beams, formed by the gas-discharge electron guns 7
- Matsuki Yoshio, Bidyuk Petro I.* Empirical investigation on influence of moon's gravitational-field to earth's global temperature 18
- Naderan Maryam, Zaychenko Yuriy.* Methods for improving accuracy of the dementia diagnosis using feature dimension reduction 25

DECISION MAKING AND CONTROL IN ECONOMIC, TECHNICAL, ECOLOGICAL AND SOCIAL SYSTEMS

- Guskova V.G., Bidyuk P.I.* Evaluating the borrower's creditworthiness of loans using data mining methods 31
- Lytvynov V.A., Maystrenko S.Ya., Khurtsylava K.V., Kostenko S.V.* Evaluation of the detection and correction properties of the reference dictionary of the system for checking and correcting orthography 49
- Makhort A.P.* Algorithms for determining equilibrium states of an economy under the presence of monopolies and consumers with different behaviours 65
- Martsenyuk V.P., Sverstiuk A.S.* An exponential evaluation for recurrent neural network with discrete delays 83

METHODS OF OPTIMIZATION, OPTIMUM CONTROL AND THEORY OF GAMES

- Kapustian O.A., Nakonechnyi O.G.* Approximate minimax estimation of functional from the solution of parabolic boundary-value problem with rapidly oscillating coefficients under nonlinear observations 94

MATHEMATICAL METHODS, MODELS, PROBLEMS AND TECHNOLOGIES FOR COMPLEX SYSTEMS RESEARCH

- Polishchuk O.D., Yadzhak M.S.* Network structures and systems: IV. Parallel processing of continuous monitoring results 105

NEW METHODS IN SYSTEM ANALYSIS, COMPUTER SCIENCE AND THEORY OF DECISION MAKING

- Kislenko Y.I.* On the way to solving the problem of "Semantic Web – Data Base" 115
- References 141
- Information about the authors 148

АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ФОКАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОФІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ, ЯКІ ФОРМУЮТЬСЯ ГАЗОРОЗРЯДНИМИ ГАРМАТАМИ

І.В. МЕЛЬНИК, А.В. ПОЧИНОК

Анотація. Розглянуто алгоритм розрахунку фокусної відстані порожнистого конусного електронного пучка, який формується електронними гарматами високовольтного тліючого розряду, а також розрахунку діаметра та товщини фокального кільця такого пучка. Запропонований алгоритм оснований на моделі вільного дрейфу електронів в анодній плазмі та сформований на основі законів електронної оптики з використанням методів дискретної математики та мінімаксного аналізу. Отримані результати моделювання дозволили встановити важливі закономірності, що характеризують залежність фокальних параметрів порожнистого конусного електронного пучка, який формується електронними гарматами високовольтного тліючого розряду, від конструктивних параметрів електродної системи електронної гармати.

Ключові слова: мінімаксний аналіз, модель вільного дрейфу електронів, фокальні параметри електронного пучка, високовольтний тліючий розряд.

ВСТУП

Електронні гармати високовольтного тліючого розряду (ВТР) знаходять широке впровадження в різних галузях промисловості, зокрема в електронній промисловості, приладобудуванні, машинобудуванні, металургії, автомобільній та авіаційній промисловості. Це насамперед зумовлено тим, що гармати ВТР мають низку переваг порівняно із традиційними електронними гарматами з розжарюваними катодами за умови роботи в низькому вакуумі в середовищі різних технологічних газів, зокрема інертних та активних [1–6]. Серед цих переваг варто відзначити такі [1, 2, 7]:

- високу стабільність роботи електронних гармат ВТР та довговічність охолоджуваних катодів у діапазоні робочого тиску 0,1–10 Па;
- відносну простоту конструкцій електронних гармат та можливість їх оновлення і ремонту із заміною головних функціональних вузлів, зокрема холодних катодів;
- простоту керування потужністю електронного пучка зміною тиску газу або електричним способом.

Істотним недоліком електронних гармат ВТР вважається відносно мале значення густини струму з поверхні катода, яке за фізичних умов горіння

розрядів низького тиску становить не більше як $0,01 \text{ А/см}^2$, що потребує для досягнення відносно високої потужності технологічних електронних пучків використання катодів з розвинутою емісійною поверхнею [1, 2]. Однак саме з цієї причини виникає можливість формувати з використанням гармат ВТР профільні електронні пучки зі складною просторовою геометрією, зокрема дискові та трубчасті електронні пучки [1, 8]. Спрощену конструктивну схему електродної системи електронної гармати ВТР, яка формує порожнистий конусний електронний пучок з кільцевим фокусом, зображено на рис. 1.

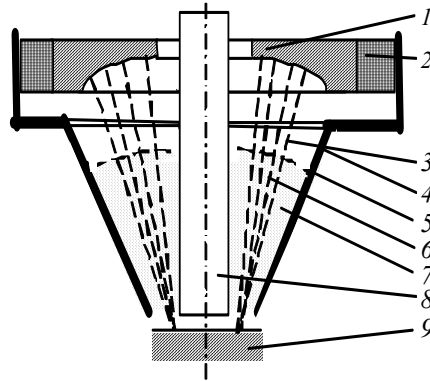


Рис. 1. Конструктивна схема аксіально-симетричної електродної системи ВТР, призначеної для формування порожнистого конусного електронного пучка: 1 — катод; 2 — високовольтний ізолятор; 3 — електронний пучок; 4 — анод; 5 — плазмова межа; 6 — електронний пучок; 7 — анодна плазма; 8 — допоміжний циліндричний електрод; 9 — виріб, який обробляється

Головна перевага електродної системи (рис. 1): кут нахилу α аксіально-симетричного електронного пучка задається до осі симетрії електродної системи, що дозволяє отримувати необхідний розподіл енергії пучка у площині розташування виробу і в такий спосіб оптимізувати технологію термічного оброблення виробів та підвищити їх якість [9].

Проблема полягає у тому, що натепер не існує точних, адекватних та простих математичних моделей, які дозволяли б на початковому етапі проектування розраховувати вихідні параметри електронних гармат ВТР, які суттєво впливають на хід проведення технологічного процесу. Насамперед це стосується електродних систем зі складною просторовою геометрією, які формують профільні електронні пучки. Наприклад, математичні моделі, які розглядалися у праці [8], є досить складними і не універсальними, оскільки вони орієнтовані на аналіз електродних систем, які формують трубчасті та дискові електронні пучки.

Мета роботи — розроблення універсального алгоритму для визначення фокальних параметрів конусного порожнистого електронного пучка, який формується в електродній системі ВТР (рис. 1).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Узагальнену методику розв’язування електронно-оптичної задачі для електродних систем ВТР сформульовано у працях [10, 11]. Ця методика ґрунтується на гіпотезі про те, що межа анодної плазми в електродних системах ВТР розглядається як джерело іонів та як рухомий прозорий для електронів

електрод з потенціалом, близьким до анодного. У праці [2] також обґрунтовано, що для максимальних струмів розряду межа анодної плазми ВТР є паралельною до поверхні катода і не змінює положення зі зміною струму розряду. Крім того, висунуто та обґрунтовано припущення про те, що об'єм, який займає анодна плазма, визначається лише прискорювальною напругою і тиском робочого газу в розрядній камері гармати і не залежить від геометрії електродів. За такої умови у працях [10, 11] запропоновано спосіб розрахунку положення плазмової межі для максимальних значень струму ВТР, оснований на тому, що спочатку визначається її положення в еквівалентній одновимірній системі із плоскими електродами, а потім отримане значення перераховується для реальної геометрії електродів з урахуванням того, що в ній плазма займає такий самий об'єм, а її межа паралельна поверхні катода. За умови малих струмів розряду геометрія плазмової межі визначається через комп'ютерний аналіз фотографій розрядного проміжку як місце межі світлої та темної ділянок розряду. За таких умов для математичного описання положення плазмової межі відносно поверхні катода запропоновано відповідні апроксимаційні співвідношення [12].

БАЗОВА СИСТЕМА РІВНЯНЬ ДЛЯ МОДЕЛІ САМОУЗГОДЖЕНОЇ ЕЛЕКТРОННО-ІОННОЇ ОПТИКИ ЕЛЕКТРОДНИХ СИСТЕМ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ

За умови відомої геометрії плазмової межі розподіл електричного поля в електродній системі (рис. 1) може бути знайдений через числове розв'язання рівняння Пуассона, поданого у циліндричних координатах, методом скінченних різниць. Відповідні скінченно-різницеві співвідношення записуються таким чином [13]:

$$U^n(i, k) = \omega \left[C_a U^{n-1}(i+1, k) + C_b U^{n-1}(i, k+1) + C_c U^n(i-1, k) + C_d U^n(i, k-1) + \frac{\rho^{n-1}(i, k)}{\epsilon_0} \right] + (1-\omega) U^{n-1}(i, k), \quad (1)$$

де

$$C_a = C_c = \frac{1}{4h_z^2}; \quad C_b = \frac{1 + \frac{1}{2k}}{h_r^2}; \quad C_d = \frac{1 - \frac{1}{2k}}{h_r^2}, \quad (2)$$

для точок, які не лежать на осі z , та

$$C_a = \frac{4h_r^2}{6}; \quad C_c = 0; \quad C_b = C_d = \frac{h_z^2}{6} \quad (3)$$

для точок, які лежать на осі z ; n — номер поточної ітерації за потенціалом; i та k — номери поточних вузлів, які розглядаються, відповідно за поздовжньою та радіальною координатами; ω — числовий параметр, який залежить від геометрії електродної системи і впливає на швидкість збіжності ітераційного процесу за потенціалом; h_r — крок дискретизації по осі r ; h_z — крок дискретизації по осі z ; $\rho^{n-1}(i, k)$ — просторовий заряд у вузлі з номером (i, k) на попередній ітерації.

Для підвищення ефективності реалізації у системі науково-технічних розрахунків MatLab та для використання можливостей паралельних обчислень на сучасних багатоядерних процесорах і в комп'ютерних мережах співвідношення (1)–(3), відповідно до концепції матричного програмування, були переписані як один арифметико-логічний вираз [14–16]:

$$\begin{aligned}
 m &= (l > 0)(l - 1) + (l = 0) \cdot 1, \quad C_m = 1 + \frac{1}{2m}, \quad D_m = 1 - \frac{1}{2m}; \\
 U_{k,l} &= \left((l > 0) \cdot \frac{\frac{U_{k-1,l} + U_{k+1,l}}{h_r^2} + \frac{D_m U_{k,m} + C_m U_{k,l+1}}{h_z^2}}{\frac{2}{h_r^2} + \frac{2}{h_z^2}} + \right. \\
 &\quad \left. + (l = 0) \cdot \frac{\frac{U_{k-1,l} + U_{k+1,l}}{h_r^2} + \frac{4U_{k,l+1}}{h_z^2}}{\frac{2}{h_r^2} + \frac{4}{h_z^2}} \right) (U_{\text{п}} < U_{k,l} < U_{\text{пр}}) + \\
 &\quad + (U = U_{\text{п}})U_{\text{п}} + (U < U_{\text{п}}) \left(\frac{kh_r(U_{\text{пр}} - U_{\text{п}})}{r_{\text{п}} - r_{\text{а}}} \right) + (U \geq U_{\text{пр}})U_{\text{пр}},
 \end{aligned} \tag{4}$$

де $U_{\text{пр}}$ — прискорювальна напруга; $U_{\text{п}}$ — потенціал анодної плазми; $r_{\text{п}}$ — радіус, який визначає положення плазмової межі; $r_{\text{а}}$ — радіус вихідного анодного отвору.

Для розрахунку траєкторій електронів та іонів в області катодного падіння потенціалу використовувалось відоме електронно-оптичне рівняння [17, 18]:

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{\left(\frac{\partial U(r, z)}{\partial r} - \frac{\partial U(r, z)}{\partial z} \frac{dr}{dz} \right) \left(1 + \left(\frac{dr}{dz} \right)^2 \right)}{\left(\frac{m_s v_s}{2} + 2(U(r, z) - U_e) \right)}, \tag{5}$$

де m_s — маса рухомої частинки; v_s — її швидкість; U_e — потенціал емітера частинок.

Для розрахунку просторового заряду використано метод трубок струму, головні ітераційні співвідношення якого модифіковані для врахування елементарних процесів взаємодії заряджених частинок ВТР, зокрема процесу перезарядження іонів на атомах залишкового газу та взаємодії іонного потоку з поверхнею катода, та наведені у працях [10, 11]:

$$\begin{aligned}
 \Delta N_i &= 2\pi N_A (1 - \xi) U_{\text{сеп}} Q_{\text{in}} \frac{\Delta r l_{\text{тр}} h_z p_0}{\Delta z p_{\text{атм}} r_{\text{тр}}^2}; \quad U_{\text{сеп}} = \frac{U_{k,l} + U_{k-1,l} + U_{k,l-1} + U_{k-1,l-1}}{4}; \\
 \rho_c^{i+1} &= \frac{\rho_c^{i2}}{\rho_c^i - 2\pi \Delta N_i r_{\text{тр}}^2 \frac{\Delta r l h_z}{\Delta z}}; \quad I_{\text{тр}}^{i+1} = I_{\text{тр}}^i - \frac{\rho_c^i}{\rho_c^i - 2\pi \Delta N_i r_{\text{тр}}^2 \frac{\Delta r l h_z}{\Delta z}},
 \end{aligned} \tag{6}$$

де ΔN_i — зміна концентрації іонів у межах скінченно-різницевої комірки в результаті процесу резонансного перезарядження; N_A — постійна Авогадро; ξ — коефіцієнт питомої іонізації атомів газу; $p_{\text{атм}}$ — атмосферний тиск; Q_{in} — усереднений перетин перезарядження іонів на атомах залишкового газу; $U_{\text{сер}}$ — усереднене значення потенціалу в межах комірки.

За умови відомих траєкторій електронів пучка в ділянці катодного падіння потенціала з урахуванням просторового заряду електронів та іонів, які шукаються ітераційно з використанням співвідношень (1)–(6), положення фокуса електронного пучка та його фокальний діаметр можна знайти, використовуючи модель вільного дрейфу електронів в анодній плазмі з урахуванням їх розсіювання на атомах залишкового газу та просторового заряду, компенсованого іонами газу. Відповідна модель базується на алгоритмах розв'язування екстремальних задач, відомих з методів числового аналізу та основ дискретної математики [19, 20]. Базові співвідношення моделі вільного дрейфу електронних пучків в іонізованому газі розглядалися у працях [17, 18]. У працях [10, 11] були отримані та проаналізовані відповідні ітераційні співвідношення моделі дрейфу електронів в анодній плазмі для аксіально-симетричних систем ВТР, які формують електронні пучки із точковим фокусом. Проте для електродної системи (рис. 1), призначеної для формування порожнистого конусного електронного пучка із кільцевим фокусом, алгоритм пошуку положення просторового фокуса електронного пучка та визначення його фокальних параметрів має бути дещо зміненим та уточненим.

АЛГОРИТМ ОБЧИСЛЕННЯ ФОКАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОРОЖНИСТОГО КОНУСНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Модель вільного дрейфу електронів пучка в іонізованому газі оснований на тому, що за відсутності електричного поля електрони рухаються між іонами у заданому напрямку і стикаються з ними, а просторовий заряд електронів пучка та іонів залишкового газу безпосередньо впливає на цей рух. За таких фізичних умов головними процесами, які можуть змінити напрямок руху електронів, є розсіювання електронів на атомах залишкового газу та вплив просторового заряду.

У математичній формі модель руху заряджених частинок записується через зміну кута нахилу траєкторій електронів φ . Тоді за допомогою аналізу траєкторій з використанням функцій дискретної математики [19] та методів розв'язування екстремальних задач [20] обчислюються фокальні параметри електронного пучка. Для цього послідовно розраховуються траєкторії електронів через зміну координатів трубки струму r за умови заданого кроку h_z за координатою z , і в такий спосіб визначається положення трубки з максимальним струмом. Тоді положення фокуса пучка $F_{\text{п}}$ відповідає координаті z , для якої значення r для трубки з максимальним струмом є мінімальним.

Аналогічно обчислюються фокальні параметри конусного порожнистого електронного пучка, якими є радіус фокального кільця $R_{\text{ф}}$ та його тов-

щина T_ϕ . Радіус фокального кільця відповідає положенню трубки з максимальним струмом за координатою r у фокальній площині, а його товщина розраховується як різниця положення двох віддалених трубок з мінімальними струмами. Ілюстративно даний мінімаксний алгоритм пошуку положення фокуса електронного пучка та визначення його фокальних параметрів показано на рис. 2 і 3. Математичні співвідношення, які відповідають описаному алгоритму, записуються у вигляді

$$\Omega_k = \{k | k = \overline{1, \dots, K}, k \in N\}; \quad M = [D/h]; \quad \Omega_i = \{i | i = \overline{1, \dots, L}, i \in N\}; \quad (7)$$

$$r(i, k) = r(i, k - 1) + h_z \operatorname{tg}(\varphi(i, k));$$

$$j_\Pi^{\max}(k) = \max_{i \in \Omega_i} [j_\Pi(i, k)]; \quad r_\Pi^{\max}(k) = \arg(j_\Pi^{\max}); \quad F_\Pi = d_{d\Pi} + h_z \arg \min_{k \in \Omega_k} [r_\Pi^{\max}(k)];$$

$$r_{\Pi 1}^{\min}(k) = \arg(0, 1 j_\Pi^{\max}) \Big|_{z=F_\Pi, r_\Pi < r_\Pi^{\max}};$$

$$r_{\Pi 2}^{\min}(k) = \arg(0, 1 j_\Pi^{\max}) \Big|_{z=F_\Pi, r_\Pi > r_\Pi^{\max}};$$

$$R_\phi = r_\Pi^{\max}(k) \Big|_{z=F_\Pi}; \quad T_\phi = (r_{\Pi 2}^{\min}(k) - r_{\Pi 1}^{\min}(k)) \Big|_{z=F_\Pi},$$

де Ω_k — область значень змінної k ; Ω_i — область значень змінної i ; $r(i, k)$ — поточна поперечна координата r , яка характеризує положення трубки струму з номером i ; D — довжина обчислювальної ділянки; h — крок дискретизації ділянки; $r_\Pi(k)$ — радіус пучка для поточної координати z , заданої відліковою точкою k ; $j_\Pi^{\max}(k)$ — максимальне значення струму в поперечному перетині електронного пучка; R_ϕ — радіус фокального кільця електронного пучка; F_Π — його фокусна відстань; T_ϕ — товщина фокального кільця.

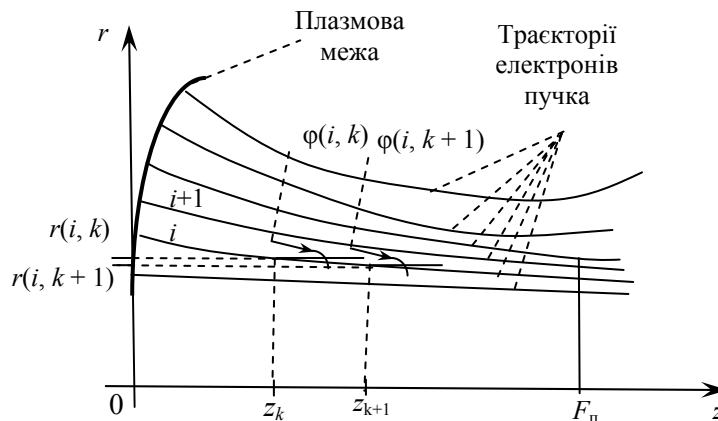


Рис. 2. Ілюстрація способу обчислення положення фокуса електронного пучка з використанням моделі вільного дрейфу електронів в анодній плазмі

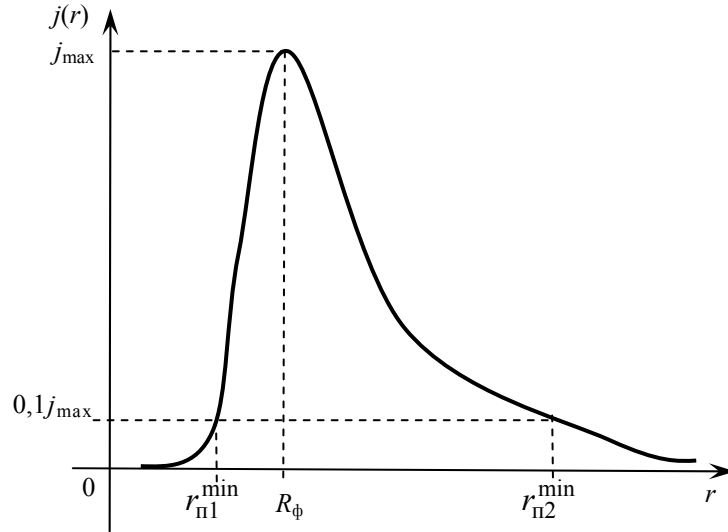


Рис. 3. Ілюстрація способу обчислення фокальних параметрів електронного пучка

Ітераційні розрахунки з використанням співвідношень (7) виконуються доти, доки не буде виконано співвідношення

$$r_{\pi}^{\max}(k) > r_{\pi}^{\max}(k-1). \quad (8)$$

Якщо умову (8) виконано, можна вважати, що єдиний мінімум, який має функція $r_{\pi}^{\max}(k)$, знайдено і $F_{\pi} = d_{\text{кп}} + h_z(k-1)$.

Для врахування впливу на формування електронного пучка процесу розсіювання електронів на іонах та нейтральних атомах залишкового газу необхідно обчислювати кути їх розсіювання. Для умов горіння ВТР точною та адекватною є модель багатократного пружного розсіювання Резерфорда. Відповідна система рівнянь подається так [17, 18]:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(0,5\theta_{\min}) &= \frac{10^{-4}Z^{4/3}}{2\gamma_p\beta^2}; & \operatorname{tg}(0,5\theta_{\max}) &= \frac{Ze^2}{m_e v^2 r_{\pi}(i)}; & v_e &= \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}; \\ dL &= h_z \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi)}; & d\theta &= \frac{4Z(Z+1)r_e^2\gamma_p^2}{(\gamma_p^2-1)^2} n_0 dL \ln\left(\frac{\theta_{\min}}{\theta_{\max}}\right); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\varphi(i, k) = \varphi(i, k-1) + d\theta,$$

де m_e — маса електрона; Z — заряд ядра атомів робочого газу; r_e — радіус електрона відповідно до моделі Бора; φ — кут вльоту електронів; γ_p — релятивістський фактор, де θ_{\min} — мінімальний кут розсіювання; θ_{\max} — максимальний кут розсіювання; $\beta = v_e/c$ — відношення швидкості електронів пучка до швидкості світла; r_{π} — радіус електронного пучка на ітерації; n — концентрація атомів газу; $\bar{\theta}$ — середній кут розсіювання.

Іншим важливим фізичним ефектом, який визначає ступінь компресії електронного пучка та його фокальний діаметр, є іонне фокусування. Вплив іонного фокусування на траєкторії електронів пучка залежить безпосередньо від тиску газу в порожнині конусного анода і визначається концентрацією іонів, яка для заданого значення тиску та прискорювальної напруги розраховується через співвідношення [17, 18]:

$$n_{i0} = \sqrt{\pi} r_{\text{п}}^2 B_i p n_e \sqrt{\frac{m_i \epsilon_0 n_e}{m_e U_{\text{пр}}}} \exp\left(-\frac{U_{\text{пр}}}{\epsilon_0 n_e r_{\text{п}}^2}\right), \quad (10)$$

де n_{i0} — концентрація іонів; B_i — ступінь іонізації газу; p — тиск газу; n_e — концентрація електронів; m_i — молекулярна маса іонів газу; ϵ_0 — діелектрична стала. Тоді для елементарної трубки струму можна записати систему алгебро-диференціальних рівнянь [17, 18]:

$$f = \frac{n_e}{n_{i0} - n_e}; \quad C = \frac{I_{\text{тр}}(1 - f - \beta^2)}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m_e} U_{\text{пр}}^{3/2}}}; \quad \frac{d^2 r_{\text{тр}}}{dz^2} = \frac{C}{r_{\text{тр}}} + \frac{d\theta_p}{dz}, \quad (11)$$

де f — рівень компенсації просторового заряду електронного пучка іонами залишкового газу. Диференціальне рівняння системи (11) на кожній ітерації розв'язувалось чисельно з використанням методу Рунге–Кутта четвертого порядку [14, 15, 21].

Блок-схему алгоритму обчислення фокальних параметрів порожнистого конусного електронного пучка, заданого співвідношеннями (7)–(11), зображено на рис. 4.

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Із використанням співвідношень (4)–(7) та урахуванням (8)–(11) отримано залежності розподілу струму електронного пучка у фокальній площині і згідно з алгоритмом, блок-схему якого зображено на рис. 4, знайдено радіус і товщину фокального кільця. Отримані результати для розподілу густини струму електронного пучка вздовж поперечної координати подано у вигляді рис. 4. Розрахунки виконувались для прискорювальної напруги $U_{\text{пр}} = 15$ кВ; робочий газ — азот, тиск газу у розрядній камері $p = 4,5$ Па. Радіус сфери катода $R_{\text{к}}$ становив 70 мм, а кут нахилу твірної конусної поверхні анода до осі симетрії електродної системи $\alpha = 15^\circ$. За таких умов фокальна площина електронного пучка розміщувалась на відстані $F_{\text{р}} = 64,85$ мм від поверхні катода вздовж осі симетрії системи, а відстань від поверхні катода до межі анодної плазми, обчислена на основі гіпотези про те, що межа анодної плазми паралельна поверхні катода [2], складала $d_{\text{кп}} = 38,42$ мм.

Як видно із графічної залежності, показаної на рис. 4, за таких умов радіус фокального кільця $R_{\text{ф}} = 8,7$ мм, а його товщина $T_{\text{ф}} = 12 - 7,6 = 5,4$ мм.

Отримані результати моделювання дозволили зробити такі висновки.

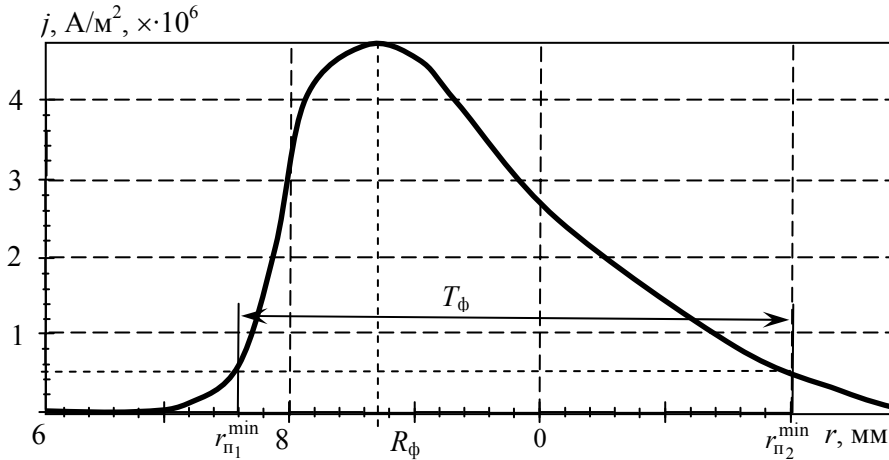


Рис. 4. Розподіл густини струму електронного пучка у його фокальній площині, отриманий в результаті моделювання електродної системи ВТР

1. Площина, у якій міститься фокальне кільце електронного пучка, розташовується на рівні, близькому до $R_k \cos(\beta)$, де R_k — радіус сфери катода; β — кут нахилу площини симетрії катода до осі симетрії електродної системи. Зазвичай значення F_π є дещо меншим за визначену величину $R_k \cos(\beta)$, що зумовлено фокусувальними властивостями анодної плазми та просторовим зарядом іонів. Тобто

$$F_\pi < \approx R_k \cos(\beta).$$

Відповідні конструктивні параметри електродної системи та їх зв'язок із фокальними параметрами порожнистого конусного електронного пучка показано на рис. 6.

2. Радіус фокального кільця R_ϕ близький до величини $r_k - R_k \sin(\beta)$, де r_k — положення центральної лінії сферичної поверхні катода відносно осі симетрії електродної системи (рис. 5). Як показали результати моделювання, радіус фокального кільця електронного пучка також менший за визначену граничну величину, що зумовлено іонним фокусуванням електронів пучка у плазмі. Тобто

$$R_\phi < \approx r_k - R_k \sin(\beta).$$

3. Результати моделювання показали, що для фізичних умов горіння ВТР, згідно із моделлю вільного дрейфу, вплив іонного фокусування більший, ніж вплив

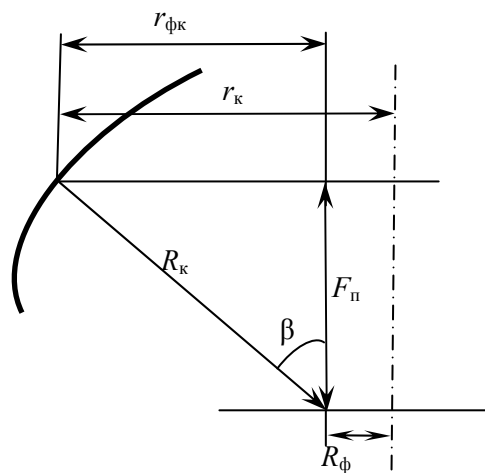


Рис. 5. Залежність фокальних параметрів порожнистого конусного електродного пучка від конструктивних параметрів електродної системи відповідно до законів геометричної оптики

розсіювання електронів пучка на атомах залишкового газу та власного просторового заряду електронів пучка.

4. Товщина фокального кільця порожнистого конусного електронного пучка залежить від його струму, визначається головним чином власним просторовим зарядом електронів і становить близько кількох міліметрів.

ВИСНОВКИ

У роботі проведено комплексне моделювання електродних систем ВТР, які формують профільні електронні пучки з кільцевим фокусом, і на основі моделі вільного дрейфу електронів в анодній плазмі визначено фокальні параметри електронного пучка. Запропонована модель вільного дрейфу електронів ґрунтується на алгоритмі пошуку екстремальних величин у заданій вибірці даних. З використанням методів комп'ютерного моделювання знайдено важливі закономірності, які описують залежність фокальних параметрів електронного пучка з кільцевим фокусом від геометрії електродів та від конструктивних параметрів електродної системи. Отримані залежності, основані на законах геометричної та фізичної оптики, мають важливе практичне значення для спеціалістів, які займаються проектуванням технологічного електронно-променевого обладнання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Новиков А.А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой / А.А. Новиков. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 96 с.
2. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейндел, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин. — М.: Атомиздат, 1989. — 256 с.
3. Ладохин С.В. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве / С.В. Ладохин, Н.И. Левитский, В.Б. Чернявский и др. — К.: Сталь, 2007. — 605 с.
4. Feinaeugle P. A new generation of plasma-based electron beam sources with high power density as a novel tool for high-rate PVD / P. Feinaeugle, G. Mattausch, S. Schmidt, F.H. Roegner // Society of Vacuum Coaters, 54-th Annual Technical Conference Proceedings, Chicago. — 2011. — P. 202–209.
5. Mattausch G. Gas discharge electron sources – proven and novel tools for thin-film technologies / G. Mattausch, B. Zimmermann, F. Fietzke et al. // Elektrotechnica and Electronica (E+E). — 2014. — Vol. 49, N 5–6. — P. 183–195.
6. Grechanyuk M.I. Modern electron beam technologies and equipment for melting and physical vapor deposition of different materials / M.I. Grechanyuk, A.G. Melnyk, I.M. Grechanyuk et al. // Elektrotechnica and Electronica (E+E). — 2014. — Vol. 49, N 5–6. — P. 115–121.
7. Denbnovetsky S.V. High voltage glow discharge electron sources and possibilities of its application in industry for realising of different technological operations / S.V. Denbnovetsky, V.G. Melnyk, I.V. Melnyk // IEEE Transactions on plasma science. — 2003. — Vol. 31, N 5. — P. 987–993.
8. Melnik I.V. Simulation of geometry of high voltage glow discharge electrodes' systems, formed profile electron beams / I.V. Melnik // Proceedings of SPIE, Vol. 6278, Seventh Seminar on Problems of Theoretical and Applied Electron and Ion Optics. — P. 627809-1 – 627809-13.
9. Рыкалин Н.Н. Основы электронно-лучевой обработки материалов / Н.Н. Рыкалин, И.В. Зуев, А.А. Углов. — М.: Машиностроение, 1978. — 239 с.

10. Мельник *И.В.* Численное моделирование распределения электрического поля и траекторий частиц в источниках электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда / И.В. Мельник // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. — 2005. — Т. 48. — № 6. — С. 61–71.
11. Мельник *И.В.* Методика моделирования технологических источников электронов высоковольтного тлеющего разряда / И.В. Мельник, С.Б. Тугай // Электронное моделирование. — 2010. — Т. 32. — № 6. — С. 31–43.
12. Мельник *И.В.* Исследование электронно-ионной оптики электродных систем высоковольтного тлеющего разряда с использованием методов компьютерного анализа изображений / И.В. Мельник // Электронное моделирование. — 2007. — Т. 29, № 1. — С. 45–58.
13. Ильин *В.П.* Численные методы решения задач электрофизики / В.П. Ильин. — М.: Наука, 1985. — 336 с.
14. Мельник *И.В.* Система науково-технічних розрахунків MatLab та її використання для розв'язання задач із електроніки: навч. посіб.; у 2-х т. / І.В. Мельник // Т. 1. Основи роботи та функції системи. — К.: Ун-т «Україна», 2009. — 507 с.
15. Мельник *И.В.* Система науково-технічних розрахунків MatLab та її використання для розв'язання задач із електроніки: навч. посіб.; у 2-х т. / І.В. Мельник // Т. 2. Основи програмування та розв'язання прикладних задач. — К.: Ун-т «Україна», 2009. — 327 с.
16. Мельник *И.В.* Использование параллельных вычислений для моделирования технологических газоразрядных источников электронов / И.В. Мельник, А.О. Лунтовский // Электронное моделирование. — 2016. — Т. 38. — № 3. — С. 5–21.
17. Молоковский *С.И.* Интенсивные электронные и ионные пучки / С.И. Молоковский, Д.И. Сушков. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 304 с.
18. Силадьи *М.* Электронная и ионная оптика / М. Силадьи. — М.: Мир, 1990. — 640 с.
19. Андерсон *Д.* Дискретная математика и комбинаторика / Д. Андерсон. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. — 960 с.
20. Васильев *В.П.* Численные методы решения экстремальных задач: учеб. пособие для вузов / В.П. Васильев. — М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1988. — 552 с.
21. Самарский *А.А.* Численные методы / А.А. Самарский, А.В. Гулин. — М.: Наука, 1989. — 432 с.

Надійшла 18.12.2018

EMPIRICAL INVESTIGATION ON INFLUENCE OF MOON'S GRAVITATIONAL-FIELD TO EARTH'S GLOBAL TEMPERATURE

YOSHIO MATSUKI, PETRO I. BIDYUK

Abstract. This research examined a possibility of the Moon's gravitational-wave that may influence Earth's global temperature, with a mathematical method of empirical analysis with the data of the global temperature, global carbon dioxide, and the distance between Moon and Earth. We made the regression analysis of the global temperature over the factors of Moon's gravitational field taken from the General Theory of Relativity and from the Newton's gravity theory, with the data of the carbon-dioxide. The result shows that Newton's gravitational field is related to Earth's global temperature, while the influence of Moon's gravitational wave is negligible. However, we also found a possibility that the gravitational wave could contribute to Moon's gravitational-field upon the analysis of multicollinearity of two factors taken from Newton's theory and the General Theory of Relativity.

Keywords: global temperature, Moon's gravitational field, gravitational wave, multicollinearity.

INTRODUCTION

Our previous research [1, 2] investigated the influence of Moon's gravitational-wave to the process of Earth's global warming with the methodology of empirical analysis with the database of Earth's global temperature and global carbon dioxide as well as the distance between Moon and Earth. Then, the result of the analysis suggested that there was a possibility, such that Moon's gravitational-wave influenced Earth's atmospheric temperature than global carbon dioxide could do. However, the presence of the gravitational-wave is not yet proven. In this research, we investigated the Moon's gravitational-field, in relation to the theory of 4-dimensional space that could include the gravitational-wave.

THEORY

The General Theory of Relativity [3] describes the actions of materials and energy flows in the gravitational field; while the gravitational wave is one of those flows of energy. At first, the actions of materials in the empty space, where only gravitational field exists, are described by the time-integral of the Lagrangian, $I_g = \int L\sqrt{-g}d^4x$, where $L\sqrt{-g}$ is the action density for the gravitational field. According to Einstein's law, $\delta I_g = -16\pi \int (R^{\mu\nu} - (1/2)g^{\mu\nu}R)\sqrt{-g}\delta g_{\mu\nu}d^4x = 0$, where $g_{\mu\nu}$ is a covariant fundamental tensor that describes the 4-dimensional curved space (of coordinates x_μ , where $\mu = 0, 1, 2, 3$), g is the determinant of $g_{\mu\nu}$, $R_{\mu\nu}$ is a Ricci Tensor that describes the curvature of the 4-dimensional

curved space, $R_{\mu\nu} = R_{\mu\nu\rho}^{\rho}$, $R_{\nu\rho\delta}^{\beta} = \Gamma_{\nu\sigma,\rho}^{\beta} - \Gamma_{\nu\rho,\sigma}^{\beta} + \Gamma_{\nu\sigma}^{\alpha}\Gamma_{\alpha\rho}^{\beta} - \Gamma_{\nu\rho}^{\alpha}\Gamma_{\alpha\sigma}^{\beta}$, $\Gamma_{\nu\sigma}^{\mu} = g^{\mu\lambda}\Gamma_{\lambda\nu\sigma}$, $\Gamma_{\mu\nu\sigma} = \frac{1}{2}(g_{\mu\nu,\sigma} + g_{\mu\sigma,\nu} - g_{\nu\sigma,\mu})$, $g_{\mu\nu,\sigma} = \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_{\sigma}}$ and $R = R_{\nu}^{\nu} = g^{\mu\nu}R_{\mu\nu}$. And, then, when an additional energy flow, such as gravitational wave is included one more extra Lagrangian, $I_c = c\int\sqrt{-g}d^4x$ is added to I_g . Here, $\delta I_c = c\int\frac{1}{2}g^{\mu\nu}\delta g_{\mu\nu}\sqrt{-g}d^4x$, and $\delta(I_g + I_c) = 0$. Hence, $16\pi\left(R^{\mu\nu} - \frac{1}{2}g^{\mu\nu}R\right) + \frac{1}{2}cg^{\mu\nu} = 0$, and then, $R = 4\lambda$. Hence, $R^{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = -\lambda g_{\mu\nu}$. Here, λ is a constant, and it must have the dimensions of (distance)⁻², because $R_{\mu\nu}$ contains the second derivatives of $g_{\mu\nu}$ in the 4-dimensional curved space. However, in the General Theory of Relativity, energy of the gravitational field can be integrated only in a large 3-dimensional volume at a certain time, which tends to be infinity, so that the energy densities can be integrated in the 4-dimensional curved coordinate system.

On the other hand, Newton's theory of gravity assumes weak and static gravitational field, and therefore the space is nearly flat, not with curvature; therefore, the energy of the gravitational field has the dimensions of (distance)⁻¹. And, Newton's gravitational field is independent from other energy fields. For example, the gravitational wave cannot be integrated within Newton's gravitational field.

In this research, we tried to find how Moon's gravitational wave can be related to the gravitational field, by using the mathematical method for empirical analysis with the database. For this purpose, we analyzed the relation between (distance)⁻² and (distance)⁻¹, where (distance) is the distance between Moon and Earth, within the system of Earth's global temperature. The research question is, "Are (distance)⁻² and (distance)⁻¹ related?" If there is a relation, we have a possibility to assume the 4-dimensional curved space which allows the curvature and the second derivatives of the energy.

METHOD

In order to examine the above research question, we made the regression analysis of (distance)⁻² and (distance)⁻¹ over the global temperature of Earth. And, then, we analyzed the multicollinearity of (distance)⁻² and (distance)⁻¹. We followed the steps bellow:

1. We assumed the regression model: $t = c_1 + c_2 \cdot \text{CO}_2 + c_3 \frac{1}{r} + c_4 \frac{1}{r^2}$ in addition to the model which we used in our previous research [1, 2]: $t = c_1 + c_2 \text{CO}_2 + c_3 \frac{1}{r^2}$, and then, we examined the coefficients and other characters of the models, which indicate the adequacy of the models. Here, t : Earth's global temperature, CO_2 : Earth's carbon dioxide, r : distance between Moon and Earth, and c_1, c_2, c_3 , and c_4 : constant coefficients.

2. We investigated the multicollinearity of $1/(r^2)$ and $1/r$, by the following steps:

a) regress $1/(r^2)$ on $1/r$, and obtain the residuals, $1/(r^2)^*$;

b) regress t (temperature) on $1/r$ and $1/(r^2)^*$ to estimate the parameters of the global temperature function;

c) Denote the results of the second step by $t = c_1(1/r) + c_2 * 1/(r^2)^*$;

d) Investigate the change of the value from c_2 to c_2^* .

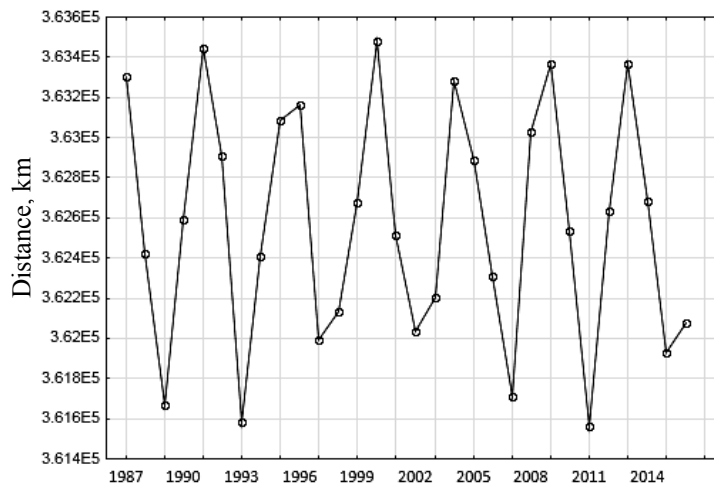
3. Database. The descriptive statistics of the data, from 1987 till 2009, of the global temperature (increased degree Celsius since 1978) [4], the global carbon dioxide (million tons) [5], the distance between Moon and Earth (r , km) [6], calculated $1/(r^2)$ (km^{-2}), and calculated $1/r$ (km) are shown in Table 1, and the distance between Moon and Earth is shown in Figure.

Table 1. Descriptive statistics

Variable	Global Temperature ($^{\circ}\text{C}$)*	CO ₂ (million tons)**	Distance between Moon and Earth (r , km)	$\frac{1}{r^2}$ (km^{-2})	$\frac{1}{r}$ (km^{-1})
Mean	0,29130	$1,25165 \cdot 10^3$	$3,62618 \cdot 10^5$	$7,60509 \cdot 10^{-12}$	$2,75773 \cdot 10^{-6}$
Standard deviation	0,12125	$2,14245 \cdot 10^2$	$5,98411 \cdot 10^2$	$2,51097 \cdot 10^{-14}$	$4,55200 \cdot 10^{-9}$
Minimum	0,10000	$8,92000 \cdot 10^2$	$3,61583 \cdot 10^5$	$7,56999 \cdot 10^{-12}$	$2,75116 \cdot 10^{-6}$
Maximum	0,43000	$1,62600 \cdot 10^3$	$3,63483 \cdot 10^5$	$7,64865 \cdot 10^{-12}$	$2,76562 \cdot 10^{-6}$
Skewness	-0,21063	0,14292	-0,15249	0,15787	0,15604
Kurtosis	1,29401	1,82491	1,67498	1,67879	1,67771
Valid number of observations	23	23	23	23	23

* Increased degree Celsius since 1978.

** To convert these estimates to units of carbon dioxide (CO₂), simply multiply these estimates by 3,667 [3].



Distance between Moon and Earth [1].

RESULTS

Regression Analysis (by Least Squares Estimations of Linear Classical Regression Model)

The global temperature $Y = \{y_1, \dots, y_n\}$, the constant value 1, x_1 , the measured global carbon-dioxide, x_2 , the inverse of the distance between Moon and Earth, x_3 , and the inverse of the squared distance between Moon and Earth, x_4 , are transformed into the forms of $n \times 1$ vectors, y, x_1, x_2, x_3, x_4 , where n is the number of observation, 23. Then, $n \times k$ matrix $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ is defined, where $k = \text{rank}(X)$. Then, we calculated the following matrices to get the coefficients b and their standard error (the diagonal elements of $\sqrt{V(b)}$).

$$Q = X'X, \text{ where } X' \text{ is a transposed matrix of the matrix } X;$$

$$b = Q^{-1}X'Y, \text{ where } Q^{-1} \text{ is an inversed matrix of the matrix } Q;$$

$$\hat{Y} = Xb : \text{ expected global temperature } Y;$$

$$e = Y - \hat{Y}; \quad V(b) = \frac{e'e}{n-k} Q^{-1}.$$

And, the values of the square-root of the diagonal elements of $V(b)$ are the standard errors of elements of the estimated coefficient-vector b . The results of the regression analysis are shown in Table 2.

Table 2. Result of Regression Analysis and Model Characterization (adequacy)

Parameter		$Y = c_1 + c_2\text{CO}_2 + c_31/(r^2)$	$Y = c_1 + c_2\text{CO}_2 + c_3(1/r) + c_41/(r^2)$
c_1		-1,17863	$-3,52065 \cdot 10^3$
c_2	Coefficient of CO_2	$5,33150 \cdot 10^{-4}$	$5,31189 \cdot 10^{-4}$
	Standard error of CO_2	$4,27704 \cdot 10^{-5}$	$4,29964 \cdot 10^{-5}$
c_3	Coefficient of $1/r$	---	$2,55211 \cdot 10^9$
	Standard error of $1/r$	---	$2,78543 \cdot 10^9$
c_4	Coefficient of $1/(r^2)$	$1,05537 \cdot 10^{11}$	$-4,62552 \cdot 10^{14}$
	Standard error of $1/(r^2)$	$3,64932 \cdot 10^{11}$	$5,04955 \cdot 10^{14}$
R^2 (coefficient of determination)		0,88602	0,89084
Durbin-Watson Statistic		0,22092	0,40021
Sum of Squared Residuals		$3,68696 \cdot 10^{-2}$	$3,53096 \cdot 10^{-2}$

Multicollinearity

At first, we made the regression of $\frac{1}{r^2}$ on $\frac{1}{r}$, and obtain the residuals $\frac{1}{r^2}^*$, by calculating the following matrices:

$$X = \left\{ \frac{1}{r}, \frac{1}{r^2} \right\}, \text{ a matrix made of two vectors } \frac{1}{r} \text{ and } \frac{1}{r^2};$$

$$Q = X'X, \text{ where, } X' \text{ is a transposed matrix of } X;$$

$$A = Q^{-1} \frac{1}{r}, \text{ where } Q^{-1} \text{ is an inversed matrix of } Q;$$

$$N = XA;$$

$M = I - N$, where, I is $k \times k$ matrix, in which all diagonal element is 1, and non-diagonal elements are ;

$$\frac{1}{r^2}^* = M \frac{1}{r^2}.$$

And, then, we made a regression analysis with the following steps:

$$X^* = \left\{ \frac{1}{r}, \frac{1}{r^2}^* \right\};$$

$$Q^* = X^* X^{*'} = \begin{bmatrix} 1.74017 \cdot 10^{-10} & 5.18316 \cdot 10^{-32} \\ 5.18316 \cdot 10^{-32} & 3.46866 \cdot 10^{-27} \end{bmatrix};$$

$$A^* = Q^{*-1} X^{*'};$$

$$b^* = A^* Y;$$

$$N^* = X^* A^*;$$

$$M^* = I - N^*;$$

$$e^* = M^* Y;$$

$$V(b^*) = \frac{e^{*'} e^*}{n - k} Q^{*-1}.$$

And, the values of the square-root of the diagonal elements of $V(b^*)$ are the standard errors of elements of the estimated coefficient-vector b^* . The calculated coefficients and their standard errors are shown in the second column of Table 3

$\left(Y = c_1 \frac{1}{r} + c_2 \frac{1}{r^2}^* \right)$. The third column of Table 3 $\left(Y = c_1 \frac{1}{r}^* + c_2 \frac{1}{r^2} \right)$ was calculated

after the regression of $\frac{1}{r}$ on $\frac{1}{r^2}$, to obtain the residuals $\frac{1}{r}^*$; and, the first

column of Table 3 $\left(Y = c_1 \frac{1}{r} + c_2 \frac{1}{r^2} \right)$ was calculated by making the regression of

Y on $\frac{1}{r}$ and $\frac{1}{r^2}$.

Table 3. Comparison of Calculated Coefficients and Standard Errors

Parameter		$Y = c_1 \frac{1}{r} + c_2 \frac{1}{r^2}$	$Y = c_1 \frac{1}{r} + c_2 \frac{1}{r^2}^*$	$Y = c_1 \frac{1}{r}^* + c_2 \frac{1}{r^2}$
c_1	Coefficient	$7,68915 \cdot 10^5$	$1,05630 \cdot 10^5$	$7,68916 \cdot 10^5$
	Standard error	$5,81004 \cdot 10^6$	$9,38188 \cdot 10^3$	$5,81005 \cdot 10^6$
c_2	Coefficient	$-2,40517 \cdot 10^{11}$	$-2,40519 \cdot 10^{11}$	$3,83024 \cdot 10^{10}$
	Standard error	$2,10681 \cdot 10^{12}$	$2,10681 \cdot 10^{12}$	$3,40201 \cdot 10^9$

ANALYSIS OF THE RESULTS

1. We added $\frac{1}{r}$ to the Classical Regression Model of our previous analysis [1]. The result shows more adequacy of the model in comparison with the previous model [1] in the coefficient of determination, Durbin-Watson Statistic and Sum of Squared Residuals; however, the sign of the coefficient of $\frac{1}{r^2}$ changed from positive sign (plus) to negative sign (minus), in Table 2. It means that $\frac{1}{r}$ is an influential variable to Earth's global temperature; while, $\frac{1}{r^2}$ is not influential in this system of Moon's gravitational field and Earth's global temperature.

2. We tested the multicollinearity of $\frac{1}{r}$ and $\frac{1}{r^2}$, by changing $\frac{1}{r^2}$ to $\frac{1}{r^2}^*$ by auxiliary residual regression, and then made the regression of Earth's temperature (Y) over $\frac{1}{r}$ and $\frac{1}{r^2}^*$. As the result, multicollinearity was found. In Table 3, the coefficient of $\frac{1}{r}$ changed from $7,68915 \cdot 10^5$ to $1,05630 \cdot 10^5$. It means that $\frac{1}{r^2}$ lowered the influence of $\frac{1}{r}$. On the other hand, we also changed $\frac{1}{r}$ to $\frac{1}{r}^*$ by auxiliary residual regression, and then made the regression of Earth's temperature (Y) over $\frac{1}{r}^*$ and $\frac{1}{r^2}$. The result shows that the coefficient of $\frac{1}{r^2}$ changed from $-2,40517 \cdot 10^{11}$ to $3,83024 \cdot 10^{10}$. This result means that $\frac{1}{r}$ increased the influence of $\frac{1}{r^2}$ in the system.

After these calculations, we conclude that $\frac{1}{r}$ and $\frac{1}{r^2}$ are related in the system of Moon's gravitational-field and Earth's temperature. This finding also implies that Moon's gravitational-field may be mainly described in the flat space,

although non-linear space (4-dimensional curved space in theory) could also influence the gravitational field of this system where the gravitational wave could interact.

CONCLUSION AND RECOMMENDATION

In the system of Earth's global temperature with Moon's gravitational field, the effect of $\frac{1}{r^2}$ is negligible in the presence of $\frac{1}{r}$. However, there is the multicollinearity between $\frac{1}{r}$ and $\frac{1}{r^2}$, which suggests the existence of the gravitational wave's interaction to the gravitational field; therefore there is a possibility for assuming the 4-dimensional curved space, instead of flat space. Further simulation is needed to model the system of flat space and curved space, which may explain how the gravitational wave and the gravitational field are interrelated.

So far, our calculation has shown that the influence of Moon's gravitational field to Earth's global temperature is significant than the influences of CO₂.

REFERENCE

1. *Matsuki Y.* Empirical analysis of moon's gravitational wave and Earth's global warming / Y. Matsuki, P.I. Bidyuk // System Research & Information Technology. — N 1. — 2018. — P. 107–118.
2. *Matsuki Y.* Analysis of Moon's gravitational-wave and Earth's global temperature: influence of time-trend and cyclic change of distance from Moon / Y. Matsuki, P.I. Bidyuk // System Research & Information Technology. — N 3. — 2018. — P. 19–30.
3. *Dirac P.A.M.* General Theory of Relativity / P.A.M. Dirac. — Florida University, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, New York, 1975. — P. 69.
4. UK Department of Energy and Climate Change (DECC). — Available at: <http://en.openei.org/datasets/dataset/b52057cc-5d38-4630-8395-b5948509f764/resource/f42998a9-071e-4f96-be52-7d2a3e5ecef3/download/england.surface.temp1772.2009.xls>
5. *Boden T.A.* Global Regional and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions / T.A. Boden, G. Marland, R.J. Andres. — Available at: cdiac.orbl.gov/trends/emits/tre_glob.html cdiac.ornl.gov/trends/emits/tre_glob.html (last access, 8 August 2017)
6. *Moon Distance Calculator – How Close is Moon to Earth?*. — Available at: <https://www.timeanddate.com/astronomy/moon/distance.html?year=1987&n=367>

Received 15.11.2018

From the Editorial Board: the article corresponds completely to submitted manuscript.

METHODS FOR IMPROVING ACCURACY OF THE DEMENTIA DIAGNOSIS USING FEATURE DIMENSION REDUCTION

MARYAM NADERAN, YURIY ZAYCHENKO

Abstract. In this paper, the problem of choosing the right feature for diagnosing Dementia is discussed. Several features that could affect dementia were reviewed and their importance was evaluated. Random forest algorithm and SVM for the dementia diagnosis have been developed and investigated. Experiments were conducted on the open-source database and compared with the related works' results. The purpose of the paper is to improve the accuracy of diagnosis of dementia using the reduction of features' dimension. This article is devoted to analysis of the main distinguishing features of Alzheimer's dementia, applicable methods and treatment of Alzheimer's dementia on early stage that could help to avoid negative consequences connected with progress of the disease. The purpose of the paper is to improve the accuracy of diagnosis of dementia.

Keywords: diagnosis Alzheimer's disease, ensemble learning methods, classification, Convolutional Neural Network.

INTRODUCTION

This article is devoted to analysis of the main distinguishing features of Alzheimer's dementia and applicable methods, main elements of successful diagnostics and treatment of Alzheimer's dementia on early stage, and review of the Alzheimer's association experience, that could help to avoid negative consequences connected with progress of the disease. In addition, it's necessary to find important features which play the big role in Alzheimer's disease diagnostics using by Random Forest Algorithms and Support Vector Machine (SVM) Algorithm. Distinguishing features of Alzheimer's dementia could be found using physical & neurological exam, mental status tests, computerized tests, screening, genetic tests and etc. For this research, Kaggle's data about patients Nondemented and Demented was used.

General features of Alzheimer's disease were described by foreign scientists S. Sarraf, G. Tofighi and J. Anderson in publication devoted to classification of the considered features using convolutional neural networks, that contain results necessary for distinguishing classification criteria and significant features taken into consideration for the patients with the mentioned disease. Authors stated, that "early detection and classification of Alzheimer's disease are critical for proper treatment and preventing brain tissue damage. Alzheimer's disease has a certain progressive pattern of brain tissue damage. It shrinks the hippocampus and cerebral cortex of the brain and enlarges the ventricles [6]. The considered general characteristics could be considered as common for many other mental diseases, but the underlined damage to the brain tissue and peculiarities of negative impact on the ventricles provide the grounds for differentiation at site.

Approaches as to the stages of Alzheimer's disease. Modern Ukrainian and foreign scholars have different views as to the issue of the main stages of Alzheimer's dementia, for example, in Ukrainian practice we found the approach providing differentiation into four main stages: prior dementia, early dementia, moderated dementia and final dementia, according to the classification provided by Ukrainian Clinics of modern neurology "Aximed".

RELATED WORK

Special attention should be paid to modern steps in differentiation of special types of Alzheimer's dementia revealed by L.V. Zhdaneeva in PhD thesis devoted to the issues of "Movement disorders of Alzheimer's disease" [1]. Author substantiated important statistical data, regarding internal differentiation of special features, common to patients with Alzheimer's dementia: "87,7 % of patients with Alzheimer's disease had movement disorders, including: 18,9 % — a kinetic-rigid syndrome; 27,8 % — hyperkinesias syndrome without rigidity; 8,8 % — tremor; 12,2 % — walking and postural stability disorder syndrome; 76,6 — pseudo bulbar syndrome; 45,6 % — stereotypes; 12,2 % — pyramidal syndrome; 6,7 % — epileptic seizures" [1, p. 23]. These data show strong correlation between general and special features, disorders common not only to patients with Alzheimer's dementia, that could be used for further scientific research and practical clinical activities, as the obtained data represent a wide range of patients with Alzheimer's disease and provide solutions for facilitation of differentiation of patient's status.

Modern research results in the field show, that the leading Harvard team was "the first to try to combine fMRI scans and deep learning into a program that could predict an MCI patient's chance of developing Alzheimer's disease. The fMRI scans used in their analysis were taken when patients were at rest. As with any fMRI scans, they reveal where electrical signals are flashing in the brain and how these areas relate to one another". But one of the latest publication in IEEE underlined, that there is no such a method found yet to provide 90 and more percent in recognition of Alzheimer's dementia. Such a conclusion was made by Dinggang Shen, famous scientist from University of North Carolina: "Nobody in the field can get from 80 to 90 percent," he says. "That's impossible, just based on this method" [5].

Negative impact on patient's memory can also be considered as a general feature for differentiation of the status of Alzheimer's patients. Progress of the disease makes it impossible to realize mental function as previously, during active adult or youth periods, even daily activities cannot be fulfilled without toil, patients thus need special assistance and support, understanding of their needs and problems. Scientists consider Alzheimer's disease as a severe disorder, that has neurological nature and affects human brains in a special way described above.

The mentioned approach differs from the one provided by J. Islam and Y. Zhang in the above-mentioned publication, providing classification into three main stages of Alzheimer's disease: very mild, mild and moderate [4]. The distinction between the considered approaches lies in the attitude to the prior stage of the disease that often shows very close features to other common mental, psychological, general diseases, in this respect it is important to discover modern methods of early diagnostics and treatment of Alzheimer's dementia, as it could provide the best results for evaluation of patient's health.

COMPARATIVE ANALYSIS

In [2] was carried out comparative analysis about methods which are using in medical diagnosis. It was emphasized that Convolutional Neural Network’s diagnosis ability is greater than endoscopists in general. In [3], authors have compared CNN and endoscopists. The results obtained show that the sensitivity, specificity, accuracy, and diagnostic time were 88,9%, 87,4%, 87,7%, and 194 s, respectively, for Convolutional Neural Network. The same indicators obtained for the 23 endoscopists were 79,0%, 83,2% and 82,4% respectively.

Among foreign scholars and researchers we should address to modern scientific articles of Jyoti Islam, Yanqing Zhang “An Ensemble of Deep Convolutional Neural Networks for Alzheimer’s Disease Detection and Classification” authors substantiated “a novel Alzheimer’s Disease detection and classification model using brain MRI data analysis, developed an ensemble of deep convolutional neural networks and demonstrated superior performance on the Open Access Series of Imaging Studies dataset” [4]. This aspect has special importance for domestic research and clinical practice as provides new knowledge and methods for development of early diagnostics of Alzheimer’s dementia.

Modern computerized systems provide experts with detailed information on the nature of dementia, it’s stage, or precisely define, a contrario, Nondemented status. For the past ten years significant development was achieved in using MRI, but modern foreign researchers insist on automated brain MRI results, providing at site segmentation and classification, comparison with other groups of patients, i.e. control groups collected in computerized memory. This could be an example of conclusions and recommendations of the 31-st Conference held in 2017 on Neural Information Processing Systems in USA, where it was proposed to use “handcrafted feature generation and extraction from the MRI data, improvement of machine learning models such as Support Vector Machine, Logistic regression model etc” [4, p. 2].

RESULTS

In related works, authors hadn’t mentioned which attributes are more informative for classification. In this paper, three more important features for dementia classification are detected.

Table 1 illustrates some of the data which were used in this paper [7]. The origin of the data set consists several visits of each patients. We consider only those patients who visited for the first time, since during second and third visit, patients could use medicine to prevent degradation of the dementia.

Table 1. Attributes with their definition

Attributes	Subject ID	MRI ID	Group	Visit	MR Delay	M/F	Hand
Definition	Subject identification	MRI identification	Class	Visit followup	MR contrast	Gender	Dominant hand
Attributes	EDUC	SES	MMSE	CDR	eTIV	nWBV	ASF
Definition	Education level	SES cognition test	MMSE cognition test	CDR cognition test	Estimated intracranial volume	Standardized brain volume	Atlas factor scaling

Table 2. Data of some patients during medical examination

Group	Visit	MR Delay	M/F	Hand	Age	EDUC	SES	MMSE	CDR	eTIV	nWBV	ASF
Nondemented	1	0	M	R	87	14	2	27	0	1987	0,696	0,883
Demented	1	0	M	R	75	12		23	0,5	1678	0,736	1,046
Nondemented	1	0	F	R	88	18	3	28	0	1215	0,71	1,444
Nondemented	1	0	M	R	80	12	4	28	0	1689	0,712	1,039
Demented	1	0	M	R	71	16		28	0,5	1357	0,748	1,293
Nondemented	1	0	F	R	93	14	2	30	0	1272	0,698	1,380
Demented	1	0	M	R	68	12	2	27	0,5	1457	0,806	1,205
Demented	1	0	F	R	66	12	3	30	0,5	1447	0,769	1,213
Nondemented	1	0	F	R	78	16	2	29	0	1333	0,748	1,316
Nondemented	1	0	F	R	81	12	4	30	0	1230	0,715	1,427
Demented	1	0	M	R	76	16	3	21	0,5	1602	0,697	1,096
Demented	1	0	M	R	88	8	4	25	0,5	1651	0,66	1,063
Nondemented	1	0	M	R	80	12	3	29	0	1783	0,752	0,985
Converted	1	0	F	R	87	14	1	30	0	1406	0,715	1,248
Converted	1	0	M	R	80	20	1	29	0	1587	0,693	1,106

Alzheimer's disease is diagnosed based on the value of some key indicators. Data analysis in table 3 illustrates some features with the average of each patients (Demented and Non-Demented).

Table 3. Average of each features that could cause the Alzheimer's disease

AVE	Age	EDUC	SES	MMSE	CDR	eTIV	nWBV	ASF
Female Demented	76,10714	12,89286	3	25,46429	0,625	1373,929	0,728786	1,281036
Female Non-Demented	75,68	15,22	2,38	29,34	0	1402,56	0,75072	1,26152
Male Demented	74,33333	14,30556	2,5625	25,22222	0,583333	1555,278	0,720972	1,135361
Male Non-Demented	74,86364	15,04545	2,5	28,86364	0	1656,364	0,735682	1,070909

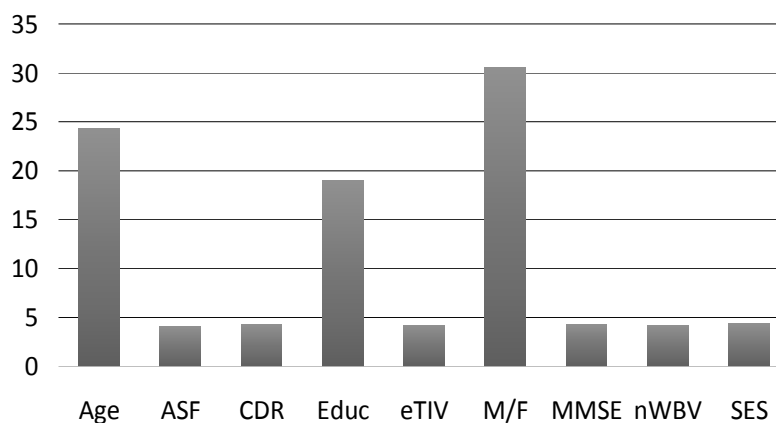
Based on the table 3, it could be concluded that the average of education level for Demented people is less than Non-Demented. While average of the age for Demented patients is higher than Non-Demented (for both female and male).

All features were compared separately during training Random Forest Algorithm. After some experiments, Gender, Age and Education level were computed that are the most valuable attributes for classification. The coefficient of importance each features for forest was multiplied by 100 which is illustrated in fig. 1.

There were used 70% of data for training and 30% of them for test. Accuracy of the classification using by Random Forest Algorithms was 89,5%.

Whereas, accuracy of the classification with Support Vector Machine was 88%. The table 4 compares two algorithms result for classification.

Feature importances of the forest



Importance of each features

Table 4. Average accuracy of each algorithms

Classifier	Average Recall, %	Average Precision, %	Average F-Score, %
SVM	89	88	88
Random Forest	89	89	89

CONCLUSION

This article presents the results of known works analysis on diagnosis of Alzheimer’s disease. The following conclusions should be made after analysis of considered works.

By using Random Forest Algorithms (RFA), we determine the most informative features like gender, age and education level which could mostly affect Alzheimer’s disease.

In addition, Support vector machine and RF algorithms were compared with accuracy 88% and 89% respectively.

In the future research, it’s planned to improve Convolutional Neural Network to reach the higher accuracy. Based on previous works, CNN provides high results in classification and has various benefits: like it’s very good feature extractors. In addition, the results of CNN classification will be compared with the algorithms which were consider in the current paper.

REFERENCES

1. *Convolutional Neural Network*. 3 things you need to know. — P. 1–4. — Available at: <https://www.mathworks.com/solutions/deep-learning/convolutional-neural-network.html>
2. *Альцгеймера* болезнь. Диагностика. Анализы и инструментальные исследования. — Режим доступа: <http://demenciya.com>

3. *Islam J.* An Ensemble of Deep Convolutional Neural Networks for Alzheimer's Disease Detection and Classification, *Computer Vision and Pattern Recognition* / J. Islam, Y. Zhang. — Available at: <https://arxiv.org/pdf/1712.01675.pdf>
4. *Sarraf S.* Deepad: Alzheimer's disease classification via deep convolutional neural networks using mri and fmri / S. Sarraf, J. Anderson, G. Tofighi. — bioRxiv, p. 070441, 2016.
5. *Naderan M.* Diagnosing Lung Cancer Based on Deep Learning Algorithms: Review / M. Naderan, Y.P. Zaychenko // 20-th International conference on System Analysis and Information Technology SAIT 2018, May 21–24, 2018. — P. 111–112.
6. *Satoki S.* Application of Convolutional Neural Networks in the Diagnosis of Helicobacter pylori Infection Based on Endoscopic Images / S. Satoki, N. Shuhei, A. Kazuharu, N. Yoshitaka et al. // EBioMedicine. — Vol. 25, November 2017. — P. 106–111.
7. *Boysen Jacob.* Magnetic Resonance Imaging Comparisons of Demented and Non-demented Adults / Jacob Boysen. — Available at: <https://www.kaggle.com/jboysen/mri-and-alzheimers>

Received 14.09.2018

From the Editorial Board: the article corresponds completely to submitted manuscript.

ОЦІНЮВАННЯ КРЕДИТОСПРОМОЖНОСТІ ПОЗИЧАЛЬНИКІВ КРЕДИТІВ МЕТОДАМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ

В.Г. ГУСЬКОВА, П.І. БІДЮК

Анотація. Розглянуто актуальне завдання оцінювання кредитоспроможності на основі експертного та скорингово підходів. Виконано аналіз предметної галузі та проаналізовано основні методи математичного моделювання і оцінювання кредитних ризиків, запропоновано математичні моделі для аналізу кредитних ризиків індивідуальних позичальників на основі альтернативних методів, розроблено математичні моделі для аналізу кредитних ризиків індивідуальних позичальників на основі дерев рішень, логістичної регресії, мереж Байєса та нечіткої логіки. Установлено, що модель на основі нечіткої логіки для розв'язання задачі визначення ймовірності дефолту для кредитного позичальника є більш точною, на що вказують порашовані точності моделей. Це зумовлено можливістю з використання методу нечіткої логіки з нечітким висновком Мамдані точніше встановлювати причинно-наслідкові зв'язки між характеристиками-факторами задачі та їх вплив на вихідну змінну.

Ключові слова: дерева рішень, логістична регресія, мережа Байєса, нечітка логіка, імовірність дефолту, висновок Мамдані.

ВСТУП

Оцінювання кредитоспроможності — важливе завдання загальної проблеми менеджменту ризиків фінансових організацій, які забезпечують клієнтів кредитами. Коректне вирішення цього завдання забезпечує повне та своєчасне повернення кредитів, зменшення можливих утрат. Є два основні підходи до його розв'язання: експертний та скоринговий.

Експертний підхід передбачає, що фахівці з кредитування індивідуальних позичальників визначають істотні характеристики клієнта банку, які можуть впливати на повернення кредиту, ставлять у відповідність цим характеристикам певні ваги [1–3]. Для кожного клієнта за всіма характеристиками проставляються бали відповідно до вагових коефіцієнтів, установленими експертами, та підраховується сума всіх балів. Для банку завчасно встановлюється певне порогове значення, яке визначає правило: якщо сума всіх балів менша за це значення, то клієнту не слід видавати кредит, а якщо більша, то клієнт може отримати кредит. Банк може встановити ще одне обмеження (верхню межу), яке визначає таке правило: якщо сума балів більша від уста-

новленого значення, то клієнту можна видавати кредит без надмірної обережності. Якщо і верхня, і нижня межі видачі кредиту задані, то значення між ними є компетенцією менеджера банку, який на власний розсуд визначає, чи видавати кредит клієнту, чи ні. Зрозуміла суб'єктивність цього підходу для встановлення як балів, так і порогового та верхнього значень.

Скоринговий підхід ґрунтується на побудові математичної моделі для оцінювання кредитоспроможності позичальників на основі кредитних історій банку та оцінюванні ймовірності дефолту потенційного позичальника з урахуванням його соціально-демографічних характеристик. Маючи статистичні дані «гарних» і «поганих» кредитів за певний період, банк може визначити безпосередньо фактори, які створюють передумови для повернення/неповернення кредиту, і для кожного нового клієнта на основі цих характеристик визначити його можливість повернути кредит [4, 5]. На початковому етапі скоринговий підхід ґрунтується на експертному підході, оскільки необхідно передусім визначити, які саме характеристики щодо клієнта потрібно збирати та як перевірити надані клієнтом дані, і в процесі застосування скорингової моделі змінювати оброблені банком дані про клієнта [6]. Очевидно, що скорингову модель необхідно коригувати у процесі роботи (кожні два-три роки), оскільки ситуація в країні динамічно змінюється, з'являються певні зловмисники, які прораховують фіктивні дані для скорингової моделі з надання кредиту і т. ін. Спільне використання обох підходів дозволило б полегшити процес прийняття рішення щодо видачі кредиту клієнту банком [7].

Більш адекватним є підхід на основі статистики дефолтів за попередні періоди, тобто побудова скорингової моделі. Статистичні методи передбачають визначення ймовірності реалізації певної події на підставі певних вимог:

- об'єкти, для аналізу яких пропонується використати статистичні дані, і об'єкти, на яких збираються статистичні дані, є еквівалентними;
- умови, у яких пропонується використовувати статистичні дані і умови їх збирання є еквівалентними;
- обсяги вибірок статистичних даних є достатніми, методи оброблення — коректними, а джерело інформації надійним.

Такий підхід ставить високі вимоги до статистики дефолтів:

1. Однорідна вибірка (позичальники повинні бути досить схожими).
2. Вибірка має складатися з певної кількості випадків – чим більше дефолтів, тим краще. За експертними оцінками для адекватності моделі обсяг вибірки повинен складати не менше ніж 2000 випадків.
3. Вибірка для побудови моделі повинна нагромаджуватися за доволі обмежений термін. Ця вимога викликана фактом зміни макроекономічного середовища. Позичальник з певними параметрами в одному макроекономічному середовищі без проблем виплачуватиме кредит; а в іншому середовищі виявиться дефолтом. Вважається, що в умовах країн, які розвиваються, модель для оцінювання ймовірності дефолту необхідно змінювати кожні два-три роки.
4. Необхідно нагромаджувати не лише кредитну історію позичальників (дефолт / не дефолт), але й параметри цих позичальників – вік, стать, місце роботи, посада, сім'я тощо. Проблема в тому, що спочатку невідомо, які са-

ме параметри виявляться значущими у моделі. Тому на етапі побудови моделі необхідно нагромаджувати максимальну кількість параметрів за кожним позичальником.

5. Вибірка має включати інформацію про кредити, цикл кредитування яких уже закінчився. Ця вимога необхідна, оскільки обов'язковою є інформація про повернення / неповернення кредиту.

6. Історію потрібно нагромаджувати в межах кредитних продуктів (споживчий кредит, кредит на автомобільний транспорт, іпотечний кредит). Скорингову модель необхідно будувати для кожного кредитного продукту.

Дані про процес кредитування фізичних осіб задовольняють майже всі ці вимоги. Для фізичних осіб параметрами скорингової моделі можуть бути вік, сімейний стан, кількість дітей, освіта, місце проживання, робота, посада, власність, кредитна історія і т. ін.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для досягнення поставленої мети у роботі поставлені і вирішуються такі завдання: виконати аналіз предметної галузі і вибрати методи математичного моделювання та оцінювання кредитних ризиків; запропонувати математичні моделі для аналізу кредитних ризиків індивідуальних позичальників на основі альтернативних методів; розробити математичні моделі для аналізу кредитних ризиків індивідуальних позичальників на основі дерев рішень, логістичної регресії, мереж Байеса (МБ) та нечіткої логіки; створити проект та програмну реалізацію інформаційної системи підтримання прийняття рішень (СППР) для оцінювання кредитоспроможності позичальників і порівняти показники якості моделей за допомогою ROC-аналізу.

МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ БАНКІВСЬКИХ КРЕДИТНИХ РИЗИКІВ

Розглянемо особливості побудови моделей у формі логістичної регресії, МБ та нечіткої логіки.

Логістична регресія — це різновид множинної регресії, загальне призначення якої полягає в аналізі зв'язку між декількома незалежними змінними (регресорами або предикторами) і залежною змінною. Бінарна логістична регресія, як впливає з назви, застосовується в разі, коли залежна змінна є бінарною (тобто може набувати тільки двох значень). Інакше кажучи, за допомогою логістичної регресії можна оцінювати ймовірність того, що подія настане для конкретної випробовуваної особи (хворий/здоровий, повернення кредиту/ дефолт і т. ін.). Це досягається застосуванням такого регресійного рівняння (логіт-перетворення) [8, 9]:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-y}},$$

де P — ймовірність того, що відбудеться подія, яка цікавить; e — основа натуральних логарифмів 2,71; y — змінна, що визначається рівнянням лі-

нійної регресії. Залежність, що зв'язує ймовірність події і величину y , показано на рис. 1.

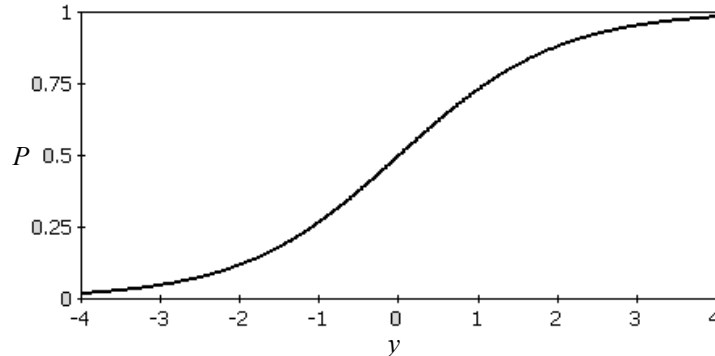


Рис. 1. Логістична функція розподілу

БАЙЄСІВСЬКИЙ ПІДХІД НА ОСНОВІ МЕРЕЖ ДОВІРИ

За допомогою МБ як інструменту аналізу даних вирішують дві математичні задачі: 1) побудову структури МБ і 2) формування ймовірнісного висновку. Задача побудови МБ за заданими навчальними даними є NP-складною, тобто завданням нелінійної поліноміальної складності. Кількість усіх можливих нециклічних моделей, які потрібно проаналізувати, обчислюється за рекурентною формулою Робінсона, запропонованою у 1976 р. [10]:

$$f(n) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} C_n^i 2^{i(n-i)} f(n-i),$$

де n — кількість вершин; $f(0) = 1$. Однак на практиці виконати повний перебір моделей можна тільки для мереж не більш ніж із сімома вершинами (вузлами), інакше не вистачить обчислювальних ресурсів.

Завдання формування ймовірнісного висновку в МБ є важливим і складним і належить до класу задач прийняття рішень. Однак для реалізації цього методу необхідно звести структуру МБ до вигляду об'єданого дерева (junction tree), і тільки тоді можна використовувати алгоритм ймовірнісного висновку в об'єданому дереві, який ґрунтується на проходженні λ і π повідомлень по дереву. Очевидно, що існуючі методи побудови МБ і формування висновку потребують трудомістких обчислень. Тому розроблення методів, що дозволяють зменшити обчислювальну складність, є актуальним для моделювання процесів різної природи МБ [10, 11].

Постановка задачі побудови МБ складається з таких кроків:

1) розроблення евристичного методу побудови МБ, що містить два етапи. На першому етапі обчислюється значення інформації між усіма вершинами, на другому — цілеспрямований пошук, який використовує як оцінну функцію оцінки мінімальної довжини, засновану на принципі опису, який застосовується на кожній ітерації алгоритму навчання.

2) розроблення методу ймовірнісного висновку в МБ з використанням двох кроків. На першому кроці обчислюється матриця емпіричних значень спільного розподілу ймовірностей всієї мережі, а на другому кроці — значення ймовірностей всіх можливих станів неінстанційованих вершин [12].

Байєсова мережа являє собою пару (G, B) , перша компонента G якої — це напрямлений нециклічний граф, який відповідає випадковим змінним і записується як набір умов незалежності: кожна змінна незалежна від її батьків у G . Друга компонента пари B — це множина параметрів, що визначають мережу; містить параметри $\theta_{X^{(i)}|pa(X^{(i)})} = P(X^{(i)} | pa(X^{(i)}))$ для кожного можливого значення $x^{(i)} \in X^{(i)}$ і $pa(X^{(i)}) \in Pa(X^{(i)})$, де $Pa(X^{(i)})$ — набір батьків змінної $X^{(i)} \in G$. Кожна змінна $X^{(i)} \in G$ зображується у вигляді вершини. Якщо розглядають більше одного графу, то для визначення батьків змінної $X^{(i)}$ у графі використовують позначення $Pa^G X^{(i)}$. Повна спільна ймовірність БМ обчислюється за виразом [12, 13]

$$P_B(X^{(1)}, \dots, X^{(N)}) = \prod_{i=1}^N P_B(X^{(i)} | P_a(X^{(i)})).$$

Гібридна МБ $B = (X, D, P)$ визначається через напрямлений ациклічний граф $G = (X, E)$ і його функції $P_i = \{P(x_i | pa_i)\}$, де pa_i — набір батьківських вузлів x_i ; X — набір змінних, поділених на дискретні Δ і неперервні Γ змінні, тобто $X = \Gamma \cup \Delta$. Структура графу G обмежена тим, що неперервні змінні не можуть мати дискретних змінних як їх вузли-нащадки. Умовний розподіл неперервних змінних задається лінійною гаусівською моделлю:

$$P(x_i | I = i, Z = z) = N(\alpha(i) + \beta(i) \times z, \gamma(i)), \quad x_i \in \Gamma,$$

де Z та I — множини відповідно неперервних і дискретних батьків x_i ; $N(\mu(\sigma))$ — мультиноміальний нормальний розподіл. Мережа являє собою спільний розподіл усіх його змінних, заданих добутком усіх таблиць умовних ймовірностей.

Можна розглядати сформульований висновок як шлях конвертації багатовимірних гаусіанів у МБ. Змінні упорядковуються у певному порядку X_1, \dots, X_n . Потім цей висновок використовується для знаходження умовного розподілу:

$$P(X_i | X_1, \dots, X_{i-1}) = N\left(X_i; \beta_{i0} \sum_{j=1}^{i-1} \beta_{i,j} X_j, \sigma_i^2\right).$$

Створюється ребро з X_j до X_i ($1 \leq j < i$) тоді і тільки тоді, коли $\beta_{ij} \neq 0$. Умовний ймовірнісний розподіл (УІР) X_i називають лінійним умовним ймовірнісним розподілом, що має вигляд деякого виразу після скорочення усіх нульових значень. Лінійний умовний ймовірнісний розподіл для кореневих вузлів є просто одновимірною гаусіаною. Мережа Байєса, у якій всі умовні ймовірнісні розподіли є лінійними, називається лінійною гаусіаною (ЛГ). Таким чином, кожна багатовимірна гаусіана може бути подана ЛГ. Обернене твердження також справедливе. Кожна МБ з лінійними УІР являє собою спільний нормальний розподіл.

Умовна лінійна гаусіана (УЛГ) — це МБ, яка містить як неперервні змінні (Γ), так і дискретні змінні (Δ) з такими обмеженнями [14, 15]:

- дискретний вузол не може мати неперервних батьків, таким чином, усі УІР для дискретних вузлів можуть бути подані як у дискретних МБ;
- умовно-імовірнісний розподіл будь-якої неперервної змінної є лінійним УІР, заданим будь-якою комбінацією дискретних батьків. Формально, якщо вузол Y має батьків $\{X_1, \dots, X_k\} \subseteq \Gamma$ і $D = \{D_1, \dots, D_l\} \subseteq \Delta$, він визначається як УІР з використанням таких параметрів: для кожного $d \in \text{Dom}(D, \beta_{d0}, \dots, \beta_{dk})$ і σ_d^2 :

$$P(Y | x, d) = N(Y; \beta_{d,0} + \sum_{i=1}^k \beta_{d,i} x_i, \sigma_d^2).$$

Це найбільш поширений вид гібридних моделей. Вони дозволяють мати лише лінійні відношення між неперервними змінними і не дозволяють дискретним змінним мати неперервних батьків. Широке використання таких моделей зумовлено їх математичною зручністю. В УЛГ задано значення дискретних змінних, розподіл неперервних змінних — багатовимірну гаусіану; отже спільний імовірнісний розподіл — це композиція гаусіан, з якими можна працювати, використовуючи аналітичні інструменти.

Якщо всі дискретні змінні задані, то УІР неперервних змінних є лінійними умовними неперервними розподілами. Тоді з наданням будь-яких значень дискретним змінним УЛГ редукується у ЛГ і тому є нормальним розподілом. Звідси випливає, що спільний розподіл, поданий УЛГ, є композицією гаусіан, де кожна композиція компонентів відповідає реалізації дискретних змінних.

Таким чином, використання МБ дає змогу аналізувати причинно-наслідкові зв'язки між окремими змінними (подіями, даними) і формулювати на цій основі обґрунтований імовірнісний прогноз. Використання гібридних МБ дозволяє коректно аналізувати неперервні змінні у моделі (наприклад, вік чи суму кредиту) і досягати вищої точності прогнозу [15].

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ КРЕДИТНИХ РИЗИКІВ

Прогнозування кредитоспроможності індивідуального позичальника виконується на основі бінарної логістичної регресії. Для побудови моделі використаємо навчальну вибірку даних про клієнта та результати повернення чи неповернення цим клієнтом кредиту (0 — якщо кредит повернено і 1 — якщо ні). Маючи інформацію про 1500 клієнтів, спочатку будуємо модель логістичної регресії на основі даних про 1200 клієнтів, а потім робимо прогноз на основі побудованої моделі для 300 клієнтів, маючи в моделі всі дані про них, окрім результатів повернення чи неповернення кредиту, і порівнюємо результати побудованого прогнозу з реальним станом подій. У цьому випадку як вхідні дані включено такі змінні: суму кредиту, вік позичальника, його дохід, платіж за кредитом, термін кредиту та освіту. Характеристики побудованих логіт і пробіт моделей подано в табл. 1.

Таблиця 1. Статистичні характеристики якості прогнозів

Характеристика	Середньо-квадратична похибка	САПП	Коефіцієнт Тейла
Логіт	0,407083	13,23895	0,493373
Пробіт	0,406719	13,23129	0,493053

Отримані статистичні характеристики прогнозування для обох типів моделей дуже близькі між собою. Тобто тип розподілу не є значущим для побудови моделі.

ЗАСТОСУВАННЯ ДЕРЕВ РІШЕНЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ КРЕДИТОСПРОМОЖНОСТІ ПОЗИЧАЛЬНИКІВ

Дерева рішень часто використовують для розв’язання задач класифікації. Наприклад, звернення за кредитом можуть бути класифіковані як такі, що мають високий або низький ризик — дерева рішень дозволяють визначити правила для виконання такої класифікації на основі даних з навчальної вибірки. Порівняно з іншими алгоритмами дерева рішень мають такі переваги, як висока швидкість навчання, прийнятна точність та легко зрозумілі шаблони. На вибірці з 1600 кредитів побудовано дерево рішень, що дозволяє класифікувати нового клієнта як такого, що поверне кредит, або не поверне. Результати побудови дерев рішень зведено для порівняння в табл. 2 та подано у вигляді діаграми (рис. 2).

Таблиця 2. Результати для всіх типів дерев рішень

Тип дерева рішень	Загальна точність: CA	Похибки класифікації		
		I роду	II роду	Сумарна похибка
Chaid	0,843	3,733	11,933	15,666
Exhaustive Chaid	0,825	3,733	13,733	17,466
CRT	0,922	4,4	3,4	7,8
Quest	0,885	5,333	6,1333	11,466

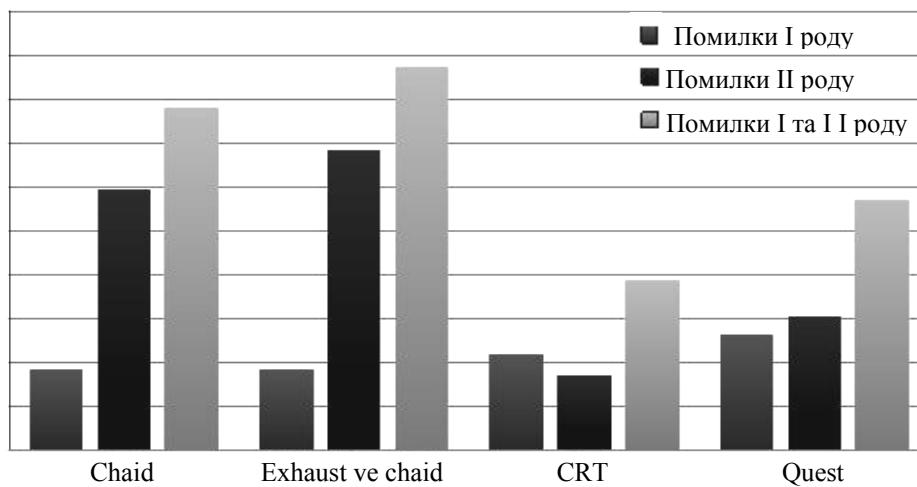


Рис. 2. Порівняльна діаграма похибок алгоритмів дерев рішень

ПРОГНОЗУВАННЯ КРЕДИТОСПРОМОЖНОСТІ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ПОЗИЧАЛЬНИКА ЗА ДОПОМОГОЮ БАЙЄСІВСЬКИХ МЕРЕЖ

За рік банком видано 1600 кредитів. Кожний клієнт описується 18 характеристиками. За наявними даними побудовано мережу, яка показує зв'язок між характеристиками клієнта і вершиною — подією повернення кредиту. За наявними навчальними даними визначено ймовірність повернення кредиту новим клієнтом, що звернувся до банку. Отже, треба визначити PD_i — ймовірність дефолту потенційного позичальника. Оскільки числові характеристики (сума кредиту, вік, дохід і т.ін.) набувають багато значень, тобто є неперервними, то для розв'язання поставленої задачі потрібно використовувати гібридні МБ. За описаною вище методикою необхідно виконати аналіз проблеми і зробити формалізовану постановку задачі. Розглянемо детальніше схему застосування запропонованої методики.

Крок 1. Для розв'язання задачі оцінювання кредитоспроможності позичальника зібрати статистичні дані про видані кредити, частину з яких повернуто, а частина виявилась дефолтом, тобто отримати позитивні і негативні приклади навчальних даних. На основі вибраних параметрів позичальника та кредиту розробити формальну модель і оцінити ймовірності дефолту позичальника PD_i :

$$PD_i = F(w^j, x_i^j),$$

де w^j — ваги параметрів x_i^j ; i — кількість позичальників; j — кількість параметрів кредиту. Модель для оцінювання кредитоспроможності на основі МБ описується таким чином:

$$PD_i = F(v_i^k, G, J) = 1 - PR_i,$$

де v_i^k — змінні, що описують характеристики клієнта і кредиту; J — ймовірнісний розподіл змінних v_i^k ; G — напрямлений ациклічний граф, вузли якого відповідають випадковим змінним v_i^k модельованого процесу; PR_i — ймовірність повернення кредиту.

Крок 2. Дані задачі — це статистичні дані за 1600 виданими кредитами, з яких 450 випадків дефолтів, 1150 — повернутих кредитів.

Крок 3. Взаємовиключними змінними для даної задачі є 18 характеристик, що описують клієнта та кредит.

Кроки 4–5. Оскільки в задачі використовуються неперервні змінні і будується гібридна МБ, то для неперервних змінних використовується дискретизація, тобто область значень неперервної змінної розбивається на проміжки. Кількість проміжків визначається користувачем, ті стовпчики, для яких не вказано кількість інтервалів розбиття, автоматично розбиваються на два проміжки. Доцільно виконувати дискретизацію даних за однаковою шириною класів або за однаковою кількістю точок усередині кластерів. Крім цього, ширина та кількість проміжків можуть бути регламентовані банком, виходячи із соціологічних або демографічних досліджень груп клієнтів [15]. Під час побудови структури МБ слід пам'ятати, що обраний алгоритм впливає на швидкість виконання програми і на саму побудовану

структуру. Найшвидшим є алгоритм Greedy Thick Thinning, його і будемо використовувати для аналізу прикладів. У результаті роботи алгоритму отримуємо тільки одну структуру, яка є логічною і оптимальною. Побудовану за цими даними структуру МБ зображено на рис. 3. Вона наочно демонструє зв'язки між даними.

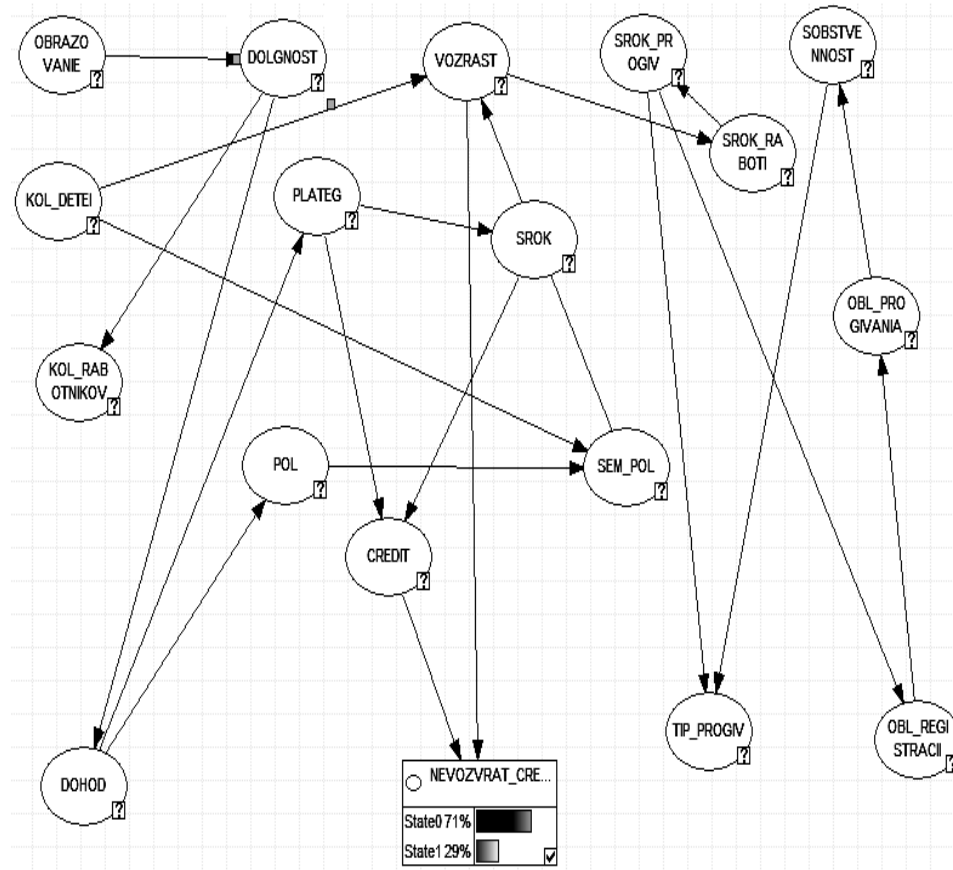


Рис. 3. Структура побудованої МБ

ОЦІНЮВАННЯ КРЕДИТОСПРОМОЖНОСТІ ПОЗИЧАЛЬНИКА З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Для врахування не тільки кількісних, але і якісних характеристик вектор даних можна подати за допомогою лінгвістичних змінних. Лінгвістична змінна визначається як $\langle b, T, X, G, M \rangle$, де

b — ім'я лінгвістичної змінної;

T — базова терм-множина лінгвістичної змінної, кожний елемент якої (терм) подається як нечітка множина на універсальній множині X ;

G — синтаксичне правило, часто у вигляді грамматики, що дозволяє оперувати елементами терм-множини T , зокрема, генерувати нові терми (значення);

M — семантичне правило, що задає функцію належності нечітких термів, утворених синтаксичними правилами [16, 17]. Для побудови правила

необхідно побудувати функції належності кожної лінгвістичної змінної, тобто задати вигляд функції та її параметри. Параметри функцій належності визначаються в процесі її побудови. Підхід на основі нечітких нейронних мереж (ННМ) дозволяє автоматично будувати функцію належності, а відповідно і базу знань та реалізувати нечіткий логічний висновок. У загальному вигляді алгоритм має такі етапи.

1. Визначення множини вхідних змінних про позичальника:
 $\vec{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_N\}$.
2. Визначення множини вихідних змінних — можливі групи ризику:
 $D = \{D_1, D_2, \dots, D_i, \dots, D_M\}$.
3. Формування базової терм-множини з відповідними функціями належності кожної змінної: $A = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$.
4. Формування кінцевої множини нечітких правил, узгоджених щодо змінних, що в них використовуються.
5. Реалізація логічного висновку, тобто визначення істинності для передумов кожного правила та визначення нечітких підмножин для змінних виходу для кожного правила.
6. Композиція нечітких підмножин кожної змінної виходу за всіма правилами.
7. Знаходження чіткого значення для кожної з вихідних лінгвістичних змінних.

У ННМ з логічним висновком Мамдані реалізується логічний висновок, який має такі етапи.

1. **Уведення нечіткості.** Знаходимо ступінь істинності для передумов кожного правила: $A_1(x_0), A_2(x_0), B_1(x_0), B_2(x_0)$.
2. **Логічний висновок.** Знаходимо рівні відсікання для передумов кожного з правил (з використанням операції знаходження мінімуму): $\alpha_1 = A_1(x_0) \cap B_1(y_0)$; $\alpha_2 = A_2(x_0) \cap B_2(y_0)$. Знаходимо рівні відсікання функції належності: $C'_1 = (\alpha_1 \cap C_1(z))$; $C'_2 = (\alpha_2 \cap C_2(z))$.
3. **Композиція.** Підсумовуємо знайдені відсічені функції належності з використанням операції максимум та отримуємо підсумкову нечітку підмножину для змінної виходу з функцією належності: $\mu_{\Sigma} = C(z) = C'_1(z) \cup C'_2(z) = (\alpha_1 \cap C_1(z)) \cup (\alpha_2 \cap C_2(z))$.
4. **Зведення до чіткості.** Використовуються центроїдний метод (рис. 4).

Вхідними є такі фактори впливу, як вік, рівень заробітної плати, термін кредитування, а вихідним — імовірність повернення кредиту та відповідний фінансовий клас позичальника. Задачу оцінювання кредитоспроможності можна сформулювати таким чином [17–19]. Кожна кредитна заявка задається вектором $\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$, де x_i — певним чином формалізовані дані з анкети позичальника та параметри кредиту. Далі за заданим вектором треба прийняти рішення про надання кредиту, тобто оцінити ймовірність повернення кредиту. У загальному вигляді нечіткий логічний висновок має такі етапи: визначення множини вхідних змінних; визначення множини вихідних змінних; формування базової терм-множини з відповідними функціями належності кожного терму; формування кінцевої множини нечітких правил, узгоджених щодо використовуваних у них змінних. Знаходження чіткого значення для кожної з вихідних лінгвістичних змінних.

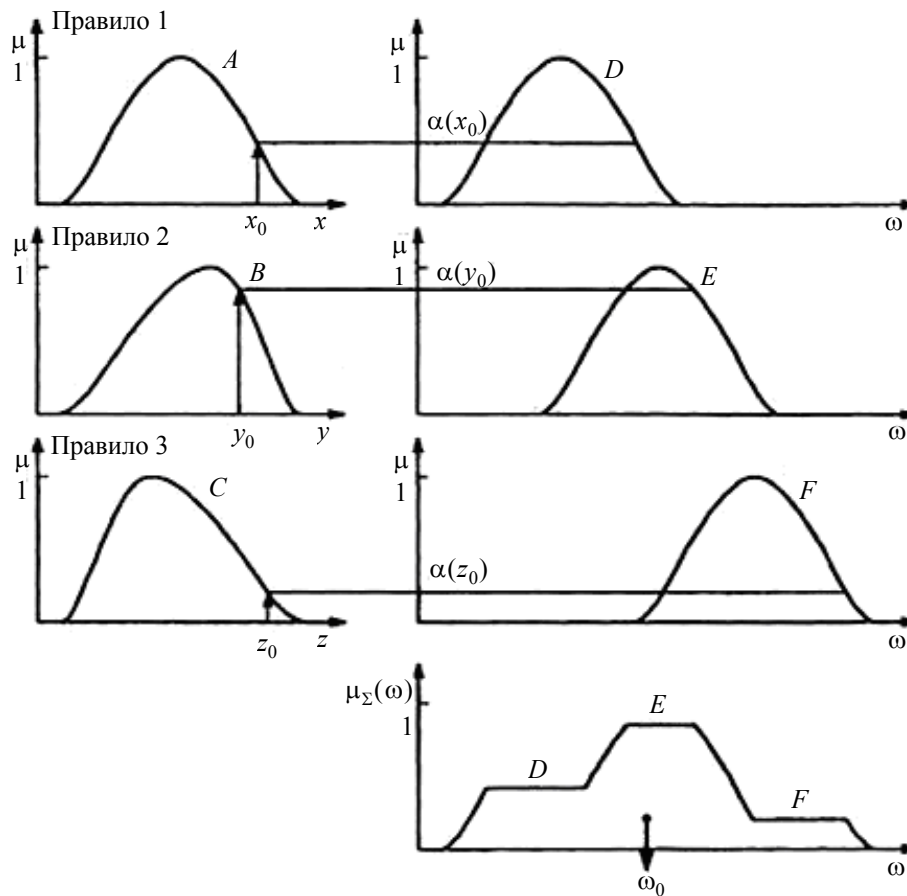


Рис. 4. Ілюстрація логічного висновку Мамдані

Під час виконання аналітичних досліджень визначено перелік факторів, що впливають на формування рівня кредитоспроможності клієнта. Нижче подано перелік вхідних факторів, використаних для розроблення системи, зокрема: 1) вік позичальника (x_1); 2) стаж роботи (x_2); 3) місячна заробітна плата (x_3); 4) наявність майна (x_4); 5) наявність кредитної історії (x_5); б) сума кредиту (x_6); 7) термін кредитування (x_7).

Для оцінювання кредитоспроможності фактори, що впливають на формування рівня кредитоспроможності клієнта, можуть набувати таких значень: вік = 18–65 (років); стаж роботи = 0–49 (років); заробітна плата = 0–30000 (грн); наявність майна = 1 — ні; 2 — машина; 3 — квартира; 4 — дім; 5 — два та більше з перелічених значень. Наявність кредитної історії: 1 — є кредити, оплата за якими прострочена; 2 — не було; 3 — є кредити в інших банках і погашаються своєчасно; 4 — є кредити у банку і погашаються своєчасно; 5 — немає відкритих кредитів, попередні сплачувались своєчасно; сума кредиту: 1000–100000 (грн); термін кредитування: від 4 місяців до 5 років.

Як вихідну маємо лінгвістичну змінну «імовірність повернення кредиту», що має такі терми: «дуже низька ймовірність повернення», «низька ймовірність повернення», «середня ймовірність повернення», «висока ймо-

вірність повернення», «дуже висока ймовірність повернення». Приклади функцій належності для деяких змінних подано на рис. 4, 5.

Для запису правил, що використовувались у програмі, уведемо позначення: «дуже низький» — ДН, «низький» — Н, «середній» — Ср, «високий» — В, «дуже високий» — ДВ.

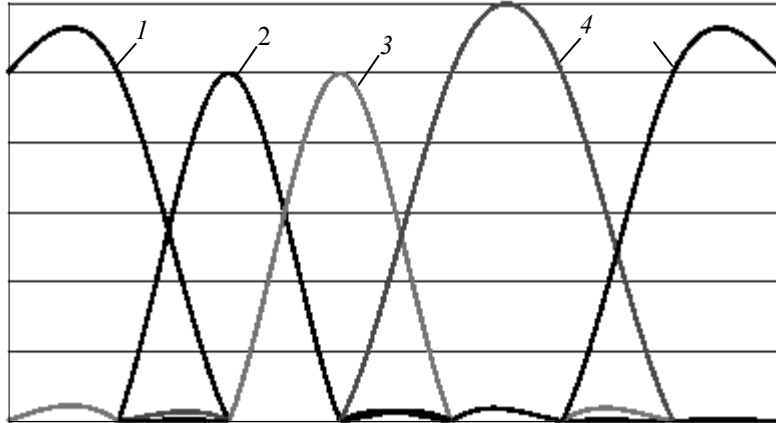


Рис. 4. Функція належності змінної «вік»: 1 — ДН, 2 — Н, 3 — Ср, 4 — ДВ, 5 — В

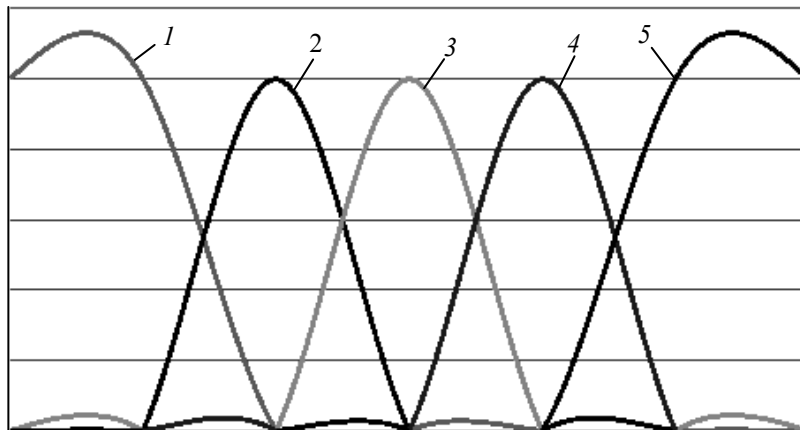


Рис. 5. Функція належності змінної «спроможність погашення»: 1 — ДВ, 2 — В, 3 — Ср, 4 — Н, 5 — ДН

Змінна «спроможність погашення» визначається так:

$$\text{Спроможність погашення} = \frac{\text{Сума кредиту} \times \text{Строк кредитвання}}{\text{Заробітна плата}}$$

РОЗРОБЛЕНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Для розроблення автоматизованої системи підтримання прийняття рішень (СППР) використано Microsoft Visual Studio (мова програмування — С#). Приклад інтерфейсу розробленої системи для оцінювання кредитоспроможності фізичних осіб, вхідними змінними якої є зазначені фактори впливу, а

вихідною змінною — імовірність повернення кредиту, подано на рис. 6. Після заповнення полів з інформацією про позичальника необхідно натиснути кнопку «Обчислити». Результатом роботи команди є відповідна інформація навпроти поля «Імовірність повернення кредиту» та фінансовий клас позичальника.

Класифікувати клієнта:		Завантажити дані	
Ім'я позичальника	Gogi		
Вік	25	років	
Загальний стаж роботи	5	років	
Заробітня плата	6000	грн/міс	
Наявність власності	Машина		
Наявність кредитної історії	Не було		
Сума запрошеного кредиту	1500		
Термін кредитування	6	міс	
		Обчислити	
Імовірність повернення кредиту	Середня імовірність повернення		
Фінансовий клас позичальника	B		
		Очистити поля	Зберегти дані
		Вихід	

Рис. 6. Приклад роботи програми

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для аналізу якості моделей і встановлення найкращої моделі для розв'язання певної задачі використовують декілька критеріїв для оцінювання адекватності моделей: загальну точність моделі; помилки I та II роду; ROC-криву та індекс GINI та загальну точність моделі (CA — Common Accuracy).

Індекс GINI можна визначити через площу фігури, що міститься під ROC-кривою, таким чином: $GINI = 2 \cdot AUC - 1$. Діапазон значень індексу GINI становить $0 \leq G \leq 1$, а моделі з найвищою роздільною здатністю, тобто моделі, які виконують високоякісне сортування схильних до дефолту клієнтів і клієнтів, не схильних до дефолту, отримують найвищі коефіцієнти. На практиці оцінка якості моделі суттєво залежить від даних, за якими вона бу-

дується. Для застосування на практиці скорингу (оцінки фінансового стану нових клієнтів) індекс GINI на рівні 55% є вже дуже високим, у той час як для скорингу поведінки (оцінки фінансового стану існуючих клієнтів) індекс GINI зазвичай набуває значень вищих за 70%.

Значення точок ROC-кривої використано для знаходження порога відсікання — компромісу між чутливістю та специфічністю моделі. Критеріями вибору порога відсікання можуть бути:

- 1) вимога мінімальної величини чутливості (специфічності) моделі;
- 2) вимога максимальної сумарної чутливості та специфічності моделі, тобто

$$cut - off = \max_k (Se_k + Sp_k);$$

- 3) вимога балансу між чутливістю і специфічністю [6], тобто коли

$$Sp \approx Se : cut - off = \min_k |Se_k - Sp_k|.$$

За побудованими моделями виконано аналіз прогнозів останніх 300 значень (з 1600) про кредити, отриманих за методами логістичної регресії, дерев рішень, МБ та нечіткої логіки, порівняно з реальними значеннями. Після проведення ROC-аналізу і встановлення порогів відсікання на певних рівнях, тобто, якщо ймовірність дефолту перевищує вказаний рівень, то клієнт вважається таким, що не поверне кредит, отримано таблицю результатів для логістичної регресії (табл. 3).

Таблиця 3. Загальна точність моделі та помилки I та II роду для різних рівнів порога відсікання, отримані для логістичної регресії

Характеристика	Прогноз: Повернення кредиту (0)	Прогноз: Дефолт (1)
<i>cut-off</i> = 0,1		
Факт: Повернення кредиту (0)	57	183
Факт: Дефолт (1)	0	60
Загальна точність моделі = 61,9 %		
<i>cut-off</i> = 0,15		
Факт: Повернення кредиту (0)	86	154
Факт: Дефолт (1)	1	59
Загальна точність моделі = 67 %		
<i>cut-off</i> = 0,2		
Факт: Повернення кредиту (0)	109	131
Факт: Дефолт (1)	3	57
Загальна точність моделі = 70,3 %		
<i>cut-off</i> = 0,25		
Факт: Повернення кредиту (0)	151	89
Факт: Дефолт (1)	6	54
Загальна точність моделі = 76,5 %		
<i>cut-off</i> = 0,3		
Факт: Повернення кредиту (0)	184	56
Факт: Дефолт (1)	11	49
Загальна точність моделі = 79,2 %		

Максимальна точність моделі на рівні 79,2 % досягається за значення порога відсікання 0,3, при цьому модель пропускає 11 дефолтів та відсіює 23,3% добросовісних позичальників. Значення площі під ROC-кривою становить: $AUC = 0,775$, а індекс GINI відповідно: $GINI = 2AUC - 1 = 0,549$. На основі навчальної вибірки з 1300 клієнтів також побудовано МБ. Для перевіреної вибірки (300 випадків) обчислено ймовірності дефолтів (табл. 4).

Таблиця 4. Загальна точність моделі та помилки I та II роду для різних рівнів порога відсікання, отримані для МБ

Характеристика	Прогноз: Повернення кредиту (0)	Прогноз: Дефолт (1)
<i>cut-off</i> = 0,1		
Факт: Повернення кредиту (0)	3	237
Факт: Дефолт (1)	0	60
Загальна точність моделі = 50,6 %		
<i>cut-off</i> = 0,15		
Факт: Повернення кредиту (0)	3	237
Факт: Дефолт (1)	0	60
Загальна точність моделі = 50,6 %		
<i>cut-off</i> = 0,2		
Факт: Повернення кредиту (0)	22	218
Факт: Дефолт (1)	0	60
Загальна точність моделі = 54,6 %		
<i>cut-off</i> = 0,25		
Факт: Повернення кредиту (0)	23	217
Факт: Дефолт (1)	0	60
Загальна точність моделі = 54,8 %		
<i>cut-off</i> = 0,3		
Факт: Повернення кредиту (0)	146	94
Факт: Дефолт (1)	3	57
Загальна точність моделі = 77,9 %		

Найбільша точність моделі досягається на рівні 77 % під час встановлення порога 0,3; при цьому буде пропущено три дефолти та відкинута 39 % добросовісних позичальників. Значення площі під кривою становить: $AUC = 0,879$, а індекс GINI відповідно: $GINI = 2AUC - 1 = 0,758$. Результати оцінювання кредитоспроможності для різних порогів відсікання під час використання нечіткої логіки подано в табл. 5.

Як видно з отриманих результатів нечітка модель показує вищі значення загальної точності для порогів відсікання 0,2 і 0,25, а також відсіює менше добросовісних позичальників порівняно з даними для МБ. Значення площі під кривою для моделі на основі нечіткої логіки: $AUC = 0,8875$, а індекс GINI відповідно: $GINI = 2AUC - 1 = 0,775$, що є кращим результатом.

Таблиця 5. Загальна точність моделі та помилки I та II роду для різних рівнів порога відсікання, отримані для нечіткої логіки

Характеристика	Прогноз: Повернення кредиту (0)	Прогноз: Дефолт (1)
<i>cut-off</i> = 0,1		
Факт: Повернення кредиту (0)	42	198
Факт: Дефолт (1)	0	60
Загальна точність моделі = 58,75 %		
<i>cut-off</i> = 0,15		
Факт: Повернення кредиту (0)	88	152
Факт: Дефолт (1)	0	60
Загальна точність моделі = 68,3 %		
<i>cut-off</i> = 0,2		
Факт: Повернення кредиту (0)	121	119
Факт: Дефолт (1)	0	60
Загальна точність моделі = 75,3 %		
<i>cut-off</i> = 0,25		
Факт: Повернення кредиту (0)	161	79
Факт: Дефолт (1)	2	58
Загальна точність моделі = 81,9 %		
<i>cut-off</i> = 0,3		
Факт: Повернення кредиту (0)	173	67
Факт: Дефолт (1)	3	57
Загальна точність моделі = 83,5 %		

Точність моделі та кількість помилок I та II роду залежать від порога відсікання, який буде встановлений банком. Установлення порога відсікання визначає не лише відсоток відсіяних клієнтів, а і нижню межу ймовірності повернення кредиту, тобто поріг, нижче за який клієнт вважається таким, що не поверне кредит. При цьому значення ймовірності дефолту 0,1 або 0,2 для клієнта є статистично незначними, а тому поріг відсікання доцільно встановлювати на рівні 0,25–0,3. Таким чином, підхід за допомогою нечіткої логіки до оцінювання кредитоспроможності позичальника дозволяє підвищити якість моделі, а також її здатність розрізняти надійних та ненадійних клієнтів та зменшити кількість некоректно відсіяних клієнтів. Результати застосування використаних методів оцінювання кредитоспроможності наведено на табл. 6.

Таблиця 6. Порівняльна таблиця характеристик для різних моделей

Назва методу	Індекс GINI	Значення AUC	Точність моделі, %	Якість моделі
Бінарна логістична регресія	0,5491	0,7745	79,2	Прийнятна
Дерева рішень	0,548	0,774	71,25	Прийнятна
Мережа Байєса	0,758	0,879	77,9	Висока
Нечітка логіка	0,775	0,8875	83,5	Висока

Отримані результати обчислювальних експериментів свідчать, що найкращі результати дає нечітка логіка (83,5%), також хороший результат дає модель у формі МБ (77,9%). Високі значення точності моделі отримано за логістичною регресією (79,2%). Ці результати ще раз підтверджують доцільність використання нечіткої логіки, логістичної регресії, дерев рішень та МБ під час оцінювання кредитоспроможності позичальників кредитів.

ВИСНОВКИ

Виконано аналіз якості моделей, побудованих за методами логістичної регресії, дерев рішень, МБ та нечіткою логікою. Установлено, що модель на основі нечіткої логіки є кращою (у розгляданого випадку) для розв'язання задачі визначення ймовірності дефолту для кредитного позичальника, на що вказує поражена точність моделі, яка становить 83,5% для моделі нечіткої логіки та 77,9% для МБ. Це зумовлено тим, що використання методу нечіткої логіки (за нечітким висновком Мамдані) дає змогу точніше встановити причинно-наслідкові зв'язки між характеристиками-факторами задачі, їх вплив на вихідну змінну.

Для аналізу якості результатів використано кілька критеріїв. Для кожної з моделей обчислено помилки I та II роду, загальну точність моделей для заданих порогів відсікання, значення яких безпосередньо впливають на точність моделі та кількість помилок I та II роду. Побудовано ROC-криві і обчислено площі під кривою та індекс GINI.

Таким чином, застосування методів інтелектуального аналізу даних до розв'язання задачі прогнозування кредитоспроможності клієнтів фінансової установи уможливує отримання високоякісних результатів, придатних для подальшого практичного використання для прийняття рішень.

У подальших дослідженнях доцільно використати більші обсяги статистичних даних і розширити кількість змінних, які характеризують позичальників кредиту. Необхідно також створити інформаційну систему підтримання прийняття рішень комерційного типу на основі комбінованого використання ідеологічно різних типів моделей: статистичного типу та інтелектуального аналізу даних для розв'язання задач такого класу. Це суттєво спростить роботу працівникам банків, які займаються розв'язуванням задач оцінювання та менеджменту ризиків.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Крючковский В.В.* Экспертная система оценки кредитоспособности банковских клиентов на основе методов нечеткой логики и сети Байеса / В.В. Крючковский, С.А. Бабичев, А.В. Шарко // Экономика научно-технического прогресса. — 2009. — № 1. — С.197–205.
2. *Allen S.* Financial risk management: A practitioner's guide to managing market and credit risk / S. Allen. — Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, Inc., 2003. — 567 p.
3. *Hennie van Greuning.* Analyzing and managing banking risk: a framework for assessing corporate governance and financial risk / Hennie van Greuning, Sonja Bratanovic. — 2nd ed.
4. *Костюченко Н.С.* Анализ кредитных рисков / Н.С. Костюченко. — СПб.: ИТД «Скифия», 2010. — 440 с.

5. Бідюк П.І. Моделі оцінки ризиків кредитування фізичних осіб / П.І. Бідюк, Є.О. Матрос // Кібернетика та обчислювальна техніка. — 2007. — № 153. — С. 87–95.
6. Бідюк П.І. Порівняльний аналіз характеристик моделей оцінювання ризиків кредитування / П.І. Бідюк, Н.В. Кузнєцова // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2010. — № 1. — С. 42–53.
7. Колпаков В.М. Теория и практика принятия управленческих решений: учеб. пособие / В.М. Колпаков. — 2-е изд., перераб. и доп. — К.: МАУП, 2004. — 504 с.
8. Agresti A. Building and applying logistic regression models. An Introduction to Categorical Data Analysis / A. Agresti. — Hoboken, New Jersey: Wiley, 2007. — 138 p.
9. Shariff A. The Comparison Logit and Probit Regression Analyses in Research / A. Shariff, A. Zaharim, K. Sopian. — 2009. — Vol. 27, N 4. — P. 548–553.
10. Терентьев А.Н. Сравнение методов интеллектуального анализа данных при оценивании кредитоспособности физических лиц / А.Н. Терентьев, П.И. Бидюк, А.В. Миронова, Н.Ю. Медин // Проблемы управления и информатики. — К.: ИКИ НАНУ-НКАУ, 2009. — № 5. — С. 141–149.
11. Терентьев А.Н. Метод вероятностного вывода в байесовских сетях по обучающим данным / А.Н. Терентьев, П.И. Бидюк // Кибернетика и системный анализ. — 2007. — № 3. — С. 93–99.
12. Бідюк П.І. Основні етапи побудови і приклади застосування мереж Байєса / П.І. Бідюк, Н.В. Кузнєцова // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2007. — № 4. — С. 26–39.
13. Heckerman D. Bayesian Networks for Data Mining / D. Heckerman // Data Mining and Knowledge Discovery. — 1997. — № 1. — P. 79–119.
14. Кузнєцова Н.В. Гібридні мережі Байєса: основні особливості і точні методи формування висновку / Н.В. Кузнєцова // Праці Одеського політехн. ун-ту. — Одеса, 2009. — Вип. 1(31). — С. 114–121.
15. Кузнєцова Н.В. Системний підхід до аналізу кредитних ризиків з використанням мереж Байєса / Н.В. Кузнєцова, П.І. Бідюк // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2008. — № 3. — С. 11–24.
16. Недосекин А. Методологические основы моделирования финансовой деятельности с использованием нечетко множественных описаний / А. Недосекин. — СПб, 2003. — 280 с.
17. Зайченко Ю.П. Оценка кредитных банковских рисков с использованием нечеткой логики // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2010. — № 2. — С. 37–54.
18. Шовгун Н.В. Аналіз кредитоспроможності позичальника за допомогою методів з нечіткою логікою / Н.В. Шовгун // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка: зб. наук. праць. — К.: Век+, 2012. — № 55. — С.169–173.
19. Shovgun Natalia. Fuzzy neural networks for evaluating the creditworthiness of the borrowers / Natalia Shovgun // Information theories & applications. ITHEA IBS ISC. — 2014. — Vol. 21. — P. 54–257.

Надійшла 28.01.2019

ОЦІНЮВАННЯ КОНТРОЛЮВАЛЬНИХ І КОРИГУВАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РЕФЕРЕНТНОГО СЛОВНИКА СИСТЕМИ ПЕРЕВІРКИ І ВИПРАВЛЕННЯ ОРФОГРАФІЇ

В.А. ЛИТВИНОВ, С.Я. МАЙСТРЕНКО, К.В. ХУРЦИЛАВА, С.В. КОСТЕНКО

Анотація. Розглянуто моделі оцінювання властивостей референтного орфографічного словника (РОС) системи перевірки і виправлення орфографії. Контрольовальні властивості РОС визначаються ймовірністю невиявлення типової помилки і ймовірністю хибного сигналу про помилку. Поставлено завдання оптимізації РОС за Парето, запропоновано покроковий алгоритм його розв'язання, наведено дані експериментальної оцінки результативності алгоритму для обраних словників російської й української мов. Коригувальні властивості визначаються ймовірностями правильного і неправильного коригування типових помилок. Запропоновано моделі оцінювання, наведено результати моделювання для обраних словників. Показано, що РОС, оптимізований за контрольовальними властивостями, має і кращі коригувальні властивості. Отримані результати можуть бути покладені в основу інструменту порівняльної оцінки, вибору і поліпшення потенційних властивостей конкретного РОС для заданої предметної галузі.

Ключові слова: помилка тайпінгу, перевірка орфографії, контрольовальні властивості, коригувальні властивості.

ВСТУП

Натепер системи перевірки орфографії (СПО) є як затребуваним самостійним продуктом (ОРФО, Language Tool та ін.), так і обов'язковим компонентом текстових редакторів, пошукових систем, поштових клієнтів, електронних словників та ін. Центральний елемент таких систем — референтний орфографічний словник, що містить коректні слова деякої предметної галузі, з якими порівнюються слова, що перевіряються. Наявна в доступних джерелах інформація відображає передусім орієнтовані на користувача відомості про інструменти СПО — функціонал, технологію роботи, особливості використання тощо.

Разом з виявленням орфографічних помилок багато загальних і спеціалізованих текстових редакторів та інших програм оброблення текстів пропонують функцію автоматичного і напівавтоматичного виправлення помилок. Короткий огляд основних методів автоматичного виправлення і нечіткого пошуку (fuzzy string search) на основі оцінки відстаней Левенштейна і Дамерау–Левенштейна наведено у працях [1, 2]. Типовим рішенням щодо вибору алгоритмів для конкретної реалізації є використання фонетичних алгоритмів [3, 4]. Дослідження різних модифікацій таких алгоритмів та альтернативних алгоритмічних підходів і систем (наприклад, [5, 6]) відображені у ряді публікацій в пострадянських і зарубіжних джерелах.

Загалом публікації за темою присвячені користувачьким та алгоритмічним аспектам проблематики СПО. Питанням же кількісної оцінки і можливого поліпшення потенційних контролювальних і коригувальних властивостей самих РОС мало приділяється уваги.

Запропонована робота спрямована на часткове заповнення відзначеного пропуску щодо типових помилок тайпінгу.

Надалі використаємо загальні позначення:

A_j — слово РОС ($j = 1..N$);

\bar{A}_j — слово РОС, спотворене помилкою;

q — алфавіт символів РОС.

Поділимо різноманітні помилки \bar{A}_j на дві групи: ансамбль специфічних помилок K , що підлягають коригуванню, та інші помилки. Традиційно (та у відповідності зі складовими показника відстані Дамерау–Левенштейна) віднесемо до ансамблю K типові орфографічні помилки тайпінгу — однократні транскрипції E_1 , уставки E_2 і випадіння E_3 символу та суміжні транспозиції E_4 . Властивості РОС стосовно різноманітних довільних помилок принципово не обліковують і не аналізують, оскільки, якщо не накладати обмежень на характер цих помилок, можна стверджувати, що для кожного слова A_j існують помилки, що переводять його у будь-яке інше слово. Тому контролювальні і коригувальні властивості РОС надалі оцінюватимемо щодо здатності виявляти і виправляти саме базові помилки ансамблю K .

КОНТРОЛЮВАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ РОС

Дисфункція референтного словника

Контролювальні властивості РОС визначаються ймовірністю невиявлення помилки в результаті випадкового збігу спотвореного слова з деяким стороннім допустимим словом. Груба оцінка значення $Q_{\text{нв}}^{(0)}$ такої ймовірності може ґрунтуватися на припущенні щодо випадкового характеру спотворень слова A_j та зіставленні потужностей Q_3 заборонених (відсутніх у РОС) комбінацій символів і Q_p допустимих [7]:

$$Q_{\text{нв}}^{(0)} \approx \frac{Q_{\text{д}}}{Q_{\text{д}} + Q_3} \approx \frac{N}{q^n}, \quad (1)$$

де n — середня кількість символів у слові.

Для РОС із цілеспрямовано введеною надмірністю і відносно рівномірним (випадковим) розподілом N реальних слів серед q^n різних значень комбінацій n символів в алфавіті q — зокрема для кодових довідників — оцінка (1) може бути достатньо близькою до істини. Для природномовних слів (слів у текстовому редакторі, ключового слова в пошуковій системі і т.ін.) і специфічних спотворень, викликаних типовими помилками користувача, припущення про випадковий характер розподілів значень слів та їх

можливих спотворень не виконуються. Тут найбільш імовірні прості спотворення можуть дати значно більшу кількість неправдивих збігів з реально існуючими словами і, відповідно, набагато гіршу результативність контролю.

Реальні значення Q і $Q_{\text{нв}}$ можуть бути оцінені безпосередньо за допомогою моделі, що імітує процес спотворення кожного зі слів РОС помилками ансамблю K та виявлення цих помилок шляхом пошуку збігів помилкових слів із словами РОС.

Повновибіркове ($j = 1 \dots N$) моделювання проведено у праці [7] для імовірно рівнозатребуваних слів трьох словників російської мови і адаптованих україномовних версій цих словників, сформованих за допомогою російсько-української конвертації (перекладу). Зокрема, досліджені Словари русского языка. Словарь А.А. Зализняка [8] (СЗр — російський, СЗу — українська версія), Лопатин Владимир — Русский орфографический словарь [9] (СЛр — російський, СЛу — українська версія), Словари русского языка. Словарь русской литературы [10] (СРЛр — російський, СРЛзу — українська версія). Для орієнтовних оцінок імовірності P_k помилок класів E_k взято значення із праці [11].

Результати моделювання наведено у табл. 1

Таблиця 1. Результати повновибіркового моделювання

k	P_k	СЗр	СЛр	СРЛр	СЗу	СЛу	СРЛу
		$N = 92555$ $\bar{n} = 9,61$	$N = 150213$ $\bar{n} = 10,06$	$N = 161730$ $\bar{n} = 8,44$	$N = 84575$ $\bar{n} = 9,49$	$N = 135401$ $\bar{n} = 9,93$	$N = 129244$ $\bar{n} = 8,31$
1	0,56	0,39	0,41	1,2	0,28	0,28	1,0
2	0,16	0,06	0,07	0,27	0,04	0,04	0,15
3	0,12	2,14	2,16	8,8	1,39	1,40	5,2
4	0,06	0,95	1,55	1,2	0,91	1,22	1,1
$Q_{\text{нв}}$	0,9	0,54	0,6	1,84	0,38	0,41	0,77

Як видно з даних, наведених у табл. 1, реальні значення $Q_{\text{нв}}$ значно (на порядки) перевищують ідеалізовані значення $Q_{\text{нв}}^{(0)}$. Це є наслідком того, що ланцюжок взаємних спотворень слів типу $\langle \text{кол} \rangle \Rightarrow \langle \text{пол, мол, гол, фол, вол, тол, дол} \rangle$ дає значно більшу кількість збігів зі словником, ніж, наприклад, випадковий малоімовірний гіпотетичний перехід $\langle \text{кол} \rangle \Rightarrow \langle \text{крах} \rangle$, у результаті контролювальна здатність словників як російської, так і української мови виявляється значно нижчою, ніж можна було б припустити, виходячи з виразу (1). При цьому різні словники мають контролювальні властивості, що помітно розрізняються. Так, із 1000 випадкових помилкових слів словників, спотворених помилками 1, 2, 3, 4 (у вказаній пропорції), у середньому не виявляються 5,4 помилок для Словника Зализняка і 18,4 помилки для Словника російської літератури. Виходячи з отриманих даних, можна припустити, що діапазон значень $Q_{\text{нв}}$ для досліджених словників визначається як чисто лінгвістичними чинниками (мовою, структурою), так і різницею в обсягах. Зменшення обсягу словника за інших однакових умов прогнозовано повинно зменшувати $Q_{\text{нв}}$ за рахунок явного збільшення від-

носної надмірності подання слів і відповідного зменшення можливостей випадкових збігів помилкових слів з допустимими. З іншого боку, вилучення зі словника слів з ненульовою затребуваністю збільшує ймовірність хибних повідомлень про помилки. Тому комплексна оцінка контролювальних властивостей РОС, що оцінює його якість, визначається двома чинниками [12]:

- здатністю виявляти якнайбільше найімовірніших (типових) помилок;
- здатністю виявляти якнайменше хибних повідомлень про помилки.

Перший чинник оцінимо показником дисфункції РОС, який визначимо через значення ρ відносної кількості слів, що спотворені певними помилками і збіглися з іншими, реально допустимими словами; відповідні помилки системою не виявляються.

Другий чинник оцінимо ймовірністю ϕ відсутності запитаного слова у РОС.

Для уточнення і розвитку поняття дисфункції і питань, пов'язаних з її кількісною оцінкою, розглянемо наступну модель спотворення слів і виявлення помилок (чекінгу) (рис. 1).

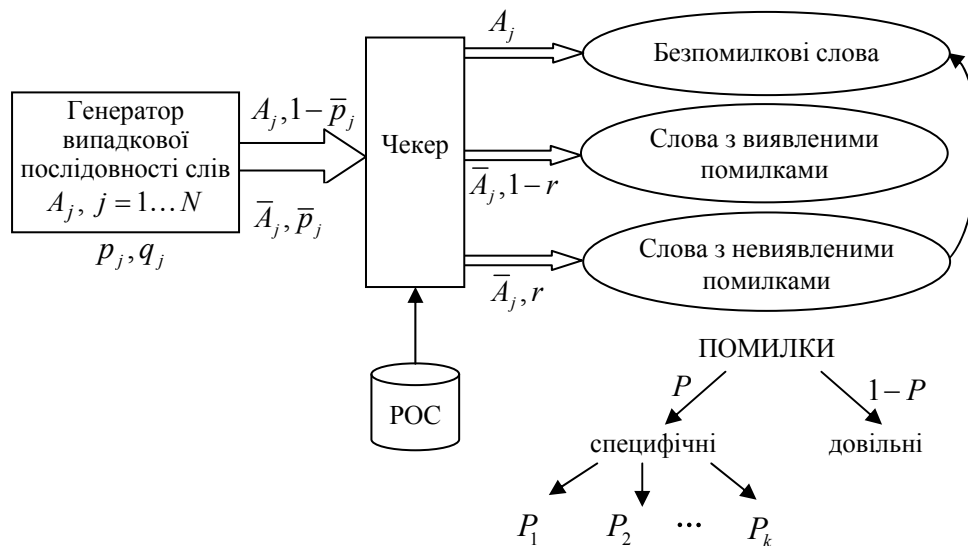


Рис. 1. Схема ймовірнісної моделі спотворення слів

Для пояснення позначень розглянемо інтерпретацію функцій, поданих на рис. 1 об'єктів.

Уявимо генератор слів A_j у вигляді деякої урни, у якій містяться деякі фішки зі словами A_j ; значення p_j , визначає відносну кількість фішок з конкретним словом A_j . Під час замісного витягання фішок з урни (генерації послідовності слів) фішки можуть пошкодитися, причому конкретна фішка A_j пошкоджується ($A_j \rightarrow \bar{A}_j$) з ймовірністю q_j .

У вихідному потоці слів генератора відносна кількість \bar{p}_j пошкоджених фішок \bar{A}_j визначається добутком $\bar{p}_j = p_j q_j$ (з точністю до умов нормування). Чекер порівнює фішки A_j, \bar{A}_j з еталонними і виокремлює пошко-

джені, причому деяка частина пошкоджень r не розпізнається, оскільки пошкоджена фішка \bar{A}_j збігається з деякою еталонною A_s . Показник дисфункції r визначає відносну кількість невиявлених пошкоджень (помилки) до повної кількості пошкоджених фішок (помилкових слів).

Визначимо величину r через властивості слів A_j , \bar{A}_j словника РОС. Позначимо через r_j відносну кількість невиявлених помилок у слові \bar{A}_j до всіх можливих помилок у цьому слові. Тоді

$$r = \sum_{j=1}^N r_j \cdot \bar{p}_j. \quad (2)$$

За визначенням, обмежуючись помилками ансамблю \mathbf{K} , для виразу (2) беремо

$$r_j \rightarrow \rho_j = \sum_k \frac{\rho_{kj} P_k}{P}$$

та

$$r \rightarrow \rho = \sum_j \sum_k \bar{p}_j \cdot \frac{\rho_{kj} P_k}{P}, \quad (3)$$

де ρ_{kj} — відносна кількість невиявлених помилок підкласу k до різноманітних помилок цього підкласу у слові A_j .

З очевидних міркувань

$$\rho_{kj} = \frac{v_{kj}}{V_{kj}}, \quad (4)$$

де v_{kj} — кількість збігів слова \bar{A}_j , спотвореного помилками підкласу k , з іншими словами РОС; V_{kj} — повна кількість різноманітних спотворень слова A_j у підкласі помилок k (кількість варіацій \tilde{A}_{kj}) [7].

Таким чином, вирази (3), (4) визначають зміст та значення показника дисфункції довільного РОС та довільної функції q_j .

Для процесу послідовного введення (передавання) символів слів, що перевіряються, можна скористатися відомим допущенням про пряму залежність імовірності спотворення слова від його довжини:

$$q_j \approx \pi_c n_j \mu,$$

де π_c — статистична ймовірність спотворення довільного символу у процесі послідовного введення; n_j — кількість символів у слові A_j ; μ — нормувальний множник.

Тоді з урахуванням нормувальної умови $\sum_j q_j = 1$

$$q_j = \frac{n_j}{\sum_{j=1}^N n_j}.$$

В окремому випадку для $n_j = \text{const} = n$ отримаємо $q_j = \frac{1}{N}$.

Якщо ще і $p_j = \frac{1}{N}$, то нормоване значення \bar{p}_j також дорівнює $\frac{1}{N}$.

Задача узгодження критеріїв якості РОС та підхід до її розв'язання

Нині для одних і тих самих предметних галузей (зокрема, понять і слів української, російської та інших природних мов) існують різні готові орфографічні словники, що розрізняються широтою охоплення тезауруса (обсягами) і контролювальними властивостями. Зменшення обсягу словника за інших однакових умов протилежним чином впливає на показники якості — значення ρ і φ . З одного боку, за рахунок збільшення відносної надмірності подання слів і відповідного зменшення випадкових збігів помилкових слів з допустимими зменшується показник дисфункції ρ , з другого боку, вилучення з РОС слів з ненульовою затребуваністю (імовірністю звернення) збільшує значення φ .

Уявимо тезаурус T деякої предметної галузі, складеним з двох частин — дійсної (видимої) і уявної (прихованої). Дійсна частина є конкретним реальним РОС, а уявна (УРОС) — частина слів T , не поданих у РОС, але потенційно затребуваних. Задача узгодження критеріїв якості РОС формулюється як завдання вилучення і переміщення в УРОС слів, які більше за інших зменшують ρ і менше ніж інші збільшують φ . Інакше кажучи, ідеться про побудову парето-оптимальної траєкторії значень ρ , φ у міру переміщення вибраних слів в УРОС з метою можливого вибору прийнятного поєднання ρ , φ . Формування точкового критерію, що оцінює конкретний внесок слів, які потенційно вилучаються, у значення показників якості, ґрунтується на таких положеннях:

1. Вилучення нейтрального слова, помилки у якому не спричиняють збігів з реальними словами, не зменшують значення ρ , але збільшують значення φ . Отже, вилучення таких слів не входить у парето-оптимальні розв'язки.

2. Для кожного слова A_l , пряма помилка $A_l \rightarrow A_s$ у якому викликає збіг зі словами A_s (наприклад, *влечь* \Rightarrow {*слечь, увлечь, лечь*}), існують обернені помилки, що не виявляються, $A_s \rightarrow A_l$ ({*слечь, увлечь, лечь*} \Rightarrow *влечь*).

3. Із вилученням слова A_l (зокрема, *влечь*) обернені помилки будуть виявлятися (оскільки слова *влечь* не буде у РОС), а прямі помилки $A_l \rightarrow A_s$ — ні (оскільки затребуваність слова *влечь* не зникає, а пов'язані слова A_s залишаються у РОС).

Наведені якісні міркування узагальнює критерій відповідності (\sim), який може бути покладений в основу покрокового алгоритму розв'язання задачі вибору для вилучення слова A_l :

$$A_l \sim \min_l \alpha_l = \frac{p_l}{\Delta \rho_l}, \quad \Delta \rho_l = \sum_k p_k \sum_s \bar{p}_s \frac{v_{ks}}{V_{ks}}, \quad (5)$$

де V_{ks} — повна кількість різноманітних спотворень слів A_s у класах помилок E_k .

У наведеній постановці задачу можна розглядати як деяке узагальнення задачі рюкзака (Knapsack Problem [13]), а покроковий алгоритм її розв’язання на основі критерію (5) — як різновид жадібного алгоритму GA (Greedy algorithm [14]), у якому в рюкзак поміщають предмети з максимальним співвідношенням ціни (у розгляданому випадку $\Delta\rho$) до маси (p_l). Ця задача відрізняється від класичної Knapsack Problem тим, що там ціна і маса предметів залишаються постійними в процесі укладання рюкзака, а в цьому випадку ціна предметів, що залишилися після часткового завантаження рюкзака, може змінюватися залежно від того, що було завантажено перед цим. Останнє зумовлено тим, що вилучення слова A_l змінює розподіл наслідків можливих помилок у частині РОС, що залишилася.

Результати моделювання алгоритму GA з критерієм (5) наведено у табл. 2, 3.

Таблиця 2. Словник Лопатіна

$\frac{N-Y}{N}$	$\lambda = \frac{8}{N}$				$\lambda = \frac{24}{N}$			
	Випадкове зменшення		Розрахункове зменшення		Випадкове зменшення		Розрахункове зменшення	
	$\rho^{(Y)}/\rho^{(N)}$	$\varphi \cdot 10^2$	$\rho^{(Y)}/\rho^{(N)}$	$\varphi \cdot 10^4$	$\rho^{(Y)}/\rho^{(N)}$	$\varphi \cdot 10^2$	$\rho^{(Y)}/\rho^{(N)}$	$\varphi \cdot 10^4$
1	1,0	0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0
0,94	0,942	5,660	0,812	4,00	0,937	6,229	0,822	0,000014
0,88	0,888	11,909	0,563	28,38	0,877	12,525	0,554	0,003772
0,82	0,838	17,901	0,224	299,36	0,822	17,957	0,197	9,72321
0,81	0,827	19,064	0,126	632,099	0,814	19,009	0,041	229,8810

Таблиця 3. Українська версія словника Лопатіна

$\frac{N-Y}{N}$	$\lambda = \frac{8}{N}$				$\lambda = \frac{24}{N}$			
	Випадкове зменшення		Розрахункове зменшення		Випадкове зменшення		Розрахункове зменшення	
	$\rho^{(Y)}/\rho^{(N)}$	$\varphi \cdot 10^2$	$\rho^{(Y)}/\rho^{(N)}$	$\varphi \cdot 10^2$	$\rho^{(Y)}/\rho^{(N)}$	$\varphi \cdot 10^2$	$\rho^{(Y)}/\rho^{(N)}$	$\varphi \cdot 10^2$
1	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0
0,94	0,939	6,077	0,710	5,881	0,949	5,487	0,701	0,000065
0,88	0,879	12,150	0,327	108,187	0,897	11,314	0,322	0,663742
0,86	0,864	14,001	0,126	449,207	0,874	13,122	0,042	1749,524

Дані табл. 2 мають такий зміст. Параметр λ визначає крутизну експоненціальної кривої, що апроксимує ступеневий розподіл щільності ймовірності звернень до слів. Для $\lambda = \frac{8}{N}$ розподіл характеризується відношенням 20/80 (80% звернень охоплює всього 20% слів), а для $\lambda = \frac{24}{N}$ — співвідношенням 10/90 (з аналогічним змістом) [12].

У разі випадкового зменшення Y слів переносилися в УРОС випадковим чином, за розрахункового — відповідно до результатів роботи описаного вище алгоритму (точковим підбиранням).

Моделювання проводилося для словника Лопатіна (табл. 2) і його україномовної версії (табл. 3). Дані таблиць ілюструють відносну результативність роботи алгоритму. Зокрема, наприклад, для $\lambda = \frac{8}{N}$ вибіркоче вилучення 6% слів призводить до зниження значення показника дисфункції на 18% (російський словник Лопатіна) і 29% (україномовна версія словника), а випадкове — усього на 5,8% і 6,1%. Відповідне значення φ становить $5.7 \cdot 10^{-4}$ і $5.9 \cdot 10^{-4}$ для вибіркового вилучення і $5.7 \cdot 10^{-2}$ і $6.1 \cdot 10^{-2}$ для випадкового.

КОРИГУВАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ РОС

Загальні положення. Логіко-імовірнісна модель коригування

Уведемо такі поняття та позначення:

$d(A_j^i, \bar{A}_j)$ — функція відстані, що визначає в деякій метриці орфографічну близькість слів \bar{A}_j та слів РОС ($i = 1 \dots N$);

$F_1(A_j^i, \bar{A}_j)$ — функція попереднього вибору, що визначає множину слів РОС, для яких $d(A_j^i, \bar{A}_j) < d_{\max}$;

\hat{A}_j^l — слова РОС, для яких $d(\hat{A}_j^l, \bar{A}_j) = \min_i d(A_j^i, \bar{A}_j)$; $l = 1 \dots z$;
 $z = 0, 1, \dots$ Для $z = 0$ таких слів не знайдено;

$F_2(\hat{A}_j^l \rightarrow A_j)$ функція преференцій, що визначає вибір із z слів конкретного слова \hat{A}_j^l для коригування (заміни) помилкового слова \bar{A}_j .

Унаслідок коригування помилкового слова \bar{A}_j можливі такі результати:

- помилка $A_j \rightarrow \bar{A}_j$ не виявлена (фінальна подія $S_{jнв}$, імовірність результату $Q_{jнв}$);
- помилка $A_j \rightarrow \bar{A}_j$ виявлена (подія S_0), знайдено одне або більше слів-кандидатів \hat{A}_j^{il} ($m \geq 1$), функція $F_2(\hat{A}_j^{il}, A_j)$ визначила правильний вибір, коригування виконано правильно (фінальна подія $S_{jпк}$, імовірність результату $Q_{jпк}$);
- помилка $A_j \rightarrow \bar{A}_j$ виявлена, $z \geq 1$, функція $F_2(\hat{A}_j^{il} \rightarrow A_j)$ визначила помилковий розв'язок, коригування виконано помилково (фінальна подія $S_{jжк}$, імовірність результату $Q_{jжк}$);

• помилка $A_j \rightarrow \bar{A}_j$ виявлена, не знайдено жодного ($z = 0$) слова-кандидата, для якого $d(A_j^i, \bar{A}_j) < d_{\max}$; коригування не виконується (фінальна подія $S_{j\text{нк}}$, імовірність результату $Q_{j\text{нк}}$).

Мета побудови й аналізу конкретної логіко-імовірнісної моделі полягає у визначенні для конкретного РОС значень імовірності відповідних результатів, що визначають коригувальні властивості РОС для окремих слів і словника в цілому.

Унаслідок реалізації процесу коригування можливі різні рішення щодо вибору функцій відстаней і переваг. Для оцінювання властивостей РОС конкретизуємо узагальнену модель (рис. 2) для таких умов.

1. Визначаючи функцію попереднього вибору, обмежимося базовими помилками ансамблю \mathbf{K} , що за визначенням звужують зону пошуку варіантів коригування помилкового слова.

2. Покладемо

$$d_0(A_j^i, \bar{A}_j) = \begin{cases} 0 & \text{для } A_j^i \equiv \tilde{A}_j^i, \text{ де } \tilde{A}_j^i - \text{вторинне;} \\ & \text{сплотовлення (вваріація слова } \bar{A}_j); \\ d_{\max} & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (6)$$

Рівність $d_0(A_j^i, \bar{A}_j) = 0$ означає, що варіація \tilde{A}_j^i збігається зі словом

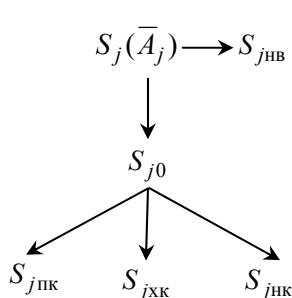


Рис. 2. Узагальнена модель подій тут забезпечений, тобто $z \geq 1$.

A_j^i . У межах уведених умов відстань Дамерау–Левенштейна мінімальна для слів A_j^i , з якими збігається варіація \tilde{A}_j^i у класах $E_1 - E_4$ ансамблю коригованих помилок.

3. Для функції переваги визначимо найгірше рішення — рівноймовірний вибір із z збігів. Оскільки генеруються усі варіації помилкового слова, принаймні один збіг

Логіко-імовірнісну модель, конкретизовану для прийнятих умов, наведено на рис. 3.

Додаткові позначення для окремих подій:

S_{j0} і $S_{jнв}$ — помилка виявлена/не виявлена;

S_{j1} і $S_{j2} = \bar{S}_{j1}$ — помилка належить/не належить до ансамблю \mathbf{K} відповідно;

S_{j1}^k — помилка належить до класу E_k ;

S_{j11} і $S_{j12} = \bar{S}_{j11}$ — помилка однозначна ($z = 1$) / неоднозначна ($z > 1$);

$S_{jпк1}^k$ — помилка класу E_k коригується однозначно правильно;

S_{j121}^k — фактично багатозначній помилці класу E_k відповідає перший ($l = 1$) зі збігів;

$S_{j122}^k = \bar{S}_{j11}^k$ — фактично багатозначній помилці класу k відповідають збіги з $l = 2 \dots z$.

Таким чином,

$$S_{jпк1}^k = S_{j0}^k \wedge S_{j1}^k \wedge S_{j11}^k;$$

$$S_{jпк}^k = (S_{j0}^k \wedge S_{j1}^k \wedge S_{j11}^k) \vee (S_{j0}^k \wedge S_{j1}^k \wedge S_{j12}^k \wedge S_{j121}^k) =$$

$$= (S_{j0}^k \wedge S_{j1}^k) \wedge (S_{j11}^k \vee (S_{j12}^k \wedge S_{j121}^k));$$

$$S_{jлк1}^k = S_{j0}^k \wedge S_{j1}^k \wedge S_{j12}^k \wedge S_{j122}^k,$$

$$S_{пк, лк} = \bigvee_j \bigvee_k S_{jпк, jлк}^k.$$

Натурно-імітаційне моделювання

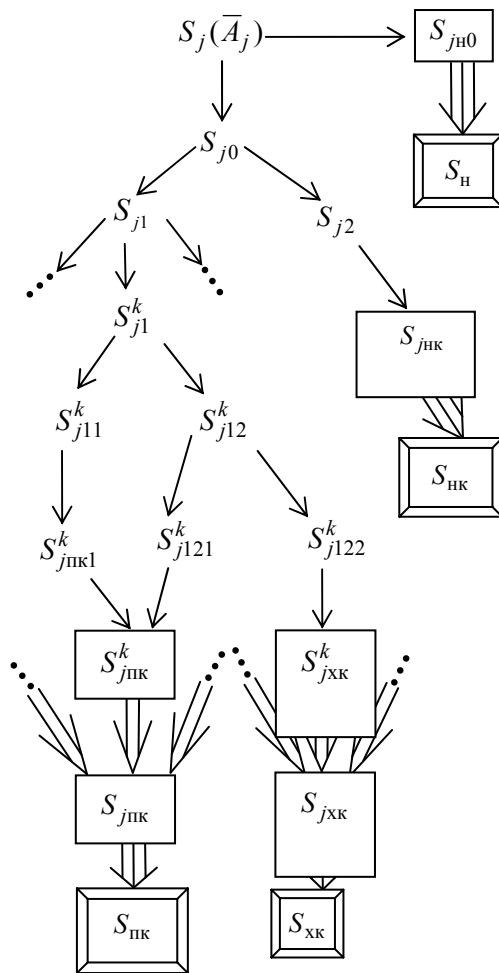


Рис. 3. Логіко-імовірнісна модель визначення коригувальних властивостей РОС моделювання

Натурно-імітаційне моделювання процесу спотворення та коригування слів РОС ґрунтується на генерації для кожного слова A_j можливих коригованих помилок ансамблю K , перевірці можливості виявлення помилки, генерації для кожної помилки можливих варіантів коригування (зворотних спотворень) і пошуку збігів у словнику. При цьому ймовірність проміжних і фінальних подій визначається де-факто для конкретного словника через відповідні кількості збігів.

Приклади можливих окремих випадків для конкретного слова $A_j := \text{арак}$:

$\bar{A}_{jks} = \text{мрак}$, помилка не виявляється;

$\bar{A}_{jks} := \text{аеак}$, $\tilde{A}_{jks} = \{\text{арак}\}$, $z = 1$, помилка коригується однозначно;

$\bar{A}_{jks} := \text{прак}$, $\tilde{A}_{jks} = \{\text{арак}, \text{брак}, \text{мрак}, \text{трак}, \text{рак}, \text{парк}\}$, $z = 6$, за випадкового вибору помилка коригується правильно з імовірністю $1/6$ і неправильно з імовірністю $5/6$;

$\bar{A}_{jks} := aарк$, $\tilde{A}_{jks} = \{барк, карк, марк, парк, тарк, арак\}$, $z = 6$, за випадкового вибору помилка коригується правильно з імовірністю $1/6$ і неправильно з імовірністю $5/6$;

Оскільки під час моделювання генеруються усі можливі кориговані помилки та всі варіанти їх виправлення, результат моделювання (зокрема, значення ймовірності $Q_{пк}$ і $Q_{хк}$) повністю характеризує коригувальні властивості конкретного РОС.

Моделювання виконано для наборів словників і значень P_k . У зв'язку з відносно високою обчислювальною трудомісткістю процесу генерації помилок і варіантів їх виправлення оброблялися випадковим чином сформовані вибірки обсягом 20000 слів (з оцінкою відповідної довірчої ймовірності). Результати моделювання наведено у табл. 4.

Таблиця 4. Результати моделювання для натурно-імітаційного коригування

Словник	$Q_{0пк}$	$Q_{0лк}$	$Q_{пк}$	$Q_{хк}$	$Q_{нв}$	$Q_{нк}$
Словник російської літератури, $N = 161730$	0,7549	0,1443	0,7410	0,1416	0,0184	~01
Словник Лопатіна, $N = 150213$	0,8282	0,0709	0,8233	0,0706	0,0060	~01
Словник Залізняка, $N = 92555$	0,8281	0,0710	0,8236	0,0706	0,0054	~01
Словник Лопатіна скорочений, $N = 84575$	0,8518	0,0474	0,8483	0,0472	0,0038	~01
Українська версія Словника Лопатіна $N = 84575$	0,8610	0,0382	0,8585	0,0381	0,0028	~01

Довірчі інтервали для отримання середніх загальних значень $Q_{0пк}$, $Q_{0хк}$, обчислені на основі припущення про близький до нормального закон розподілу окремих значень $Q_{j0пк}$, $Q_{j0хк}$, з імовірністю 0,99 становлять $\pm 0,5\%$ для словника російської літератури, $\pm 0,3\%$ для словників Лопатіна та Залізняка і $\pm 0,2\%$ для скорочених словників.

Із даних табл. 4 видно, що коригувальні властивості так само, як і контролювальні помітно розрізняються для різних словників. Так, для словника російської літератури з 1000 довільних помилок не виявляється 18,4 помилки, правильно коригується 741 помилка і неправильно — 141 помилка. Відповідні значення для скороченого словника Лопатіна складають 2,5; 850 і 47.

Розкид значень $Q_{пк}$, $Q_{хк}$ для різних словників пояснюється двома чинниками. З одного боку, словник меншого обсягу за інших однакових умов повинен мати більш високі значення $Q_{пк}$ і менші $Q_{хк}$ за рахунок більшого значення відносної надмірності подання слів і відповідного зменшення можливостей збігу згенерованих варіантів виправлення помилок з реальними словами словника. Так, для словника Лопатіна обсягом 92555 слів значення $Q_{пк} = 0,8233$, а для скороченого (випадковим чином) цього ж словника обсягом 84575 $Q_{пк} = 0,8483$. Із другого боку, відіграють роль і чисто лінгвістичні чинники (мова, тезаурус). Так, для української версії скороченого словника Лопатіна, що має такий самий обсяг і такий самий набір

слів, що і російськомовна версія $Q_{\text{пк}} = 0,8594$. У цілому, як видно з даних табл. 4, існує явно високий ступінь кореляції між значеннями $Q_{\text{нв}}$ і $Q_{\text{хк}}$. Цей чинник у поєднанні із впливом відносної надмірності словника дає підстави для таких попередніх висновків:

- словник, оптимізований (за Парето) щодо контролювальних властивостей, має і кращі коригувальні властивості;
- показник відносної надмірності словника може бути використаний як основа для оцінювання його коригувальних властивостей.

Натурно-аналітична модель коригувальних властивостей

Зупинимося детальніше на значенні згаданого поняття «відносна надмірність словника» і його кількісного зв'язку з контролювальними і коригувальними властивостями. Розглянемо ідеалізований гіпотетичний словник обсягом N слів однакової довжини n символів в алфавіті q .

На рис. 4 показано лінійну модель такого словника, у якій q^n активних комірок позначають різноманітні значення комбінацій n символів, а виділені комірки A_j позначають комбінації, що відповідають реально існуючим словам ($j = 1 \dots N$).

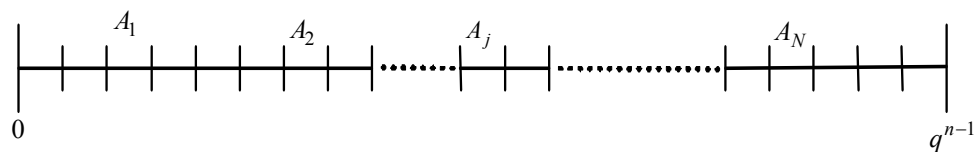


Рис. 4. Лінійна інтерпретація словника

Акт перевірки правильності слова A_j , спотвореного довільною помилкою $A_j \rightarrow \bar{A}_j$, можна розглядати тут як акт очищення комірки A_j і «кидання» комбінації \bar{A}_j на регістр комірок. За припущення випадкового характеру розподілу активних комірок в інтервалі $0..q^n - 1$ імовірність потрапити комбінацією \bar{A}_j в зайняту комірку $r = \frac{N}{q^n}$, а відносну надмірність словника C можна оцінити як $C = 1 - r = 1 - \frac{N}{q^n}$.

Чим більше N за інших однакових умов, тим більше r , тим гірші і контролювальні властивості (вища ймовірність випадкового збігу помилкового слова з реально існуючим) та коригувальні властивості (більша кількість рівноправних варіантів коригування помилкового слова, зокрема варіантів повного збігу).

Для функції (6) і гіпотетичного ідеалізованого словника можлива ймовірнісна оцінка кількості випадкових збігів довільного помилкового слова (генерованої варіації) зі словником на основі моделі незалежних випробувань Бернуллі і відповідної формули біноміального розподілу

$$P(g, r, V) = C_V^g r^g (1 - r)^{V-g}, \quad (7)$$

де $P(g, r, V)$ — імовірність отримання точно g випадкових збігів у результаті V дослідів, у кожному з яких імовірність сприятливого наслідку дорівнює r ; C_V^g — кількість сполучень з V за g .

Проте для реального словника така оцінка значень $Q_{пк}$, $Q_{хк}$ є надто грубою, оскільки випробування не є однорідними: згенеровані варіації так само, як і слова словника, мають різну довжину і різну лексикографічну вразливості у сенсі можливостей взаємних збігів. Для підвищення адекватності моделі (7) реєстр (рис. 4) слід розглядати у двох вимірах (номер комірки і довжина комірки), а значення V і r — індивідуально для кожного слова словника і варіації помилкового слова.

Припустімо заданими ймовірність β_{1j} збігу зі словником помилкового слова та ймовірність β_{2j} збігу варіації помилкового слова \tilde{A}_j . Тоді у відповідності з логічними виразами для подій (див. рис. 2) і моделі випробувань (7) можемо записати такі вирази для ймовірності окремих подій:

$$Q_{jнв} = \beta_{1j}P;$$

$$Q_{jпк} = (1 - Q_{jнв})P \left[(1 - \beta_{2j})^{V_j - 1} + \sum_{g=1}^{V_j - 1} \frac{1}{g + 1} P(g, \beta_{2j}, V_j - 1) \right];$$

$$Q_{jпк} = (1 - Q_{jнв})P \sum_{g=1}^{V_j - 1} \frac{g}{g + 1} P(g, \beta_{2j}, V_j - 1);$$

$$Q_{jнк} = (1 - Q_{jнв})(1 - P).$$

Під час виведення виразів ураховано, що із z можливих збігів слів, що перевіряються, одне правильне, таке, що відповідає спотвореному слову \bar{A}_j , і g випадкових збігів — неправильні. Правильним є коригування в разі, якщо $g = 0$ (імовірність події $P(0, \beta_{2j}, V_j - 1) = (1 - \beta_{2j})^{V_j - 1}$, або якщо з $g + 1$ варіантів зроблено правильний вибір (імовірність $\frac{1}{g + 1}$).

Для визначення величин β_{1j} і β_{2j} розглянемо таку інтерпретацію залежності значень імовірності $\beta_{xj}(x)$ збігу зі словником x разів спотвореного типовою помилкою слова A_j (рис. 5).

Якщо $x = 0$, то $\beta_{0j} = 1$, оскільки неспотворене слово безперечно збігається зі словником.

Якщо $x = 1$, величина β_{1j} дорівнює відносній кількості збігів слів \bar{A}_j , спотворених типовими помилками. Ця величина визначається безпосередньо за допомогою імітаційної моделі (табл. 4).

Якщо $x = m_j \gg 1$, величина β_{mj} асимптотично прагне до значення

$$r_j = \frac{\hat{N}(n_j)}{q^{n_j}},$$

де $\hat{N}(n_j)$ — кількість слів словника довжиною $n_j \pm 1$.

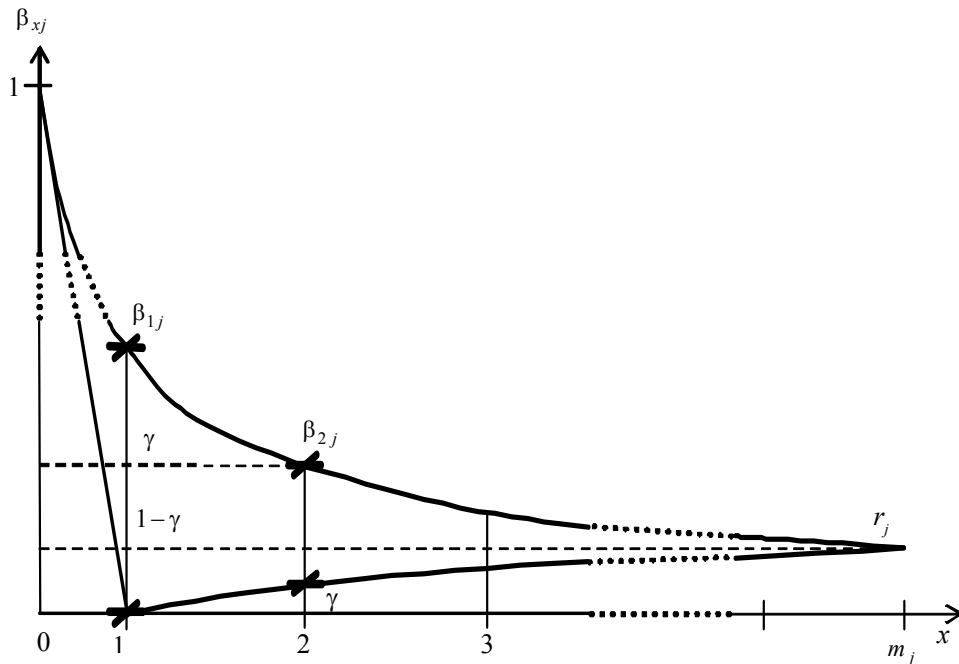


Рис. 5. Графічна інтерпретація залежності значення ймовірності збігу зі словником

На підставі попередніх міркувань для $x = 2$ покладемо

$$\beta_{2j} := \beta_{1j} - \left(\beta_{1j} - \frac{\hat{N}(n_j)}{q^{n_j}} \right) \gamma, \text{ де коефіцієнт } \gamma \text{ визначає крутизну спадання кривої } \beta_{xj}(x).$$

Для розрахунків за моделлю беремо

Для розрахунків за моделлю беремо

$$\beta_{1j} = \frac{\sum v_{kj}}{V(n_j)},$$

де v_{kj} — кількість збігів зі словником слова \bar{A}_j , спотвореного типовою помилкою E_k ; $V(n_j) = V_j$ — сумарна кількість різноманітних типових помилок слова довжиною n_j символів;

$$\hat{N}(n_j) = N(n_j) \frac{V_1(n_j) + V_4(n_j)}{V(n_j)} + N(n_j - 1) \frac{V_2(n_j)}{V(n_j)} + N(n_j + 1) \frac{V_3(n_j)}{V(n_j)},$$

де $N(n_j)$, $N(n_j - 1)$, $N(n_j + 1)$ — фактична кількість слів довжиною n_j , $n_j - 1$, $n_j + 1$; $\gamma = 0,87$.

У виразі для $\hat{N}(n_j)$ взято до уваги зміну довжини слова \bar{A}_j , спотвореного пропусками та вставками символів, а значення коефіцієнта γ підбиралось у процесі моделювання (за траєкторією $0,9 \rightarrow 0,88 \rightarrow 0,86 \rightarrow 0,87$).

Результати моделювання наведено в табл. 5.

Таблиця 5. Результати моделювання для натурно-аналітичного коригування

Словник	$Q_{0\text{ПК}}$	$Q_{\text{ПК}}$	$Q_{\text{ХК}}$	$Q_{\text{НВ}}$
Словник російської літератури, $N = 161730$	0,7490	0,7355	0,1470	0,0184
Словник Лопатіна, $N = 150213$	0,8373	0,8323	0,0628	0,0600
Словник Залізняка, $N = 92555$	0,8383	0,8338	0,0614	0,0054
Словник Лопатіна скорочений, $N = 84575$	0,8608	0,8576	0,0394	0,0038
Українська версія скороченого Словника Лопатіна, $N = 84575$	0,8698	0,8674	0,0300	0,0028

Як видно з даних табл. 2, результати розрахунків за аналітичною моделлю близькі до результатів табл. 4. Так, відхилення значень основного показника коригувальних властивостей $Q_{\text{ПК}}$ становить 0,75% для словника російської літератури і не перевищує 1,2% для інших словників. При цьому оброблення словника потребує на порядки менше часу — для використовуваного малопотужного комп'ютера і послідовної схеми моделювання час оброблення одного слова за імітаційною моделлю становило 6 с, а за аналітичною моделлю — 0,04 с. Крім того, відхилення могло б бути ще меншим (до 1%) за ретельнішого підбору значень γ . Із порівняльних даних випробувань і їх інтерполяційних оцінок випливає, що оптимальне значення, яке відповідає мінімальному сумарному відхиленню, $\gamma = 0,865 - 0,867$. Істотно, що відхилення результатів мало залежить від лінгвістичної структури і змісту словників, їх обсягів і мов. Подібна «універсальність» дає підстави для підтвердження правомірності пропонованого підходу до побудови аналітичної моделі. У свою чергу, це означає, що аналітична модель може бути покладена в основу оцінки коригувальних властивостей щодо більш складних помилок, що мають відстань Дамерау–Левенштейна більшу, ніж типові помилки.

ВИСНОВКИ

1. Подані моделі можуть бути покладені в основу інструменту порівняльної оцінки потенційних контролювальних і коригувальних властивостей конкретного орфографічного словника щодо типових помилок тайпінгу.

В оцінюванні контролювальних властивостей (див. табл. 1–3) моделі та алгоритм дають можливість для конкретного словника отримати дані про значення очікуваного показника дисфункції і можливості його зменшення за рахунок прийнятного підвищення ймовірності неправдивого сигналу про помилковість слова. Такі дані можуть бути корисні для прийняття обґрунтованих рішень для вибору готового словника, що описує задану предметну галузь, оцінювання можливості та доцільності його поліпшення з урахуванням критеріїв ρ , ϕ та адаптивного супроводу РОС (поповнення, вилучення) на основі критерію (5).

Під час оцінювання коригувальних властивостей моделі дозволяють оцінити потенційне співвідношення ймовірності правильного і неправильного коригування. При цьому аналітична модель може слугувати для попередніх рішень, а імітаційна для уточнених оцінок, повнота яких визначається урахуванням усіх можливих типових помилок і внеску кожного слова

в підсумкове значення $Q_{ПК}$. За заданих імовірностей спотворення слів A_j цей внесок може бути відповідним чином зважений.

2. Існує високий ступінь кореляції між значеннями показників контролювальних і коригувальних властивостей $Q_{НВ}$ і $Q_{ПК}$. З одного боку, це дає підстави вважати, що словники, поліпшені щодо контролювальних властивостей, мають і відповідно кращі коригувальні властивості, з другого боку, говорити про деякий загальний показник орфографічної вразливості словника щодо як до окремих типових помилок, так і їх кратних комбінацій. Якщо взяти за основу прийняту інтерпретацію залежності значень імовірності збігу зі словником від кратності типової помилки (рис. 5) — інтерпретацію, правомірність якої попередньо підтверджують результати моделювання, тоді як загальний показник можна брати значення зваженої ймовірності збігу довільного слова, спотвореного типовою помилкою ансамблю K . Кількісна оцінка можливого зв'язку цього показника з коригувальними властивостями словника за іншими функціями попереднього вибору і преференцій (наприклад, властивих застосуванню фонетичних алгоритмів) потребує окремого дослідження.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Нечёткий поиск в тексте и словаре* [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://habrahabr.ru/post/114997/>.
2. *Расстояние Левенштейна в MySQL и алгоритмы нечёткого поиска средствами PHP* [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://habrahabr.ru/post/342434/>.
3. *Фонетические алгоритмы* [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://habrahabr.ru/post/114947/>.
4. *Phonetic Algorithms* [Електронний ресурс]. — Available at: <https://deparques.co.uk/2017/12/01/phonetic-algorithms/>.
5. *Hodge V.J. A comparison of standard spell checking algorithms and a novel binary neural approach / V.J. Hodge, J. Austin // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering.* — 2003. — С. 1073–1081.
6. *de Amorim R.C. Effective Spell Checking Methods Using Clustering Algorithms* [Електронний ресурс] / R.C. de Amorim, M. Zampieri. — Available at: <http://www.aclweb.org/anthology/R13-1023>.
7. *Литвинов В.А. Оценка контролируемых свойств базового словаря допустимых слов в системе автоматического обнаружения ошибок пользователя / В.А. Литвинов, С.Я. Майстренко, К.В. Хурцилава // Математичні машини і системи.* — 2014. — № 2. — С. 65–70.
8. *Словари русского языка* [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://speakrus.ru/dict>.
9. *Словарь Лопатина* [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://royallib.ru/book/lopatin_vladimir/russkiy_orfograficheskiy_slovar.html.
10. *Словари русского языка* [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://speakrus.ru/dict>.
11. *Литвинов В.А. Контроль достоверности и восстановления информации в человеко-машинных системах / В.А. Литвинов, В.В. Крамаренко.* — К.: Техніка, 1986. — 200 с.
12. *Литвинов В.А. Дисфункция референтного словаря системы проверки орфографии и подход к ее снижению / В.А. Литвинов, С.Я. Майстренко, К.В. Хурцилава // Математичні машини і системи.* — 2017. — № 2. — С. 39–48.
13. *Knapsack problem* [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://en.wikipedia.org/wiki/Knapsack_problem.
14. *Задача о рюкзаке: жадный алгоритм* [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://traditionu.org/wiki/Задача_о_рюкзаке_жадный_алгоритм.

Надійшла 15.01.2019

АЛГОРИТМИ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНІВ РІВНОВАГИ ЕКОНОМІЧНОЇ СИСТЕМИ ЗА НАЯВНОСТІ МОНОПОЛІСТІВ ТА З РІЗНИМИ ТИПАМИ ПОВЕДІНКИ СПОЖИВАЧІВ

А.П. МАХОРТ

Анотація. Застосовано модель рівноваги вальрасового типу до опису реагування економічної системи на впливи вибраних чинників. Дослідження полягає в адаптації задачі про економічну рівновагу у випадку економічної системи з різними типами поведінки споживачів до використання більш простих методів розв'язування, які стосуються задачі з лише ненасичуваними споживачами. Обґрунтовано можливість застосування ітераційних методів до розв'язування задачі про економічну рівновагу. Указано умови на задані характеристики моделі, які забезпечуватимуть збіжність ітераційних методів. Наведено алгоритм знаходження рівноважних характеристик, який дозволяє з'ясувати умови встановлення станів рівноваги з вибраними властивостями.

Ключові слова: рівновага, попит, пропозиція, оподаткування, монополісти, ціноутворення.

ВСТУП

Поведінку економічних систем аналізують за значеннями їх характеристик. Однією з основних характеристик, яку використовують в описі економічних систем, є ціна. Ціна будь-якого товару в економічній системі формується в результаті досягнення згоди між тим, хто його потребує, та тим, хто його має. Інакше кажучи, встановлюється рівновага попиту і пропозиції товарів. На підставі використання моделей рівноваги є можливість отримати інформацію про дію на стан економічної системи різних чинників, яка допоможе оцінити сценарії майбутнього. Моделі рівноваги дають змогу виявляти причини виникнення негативних процесів в економічних системах [1,2]. Ті моделі, у яких безпосередньо конструюються вирази для попиту і пропозиції [1], виглядають більш ілюстративними, коли йдеться про з'ясування причин і наслідків появи дисбалансів.

Причини розвитку несприятливих процесів є різними. Наприклад, монопольні явища — це завжди потенційний чинник дестабілізації. Наявність споживачів з різними типами стратегій поведінки в економічній системі також може створювати додаткові ризики [3].

Мета дослідження — порівняння і встановлення аналогії в описі рівноваги економічної системи зі споживачами, які дотримуються подібних стратегій поведінки, та у випадку, коли ці стратегії різних типів. Ураховуватиметься і наявність монополістів в економічній системі. Алгоритм визначення характеристик станів рівноваги економічної системи має включати контроль за якістю станів рівноваги і надавати можливість вибирати стани рівноваги із заданими властивостями.

**МОДЕЛЬ ЕКОНОМІКИ І РІВНЯННЯ РІВНОВАГИ. ВИПАДОК
НЕНАСИЧУВАНИХ СПОЖИВАЧІВ**

Нехай досліджувана економічна система складається з l суб'єктів, кожен з яких є споживачем товарів (послуги також є товаром). Спочатку вважатимемо, що всі споживачі дотримуються схожої стратегії поведінки, яка полягатиме у прагненні повністю витратити отриманий прибуток на придбання нових товарів (ненасичувані споживачі). Нехай в економічній системі різновидів товарів є n . Частина з l споживачів є водночас і виробниками, вони виготовляють на продаж один з n можливих типів товарів, щоб мати змогу здобути заплановані витрати на споживання. Решта $l - n$ споживачів отримують фінансові надходження із зовнішніх джерел. Засобом їх утворення є перерозподіл капіталу, сформований в результаті оподаткування.

Для опису економічної системи використаємо модель економіки з постійними інтересами споживачів [1]. Тоді структуру виробництва в економічній системі задаватимемо технологічною матрицею у натуральних показниках вигляду $\|a_{kj} + b_{kj}/x_j\|_{k,j=1}^n$ зі складовою постійних витрат $\|b_{kj}\|_{k,j=1}^n$ та вектором обсягів випуску товарів $\{x_i\}_{i=1}^n$. Вважатимемо, що серед виробників є i $n - t$ монополістів. За такого вибору виробничих технологій та за обсягів імпорту товарів $\{i_i\}_{i=1}^n$ і експорту товарів за межі економічної системи $\{e_i\}_{i=1}^n$ пропозиція товарів на ринку складатиме

$$\Psi_k = x_k - \sum_{i=1}^n a_{ki}x_i - \sum_{i=1}^n b_{ki} - e_k + i_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

а чистий (або оподаткований) прибуток, що його зможуть отримати суб'єкти економічної системи в результаті реалізації на ринку своєї продукції, подаватиметься виразом

$$\bar{D}_j(p) = \pi_j x_j \left(p_j - \sum_{k=1}^n a_{kj} p_k \right) - \pi_j \sum_{k=1}^n b_{kj} p_k, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

де $p = \{p_i\}_{i=1}^n$ — вектор цін товарів. Вектор $\pi = \{\pi_i\}_{i=1}^n$ вказує рівні оподаткування суб'єктів економічної системи.

Структуру споживання в економічній системі визначатимуть елементи матриці попиту $C = \|c_{kj}\|_{k=1, j=1}^{n, l}$. Характеристика $\sum_{s=1}^n c_{sj} p_s$ задаватиме вартість набору товарів, якими цікавиться j -й споживач, відповідно витрати (або ж величина прибутку, що йде на витрати) суб'єктів економічної системи подаватимуться формулою

$$\tilde{D}_j(p) = y_j \sum_{s=1}^n c_{sj} p_s, \quad j = \overline{1, l}. \quad (3)$$

У стані економічної рівноваги має бути баланс прибутків і витрат. Вектор ступенів задоволення потреб споживачів $y = \{y_i\}_{i=1}^l$ вказуватиме, якою

мірою рівень отриманого прибутку дозволить здійснити заплановані витрати, тому компоненти цього вектора належатимуть інтервалу $(0,1]$. Отже, для тих індексів, що нумерують виробників величини $\{\tilde{D}_j(p)\}_{j=1}^n$ у виразах (2) (3) повинні збігатися. А щодо величин $\{\tilde{D}_j(p)\}_{j=n+1}^l$, то вони набудуть значень відповідно до перерозподілу прибутків, сформованому оподаткуванням:

$$\sum_{j=n+1}^l \tilde{D}_j(p) = \sum_{j=1}^n (1 - \pi_j) D_j(p).$$

За елементами матриці C формуватиметься і попит $\Lambda_{ik}(p)$ кожного i -го ненасичуваного споживача на k -й товар:

$$\Lambda_{ik}(p) = \frac{c_{ki} p_k}{\sum_{s=1}^n c_{si} p_s}, \quad i = \overline{1, l}, \quad k = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Економічна рівновага означає, що пропозиція перевищує попит на товари в економічній системі. Попит на k -й товар в економічній системі утворюється з попиту окремих споживачів і величини їх прибутку:

$$\Phi_k = \frac{1}{p_k} \sum_{i=1}^l \Lambda_{ik}(p) \tilde{D}_i(p), \quad k = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Якщо брати до уваги лише ті стани рівноваги, які забезпечуватимуть прибуткове виробництво суб'єктам економічної системи, то умову економічної рівноваги достатньо звести до рівності попиту і пропозиції [1]. Із виразів (1), (5) і (3) випливатиме

$$\sum_{j=1}^l c_{kj} y_j = x_k - \sum_{i=1}^n a_{ki} x_i - \sum_{i=1}^n b_{ki} - e_k + i_k, \quad k = \overline{1, n}. \quad (6)$$

А на підставі виразів (2) і (3) отримаємо баланс прибутків і витрат:

$$\pi_j x_j \left(p_j - \sum_{k=1}^n a_{kj} p_k \right) - \pi_j \sum_{k=1}^n b_{kj} p_k = y_j \sum_{s=1}^n c_{sj} p_s, \quad j = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Рівняння рівноваги (6), (7) розв'язуватимемо відносно змінних $\{p_i\}_{i=1}^l$, $\{y_i\}_{i=1}^l$, $\{x_i\}_{i=t+1}^n$ і $\{\pi_i\}_{i=t+1}^n$ за решти заданих економічних характеристик. Їх розв'язки описуватимуть можливі рівноважні стани економічної системи з прибутковим виробництвом. Монополісти мають змогу впливати на рівень цін своїх товарів $(p_{t+1}^0, \dots, p_n^0)$ і можуть спричинити негативний ефект на інших суб'єктів економічної системи і зменшувати їх спроможність забезпечувати належний рівень споживання. Рівні оподаткування $\{\pi_i\}_{i=t+1}^n$ будуть важелем впливу на монополістів, а рівні задоволення потреб суб'єктів економічної системи $\{y_i\}_{i=1}^l$ вказуватимуть на якість станів рівноваги. Якість визначатиметься спроможністю задовольнити свої потреби не нижче за певний встановлений рівень для кожного суб'єкта економічної системи.

ЕКОНОМІЧНА СИСТЕМА З РІЗНИМИ ТИПАМИ СТРАТЕГІЇ ПОВЕДІНКИ СПОЖИВАЧІВ

У попередньому підрозділі розглядався випадок, коли всі споживачі в економічній системі дотримувалися схожої стратегії поведінки. Зміна у виборі стратегії поведінки споживачів пов'язана насамперед з плануванням витратити весь свій прибуток на придбання нових товарів (ненасичуваний споживач), або ж лише його частину. У випадку наявності різних стратегій поведінки споживачів зміниться і їх опис. Як і раніше всіх споживачів характеризуватимемо системою векторів $\{c_{kj}\}_{k=1, j=\overline{1, l}}$, що утворює матрицю попиту $C = \|c_{kj}\|_{k=1, j=1}^{n, l}$. Кожен вектор з цієї системи (або ж стовпець матриці) задає максимальний набір товарів, бажаний для відповідного споживача. Якщо споживач відмовляється від наміру витратити весь свій прибуток на придбання нових товарів, він має переоцінити свій споживчий набір, який в цьому випадку задаватиметься системою векторів $\{\hat{c}_{kj}\}_{k=1, j=\overline{1, l}}$, або ж, відповідно, матрицею $\hat{C} = \|\hat{c}_{kj}\|_{k=1, j=1}^{n, l}$. Ненасичувані споживачі переоцінку не робитимуть, тому для них елементи матриць C і \hat{C} збігатимуться. Загалом же стосовно елементів матриць C і \hat{C} виконуватиметься умова

$$\hat{c}_{kj} \leq c_{kj}, \quad k = \overline{1, n} \quad j = \overline{1, l}.$$

Оподаткований прибуток кожного споживача в економічній системі, як і раніше, можна записати у вигляді формули (3). Але на відміну від виразу (4) вектори попиту $\Lambda_i = \{\Lambda_{ik}\}_{k=1}^n$ кожного окремого i -го суб'єкта економічної системи залежатимуть тепер від елементів матриць C і \hat{C} . Їх компоненти Λ_{ik} вказують на частку вартості, необхідної для придбання k -го товару, відносно вартості всього бажаного набору товарів, тому

$$\Lambda_{ik}(p) = \frac{\hat{c}_{ki} p_k}{\sum_{s=1}^n c_{si} p_s}, \quad i = \overline{1, l}, \quad k = \overline{1, n}.$$

Справедливі нерівності

$$\sum_{k=1}^n \Lambda_{ik}(p) \leq 1, \quad i = \overline{1, l}, \tag{8}$$

які не дозволяють умову рівноваги автоматично звузити до рівності попиту і пропозиції товарів в економічній системі для визначення станів рівноваги з прибутковим виробництвом. Пропозиція має перевищувати попит і знаходження рівноважних станів економічної системі полягатиме у розв'язанні системи нелінійних нерівностей

$$\frac{1}{p_k} \sum_{i=1}^l \Lambda_{ik}(p) \tilde{D}_i(p) \leq \psi_k \quad k = \overline{1, n}. \tag{9}$$

Але цю задачу все ж можна звести до розв'язування системи рівнянь [1], якщо замість векторів попиту споживачів Λ_i , $i = \overline{1, l}$, ввести ефективні вектори $\Lambda_i^* = \{\Lambda_{ik}^*\}_{k=1}^n$, $i = \overline{1, l}$, компоненти яких задовольнятимуть рівності

$$\sum_{k=1}^n \Lambda_{ik}^*(p) = 1, \quad i = \overline{1, l}.$$

Теорема 1. Нехай для векторів попиту споживачів виконуються нерівності

$$\sum_{k=1}^n \Lambda_{ik}(p) \leq 1, \quad i = \overline{1, l}.$$

Вектор $\{p_i\}_{i=1}^l$, який задовольнятиме умову економічної рівноваги (9) і забезпечуватиме прибутковість усіх суб'єктів економічної системи, є розв'язком системи рівнянь

$$\frac{1}{p_k} \sum_{i=1}^l \Lambda_{ik}^*(p) \tilde{D}_i(p) = \psi_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (10)$$

а компоненти векторів попиту Λ_i^* , $i = \overline{1, l}$, вибираються у вигляді

$$\Lambda_{ik}^*(p) = \frac{\Lambda_{ik}(p)}{\sum_{s=1}^n \Lambda_{is}(p)} = \frac{\hat{c}_{ki} p_k}{\sum_{s=1}^n \hat{c}_{si} p_s}, \quad i = \overline{1, l}, \quad k = \overline{1, n}.$$

Доведення. Нехай рівняння (10) розв'язне. Тоді, на підставі умови (9), для його довільно вибраного додатного розв'язку має виконуватись

$$\sum_{i=1}^l \Lambda_{ik}(p) \tilde{D}_i(p) \leq \sum_{i=1}^l \Lambda_{ik}^*(p) \tilde{D}_i(p), \quad k = \overline{1, n},$$

або

$$\sum_{i=1}^l \Lambda_{ik}(p) \frac{\sum_{s=1}^n \Lambda_{is}(p)}{\sum_{s=1}^n \Lambda_{is}(p)} \tilde{D}_i(p) \leq \sum_{i=1}^l \frac{\Lambda_{ik}(p)}{\sum_{s=1}^n \Lambda_{is}(p)} \tilde{D}_i(p) \quad k = \overline{1, n}.$$

Очевидно, що за додатних цін $\{p_i\}_{i=1}^l$ і у випадку прибуткової діяльності всіх суб'єктів економічної системи

$$\tilde{D}_i(p) > 0, \quad i = \overline{1, l},$$

ця вимога задовольнятиметься внаслідок справедливості нерівності (8):

$$\sum_{i=1}^l \frac{\Lambda_{ik}(p)}{\sum_{s=1}^n \Lambda_{is}(p)} \tilde{D}_i(p) \left[1 - \sum_{s=1}^n \Lambda_{is}(p) \right] \geq 0 \quad k = \overline{1, n}.$$

Теорему доведено.

Отже, замість системи нерівностей (9) для знаходження станів рівноваги, у яких виробництво суб'єктів економічної системи прибуткове, достатньо розв'язати систему нелінійних рівнянь:

$$\sum_{j=1}^l \hat{c}_{kj} \frac{\sum_{s=1}^n c_{sj} p_s}{\sum_{m=1}^n \hat{c}_{mj} p_m} y_j = x_k - \sum_{i=1}^n a_{ki} x_i - \sum_{i=1}^n b_{ki} - e_k + i_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (11)$$

$$\pi_j x_j \left(p_j - \sum_{k=1}^n a_{kj} p_k \right) - \pi_j \sum_{k=1}^n b_{kj} p_k = y_j \sum_{s=1}^n c_{sj} p_s, \quad j = \overline{1, n}, \quad (12)$$

відносно невідомих $\{p_i\}_{i=1}^l$, $\{x_i\}_{i=1}^n$, $\{y_i\}_{i=1}^l$ і $\{\pi_i\}_{i=1}^n$. Якщо ввести змінні

$$\hat{y}_j = \frac{\sum_{s=1}^n c_{sj} p_s}{\sum_{m=1}^n \hat{c}_{mj} p_m} y_j, \quad j = \overline{1, l},$$

то рівняння (11), (12) набудуть вигляду (6), (7), де замість елементів матриці C міститимуться елементи матриці \hat{C} , а замість ступенів задоволення потреб споживачів $\{y_i\}_{i=1}^l$ — величини $\{\hat{y}_i\}_{i=1}^l$. Отже, задача рівноваги зводиться до випадку ненасичуваних споживачів, що дає змогу використати всі напрацьовані алгоритми знаходження невідомих.

Зробимо кілька зауважень стосовно розв'язування задачі рівноваги. За структурою рівняння (6), (7) мають більш простий вигляд, ніж рівняння (11), (12). Цей факт і наявність алгоритмів розв'язування схиляє до використання саме рівнянь (6), (7) з вектором $\{\hat{y}_i\}_{i=1}^l$ і матрицею \hat{C} [4]. Але на відміну від вектора $\{y_i\}_{i=1}^l$, компоненти якого дозволяють оцінити прийнятність станів рівноваги для окремих суб'єктів економічної системи, вектор $\{\hat{y}_i\}_{i=1}^l$ є ефективною величиною. Компоненти вектора $\{y_i\}_{i=1}^l$ визначатимуться згодом за компонентами вектора $\{\hat{y}_i\}_{i=1}^l$. Прийнятність станів рівноваги встановлюється за виконанням умов на рівноважний вектор $\{y_i\}_{i=1}^l$. Серед усіх можливих станів рівноваги вибираються лише ті, для яких виконуватимуться обмеження на компоненти вектора ступенів задоволення потреб споживачів $y^m \leq y_i \leq y^M$, $i = \overline{1, l}$. На компоненти вектора $\{\hat{y}_i\}_{i=1}^l$ теж можна накласти подібні обмеження [4], щоб досягти виконання вказаних умов, але вони можуть виявитись менш точними, ніж якщо б обмеження накладались безпосередньо на компоненти вектора $\{y_i\}_{i=1}^l$. Крім того, вектор $\{\hat{y}_i\}_{i=1}^l$ залежить від цін і це необхідно враховувати, щоб вказати потрібні обмеження на його компоненти. Запропонуємо альтернативний підхід розв'язання задачі про економічну рівновагу без визначення вектора $\{\hat{y}_i\}_{i=1}^l$.

ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАНІВ РІВНОВАГИ І АЛГОРИТМ ЇХ ЗНАХОДЖЕННЯ

Якщо задати матричні елементи

$$c_{kj}(p) = \hat{c}_{kj} \frac{\sum_{s=1}^n c_{sj} p_s}{\sum_{m=1}^n \hat{c}_{mj} p_m}, \quad k = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, l}, \quad (13)$$

то система рівнянь (11), (12) набуде вигляду:

$$\sum_{j=1}^l c_{kj}(p) y_j = x_k - \sum_{i=1}^n a_{ki} x_i - \sum_{i=1}^n b_{ki} - e_k + i_k, \quad k = \overline{1, n}; \quad (14)$$

$$\pi_j x_j \left(p_j - \sum_{k=1}^n a_{kj} p_k \right) - \pi_j \sum_{k=1}^n b_{kj} p_k = y_j \sum_{s=1}^n c_{sj}(p) p_s, \quad j = \overline{1, n}. \quad (15)$$

На матричні елементи $c_{kj}(p)$, означені виразом (13), накладемо обмеження:

$$\hat{c}_{kj} \leq c_{kj}(p) \leq c_{kj}, \quad k = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, l}. \quad (16)$$

Задача знову звелась до випадку ненасичуваних споживачів, але тепер із залежними від вектора цін елементами матриці попиту. З усіх можливих станів рівноваги необхідно знайти характеристики лише тих, які належатимуть заданій області значень. Цю задачу розглянуто у праці [5]. Відповідно до раніше отриманих результатів вважатимемо, що матриця $A = \|a_{kj}\|_{k,j=1}^n$ продуктивна, тоді для знаходження рівноважного вектора цін використовуватимемо рівняння

$$p_k = P_k(p, y), \quad k = \overline{1, t}; \quad (17)$$

$$P_k(p, y) = \sum_{j=1}^t (E - A)_{jk}^{-1} \left[\sum_{s=t+1}^n a_{sj} p_s^0 + \frac{y_j}{\pi_j x_j} \sum_{s=1}^n c_{sj}(p) p_s + \frac{1}{x_j} \sum_{s=1}^n b_{sj} p_s \right], \quad k = \overline{1, t},$$

яке розв'язуватимемо одночасно з рівнянням на рівноважні ступені задоволення потреб споживачів y_1, \dots, y_t :

$$y_s = \Delta_1(\alpha_s - \lambda_s) + \sum_{k=1}^t (\alpha_k - \lambda_k) d_{ks}(p), \quad s = \overline{1, t}, \quad (18)$$

де

$$d_{kj}(p) = \sum_{s=1}^n (E - A)_{ks}^{-1} c_{sj}(p),$$

та рівнянням на допоміжний вектор $\{\alpha_i - \lambda_i\}_{i=1}^t$:

$$\alpha_k - \lambda_k = \tilde{\Theta}_k(p, \alpha_1 - \lambda_1, \dots, \alpha_t - \lambda_t), \quad k = \overline{1, t}, \quad (19)$$

$$\tilde{\Theta}_k(p, \alpha_1 - \lambda_1, \dots, \alpha_t - \lambda_t) = \frac{\Delta_0}{\Delta_1^2} \left(b_k^0 - \sum_{j=t+1}^n d_{kj}(p) \alpha_j^1 \right) - \frac{1}{\Delta_1^2} \sum_{j=1}^t \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}(p) d_{ji}(p) \right] \times$$

$$\times (\alpha_j - \lambda_j) - \frac{1}{\Delta_1} \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}(p) (\alpha_j - \lambda_j) + \sum_{j=1}^t d_{jk}(p) (\alpha_j - \lambda_j) \right), \quad k = \overline{1, t},$$

де

$$b_k^0 = x_k^0 - \sum_{s=1}^n (E - A)_{ks}^{-1} \left[\sum_{i=1}^n b_{si} + e_s - i_s \right].$$

Рівняння (18), (19) випливають з екстремальної задачі [6]

$$\min_{(y_1, \dots, y_n)} \mathcal{F}^0(p), \quad \mathcal{F}^0(p) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n [\beta_j(p) - y_j]^2$$

за додаткових вимог

$$\sum_{j=1}^n d_{kj}(p) y_j + \Delta_1 y_k = \Delta_0 b_k^0, \quad k = \overline{1, t},$$

та величини $\{\beta_i(p)\}_{i=1}^n$, які подаються виразами:

$$\beta_s(p) = \Delta_1 \alpha_s + \sum_{k=1}^t \alpha_k d_{ks}(p), \quad s = \overline{1, t},$$

$$\beta_s(p) = \Delta_0 \alpha_s^1 + \sum_{k=1}^t \alpha_k d_{ks}(p), \quad s = \overline{t+1, n}.$$

Рівняння (17), (18), (19) мають розв'язок у множині додатних векторів [5], якщо справедлива оцінка

$$\sum_{k=1}^t \sum_{j=1}^t (E - A)_{jk}^{-1} \frac{1}{x_j^0} \max_{s \in [1, t]} \left(\frac{y^M}{\pi_j} c_{sj} + b_{sj} \right) < 1, \quad (20)$$

і для заданих значень постійних Δ_0 , Δ_1 та величин σ^m , σ^M , вибраних з умови

$$y^m \leq \sigma^m \left(\Delta_1 + \sum_{k=1}^t d_{ks}^1 \right) \leq \sigma^M \left(\Delta_1 + \sum_{k=1}^t d_{ks}^0 \right) \leq y^M, \quad s = \overline{1, t},$$

виконуються нерівності

$$\frac{\Delta_0}{\Delta_1^2} \left(b_s^0 - \sum_{k=t+1}^n d_{sk}^1 \alpha_k^1 \right) - \frac{\sigma^m}{\Delta_1^2} \left(\sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^t d_{ki}^1 d_{si}^1 + \Delta_1 \sum_{i=1}^t d_{si}^1 + \Delta_1 \sum_{i=1}^t d_{is}^1 \right) \leq$$

$$\leq \sigma^M, \quad s = \overline{1, t}; \quad (21)$$

$$\frac{\Delta_0}{\Delta_1^2} \left(b_s^0 - \sum_{k=t+1}^n d_{sk}^0 \alpha_k^1 \right) - \frac{\sigma^M}{\Delta_1^2} \left(\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^t d_{si}^0 d_{ji}^0 + \Delta_1 \sum_{i=1}^t d_{si}^0 + \Delta_1 \sum_{i=1}^t d_{is}^0 \right) \geq$$

$$\geq \sigma^m, \quad s = \overline{1, t}. \quad (22)$$

де

$$d_{kj}^1 = \sum_{s=1}^n (E - A)_{ks}^{-1} \hat{c}_{sj}, \quad d_{kj}^0 = \sum_{s=1}^n (E - A)_{ks}^{-1} c_{sj}.$$

Рівноважні ступені задоволення потреб споживачів y_{t+1}, \dots, y_n визначаються з рівняння

$$y_s = \Delta_0 \alpha_s^1 + \sum_{k=1}^l (\alpha_k - \lambda_k) d_{ks}(p), \quad s = \overline{t+1, n}.$$

У цьому випадку всі компоненти y_1, \dots, y_n задовольнятимуть обмеження $y^m \leq y_i \leq y^M$, $i = \overline{1, n}$. Решту рівноважних ступенів задоволення потреб споживачів y_{n+1}, \dots, y_l визначимо з екстремальної задачі

$$\min_{(y_{n+1}, \dots, y_l)} \tilde{\mathcal{F}}^1(p), \quad \tilde{\mathcal{F}}^1 = \frac{1}{2} \sum_{j=n+1}^l [\beta_j(p) - y_j]^2; \quad (23)$$

$$\beta_s(p) = \sum_{k=1}^l \hat{\alpha}_k^1 d_{ks}(p), \quad s = \overline{n+1, l}$$

за додаткових вимог

$$\sum_{j=1}^n d_{kj}(p) y_j + \Delta_1 y_k = \Delta_0 \sum_{j=1}^l d_{kj}(p) y_j, \quad k = \overline{1, l}. \quad (24)$$

Розв'язок задачі (23), (24) теж має задовольняти обмеження

$$y^m \leq y_k \leq y^M, \quad k = \overline{n+1, l}. \quad (25)$$

Існування розв'язку рівнянь (17)–(19) доведено. Обґрунтуємо використання ітераційних методів для його знаходження. Побудуємо ітераційний процес

$$p_k^{[s+1]} = P_k(p^{[s]}, y^{[s]}), \quad k = \overline{1, t};$$

$$y_j^{[s+1]} = \Delta_1 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) + \sum_{k=1}^l (\alpha_k^{[s]} - \lambda_k^{[s]}) d_{kj}(p^{[s]}), \quad j = \overline{1, t};$$

$$\alpha_k^{[s+1]} - \lambda_k^{[s+1]} = \tilde{\Theta}_k(p^{[s]}, \alpha_1^{[s]} - \lambda_1^{[s]}, \dots, \alpha_t^{[s]} - \lambda_t^{[s]}), \quad k = \overline{1, t},$$

та з'ясуємо питання про його збіжність до розв'язку, де нульове наближення вибиратимемо з множин:

$$\mathcal{M}_\lambda = \left\{ \alpha_k - \lambda_k \in R, \quad \left| \frac{\sigma^M + \sigma^m}{2} - \alpha_k + \lambda_k \right| \leq \frac{\sigma^M - \sigma^m}{2}, \quad k = \overline{1, l} \right\};$$

$$\mathcal{M}_y = \left\{ y_k \in R_+, \quad \left| \frac{(y^M + y^m)}{2} - y_k \right| \leq \frac{(y^M - y^m)}{2}, \quad k = \overline{1, n} \right\};$$

$$\mathcal{M}_p = \left\{ p_k \geq \rho_0, \quad k = \overline{1, t}, \quad \sum_{k=1}^l p_k \leq \rho \right\}.$$

Кожна ітерація знову належатиме множинам $\mathcal{M}_\lambda, \mathcal{M}_y, \mathcal{M}_p$ [5]. Вважатимемо, що нерівності (16) виконуватимуться для всіх $p \in \mathcal{M}_p$, якщо параметр ρ вибрати з урахуванням обмеження [5]

$$\frac{\sum_{k=1}^t \sum_{j=1}^t (E - A)_{jk}^{-1} \frac{1}{x_j^0} \left[x_j^0 \sum_{s=t+1}^n a_{sj} p_s^0 + \frac{y_j^M}{\pi_j} \sum_{s=t+1}^n c_{sj}^0 p_s^0 + \sum_{s=t+1}^n b_{sj} p_s^0 \right]}{1 - \sum_{k=1}^t \sum_{j=1}^t (E - A)_{jk}^{-1} \frac{1}{x_j^0} \max_{s \in [1, t]} \left(\frac{y_j^M}{\pi_j} c_{sj}^0 + b_{sj} \right)} \leq \rho.$$

Оцінимо різницю

$$|p_k^{[s+1]} - p_k^{[s]}|, \quad k = \overline{1, t}.$$

Уведемо допоміжну матрицю з елементами τ_{kj} , такими, що

$$y^m \hat{c}_{kj} = \tau_{kj} y^M c_{kj}, \quad 0 < \tau_{kj} \leq 1 \quad k = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, l}.$$

Відповідно до структури оператора $\{P_i(p, y)\}_{i=1}^n$ отримаємо

$$\begin{aligned} |p_k^{[s+1]} - p_k^{[s]}| &= |P_k(p^{[s]}, y^{[s]}) - P_k(p^{[s-1]}, y^{[s-1]})| = \left| \sum_{j=1}^t (E - A)_{jk}^{-1} \frac{1}{x_j} \times \right. \\ &\times \left. \left[\sum_{i=1}^n b_{ij} (p_i^{[s]} - p_i^{[s-1]}) + \frac{1}{\pi_j} \sum_{i=1}^n (y_j^{[s]} c_{ij} (p_i^{[s]}) p_i^{[s]} - y_j^{[s-1]} c_{ij} (p_i^{[s-1]}) p_i^{[s-1]}) \right] \right| \leq \\ &\leq \sum_{j=1}^t (E - A)_{jk}^{-1} \frac{1}{x_j} \left[\sum_{i=1}^n b_{ij} |p_i^{[s]} - p_i^{[s-1]}| + \right. \\ &\left. + \frac{1}{\pi_j} \sum_{i=1}^n |y_j^{[s]} c_{ij} (p_i^{[s]}) p_i^{[s]} - y_j^{[s-1]} c_{ij} (p_i^{[s-1]}) p_i^{[s-1]}| \right] \leq \\ &\leq \sum_{j=1}^t (E - A)_{jk}^{-1} \frac{1}{x_j} \left[\sum_{i=1}^n b_{ij} |p_i^{[s]} - p_i^{[s-1]}| + \right. \\ &\left. + \frac{1}{\pi_j} \max \left(\sum_{i=1}^n (y^M c_{ij} p_i^{[s]} - y^m \hat{c}_{ij} p_i^{[s-1]}), \sum_{i=1}^n (y^M c_{ij} p_i^{[s-1]} - y^m \hat{c}_{ij} p_i^{[s]}) \right) \right] \leq \\ &\leq \sum_{j=1}^t (E - A)_{jk}^{-1} \frac{1}{x_j} \times \\ &\times \left[\sum_{i=1}^n b_{ij} |p_i^{[s]} - p_i^{[s-1]}| + \frac{y^m}{\pi_j} \sum_{i=1}^n \hat{c}_{ij} \max((\tau_{ij} p_i^{[s]} - p_i^{[s-1]}), (\tau_{ij} p_i^{[s-1]} - p_i^{[s]})) \right] \leq \\ &\leq \sum_{j=1}^t (E - A)_{jk}^{-1} \frac{1}{x_j} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \left[\sum_{i=1}^n b_{ij} |p_i^{[s]} - p_i^{[s-1]}| + \frac{y^M}{\pi_j} \sum_{i=1}^n c_{ij} \max((p_i^{[s]} - p_i^{[s-1]}), (p_i^{[s-1]} - p_i^{[s]})) \right] = \\ & = \sum_{j=1}^t (E - A)_{jk}^{-1} \sum_{i=1}^t \left[\frac{1}{x_j} b_{ij} + \frac{y^M}{\pi_j x_j} c_{ij} \right] |p_i^{[s]} - p_i^{[s-1]}| \leq \\ & \leq \sum_{j=1}^t (E - A)_{jk}^{-1} \max_{i \in [1, t]} \left(\frac{1}{x_j} b_{ij} + \frac{y^M}{\pi_j x_j} c_{ij} \right) \sum_{i=1}^t |p_i^{[s]} - p_i^{[s-1]}| = \\ & = \omega_k \sum_{i=1}^t |p_i^{[s]} - p_i^{[s-1]}|, \quad k = \overline{1, t}, \end{aligned}$$

де враховано, що

$$p_k^{[s]} = p_k^{[s-1]} = p_k^0, \quad k = \overline{t+1, n}.$$

З умови (20) випливають очевидні нерівності

$$\omega_k = \sum_{j=1}^t (E - A)_{jk}^{-1} \max_{i \in [1, t]} \left(\frac{1}{x_j} b_{ij} + \frac{y_j}{\pi_j x_j} c_{ij} \right) < \sum_{k=1}^t \omega_k < 1, \quad k = \overline{1, t}.$$

Тому буде справедлива оцінка

$$\sum_{k=1}^t |p_k^{[s+1]} - p_k^{[s]}| \leq \sum_{j=1}^t \omega_j \times \sum_{k=1}^t |p_k^{[s]} - p_k^{[s-1]}| \leq \left[\sum_{k=1}^t \omega_k \right]^s \sum_{k=1}^t |p_k^{[1]} - p_k^{[0]}|.$$

Оцінимо різницю

$$|(\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) - (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]})|, \quad j = \overline{1, t}.$$

Із виразу для оператора $\{\tilde{\Theta}_k(p, \alpha_1 - \lambda_1, \dots, \alpha_t - \lambda_t)\}_{i=1}^n$ для кожної ітерації впливає оцінка

$$\begin{aligned} \tilde{\Theta}_k(p, \alpha_1 - \lambda_1, \dots, \alpha_t - \lambda_t) & \leq \frac{\Delta_0}{\Delta_1} \left(b_k^0 - \sum_{j=t+1}^n d_{kj}^1 \alpha_j^1 \right) - \frac{1}{\Delta_1} \sum_{j=1}^t \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}(p) d_{ji}(p) \right] \times \\ & \times (\alpha_j - \lambda_j) - \frac{1}{\Delta_1} \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}(p) (\alpha_j - \lambda_j) + \sum_{j=1}^t d_{jk}(p) (\alpha_j - \lambda_j) \right), \quad k = \overline{1, t}. \end{aligned}$$

Уведемо допоміжні матриці з елементами $\tau_{kj}^0, \tilde{\tau}_{kj}^0$ такими, що

$$\left[\sum_{i=1}^n d_{ki}^1 d_{ji}^1 \right] = \tilde{\tau}_{kj}^0 \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}^0 d_{ji}^0 \right], \quad 0 < \tilde{\tau}_{kj}^0 \leq 1, \quad k = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n};$$

$$d_{kj}^1 = \tau_{kj}^0 d_{kj}^0, \quad 0 < \tau_{kj}^0 \leq 1, \quad k = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}.$$

Звернемо також увагу, що для двох послідовних ітерацій s_i і s_{i+1} (де s_i і s_{i+1} може бути відповідно або $s-1$ і s , або навпаки s і $s-1$) завжди можна підібрати деяку сталу $\tau \geq 1$, щоб виконувались

$$\begin{aligned}
 & \tau \tilde{\Theta}_k(p^{[s_i]}, \alpha_1^{[s_i]} - \lambda_1^{[s_i]}, \dots, \alpha_t^{[s_i]} - \lambda_t^{[s_i]}) = \\
 & = \frac{\Delta_0}{\Delta_1^2} \left(b_k^0 - \sum_{j=t+1}^n d_{kj}^1 \alpha_j^1 \right) - \sum_{j=1}^t \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}(p^{[s_i]}) d_{ji}(p^{[s_i]}) \right] \frac{1}{\Delta_1^2} (\alpha_j^{[s_i]} - \lambda_j^{[s_i]}) - \\
 & - \frac{1}{\Delta_1} \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}(p^{[s_i]}) (\alpha_j^{[s_i]} - \lambda_j^{[s_i]}) + \sum_{j=1}^t d_{jk}(p^{[s_i]}) (\alpha_j^{[s_i]} - \lambda_j^{[s_i]}) \right), \quad k \in [1, t]. \\
 & \tau \tilde{\Theta}_k(p^{[s_{i+1}]}, \alpha_1^{[s_{i+1}]} - \lambda_1^{[s_{i+1}]}, \dots, \alpha_t^{[s_{i+1}]} - \lambda_t^{[s_{i+1}]}) \leq \frac{\Delta_0}{\Delta_1^2} \left(b_k^0 - \sum_{j=t+1}^n d_{kj}^0 \alpha_j^1 \right) - \\
 & - \sum_{j=1}^t \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}(p^{[s_{i+1}]}) d_{ji}(p^{[s_{i+1}]}) \right] \frac{1}{\Delta_1^2} (\alpha_j^{[s_{i+1}]} - \lambda_j^{[s_{i+1}]}) - \\
 & - \frac{1}{\Delta_1} \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}(p^{[s_{i+1}]}) (\alpha_j^{[s_{i+1}]} - \lambda_j^{[s_{i+1}]}) + \sum_{j=1}^t d_{jk}(p^{[s_{i+1}]}) (\alpha_j^{[s_{i+1}]} - \lambda_j^{[s_{i+1}]}) \right), \quad k \in [1, t].
 \end{aligned}$$

З очевидної нерівності

$$\begin{aligned}
 & \tau \tilde{\Theta}_k(p^{[s_{i+1}]}, \alpha_1^{[s_{i+1}]} - \lambda_1^{[s_{i+1}]}, \dots, \alpha_t^{[s_{i+1}]} - \lambda_t^{[s_{i+1}]}) - \\
 & - \tau \tilde{\Theta}_k(p^{[s_i]}, \alpha_1^{[s_i]} - \lambda_1^{[s_i]}, \dots, \alpha_t^{[s_i]} - \lambda_t^{[s_i]}) \leq \\
 & \leq \frac{\Delta_0}{\Delta_1^2} \left(b_k^0 - \sum_{j=t+1}^n d_{kj}^1 \alpha_j^1 \right) - \frac{1}{\Delta_1^2} \sum_{j=1}^t \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}(p^{[s_{i+1}]}) d_{ji}(p^{[s_{i+1}]}) \right] (\alpha_j^{[s_{i+1}]} - \lambda_j^{[s_{i+1}]}) - \\
 & - \frac{1}{\Delta_1} \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}(p^{[s_{i+1}]}) (\alpha_j^{[s_{i+1}]} - \lambda_j^{[s_{i+1}]}) + \sum_{j=1}^t d_{jk}(p^{[s_{i+1}]}) (\alpha_j^{[s_{i+1}]} - \lambda_j^{[s_{i+1}]}) \right) - \\
 & - \tilde{\Theta}_k(p^{[s_i]}, \alpha_1^{[s_i]} - \lambda_1^{[s_i]}, \dots, \alpha_t^{[s_i]} - \lambda_t^{[s_i]}), \quad k \in [1, t],
 \end{aligned}$$

отримаємо

$$\begin{aligned}
 & \left| \tilde{\Theta}_k(p^{[s_{i+1}]}, \alpha_1^{[s_{i+1}]} - \lambda_1^{[s_{i+1}]}, \dots, \alpha_t^{[s_{i+1}]} - \lambda_t^{[s_{i+1}]}) - \right. \\
 & \left. - \tilde{\Theta}_k(p^{[s_i]}, \alpha_1^{[s_i]} - \lambda_1^{[s_i]}, \dots, \alpha_t^{[s_i]} - \lambda_t^{[s_i]}) \right| \leq \\
 & \leq \left| \frac{1}{\Delta_1^2} \left(\sum_{j=1}^t \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}(p^{[s_i]}) d_{ji}(p^{[s_i]}) \right] (\alpha_j^{[s_i]} - \lambda_j^{[s_i]}) - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \sum_{j=1}^t \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}(p^{[s_{i+1}]}) d_{ji}(p^{[s_{i+1}]}) \right] (\alpha_j^{[s_{i+1}]} - \lambda_j^{[s_{i+1}]}) \right) \right| +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{\Delta_1} \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}(p^{[s_i]}) (\alpha_j^{[s_i]} - \lambda_j^{[s_i]}) + \sum_{j=1}^t d_{jk}(p^{[s_i]}) (\alpha_j^{[s_i]} - \lambda_j^{[s_i]}) \right) - \\
 & - \frac{1}{\Delta_1} \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}(p^{[s_{i+1}]}) (\alpha_j^{[s_{i+1}]} - \lambda_j^{[s_{i+1}]}) + \sum_{j=1}^t d_{jk}(p^{[s_{i+1}]}) (\alpha_j^{[s_{i+1}]} - \lambda_j^{[s_{i+1}]}) \right) \Bigg) = \\
 & = \left| \frac{1}{\Delta_1^2} \left(\sum_{j=1}^t \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}(p^{[s]}) d_{ji}(p^{[s]}) \right] (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) - \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. - \sum_{j=1}^t \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}(p^{[s-1]}) d_{ji}(p^{[s-1]}) \right] (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) \right) \right. \\
 & \quad \left. + \frac{1}{\Delta_1} \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}(p^{[s]}) (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) + \sum_{j=1}^t d_{jk}(p^{[s]}) (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) \right) - \right. \\
 & \quad \left. - \frac{1}{\Delta_1} \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}(p^{[s-1]}) (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) + \sum_{j=1}^t d_{jk}(p^{[s-1]}) (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) \right) \right| \leq \\
 & \leq \frac{1}{\Delta_1^2} \left| \sum_{j=1}^t \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}(p^{[s]}) d_{ji}(p^{[s]}) \right] (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) - \right. \\
 & \quad \left. - \sum_{j=1}^t \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}(p^{[s-1]}) d_{ji}(p^{[s-1]}) \right] (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) \right| + \\
 & \quad + \frac{1}{\Delta_1} \left| \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}(p^{[s]}) (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) + \sum_{j=1}^t d_{jk}(p^{[s]}) (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) \right) - \right. \\
 & \quad \left. - \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}(p^{[s-1]}) (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) + \sum_{j=1}^t d_{jk}(p^{[s-1]}) (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) \right) \right| \leq \\
 & \leq \frac{1}{\Delta_1} \max \left(\sum_{j=1}^t \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}^0 d_{ji}^0 \right] (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) - \sum_{j=1}^t \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}^1 d_{ji}^1 \right] \times \right. \\
 & \quad \left. \times (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}), \sum_{j=1}^t \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}^0 d_{ji}^0 \right] (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) - \sum_{j=1}^t \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}^1 d_{ji}^1 \right] (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) \right) + \\
 & \quad + \frac{1}{\Delta_1} \max \left[\left(\sum_{j=1}^t d_{kj}^0 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) + \sum_{j=1}^t d_{jk}^0 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) \right) - \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}^1 (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) + \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + \sum_{j=1}^t d_{jk}^1 (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) \right), \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}^0 (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) + \sum_{j=1}^t d_{jk}^0 (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) \right) - \right. \\
 & \quad \left. - \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}^1 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) + \sum_{j=1}^t d_{jk}^1 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) \right) \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}^1 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) + \sum_{j=1}^t d_{jk}^1 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) \right) \leq \\
 & \leq \frac{1}{\Delta_1^2} \max \left(\sum_{j=1}^t \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}^1 d_{ji}^1 \right] \left[\tilde{\tau}_{kj}^0 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) - (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) \right], \right. \\
 & \quad \left. \sum_{j=1}^t \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}^1 d_{ji}^1 \right] \left[\tilde{\tau}_{kj}^0 (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) - (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) \right] \right) + \\
 & + \frac{1}{\Delta_1} \max \left[\left(\sum_{j=1}^t d_{kj}^1 \tau_{kj}^0 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) + \sum_{j=1}^t d_{jk}^1 \tau_{jk}^0 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) \right) - \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}^1 (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \sum_{j=1}^t d_{jk}^1 (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) \right) \right] \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}^1 \tau_{kj}^0 (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) + \sum_{j=1}^t d_{jk}^1 \tau_{jk}^0 (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) \right) - \\
 & - \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}^1 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) + \sum_{j=1}^t d_{jk}^1 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) \right) \leq \frac{1}{\Delta_1^2} \max \left(\sum_{j=1}^t \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}^1 d_{ji}^1 \right] \left[(\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) - \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. - (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) \right] \sum_{j=1}^t \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}^1 d_{ji}^1 \right] \left[\tilde{\tau}_{kj}^0 (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) - (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) \right] \right) + \\
 & + \frac{1}{\Delta_1} \max \left[\left(\sum_{j=1}^t d_{kj}^1 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) + \sum_{j=1}^t d_{jk}^1 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) \right) - \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}^1 (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \sum_{j=1}^t d_{jk}^1 (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) \right) \right] \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}^1 (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) + \sum_{j=1}^t d_{jk}^1 (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) \right) - \\
 & - \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}^1 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) + \sum_{j=1}^t d_{jk}^1 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) \right) \leq \frac{1}{\Delta_1^2} \sum_{j=1}^t \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}^1 d_{ji}^1 \right] \left[(\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) - \right. \\
 & \quad \left. - (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) \right] + \frac{1}{\Delta_1} \left[\left(\sum_{j=1}^t d_{kj}^1 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) + \sum_{j=1}^t d_{jk}^1 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) \right) - \right. \\
 & \quad \left. - \left(\sum_{j=1}^t d_{kj}^1 (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) + \sum_{j=1}^t d_{jk}^1 (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) \right) \right] \leq \\
 & \leq \max_{j \in [1, t]} \left| (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) - (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) \right| \times \\
 & \times \left(\frac{1}{\Delta_1^2} \sum_{j=1}^t \left[\sum_{i=1}^n d_{ki}^1 d_{ji}^1 \right] + \frac{1}{\Delta_1} \sum_{j=1}^t d_{kj}^1 + \frac{1}{\Delta_1} \sum_{j=1}^t d_{jk}^1 \right), \quad k \in [1, t].
 \end{aligned}$$

Остаточно

$$\begin{aligned} \max_{j \in [1, t]} \left| (\alpha_j^{[s+1]} - \lambda_j^{[s+1]}) - (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) \right| &\leq (\varepsilon^2 + 2\varepsilon) \max_{j \in [1, t]} \left| (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) - (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) \right| \leq \\ &\leq (\varepsilon^2 + 2\varepsilon)^s \max_{j \in [1, t]} \left| (\alpha_j^{[1]} - \lambda_j^{[1]}) - (\alpha_j^{[0]} - \lambda_j^{[0]}) \right|, \end{aligned}$$

де

$$\varepsilon = \frac{1}{\Delta_1} n \max_{k, j \in [1, n]} d_{kj}^1.$$

Вимагатимемо виконання

$$\varepsilon^2 + 2\varepsilon < 1.$$

Тому величина ε має задовольняти обмеження

$$0 < \varepsilon < \sqrt{2} - 1. \quad (26)$$

Цього можна досягти за рахунок вибору значення Δ_1 , що не вплине на виконання встановлених вимог (20)–(22) (хіба що буде необхідно скоригувати значення сталої Δ_0).

Оцінимо і різницю

$$\left| y_k^{[s+1]} - y_k^{[s]} \right|, \quad k = \overline{1, t}.$$

Із виразу (18) випливає

$$\begin{aligned} \left| y_k^{[s+1]} - y_k^{[s]} \right| &= \Delta_1 \left| (\alpha_k^{[s]} - \lambda_k^{[s]}) - (\alpha_k^{[s-1]} - \lambda_k^{[s-1]}) + \frac{1}{\Delta_1} \sum_{j=1}^t d_{jk} (p^{[s]})(\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\Delta_1} \sum_{j=1}^t d_{jk} (p^{[s-1]})(\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) \right| \leq \Delta_1 \left| (\alpha_k^{[s]} - \lambda_k^{[s]}) - (\alpha_k^{[s-1]} - \lambda_k^{[s-1]}) \right| + \\ &\quad + \max \left[\left(\sum_{j=1}^t d_{jk}^0 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) - \sum_{j=1}^t d_{jk}^1 (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) \right), \left(\sum_{j=1}^t d_{jk}^0 (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \sum_{j=1}^t d_{jk}^1 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) \right) \right] \leq \\ &\leq \Delta_1 \left| (\alpha_k^{[s]} - \lambda_k^{[s]}) - (\alpha_k^{[s-1]} - \lambda_k^{[s-1]}) \right| + \max \left[\left(\sum_{j=1}^t d_{jk}^1 \tau_{jk}^0 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \sum_{j=1}^t d_{jk}^1 (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) \right), \left(\sum_{j=1}^t d_{jk}^1 \tau_{jk}^0 (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) - \sum_{j=1}^t d_{jk}^1 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) \right) \right] \leq \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\leq \Delta_1 \left| (\alpha_k^{[s]} - \lambda_k^{[s]}) - (\alpha_k^{[s-1]} - \lambda_k^{[s-1]}) \right| + \max \left[\left(\sum_{j=1}^t d_{jk}^1 (\alpha_k^{[s]} - \lambda_k^{[s]}) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \sum_{j=1}^t d_{jk}^1 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) \right), \left(\sum_{j=1}^t d_{jk}^1 (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) - \sum_{j=1}^t d_{jk}^1 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) \right) \right] \leq \\ &\leq \Delta_1 \left| (\alpha_k^{[s]} - \lambda_k^{[s]}) - (\alpha_k^{[s-1]} - \lambda_k^{[s-1]}) \right| + \sum_{j=1}^t d_{kj}^1 \left| (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) - (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) \right| \leq \\ &\leq \left(\Delta_1 + \sum_{j=1}^t d_{kj}^1 \right) \max_{j \in [1, t]} \left| (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) - (\alpha_j^{[s-1]} - \lambda_j^{[s-1]}) \right|, \quad k = \overline{1, t}. \end{aligned}$$

На підставі встановлених оцінок та теорем про нерухому точку оператора [7] справедлива теорема.

Теорема 2. Нехай виконуються умови (20)–(22) існування розв’язку рівнянь (17)–(19), а норма ε матриці $\left\| \frac{1}{\Delta_1} d_{kj}^1 \right\|_{k, j=1}^n$ задовольняє обмеження (26),

тоді розв’язок рівнянь (17)–(19) можна знайти за допомогою ітераційних процедур

$$p_k^{[s+1]} = P_k(p^{[s]}, y^{[s]}), \quad s = 0, 1, \dots \quad k = \overline{1, t},$$

зі швидкістю збіжності

$$\frac{\left[\sum_{k=1}^t \omega_k \right]^s}{1 - \left[\sum_{k=1}^t \omega_k \right]} \sum_{k=1}^t |p_k^{[1]} - p_k^{[0]}|,$$

і

$$y_j^{[s+1]} = \Delta_1 (\alpha_j^{[s]} - \lambda_j^{[s]}) + \sum_{k=1}^t (\alpha_k^{[s]} - \lambda_k^{[s]}) d_{kj}(p^{[s]}), \quad s = 0, 1, \dots \quad j = \overline{1, t};$$

$$\alpha_k^{[s+1]} - \lambda_k^{[s+1]} = \tilde{\Theta}_k(p^{[s]}, \alpha_1^{[s]} - \lambda_1^{[s]}, \dots, \alpha_t^{[s]} - \lambda_t^{[s]}), \quad s = 0, 1, \dots \quad k = \overline{1, t},$$

зі швидкістю збіжності

$$\frac{(\varepsilon^2 + 2\varepsilon)^s}{1 - (\varepsilon^2 + 2\varepsilon)} \max_{j \in [1, t]} \left| (\alpha_j^{[1]} - \lambda_j^{[1]}) - (\alpha_j^{[0]} - \lambda_j^{[0]}) \right|.$$

Щодо решти рівноважних характеристик, то за відомими векторами $\{y_i\}_{i=1}^n$ і $\{p_i\}_{i=1}^t$ задачу (23)–(25) стосовно невідомих величин $\{y_i\}_{i=n+1}^l$ можна розв’язати, використавши запропоновану у праці [5] формулу

$$y_s = \frac{1}{\lambda} \sum_{k=1}^n d_{ks}(p) \sum_{j=1}^n \left[\sum_{i=n+1}^l d_{ki}(p) d_{ji}(p) \right] v \hat{\alpha}_j^1 +$$

$$+ \frac{1}{\tilde{\lambda}} \sum_{k=1}^n d_{ks}(p)(b_k^0 - \Delta_0 b_k^0 + \Delta_1 y_k - v \hat{\alpha}_k^1), \quad s = \overline{n+1, l},$$

де $\tilde{\lambda}$ є найбільшим власним значенням матриці $\left\| \sum_{s=n+1}^l d_{ks}(p) d_{js}(p) \right\|_{k,j=1}^n$, а $\{(1+v)\hat{\alpha}_i^1 - \hat{\lambda}_i^1\}_{i=1}^n$ є власним вектором, який йому відповідає. Вибір значень величин $\{\hat{\alpha}_i^1\}_{i=1}^n$ і v має забезпечити виконання вимоги (25).

Нарешті рівноважні рівні оподаткування монополістів визначатимуться за іншими рівноважними характеристиками, як і в моделі економіки з постійними інтересами споживачів [4], виразом

$$\pi_j = \frac{\sum_{s=1}^t c_{sj} y_j p_s + \sum_{s=t+1}^n c_{sj} y_j p_s^0}{p_j^0 x_j - \sum_{k=1}^t (a_{kj} x_j + b_{kj}) p_k - \sum_{k=t+1}^n (a_{kj} x_j + b_{kj}) p_k^0}, \quad j = \overline{t+1, n}.$$

ВИСНОВКИ

Розглянуто особливості встановлення рівноваги в економічній системі за наявності монополістів та зі споживачами, які дотримуються стратегії поведінки різних типів. Удосконалено метод розв'язування задачі про економічну рівновагу. На відміну від попередніх результатів [4], де задача зводилась до випадку ненасичуваних споживачів та використання наближення економіки з постійними інтересами споживачів з ефективним вектором $\{\hat{y}_i\}_{i=1}^l$ замість вектора ступенів задоволення потреб споживачів $\{y_i\}_{i=1}^l$, тепер задача звелась теж до випадку ненасичуваних споживачів, але із залежними від вектора цін елементами матриці попиту [5] і вектором $\{y_i\}_{i=1}^l$. Процедура розв'язування задачі про економічну рівновагу для залежних від цін елементів матриці попиту є більш складною, ніж для наближення економіки з постійними інтересами споживачів, але тепер завдяки наявності вектора $\{y_i\}_{i=1}^l$ з'являється можливість гарантованого вибору стану рівноваги із заданими властивостями. Запропоновано ітераційний алгоритм знаходження рівноважних характеристик із заданими властивостями. Зокрема, вказано межі, у яких мають міститись значення змінних рівноважних характеристик моделі. З'ясовано за допомогою яких модельних характеристик можна впливати на збіжність ітераційного алгоритму та знайдено обмеження на їх значення, що гарантуватимуть збіжність.

Роботу виконано за часткової підтримки Програми фундаментальних досліджень Відділення фізики і астрономії НАН України (проект № 0117U000240).

ЛІТЕРАТУРА

1. Гончар М.С. Математичні основи інформаційної економіки / М.С.Гончар. — К.: Ін-т теор. фізики, 2007. — 464 с.

2. *Kehoe T.J.* Computation and multiplicity of equilibria. Handbook of Mathematical Economics / Kehoe T.J.; ed. by W. Hildenbrand, H. Sonnenschein. — Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1991. — Vol. IV. — P. 2049–2143.
3. *Махорт А.П.* Про рівновагу відкритої економічної системи за наявності невикористаного капіталу та заданих рівнів споживання / А.П. Махорт // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2015. — № 1. — С. 45–56.
4. *Махорт А.Ф.* Равновесие в экономической системе с разными типами стратегий поведения потребителей / А.Ф. Махорт // Проблемы управления и информатики. — 2009. — № 1. — С. 107–117.
5. *Махорт А.П.* Про рівновагу відкритої економічної системи за наявності монополістів та залежних від цін споживчих уподобань / А.П. Махорт // Математичне моделювання в економіці. — 2017. — № 1–2. — С. 159–171.
6. *Махорт А.П.* Про алгоритми визначення станів рівноваги відкритої економічної системи за наявності монополістів / А.П. Махорт // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2016. — № 4. — С. 95–107.
7. *Канторович Л.В.* Функциональный анализ / Л.В. Канторович, Г.П. Акилов. — М.: Наука, 1977. — 442 с.

Надійшла 19.02.2019

ЕКСПОНЕНЦІАЛЬНА ОЦІНКА ДЛЯ РЕКУРЕНТНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ З ДИСКРЕТНИМ ЗАПІЗНЕННЯМ

В.П. МАРЦЕНЮК, А.С. СВЕРСТЮК

Анотація. Розроблено та застосовано метод розрахунку швидкості експоненціального згасання для моделі рекурентної нейронної мережі на основі диференціальних рівнянь із дискретним запізненням. Експоненціальну оцінку отримано на основі різницевої нерівності для функціонала Ляпунова. Розглянуто приклад експоненціального оцінювання для моделі рекурентної нейронної мережі з трьома нейронами.

Ключові слова: рекурентна нейронна мережа, диференціальні рівняння із запізненням, експоненціальна стійкість, функціонал Ляпунова.

ВСТУП

Протягом останнього часу дослідження в галузі штучних нейронних мереж є одними з пріоритетних у науці та техніці. Застосування нейронних мереж, пов'язане з діагностикою [1–3], розпізнаванням образів [4, 5], обробленням сигналів [6], має важливе значення для вирішення багатьох прикладних завдань. Для вирішення найскладніших завдань (наприклад, моделювання та оброблення неперервного рукописного тексту, мовлення і мови) пропонують використовувати рекурентні нейронні мережі [7, 8].

З метою дослідження широкого кола проблем аналізу стійкості, синхронізації та оцінювання збіжності застосовують моделі рекурентних нейронних мереж на основі систем диференціальних рівнянь із часовими запізненнями. Неперервно або дискретно розподілені запізнення, спричинені часом, що затрачається на обчислення на попередніх вузлах, спостерігаються в різних нейронних мережах. Як приклади можна навести нейронні мережі Хопфілда, клітинні нейронні мережі та двонаправлені нейронні мережі з асоціативною пам'яттю. При цьому запізнення можуть впливати на хід коливань, нестійкість та продуктивність мережі [9–11].

За допомогою моделей на основі диференціальних рівнянь із запізненням можуть бути досліджені динамічні характеристики рекурентних нейронних мереж із запізненнями часу [12, 13].

Ураховуючи той факт, що глобальна стійкість є однією з найважливіших динамічних властивостей нейронних мереж, протягом останнього часу дослідження стійкості для нейронних мереж із запізненням стосувалися глобальної асимптотичної стійкості [9, 10, 14, 15], глобальної експоненціальної стійкості [11, 16] і робастної стійкості [17].

Експоненціальна стійкість є часто використовуваною для дослідження багатьох систем, оскільки вона описується чіткими показниками швидкості згасання експоненціальної оцінки. Для отримання таких оцінок застосовується ряд методів, серед яких доцільно виокремити непрямі [18, 19] та прямі

методи. Прямі методи ґрунтуються на побудові функціонала Ляпунова та оцінюванні його загальної похідної. Експоненціальну оцінку можна знайти як розв’язок різницево-диференціальної нерівності щодо функціонала Ляпунова [20]. Утім, у праці [21] для лінійної нестационарної системи розроблено метод, який ґрунтується на отриманні різницевої нерівності для функціонала Ляпунова. Цей метод складніший для побудови нерівності для функціонала Ляпунова, але пропонує більш простий розв’язок цієї нерівності. У свою чергу, швидкість згасання може бути розрахована як результат числового розв’язання нелінійного алгебричного рівняння.

Мета роботи — розроблення методу побудови оцінки експоненціального згасання для розв’язання систем диференціальних рівнянь, що використовуються як моделі рекурентних нейронних мереж. Таку оцінку можна застосовувати для вибору параметрів нейронної мережі, що забезпечували б її оптимальну збіжність до стійкого стану.

У роботі використано такі позначення:

$$|\varphi(\bullet)|_{\tau} = \sup_{\theta \in [-\tau, 0], i=1, n} |\varphi_i(\theta)| \quad \text{— норма вектора-функції, де функції}$$

$\varphi \in C^1[-\tau, 0]$ є неперервно диференційованими на $[-\tau, 0]$;

$\|M\|$ — довільна матрична норма для матриці $M \in R^{n \times n}$;

$\|x\|$ — евклідова норма для вектора $x \in R^n$;

$\lambda_{\max}(\bullet)$ — максимальне власне значення матриці;

$\tau_{\max} = \max\{\tau_1, \dots, \tau_r\}$.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РЕКУРЕНТНОЇ НЕЙРОМЕРЕЖІ

Розглядається рекурентна нейронна мережа, описана системою диференціальних рівнянь з дискретними запізненнями:

$$\dot{x}(t) = -Ax(t) + \sum_{m=1}^r W_m g(x(t - \tau_m(t))), \quad (1)$$

де $x(t) \in R^n$ — вектор стану; $A = \text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_n)$ — діагональна матриця з додатними елементами; $a_i > 0$, $W_m = (w_{ij}^m)_{n \times n}$, $m = \overline{1, r}$ — матриці ваг; $g(x(t)) = [g_1(x(t)), g_2(x(t)), \dots, g_n(x(t))]^T \in R^n$, $x(t)$ позначає функції активації нейрона, які є монотонно обмеженими, неспадними, $g_j(0) = 0$ і виконуються умови

$$0 \leq \frac{g_j(\xi_1) - g_j(\xi_2)}{\xi_1 - \xi_2} \leq l_j; \quad (2)$$

$$\xi_1, \xi_2 \in R, \quad \xi_1 \neq \xi_2, \quad j = \overline{1, 2, \dots, n}.$$

Обмежені функції $\tau_m(t)$ є дискретними запізненнями системи, причому $0 \leq \tau_m(t) \leq \tau_M$, $\tau_m(t) \leq \tau_D(t) < 1$, $m = \overline{1, r}$.

Початкові умови системи (1) мають вигляд

$$x_i(s) = \varphi_i(s), \quad s \in [-\tau_M, 0]. \quad (3)$$

У формулі (3) $\varphi_i(s)$ є неперервними дійсно значущими функціями, якщо $s \in [-\tau_M, 0]$.

Як показано у праці [22], під час виконання припущення (2) розв'язок системи (1) існує для всіх $t \geq 0$ і є єдиним.

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ЕКСПОНЕНЦІАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ

Основна ідея методу експоненціального оцінювання розв'язків (1) полягає в побудові різницевої нерівності для квадратичної функції Ляпунова $v(\varphi) \in C^1[-\tau, 0]$ у вигляді

$$v(t) \leq dv(t - 2\tau), \quad t \geq 2\tau,$$

для деякої сталої $d \in (0, 1)$.

Вихідною є нерівність для похідної функціонала Ляпунова у вигляді $\dot{v}(t) \leq -\mu \|x(t)\|^2$ для деякого $\mu > 0$.

Для отримання експоненціальної оцінки необхідно виконати чотири основні кроки, зокрема побудувати:

1) нижню оцінку для розв'язку $x(t)$, а саме функцію $M(t)$, що залежить від значення функціонала Ляпунова $v(t)$ таку, що для довільного достатньо великого t існує $s \in [t - \tau, t]$ таке, що $\|x(s)\| \geq M(t)$;

2) верхню оцінку для $\dot{x}(t)$, а саме функцію $L(t)$ (залежить від значення $v(t - \tau)$), що за довільного достатньо великого t отримуємо $\|\dot{x}(t)\| \leq L(t)$;

3) нижню оцінку для розв'язку $x(t)$, а саме функцію $M(t)$ (залежить від значення функціонала Ляпунова $v(t)$), що для довільного достатньо великого t існує такий інтервал $I \subset [t - \tau, t]$, що $\|x(s)\| \geq M(t)/2$ для будь-якого $s \in I$;

4) різницеву нерівність для квадратичного функціонала Ляпунова $v(\varphi)$ за допомогою інтегрування на інтервалі $s \in [t - \tau, t]$ оцінки $\dot{v}(t) \leq -\mu \|x(t)\|^2$ для деякого $\mu > 0$.

ОЦІНКА ДЛЯ ПОХІДНОЇ ФУНКЦІОНАЛА ЛЯПУНОВА

Розглянемо функціонал Ляпунова у вигляді

$$v(\varphi) = \varphi^T(0)\varphi(0) + \sum_{m=1}^r \int_{-\tau_m}^0 g^T(\varphi(s))V_m(s)g(\varphi(s))ds, \quad (4)$$

де $V_m(s) \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $s \in [-\tau_m, 0]$ — деякі додатно визначені матричні функції.

Обчислимо похідну функціонала вздовж розв'язків системи (1):

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} = & \left(-x^T(t)A^T + \sum_{m=1}^r g^T(x(t-\tau_m))W_m^T \right) x(t) + \\ & + x^T(t) \left(-Ax(t) + \sum_{m=1}^r W_m g(x(t-\tau_m)) \right) + \\ & + \sum_{m=1}^r (g^T(x(t))V_m(t)g(x(t)) - g^T(x(t-\tau_m))V_m(t-\tau_m)g(x(t-\tau_m))) = \xi^T \Xi \xi, \end{aligned} \quad (5)$$

де $\xi = (x(t), g(x(t)), g(x(t-\tau_1)), \dots, g(x(t-\tau_r)))^T$;

$$\Xi = \begin{bmatrix} -2A & \theta & W_1 & W_2 & \dots & W_r \\ \theta & \sum_{m=1}^r V_m(t) & \theta & \theta & \dots & \theta \\ W_1^T & \theta & -V_1(t-\tau_1) & \theta & \dots & \theta \\ W_2 & \theta & \theta & -V_2(t-\tau_2) & \dots & \theta \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_r^T & \theta & \theta & \theta & \dots & -V_r(t-\tau_r) \end{bmatrix},$$

де $\theta \in R^{n \times n}$ — матриця з нульовими елементами.

Лема 1. Згідно з працею [21] для довільних векторів $y, z \in R^n$ та матриці $C \in R^{n \times n}$ маємо

$$2y^T C^T z \leq z^T P^{-1} z + y^T C^T P C y,$$

де P — довільна додатно визначена матриця.

Розглянемо складову $2g^T(x(t-\tau_m))W_m^T x(t)$ у формулі (5). Для будь-якого фіксованого розв'язку x і фіксованого t можна застосувати лему 1, де замість C , y та z покладемо $W_m, g(x(t-\tau_m))$ і $x(t)$ відповідно. Отримуємо

$$\begin{aligned} 2g^T(x(t-\tau_m))W_m^T x(t) & \leq x^T(t)P_m^{-1}x(t) + \\ & + g^T(x(t-\tau_m))W_m^T P_m W_m g(x(t-\tau_m)) \end{aligned}$$

для довільної додатно визначеної матриці P_m .

Застосувавши верхню оцінку у формулі (5), дістанемо

$$\begin{aligned} \dot{\varphi} & \leq x^T(t) \left(-2A + \sum_{m=1}^r P_m^{-1} \right) x(t) + \sum_{m=1}^r g^T(x(t))V_m(t)g(x(t)) + \\ & + \sum_{m=1}^r g^T(x(t-\tau_m))(W_m^T P_m W_m - V_m(t-\tau_m))g(x(t-\tau_m)) = \xi^T \Xi_1 \xi, \end{aligned} \quad (6)$$

де

$$\Xi_1 = \begin{bmatrix} -2A + \sum_{m=1}^r P_m^{-1} & \theta & \theta & \dots & \theta \\ \theta & V_m(t) & \theta & \dots & \theta \\ \theta & \theta & W_1^T P_1 W_1 - V_1(t - \tau_1) & \dots & \theta \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta & \theta & \theta & \dots & W_r^T P_r W_r - V_r(t - \tau_r) \end{bmatrix}.$$

Теорема 1. Нехай система (1) є такою, що існують додатно визначені матриці P_1, \dots, P_r , для яких матриця

$$\Xi_2 = -2A + \sum_{m=1}^r (P_m^{-1} + \text{diag}(l^2) W_m^T P_m W_m)$$

є від'ємно визначеною; тут $\text{diag}(l^2) = \text{diag}(l_1^2, \dots, l_r^2)$.

Тоді існує $\mu_1 < 0$ таке, що $\dot{v}_{(1)} \leq \mu_1 \|x(t)\|^2$.

Доведення. Продовжуючи формулу (6) та використовуючи припущення (2) для $g(\bullet)$, можна записати:

$$\begin{aligned} \dot{v}_{(1)} \leq & x^T(t) \left(-2A + \sum_{m=1}^r P_m^{-1} \right) x(t) + \sum_{m=1}^r x^T(t) \text{diag}(l) V_m(t) \text{diag}(l) x(t) + \\ & + \sum_{m=1}^r g^T(x(t - \tau_m)) (W_m^T P_m W_m - V_m(t - \tau_m)) g(x(t - \tau_m)). \end{aligned}$$

Замінивши $W_m^T P_m W_m$ на V_m , отримаємо

$$\begin{aligned} \dot{v}_{(1)} \leq & x^T(t) \left(-2A + \sum_{m=1}^r P_m^{-1} + \sum_{m=1}^r \text{diag}(l) W_m^T P_m W_m \text{diag}(l) \right) x(t) \leq \\ & \leq \lambda_{\max}(\Xi_2) \|x(t)\|^2 = \mu_1 \|x(t)\|^2. \end{aligned}$$

Теорему доведено.

Скалярний випадок. Розглянемо нерівність

$$\dot{v}_1 \leq \left(-2A + \sum_{m=1}^r P_m^{-1} + W_m^2 P_m l^2 \right) x^2(t).$$

Права частина нерівності має мінімальне значення, якщо $W_m \neq 0$ і $P_m = 1/|W_m|$, $m = \overline{1, r}$. У цьому випадку

$$\dot{v}_1 \leq \left(-2A + (1 + l^T l) \sum_{m=1}^r |W_m| \right) x^2(t). \quad (7)$$

РІЗНИЦЕВА НЕРІВНІСТЬ ДЛЯ ФУНКЦІОНАЛА ЛЯПУНОВА

Використаємо допоміжні результати [21], отримані для лінійної нестационарної системи із запізненням, виходячи з нерівності для похідної функціонала Ляпунова (4).

Лема 2. Для довільного $t \geq \tau_{\max}$ існує $s \in [t - \tau_{\max}, t]$ таке, що $\|x(s)\| \geq M(t)$, де

$$M(t) = \left(\frac{v(t)}{1 + l^T l \sum_{m=1}^r |\lambda_{\max}(V_m(\bullet))|_{\tau_m} \tau_m} \right)^{1/2}.$$

Лема 3. Якщо $\dot{v}_{(1)} \leq 0$, тоді $\|x(t)\| \leq L(t)$, $t \geq \tau_{\max}$, де $L(t) = \left(\|A\| + \|l\| \sum_{m=1}^r \|W_m\| \right) (v(t - 2\tau_{\max}))^{1/2}$.

Лема 4. Для довільного $t \geq 2\tau_{\max}$ існує $s \in [t - \tau_{\max}, t]$ таке, що для будь-якого $\theta \in I$ співвідношення $\|x(\theta)\| \geq \frac{M}{2}$ виконується, якщо $I = [s - M/2L_1; s + M/2L_1] \cap [t - \tau_{\max}, t]$, де M використано з лем 2 та $L_1 = \left(\|A\| + \|l\| \sum_{m=1}^r \|W_m\| \right) (v(t - 2\tau_{\max}))^{1/2}$.

Теорема 2. Вважатимемо, що припущення теореми 1 виконується. Тоді існує додатна стала $d < 1$ така, що

$$v(t) \leq d v(t - \tau_{\max}), \quad t \geq 2\tau_{\max}.$$

Доведення. Із теореми 1 випливає, що

$$\dot{v}_{(1)} \leq \lambda_{\max}(\Xi_2) \|x(t)\|^2 < 0. \quad (8)$$

Якщо $v(t^* - 2\tau_{\max}) = 0$ для деякого t^* , то $v(t^*) = 0$ і твердження є справедливими для t^* .

Припустимо, що $v(t^* - 2\tau_{\max}) > 0$ для деякого t^* . Від супротивного матимемо

$$v(t^*) > d v(t^* - \tau_{\max}). \quad (9)$$

Із виразу (8) випливає, що

$$\begin{aligned} 0 < v(t^*) < v(t^* - \tau_{\max}) + \lambda_{\max}(\Xi_2) \int_{t^* - \tau_{\max}}^{t^*} \|x(\theta)\|^2 d\theta \leq v(t^* - \tau_{\max}) + \\ &+ \lambda_{\max}(\Xi_2) \int_I \left(\frac{M(t^*)}{2} \right)^2 d\theta \leq \\ &\leq v(t^* - \tau_{\max}) + \lambda_{\max}(\Xi_2) \left(\frac{M(t^*)}{2} \right)^2 \min \left(\frac{\tau_{\max}}{2}, \frac{M(t^*)}{2L_1(t^*)} \right). \end{aligned}$$

Ураховуючи (9) для $M(t^*)/L_1(t^*)$, маємо таку оцінку:

$$\begin{aligned} \frac{M(t^*)}{L_1(t^*)} &= \left(\frac{v(t^*)}{v(t^* - 2\tau_{\max})} \right)^{1/2} \frac{1}{\left(1 + l^T l \sum_{m=1}^r |\lambda_{\max}(V_m(\bullet))|_{\tau_m} \tau_m \right)^{1/2}} \frac{1}{\|A\| + \|l\| \sum_{m=1}^r \|W_m\|} > \\ &> \frac{1}{\left(1 + l^T l \sum_{m=1}^r \|W_m\| \lambda_{\max}(V_m(\bullet))|_{\tau_m} \tau_m \right)^{1/2}} \frac{1}{\|A\| + \|l\| \sum_{m=1}^r \|W_m\|} d^{1/2}. \end{aligned}$$

Визначаємо константу ρ таким чином:

$$0 < \rho := \frac{1}{\left(1 + l^T l \sum_{m=1}^r |\lambda_{\max}(V_m(\bullet))|_{\tau_m} \tau_m \right)^{1/2} + \|A\| + \|l\| \sum_{m=1}^r \|W_m\|}.$$

Тоді $\frac{M(t^*)}{L_1(t^*)} > \rho d^{1/2}$.

$$\text{Отже, } v(t^*) \leq v(t^* - \tau_{\max}) + \lambda_{\max}(\Xi_2) \left(\frac{M(t^*)}{2} \right)^2 \min \left(\frac{\tau_{\max}}{2}, \frac{\rho d^{1/2}}{2} \right).$$

Спочатку припустимо, що $\tau_{\max} > \rho d^{1/2}$. Звідси

$$v(t^*) \leq v(t^* - \tau_{\max}) + \lambda_{\max}(\Xi_2) \frac{v(t^*)}{1 + l^T l \sum_{m=1}^r (\lambda_{\max}(V_m(\bullet)))_{\tau_m} \tau_m} \frac{\rho d^{1/2}}{2}.$$

$$\text{Тобто } v(t^*) \leq v(t^* - \tau_{\max}) \frac{1}{1 - \frac{\lambda_{\max}(\Xi_2)}{8} + \frac{\rho d^{1/2}}{1 + l^T l \sum_{m=1}^r |\lambda_{\max}(V_m(\bullet))|_{\tau_m} \tau_m}}.$$

У цьому випадку нехай d є єдиним (додатним) розв'язком рівняння

$$\frac{1}{1 - \frac{\lambda_{\max}(\Xi_2)}{8} + \frac{\rho d^{1/2}}{1 + l^T l \sum_{m=1}^r |\lambda_{\max}(V_m(\bullet))|_{\tau_m} \tau_m}} = d,$$

або

$$d - \frac{\lambda_{\max}(\Xi_2)}{8} \frac{\rho d^{1/2}}{1 + l^T l \sum_{m=1}^r |\lambda_{\max}(V_m(\bullet))|_{\tau_m} \tau_m} d^{3/2} - 1 = 0. \quad (10)$$

Використовуючи (10), можна записати $v(t^*) \leq d v(t^* - \tau_{\max})$, що є суперечністю.

З іншого боку, припустимо, що $\tau_{\max} \leq \rho d^{1/2}$.

Тоді $v(t^*) \leq v(t^* - \tau_{\max}) + \lambda_{\max}(\Xi_2) \frac{1}{4} \frac{v(t^*)}{1 + l^T l \sum_{m=1}^r |\lambda_{\max}(V_m(\bullet))|_{\tau_m} \tau_m} \frac{\tau_{\max}}{2}$.

Тобто $v(t^*) \leq v(t^* - \tau_{\max}) \frac{1}{1 - \frac{\lambda_{\max}(\Xi_2)}{8} \frac{\tau_{\max}}{1 + l^T l \sum_{m=1}^r |\lambda_{\max}(V_m(\bullet))|_{\tau_m} \tau_m}} + \frac{\tau_{\max}}{2}$.

У цьому випадку нехай d матиме такий вигляд:

$$d = \frac{1}{1 - \frac{\lambda_{\max}(\Xi_2)}{8} \frac{\tau_{\max}}{1 + l^T l \sum_{m=1}^r |\lambda_{\max}(V_m(\bullet))|_{\tau_m} \tau_m}}.$$

Тоді $v(t^*) \leq d v(t^* - \tau_{\max})$, що також є суперечністю.

Наслідок 1. Припускаючи, що умови теореми 2 виконуються, константу $d < 1$ можна подати у вигляді:

$$d = \begin{cases} \frac{1}{1 - \frac{\lambda_{\max}(\Xi_2)}{8} \frac{\tau_{\max}}{1 + l^T l \sum_{m=1}^r |W_m^T P_m W_m \lambda_{\max}(V_m(\bullet))|_{\tau_m} \tau_m}}, & \text{якщо } \tau_{\max} \leq \rho d^{1/2}, \\ d_0, & \text{якщо } \tau_{\max} > \rho d^{1/2}, \end{cases}$$

де d_0 — єдиний додатний розв’язок рівняння

$$\frac{\lambda_{\max}(\Xi_2)}{8} \frac{\rho}{1 + l^T l \sum_{m=1}^r |\lambda_{\max}(W_m^T P_m W_m)|_{\tau_m} \tau_m} d^{3/2} - d + 1 = 0. \quad (11)$$

У формулі (11)

$$\rho := \frac{1}{\left(1 + l^T l \sum_{m=1}^r \lambda_{\max}(W_m^T P_m W_m) \tau_m\right)^{1/2} \|A\| + \|l\| \sum_{m=1}^r \|W_m\|}.$$

Доведення впливає з підставлення $W_m^T P_m W_m$ замість V_m .

Теорема 3. Припустімо, що виконуються припущення теореми 2.

Тоді існують константи $\lambda > 0$ і $k > 1$ такі, що $v(t) \leq v(0) k e^{-\lambda t}$, $t \geq 2\tau_{\max}$.

Доведення. Нехай λ і k мають вигляд

$$0 < \lambda = -\frac{\log d}{2\tau_{\max}}, \quad 1 < k = \frac{1}{d}.$$

Припустімо, що $t \geq 2\tau_{\max}$ — довільний момент часу з інтервалу $t \in [2i\tau_{\max}, 2(i+1)\tau_{\max})$. Тоді

$$\begin{aligned} v(t) &\leq v(t - 2\tau_{\max})d \leq v(t - 4\tau_{\max})d^2 \leq \dots \leq v(t - 2i\tau_{\max})d^i \leq \\ &\leq v(0)\frac{1}{d}d^{i+1} \leq v(0)ke^{-\lambda 2\tau_{\max}(i+1)} \leq v(0)ke^{-\lambda t}. \end{aligned}$$

Теорема 4. Нехай виконуються припущення теореми 2. Тоді існують константи $k > 1$ і $\lambda > 0$ такі, що

$$|x_t|_{\tau_{\max}} \leq (v(0)k)^{1/2} e^{(\lambda/2)\tau_{\max}} e^{-(\lambda/2)t}, \quad t \geq 3\tau_{\max}.$$

Доведення випливає безпосередньо з нерівностей $\|x(t)\|^2 \leq v(t)$, $(|x_t|_{\tau_{\max}})^2 \leq v(t - \tau_{\max})$ і теореми 3.

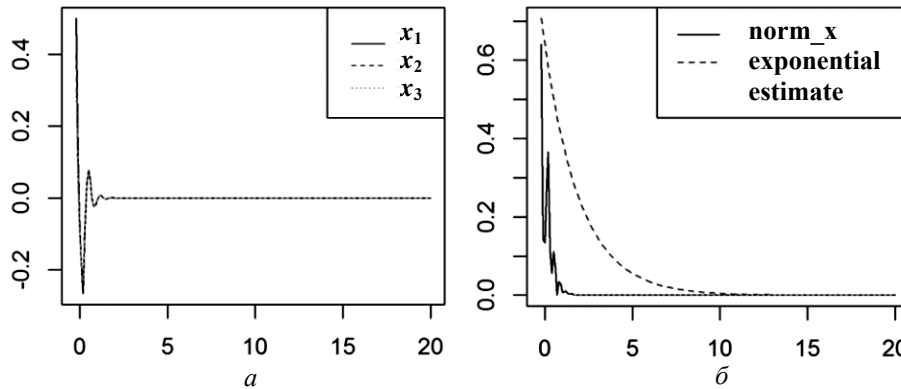
Приклад. Розглядається рекурентна нейронна мережа з трьома нейронами, що використовувалася як приклад у праці [23]. При цьому

$$A = \begin{pmatrix} 6 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 6 \end{pmatrix}; \quad W_1 = \begin{pmatrix} -3 & -1 & -1 \\ -1 & -3 & -1 \\ -1 & -1 & -3 \end{pmatrix}; \quad (12)$$

$$g_1(x) = g_2(x) = g_3(x) = \tanh(x), \quad x \in R^3, \quad \tau_1 = 0,2.$$

Застосуванням результату теореми 4 встановлено значення експоненційного згасання $\lambda = 0,12$.

Траєкторії розв'язків показано на рисунку, *а*, а експоненціальна оцінка розв'язків — на рисунку, *б*. Із рисунка, *а* бачимо, що тривіальний розв'язок системи є стійким фокусом.



Траєкторії розв'язків (*а*) та експоненціальна оцінка розв'язків (*б*) системи диференціальних рівнянь із запізненням, заданої параметрами (12), що використано як модель рекурентної нейронної мережі з трьома нейронами [23]

ВИСНОВКИ

У роботі досліджено модель рекурентної нейронної мережі у вигляді системи диференціальних рівнянь із запізненням. Побудовано експоненціальну оцінку розв'язку диференціальних рівнянь зі швидкістю згасання, що залежить від часу запізнення.

З'ясовано, що традиційні методи побудови експоненціальних оцінок розв'язків систем диференціальних рівнянь із запізненням ґрунтуються на диференціальних або диференціально-різницевих нерівностях, що включають функції (функціонали) Ляпунова і полягають в аналізі відповідних лінійних матричних нерівностей. Водночас метод на основі різницевої нерівності для функціоналів Ляпунова дає змогу отримати оцінки експоненціального згасання як розв'язок нелінійного алгебричного рівняння.

У подальших дослідженнях отримані результати можна використати для вирішення проблем оптимізації рекурентних нейронних мереж у практичних застосуваннях.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Amato Filippo*. Artificial neural networks in medical diagnosis / Filippo Amato, Alberto López, Eladia María Peña-Méndez et al. // *Journal of Applied Biomedicine*. — 2013. — Vol. 11, Issue 2. — P. 47–58. — <https://doi.org/10.2478/v10136-012-0031-x>.
2. *Jančíková Z.K.* Review on Artificial Intelligence Applications in Material Diagnostics and Technology / Z.K. Jančíková, P. Košťál, M. Heger et al. — (2018) MATEC Web of Conferences, 210, art. no. 04030. DOI: 10.1051/mateconf/201821004030.
3. *Pliego Marugán Alberto*. A survey of artificial neural network in wind energy systems / Alberto Pliego Marugán, Fausto Pedro Garcá-a MArquez, Jesus Mará-a Pinar Perez, Diego Ruiz-Hernández // *Applied Energy*. — 2018. — Vol. 228. — P. 1822–1836. — <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.084>.
4. *Sieniutycz Stanislaw*. A Review of Applications Optimizing Thermal, Chemical, and Environmental Systems / Stanislaw Sieniutycz, Zbigniew Szwast // Elsevier. — 2018. — P. 109–120. — <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813582-2.00004-5>.
5. *Qin C.* Computer-aided detection in chest radiography based on artificial intelligence: A survey / C. Qin, D. Yao, Y. Shi, Z. Song // *BioMedical Engineering Online*. — 2018. — 17 (1), art. no. 113. — DOI: 10.1186/s12938-018-0544-y
6. *Rajendra Acharya U.* Deep convolutional neural network for the automated detection and diagnosis of seizure using EEG signals / U. Rajendra Acharya, Shu Lih Oh, Yuki Hagiwara et al. // *Computers in Biology and Medicine*. — 2018. — Vol. 100. — P. 270–278. — <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2017.09.017>.
7. *Deng Hongli*. Feature memory-based deep recurrent neural network for language modeling / Hongli Deng, Lei Zhang, Xin Shu // *Applied Soft Computing*. — 2018. — Vol. 68. — P. 432–446. — <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.03.040>.
8. *Plappert Matthias*. Learning a bidirectional mapping between human whole-body motion and natural language using deep recurrent neural networks / Matthias Plappert, Christian Mandery, Tamim Asfour // *Robotics and Autonomous Systems*. — 2018. — Vol. 109. — P. 13–26. — <https://doi.org/10.1016/j.robot.2018.07.006>.
9. *Park J.H.* On global stability criterion for neural networks with discrete and distributed delays / J.H. Park // *Chaos, Solitons & Fractals*. — 2006. — Vol. 30, N 4. — P. 897–902. — Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chaos.2005.08.147>.
10. *Park J.H.* A delay-dependent asymptotic stability criterion of cellular neural networks with time-varying discrete and distributed delays / J.H. Park, H.J. Cho // *Chaos, Solitons & Fractals*. — 2007. — Vol. 33, N 2. — P. 436–442. — Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chaos.2006.01.015>.

11. *Liao X.* Delay-dependent exponential stability analysis of delayed neural networks: An LMI approach / X. Liao, G. Chen, E.N. Sanchez // *Neural Networks*. — 2002. — Vol. 15, N 7. — P. 855–866. — Available at: [http://dx.doi.org/10.1016/S0893-6080\(02\)00041-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0893-6080(02)00041-2).
12. *Haykin Simon.* *Neural Networks and Learning Machines: A Comprehensive Foundation (3rd Edition)* / Simon Haykin. — 2011. — 936 p.
13. *Marcus C.M.* Stability of analog neural networks with delay / C.M. Marcus, R.M. Westervelt // *Physical Review A*. — 1989, 39.1: 347.
14. *He Y.* Delay-range-dependent stability for systems with time-varying delay / Y. He, Q.G. Wang, C. Lin, M. Wu // *Automatica*. — 2007. — Vol. 43, N 2. — P. 371–376. — Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.automatica.2006.08.015>.
15. *Lien C.-H.* Global asymptotic stability for cellular neural networks with discrete and distributed time-varying delays / C.-H. Lien, L.-Y. Chung // *Chaos, Solitons & Fractals*. — 2007. — Vol. 34, N 4. — P. 1213–1219. — Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chaos.2006.03.121>.
16. *Zhang Q.* Stability of delayed cellular neural networks / Q. Zhang, X. Wei, J. Xu // *Chaos, Solitons & Fractals*. — 2007. — Vol. 31, N 2. — P. 514–520. — Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chaos.2005.10.003>.
17. *Singh V.* New global robust stability results for delayed cellular neural networks based on norm-bounded uncertainties / V. Singh // *Chaos, Solitons & Fractals*. — 2006. — Vol. 30, N 5. — P. 1165–1171. — Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chaos.2005.08.183>.
18. *Martsenyuk V.* On an indirect method of exponential estimation for a neural network model with discretely distributed delays / V. Martsenyuk // *Electronic Journal of Qualitative Theory of Differential Equations*. — 2017. — N 23. — P. 1–16.
19. *Indirect method of exponential convergence estimation for neural network with discrete and distributed delays* // *Electronic Journal of Differential Equations*. — 2017.
20. *Khusainov D.* Two-side estimates of solutions of linear systems with delay / D. Khusainov, V. Marzeniuk // *Reports of Ukr. Nat. Acad. Sciences*. — 1996. — P. 8–13.
21. *Kertesz V.* Stability investigations and exponential estimations for functional differential equations of retarded type / V. Kertesz // *Acta Mathematica Hungarica*. — 1990. — Vol. 55, N 3–4. — P. 365–378.
22. *Hale J.K.* *Introduction to functional differential equations* / J.K. Hale, S.M.V. Lunel // Springer Science & Business Media. — 2013. — Vol. 99.
23. *Cao J.* Absolute exponential stability of recurrent neural networks with Lipschitz-continuous activation functions and time delays / J. Cao, J. Wang // *Neural Netw.* — 2004. — 17, N 3. — P. 379–390.

Надійшла 07.02.2019

**НАБЛИЖЕНЕ МІНІМАКСНЕ ОЦІНЮВАННЯ
ФУНКЦІОНАЛІВ ВІД РОЗВ'ЯЗКУ ПАРАБОЛІЧНОЇ ЗАДАЧІ
ЗІ ШВИДКОКОЛИВНИМИ КОЕФІЦІЄНТАМИ
ПІД ЧАС НЕЛІНІЙНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ**

О.А. КАПУСТЯН, О.Г. НАКОНЕЧНИЙ

Анотація. Розглянуто задачу мінімаксного оцінювання функціонала від розв'язку параболічної задачі зі швидкоколивними коефіцієнтами. Вимірюється не сама величина, яка описує досліджуване явище, а спостерігається деяке значення від розв'язку з оператором, що визначає спосіб вимірювання. Проблема ускладнюється не лише через швидкоколивні коефіцієнти та невідомі функції, які входять до рівняння та початкових умов, а і через те, що спостереження є нелінійним (має оператор типу суперпозиції). За значення малого параметра $\varepsilon > 0$ існування розв'язку вихідної задачі встановлюється за допомогою традиційного мінімаксного підходу. Перехід до задачі з усередненими параметрами дозволяє звільнитися від нелінійності у спостереженні. Основним результатом роботи є доведення того, що мінімаксна оцінка задачі з усередненими коефіцієнтами є наближеною мінімаксною оцінкою вихідної задачі.

Ключові слова: мінімаксне оцінювання, параболічна задача, швидкоколивні коефіцієнти, усереднена задача, невизначеність, наближена оцінка.

ВСТУП

У теорії керування значне місце посідають *проблеми побудови конструктивних методів моделювання, аналізу та оптимізації систем з неповними даними* як для детермінованих, так і стохастичних систем, що описуються звичайними диференціальними рівняннями або рівняннями з частинними похідними. Основи такої теорії [1–4] започатковано в 70–80-ті роки минулого століття. Теоретичні результати у цьому напрямі стали основою для розроблення ефективних алгоритмів розв'язування задач оцінювання, прогнозування, оптимізації, дослідження стійкості та аналізу систем, що функціонують в умовах невизначеності та неповноти даних. На основі таких теоретичних результатів упроваджено інформаційно-математичні технології у різних предметних галузях, зокрема літально-космічного та гідроакустичного напрямів, оптимального проектування сучасних маніпуляційних роботів, соціально-економічних та інтелектуальних систем.

Незважаючи на актуальність, задача мінімаксного оцінювання для нескінченновимірних систем є недостатньо дослідженою. Принципові труднощі виникають при узагальненні задач оцінювання на випадок рівнянь з частинними похідними. Із цією метою побудовано теорію мінімаксного оцінювання функціоналів від розв'язків рівнянь [5–6]. Методами мінімаксної теорії оцінювання розв'язано ряд задач прогнозування розв'язків рівнянь параболічного типу зі швидкоколивними коефіцієнтами за даними вимірювань, зокрема [7]. Спеціальні обмеження кореляційних функцій випадкових процесів, що входять до правих частин та до похибок вимірювань, дозволили отримати параболічні рівняння для мінімаксних прогнозних оцінок.

У працях [8–10] запропоновано й обґрунтовано процедуру побудови наближеного оптимального керування у формі зворотного зв'язку (синтезу) для широких класів розподілених процесів у мікронеоднорідних середовищах, які досліджувалися раніше у праці [11]. У загальному випадку знайти точну формулу оптимального синтезу для таких задач неможливо. Проте перехід до усереднених параметрів значно спрощує структуру задачі.

У роботі розглядається задача мінімаксного оцінювання функціонала від розв'язку параболічної задачі зі швидкоколивними коефіцієнтами. Вимірюється не сама величина, яка описує досліджуване явище, а спостерігається деяке значення від розв'язку з оператором, що визначає спосіб вимірювання. Проблема ускладнюється не лише через швидкоколивні коефіцієнти, а і через те, що спостереження має оператор типу суперпозиції. Тому виправданним є перехід до задачі з усередненими параметрами. Основним результатом роботи є доведення того, що мінімаксна оцінка задачі з усередненими коефіцієнтами є наближеною мінімаксною оцінкою вихідної задачі.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У циліндрі $Q_T = (0, T) \times \Omega$, де $\Omega \subset \mathbf{R}^n$ — обмежена область, розглядається задача

$$\begin{cases} \frac{\partial y^\varepsilon}{\partial t} = A^\varepsilon y^\varepsilon + f(t, x), \\ y^\varepsilon|_{\partial\Omega} = 0, \\ y^\varepsilon|_{t=0} = y_0(x), \end{cases} \quad (1)$$

де $A^\varepsilon = \operatorname{div}(a^\varepsilon(x)\nabla)$, $a^\varepsilon(x) = a(x/\varepsilon)$, $a \in L^\infty(\mathbf{R}^n)$ — задана матриця.

Спостерігається функція

$$v^\varepsilon(x) = \int_0^T C^\varepsilon(t, x, y^\varepsilon(t, x)) \cdot y^\varepsilon(t, x) dt + g(x), \quad (2)$$

де $C^\varepsilon = C^\varepsilon(t, x, \xi) : (0, T) \times \Omega \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$ — задана вимірна функція. Функції $f \in L^2(Q_T)$ і $y_0 \in L^2(\Omega)$ із системи (1), а також функція $g \in L^2(\Omega)$ зі спостереження (2) невідомі, проте відомо, що вони належать опуклій замкненій множині G з простору $L^2(\Omega) \times L^2(Q_T) \times L^2(\Omega)$:

$$\{y_0, f, g\} \in G = \{\alpha \|y_0\|^2 + \beta \|f\|_{Q_T}^2 + \gamma \|g\|^2 \leq 1\}. \quad (3)$$

Тут і надалі $\|\cdot\|$ і (\cdot, \cdot) — норма і скалярний добуток у $L^2(\Omega)$; $\|\cdot\|_{Q_T}$, $(\cdot, \cdot)_{Q_T}$ — норма і скалярний добуток у $L^2(Q_T)$.

Класична постановка задачі мінімаксного оцінювання [1] полягає в тому, щоб оцінити функціонал

$$I(y^\varepsilon) = \int_{Q_T} l(t, x) y^\varepsilon(t, x) dt dx, \quad (4)$$

де $l \in L^2(Q_T)$ — задана функція; y^ε — розв'язок задачі (1), у класі функціоналів від спостереження

$$\hat{I}(y^\varepsilon) = \int_{\Omega} v^\varepsilon(x) u(x) dx, \quad u \in L^2(\Omega), \quad (5)$$

де функція \hat{u}^ε є розв'язком задачі

$$\sup_{\{y_0, f, g\} \in G} \left(I(y^\varepsilon) - \hat{I}(y^\varepsilon) \right)^2 \rightarrow \inf. \quad (6)$$

При цьому значення (6)

$$\sigma_\varepsilon := \inf_u J^\varepsilon(u), \quad (7)$$

де

$$J^\varepsilon(u) = \sup_{\{y_0, f, g\} \in G} \left(I(y^\varepsilon) - \hat{I}(y^\varepsilon) \right)^2, \quad (8)$$

називається похибкою мінімаксного оцінювання.

Нелінійність C^ε і наявність швидкоколивних коефіцієнтів у A^ε , C^ε змушують шукати наближений розв'язок задачі (1) – (6), використовуючи теорію усереднення [11], [7]. А саме, нехай a^0 — усереднена матриця для $a^\varepsilon(x)$, $A^0 = \text{div}(a^0 \nabla)$, $C^0 = C^0(t, x)$ — задана функція з простору $L^\infty(Q_T)$, яка не залежить від фазової змінної y і є усередненою у певному сенсі функцією для $C^\varepsilon(t, x, \xi)$.

Тоді [1] за фіксованого $u \in L^2(\Omega)$ розв'язок задачі (8), якщо $\varepsilon = 0$,

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(I(y) - \hat{I}(y) \right)^2 \rightarrow \sup, \\ \{y_0, f, g\} \in G \end{array} \right. \quad (9)$$

має вигляд

$$y_0 = -\frac{\lambda}{\alpha} z(0), \quad f = -\frac{\lambda}{\beta} z, \quad g = -\frac{\lambda}{\gamma} u, \quad (10)$$

де

$$\lambda^2 = \left(\frac{\|z(0)\|^2}{\alpha} + \frac{\|z\|_{Q_T}^2}{\beta} + \frac{\|u\|^2}{\gamma} \right)^{-1},$$

$$\hat{l}(y) = \int_{\Omega} v^0(x)u(x)dx, \quad u \in L^2(\Omega), \quad (11)$$

спостереження

$$v^0(x) = \int_0^T C^0(t,x) \cdot y(t,x)dt + g(x),$$

а z є розв'язком задачі

$$\begin{cases} -\frac{\partial z}{\partial t} = A^0 z - l + C^0 u, \\ z|_{\partial\Omega} = 0, \\ z|_{t=T} = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Для значення задачі (9) маємо

$$J^0(u) = \sup_{\{y_0, f, g\} \in G} \left(l(y) - \hat{l}(y) \right)^2 = \frac{\|z(0)\|^2}{\alpha} + \frac{\|z\|_{Q_T}^2}{\beta} + \frac{\|u\|^2}{\gamma}. \quad (13)$$

Тоді задача

$$\sigma_0 = \inf_u J^0(u) \quad (14)$$

має єдиний розв'язок \hat{u}^0 , який характеризується такою системою [1]:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} = A^0 p - \frac{1}{\beta} z, \\ p|_{\partial\Omega} = 0, \\ p|_{t=0} = \frac{1}{\alpha} z(0), \end{cases} \quad (15)$$

$$\hat{u}^0 = \gamma \int_0^T C^0(t,x)p(t,x)dt, \quad (16)$$

де z є розв'язком задачі (12).

Основна питання, яке досліджується в роботі, — чи буде оцінка

$$\hat{l}(y^\varepsilon) = \int_{\Omega} v^\varepsilon(x)\hat{u}^0(x)dx$$

слугувати наближеною мінімаксною оцінкою для вихідної задачі (1)–(6) за достатньо малих $\varepsilon > 0$.

ІСНУВАННЯ РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧІ (1) – (6)

Нехай $a(x)$ — симетрична, періодична матриця така, що $\exists v_1 > 0, v_2 > 0$
 $\forall x \in \mathbf{R}^n \quad \forall \eta \in \mathbf{R}^n$:

$$v_1 \sum_{i=1}^n \eta_i^2 \leq \sum_{i,j=1}^n a_{i,j}(x) \eta_i \eta_j \leq v_2 \sum_{i=1}^n \eta_i^2, \quad (17)$$

$C^\varepsilon : (0, T) \times \Omega \times \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$ — функція Каратеодорі така, що $\forall \xi \in \mathbf{R}, \forall \varepsilon \in (0, 1)$ для майже всіх (м. в.) $(t, x) \in (0, T) \times \Omega$:

$$|C^\varepsilon(t, x, \xi)| \leq C_1(t, x), \quad (18)$$

де $C_1 \in L^\infty(Q_T)$ — задана невід’ємна функція.

Теорема 1. За умов (17), (18) задача (1) – (6) має розв’язок, тобто існує така функція \hat{u}^ε , на якій досягається рівність (7).

Доведення. Для фіксованих u, y_0, f, g маємо

$$l(y^\varepsilon) - \hat{l}(y^\varepsilon) = -(g, u) - (z^\varepsilon(0), y_0) - (z^\varepsilon, f)_{Q_T},$$

де z^ε — розв’язок задачі

$$\begin{cases} -\frac{\partial z^\varepsilon}{\partial t} = A^\varepsilon z^\varepsilon - l + C^\varepsilon(t, x, y^\varepsilon(t, x))u, \\ z^\varepsilon|_{\partial\Omega} = 0, \\ z^\varepsilon|_{t=T} = 0. \end{cases} \quad (19)$$

Оскільки функції $u \in L^2(\Omega)$ і $C^\varepsilon(t, x, y^\varepsilon) \in L^\infty(Q_T)$, то задача (19) має (слабкий) розв’язок z^ε .

За фіксованого $u \in L^2(\Omega)$ задача максимізації (8) має вигляд

$$\begin{cases} ((z^\varepsilon(0), y_0) + (z^\varepsilon, f)_{Q_T} + (g, u))^2 \rightarrow \sup, \\ \alpha \|y_0\|^2 + \beta \|f\|_{Q_T}^2 + \gamma \|g\|^2 \leq 1. \end{cases} \quad (20)$$

Оскільки $C^\varepsilon(t, x, y^\varepsilon)$ (а отже, і z^ε) залежить від $\{y_0, f\}$, то формули (10)–(13), (15), (16) втрачають сенс.

Таким чином, функціонал $u \mapsto J^\varepsilon(u)$ є опуклим, напівнеперервним знизу, і для того, щоб існувала \hat{u}^ε така, що

$$\sigma_\varepsilon = \inf_u J^\varepsilon(u) = J^\varepsilon(\hat{u}^\varepsilon),$$

згідно з теоремою Вейерштрасса [3] достатньо довести, що $\lim_{\|u\| \rightarrow \infty} J^\varepsilon(u) = \infty$.

Для цього зафіксуємо $u \in L^2(\Omega)$ і набір $\{y_0, f, g\} \in G$. Їм відповідають розв’язок $y^\varepsilon(t, x)$ задачі (1) і розв’язок $z^\varepsilon(t, x)$ задачі (19) з правою частиною $C^\varepsilon(t, x, y^\varepsilon(t, x)) \cdot u(x)$. Розглянемо задачу (1) – (6) із фіксованою функцією $C^\varepsilon(t, x) := C^\varepsilon(t, x, y^\varepsilon(t, x))$. Згідно з міркуваннями, наведеними під час аналізу усередненої задачі (9) – (16), розв’язок задачі (20) має вигляд

$$\bar{y}_0^\varepsilon = -\frac{\lambda}{\alpha} z^\varepsilon(0), \quad \bar{f}^\varepsilon = -\frac{\lambda}{\beta} z^\varepsilon, \quad \bar{g}^\varepsilon = -\frac{\lambda}{\gamma} u,$$

де

$$\lambda^2 = \left(\frac{\|z^\varepsilon(0)\|^2}{\alpha} + \frac{\|z^\varepsilon\|_{Q_T}^2}{\beta} + \frac{\|u\|^2}{\gamma} \right)^{-1}.$$

Розглянемо відображення $\Psi : G \rightarrow G$, $\Psi(y_0, f, g) = \{\bar{y}_0^\varepsilon, \bar{f}^\varepsilon, \bar{g}^\varepsilon\}$.

Нехай

$$\{y_0^k, f^k, g^k\} \rightarrow \{y_0, f, g\} \in G \text{ слабко в } L^2(\Omega) \times L^2(Q_T) \times L^2(\Omega).$$

Звідси для розв'язку y_k^ε задачі (1) з умовами f^k, y_0^k згідно з працею [12] маємо

$$y_k^\varepsilon \rightarrow y^\varepsilon \text{ в } L^2(Q_T),$$

де $y^\varepsilon = y^\varepsilon(t, x)$ — розв'язок задачі (1) з умовами f, y_0 .

Тоді з умови (18) і теореми Лебега отримаємо

$$C^\varepsilon(t, x, y_k^\varepsilon(t, x)) \rightarrow C^\varepsilon(t, x, y^\varepsilon(t, x)) \text{ у } L^2(Q_T). \quad (21)$$

Отже, для z_k^ε — розв'язку задачі (19) з y_k^ε згідно з працею [12] маємо

$$z_k^\varepsilon \rightarrow z^\varepsilon \text{ в } C([0, T]; L^2(\Omega)), \quad (22)$$

де $z^\varepsilon = z^\varepsilon(t, x)$ — розв'язок задачі (19) з y^ε .

Зі збіжностей (21), (22) випливає, що Ψ — неперервне відображення і $\Psi(G)$ — компакт. Отже, за теоремою Шаудера Ψ має нерухому точку, тобто $\exists \{\hat{y}_0^\varepsilon, \hat{f}^\varepsilon, \hat{g}^\varepsilon\} \in G$:

$$\{\hat{y}_0^\varepsilon, \hat{f}^\varepsilon, \hat{g}^\varepsilon\} = \Psi(\hat{y}_0^\varepsilon, \hat{f}^\varepsilon, \hat{g}^\varepsilon).$$

Нехай \hat{y}^ε — розв'язок задачі (1), який відповідає $\hat{y}_0^\varepsilon, \hat{f}^\varepsilon, \hat{z}^\varepsilon$ — розв'язок задачі (19), який відповідає \hat{y}^ε . Тоді на підставі (13)

$$\frac{\|\hat{z}^\varepsilon(0)\|^2}{\alpha} + \frac{\|\hat{z}^\varepsilon\|_{Q_T}^2}{\beta} + \frac{\|u\|^2}{\gamma} \leq J^\varepsilon(u). \quad (23)$$

Отже, $\lim_{\|u\| \rightarrow \infty} J^\varepsilon(u) = \infty$ і теорему доведено.

НАБЛИЖЕНА МІНІМАКСНА ОЦІНКА ДЛЯ ЗАДАЧІ (1) – (6)

Нехай стала, додатно визначена матриця a^0 є усередненою для матриці $a^\varepsilon(x)$ [11], $C^0 \in L^\infty(Q_T)$ така, що

$$\forall r > 0 \quad C^\varepsilon(t, x, \xi) \rightarrow C^0(t, x), \quad \varepsilon \rightarrow 0 \text{ у } L^2(Q_T) \text{ рівномірно по } |\xi| \leq r. \quad (24)$$

Уведемо функціонал

$$\hat{l}(y^\varepsilon) = \int_{\Omega} v^\varepsilon(x) \hat{u}^0(x) dx, \quad (25)$$

де $\hat{u}^0 \in L^2(\Omega)$ визначається з усередненої задачі (9) – (16), і величину

$$\hat{\sigma}_\varepsilon = J^\varepsilon(\hat{u}^0) = \sup_{\{y_0, f, g\} \in G} ((l, y^\varepsilon)_{Q_T} - (v^\varepsilon, \hat{u}^0))^2, \quad (26)$$

де y^ε — розв’язок задачі (1), спостереження v^ε має вигляд (2).

Наступна теорема є основним результатом роботи.

Теорема 2. Оцінка (25) є наближеною мінімаксною оцінкою для вихідної задачі (1) – (6), а похибки (7) і (26) близькими за достатньо малих $\varepsilon > 0$, тобто $\forall \eta > 0 \exists \varepsilon_0 > 0 \forall \varepsilon \in (0, \varepsilon_0)$:

$$|\sigma_\varepsilon - \hat{\sigma}_\varepsilon| < \eta.$$

Доведення. За теоремою 1

$$\sigma_\varepsilon = \inf_u J^\varepsilon(u) = J^\varepsilon(\hat{u}^\varepsilon).$$

Тоді

$$J^\varepsilon(\hat{u}^\varepsilon) \leq J^\varepsilon(0) = \sup_{\{y_0, f, g\} \in G} (l, y^\varepsilon)_{Q_T}^2, \quad (27)$$

де y^ε — розв’язок задачі (1). Для $\forall \{y_0, f, g\} \in G$ через умову (16) для м. в. t виконується нерівність

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \|y^\varepsilon(t)\|^2 + v_1 \|\nabla y^\varepsilon(t)\|^2 \leq \|f(t)\| \cdot \|y^\varepsilon(t)\|.$$

Звідси з нерівності Пуанкаре виводимо, що

$$\forall \varepsilon \in (0, 1) \sup_{\{y_0, f, g\} \in G} \|y^\varepsilon\|_{Q_T} \leq C, \quad (28)$$

де константа $C > 0$ не залежить від ε .

З нерівностей (27), (28) і (23) виводимо, що $\{\hat{u}^\varepsilon\}_{\varepsilon \in (0, 1)}$ обмежена в $L^2(\Omega)$, отже, за підпоследовністю для деякої функції $v \in L^2(\Omega)$

$$\hat{u}^\varepsilon \rightarrow v \text{ слабо в } L^2(\Omega), \quad \varepsilon \rightarrow 0.$$

Доведемо, що $v = \hat{u}^0$, де \hat{u}^0 — функція, на якій оцінка $\hat{l}(y)$ вигляду (11) є мінімаксною оцінкою усередненої задачі.

Нехай $\varepsilon = \varepsilon_k \rightarrow 0$, $\hat{u}^{\varepsilon_k} := \hat{u}^k$. Тоді з огляду на нерівність (23)

$$\sigma_{\varepsilon_k} = J^{\varepsilon_k}(\hat{u}^k) \geq \frac{\|\hat{z}^k(0)\|^2}{\alpha} + \frac{\|\hat{z}^k\|_{Q_T}^2}{\beta} + \frac{\|\hat{u}^k\|^2}{\gamma},$$

де трійка $\{\hat{y}_0^k, \hat{f}^k, \hat{g}^k\} \in G$ є нерухомою точкою відображення Ψ_k з теореми 1, збудованого за функцією \hat{u}^k .

Тоді за підпослідовністю

$$\{\hat{y}_0^k, \hat{f}^k, \hat{g}^k\} \rightarrow \{\hat{y}_0, \hat{f}, \hat{g}\} \text{ слабко в } L^2(\Omega) \times L^2(Q_T) \times L^2(\Omega),$$

а \hat{z}^k є розв'язком задачі (19) з \hat{y}^k і \hat{u}^k , \hat{y}^k — розв'язок задачі (1), якщо $\varepsilon = \varepsilon_k$ з умовами \hat{f}^k, \hat{y}_0^k . Тоді із праці [4] випливає

$$\hat{y}^k \rightarrow \hat{y} \text{ в } L^2(Q_T), \quad (29)$$

де \hat{y} — розв'язок задачі (1) з умовами \hat{f}, \hat{y}_0 і $\varepsilon = 0$.

Доведемо, що виконується збіжність

$$C^{\varepsilon_k}(t, x, \hat{y}^k) \hat{u}^k \rightarrow C^0(t, x) v \text{ слабко в } L^2(Q_T). \quad (30)$$

Зі збіжності (24) випливає, що $\forall r > 0$:

$$\alpha_k(r) := \sup_{|\xi| \leq r} \int_{Q_T} \left| C^{\varepsilon_k}(t, x, \hat{y}^k(t, x)) - C^0(t, x) \right|^2 dt dx \rightarrow 0, \quad k \rightarrow \infty.$$

Покладемо

$$Q_T(k, r) = \{(t, x) \mid |\hat{y}^k(t, x)| \leq r\}.$$

Згідно з нерівністю Чебишова і збіжністю (29) отримаємо

$$\mu(Q_T \setminus Q_T(k, r)) \leq \frac{1}{r} \int_{Q_T} |\hat{y}^k(t, x)| dt dx \leq \frac{C}{r},$$

де константа $C > 0$ не залежить від k, r .

Тоді

$$\begin{aligned} & \int_{Q_T} \left| C^{\varepsilon_k}(t, x, \hat{y}^k(t, x)) - C^0(t, x) \right|^2 dt dx = \\ & = \int_{Q_T(k, r)} \left| C^{\varepsilon_k}(t, x, \hat{y}^k(t, x)) - C^0(t, x) \right|^2 dt dx + \\ & + \int_{Q_T \setminus Q_T(k, r)} \left| C^{\varepsilon_k}(t, x, \hat{y}^k(t, x)) - C^0(t, x) \right|^2 dt dx \leq \alpha_k(r) + 2 \|C_1\|_{L^\infty(Q_T)}^2 \frac{C}{r}, \quad (31) \end{aligned}$$

де функцію C_1 взято з умови (18).

Нерівність (31) означає, що

$$C^{\varepsilon_k}(t, x, \hat{y}^k) \rightarrow C^0(t, x) \text{ у } L^2(Q_T).$$

Тоді згідно з нерівністю Гельдера

$$\int_{Q_T} \left| C^{\varepsilon_k}(t, x, \hat{y}^k(t, x)) - C^0(t, x) \right| |\hat{u}^k(x)| dt dx \rightarrow 0, \quad k \rightarrow \infty.$$

Отже, за підпослідовністю

$$(C^{\varepsilon_k}(t, x, \hat{y}^k(t, x)) - C^0(t, x)) \hat{u}^k(x) \rightarrow 0, \quad k \rightarrow \infty \text{ для м. в. } (t, x).$$

Із леми Ліюна [5]

$$(C^{\varepsilon_k}(t, x, \hat{y}^k) - C^0(t, x))\hat{u}^k \rightarrow 0, \quad k \rightarrow \infty \text{ слабко в } L^2(Q_T). \quad (32)$$

Оскільки

$$C^0(t, x)(\hat{u}^k - v) \rightarrow 0, \quad k \rightarrow \infty \text{ слабко в } L^2(Q_T), \quad (33)$$

то зі збіжностей (32), (33) отримуємо збіжність (30).

Тоді

$$\hat{z}^k \rightarrow \hat{z} \text{ у } C([0, T]; L^2(\Omega)),$$

де \hat{z} — розв’язок задачі (19) при $\varepsilon = 0$ і з правою частиною $C^0(t, x)v$.

Таким чином,

$$\begin{aligned} \lim_{k \rightarrow \infty} J^{\varepsilon_k}(\hat{u}^k) &\geq \lim_{k \rightarrow \infty} \left(\frac{\|\hat{z}^k(0)\|^2}{\alpha} + \frac{\|\hat{z}^k\|_{Q_T}^2}{\beta} + \frac{\|\hat{u}^k\|^2}{\gamma} \right) \geq \\ &\geq \frac{\|\hat{z}(0)\|^2}{\alpha} + \frac{\|\hat{z}\|_{Q_T}^2}{\beta} + \frac{\|v\|^2}{\gamma} = J^0(v). \end{aligned}$$

З іншого боку, оскільки \hat{u}^k така, що

$$\inf_u J^{\varepsilon_k}(u) = J^{\varepsilon_k}(\hat{u}^k),$$

то $\forall u \in L^2(\Omega)$:

$$J^{\varepsilon_k}(\hat{u}^k) \leq J^{\varepsilon_k}(u) = ((\bar{z}^k(0), \bar{y}_0^k) + (\bar{z}^k, \bar{f}^k)_{Q_T} + (\bar{g}^k, u))^2,$$

де $\{\bar{y}_0^k, \bar{f}^k, \bar{g}^k\}$ — розв’язок задачі (20) з функцією u ; \bar{z}^k — розв’язок задачі (19) при $\varepsilon = \varepsilon_k$ і з правою частиною $C^{\varepsilon_k}(t, x, \bar{y}^k) \cdot u$, \bar{y}^k — розв’язок задачі (1) при $\varepsilon = \varepsilon_k$ з відповідними умовами \bar{y}_0^k, \bar{f}^k .

Аналогічно до попередніх міркувань (31) – (33), але з фіксованою функцією u , отримуємо, що

$$\{\bar{y}_0^k, \bar{f}^k, \bar{g}^k\} \rightarrow \{\bar{y}_0, \bar{f}, \bar{g}\} \text{ слабко в } L^2(\Omega) \times L^2(Q_T) \times L^2(\Omega),$$

$$\bar{y}^k \rightarrow \bar{y} \text{ в } L^2(Q_T),$$

$$\bar{z}^k \rightarrow \bar{z} \text{ у } C([0, T]; L^2(\Omega)),$$

де \bar{z} — розв’язок задачі (19) при $\varepsilon = 0$ і з правою частиною $C^0(t, x)u$; \bar{y} — розв’язок задачі (1) при $\varepsilon = 0$ з відповідними умовами \bar{y}_0, \bar{f} .

Тоді

$$\lim_{k \rightarrow \infty} J^{\varepsilon_k}(u) = ((\bar{z}(0), \bar{y}_0) + (\bar{z}, \bar{f})_{Q_T} + (\bar{g}, u))^2. \quad (34)$$

Покажемо, що права частина (34) — це $J^0(u)$. Дійсно, $\forall \{y_0, f, g\} \in G$:

$$J^{\varepsilon_k}(u) \geq ((z^k(0), y_0) + (z^k, \tilde{f})_{Q_T} + (g, u))^2, \quad (35)$$

де z^k — розв'язок задачі (19) з правою частиною $C^{\varepsilon_k}(t, x, y^k) \cdot u$, y^k — розв'язок задачі (1) з умовами y_0, f .

Аналогічно до міркувань (31) – (33) можна перейти до границі в нерівності (35) і з довільності $\{y_0, f, g\}$ отримати, що

$$\lim_{k \rightarrow \infty} J^{\varepsilon_k}(u) = J^0(u). \quad (36)$$

Таким чином, $\forall u \in L^2(\Omega)$:

$$J^0(v) \leq \liminf_{k \rightarrow \infty} J^{\varepsilon_k}(\hat{u}^k) \leq J^0(u). \quad (37)$$

Із виразу (37) отримуємо, що $v = \hat{u}^0$ і

$$\sigma_\varepsilon \rightarrow \sigma_0 = J^0(\hat{u}^0), \quad \varepsilon \rightarrow 0.$$

Залишилося показати, що

$$\hat{\sigma}_\varepsilon \rightarrow \sigma_0, \quad \varepsilon \rightarrow 0. \quad (38)$$

Нехай $\varepsilon = \varepsilon_k \rightarrow 0$. Тоді

$$\hat{\sigma}_{\varepsilon_k} = J^{\varepsilon_k}(\hat{u}^0) = ((\tilde{z}_k(0), \tilde{y}_0^k) + (\tilde{z}_k, \tilde{f}^k)_{Q_T} + (\tilde{g}^k, \hat{u}^0))^2,$$

де \tilde{z}_k — розв'язок задачі (19) з правою частиною $C^{\varepsilon_k}(t, x, \tilde{y}_k) \cdot \hat{u}^0$, \tilde{y}_k — розв'язок задачі (1) з умовами $\tilde{y}_0^k, \tilde{f}^k$; $\{\tilde{y}_0^k, \tilde{f}^k, \tilde{g}^k\}$ — розв'язок задачі (20) з функціями \tilde{z}_k, \hat{u}^0 .

Тоді з виразу (36)

$$\lim_{k \rightarrow \infty} J^{\varepsilon_k}(\hat{u}^0) = J^0(\hat{u}^0),$$

що і доводить (38). Теорему доведено.

ЛІТЕРАТУРА

1. Наконечный А.Г. Минимаксное оценивание функционалов от решений вариационных уравнений в гильбертовых пространствах / А.Г. Наконечный // К.: КГУ, 1985. — 83 с.
2. Красовский Н.Н. Теория управления движением / Н.Н. Красовский. — М.: Наука, 1968. — 476 с.
3. Лионс Ж.-Л. Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными / Ж.-Л. Лионс. — М.: Мир, 1972. — 414 с.
4. Лионс Ж.-Л. Некоторые методы решения нелинейных краевых задач // Ж.-Л. Лионс. — М.: Мир, 1972. — 588 с.

5. *Nakonechnyi A.G.* Minimax prediction estimation of solutions of initial-boundary-value problems for parabolic equations with discontinuous coefficients based on imperfect data / A.G. Nakonechnyi, Yu.K. Podlipenko, Yu.A. Zaitsev // *Cybernetics and Systems Analysis*. — 2000. November 2000, Vol. 36, Issue 6. P. 845–854.
6. *Podlipenko Y.* Mixed variational approach to finding guaranteed estimates for solutions and right-hand sides of the second-order linear elliptic equations under incomplete data / Y. Podlipenko, Y. Shestopalov // *Minimax Theory and its Applications*. — 2016.
7. *Kapustyan E.A.* The minimax problems of pointwise observation for a parabolic boundary value problem / E.A. Kapustyan, A.G. Nakonechnyj // *Journal of Automation and Information Sciences*. — 2002. — Vol. 34(5–8). — P. 52–63.
8. *Kapustyan E.A.* Optimal bounded control synthesis for a parabolic boundary-value problem with fast oscillatory coefficients / E.A. Kapustyan, A.G. Nakonechnyj // *Journal of Automation and Information Sciences*. — 1999. - Vol. 31, Issue 12, P. 33-44.
9. *Kapustyan O.V.* Approximate bounded synthesis for one weakly nonlinear boundary-value problem / O.V. Kapustyan, O.A. Kapustyan, A.V. Sukretna // *Nonlinear Oscillations*. — 2009. — Vol. 12, N 3. — P. 297–304.
10. *Kapustian O.A.* Approximate homogenized synthesis for distributed optimal control problem with superposition type cost functional / O.A. Kapustian, V.V. Sobchuk // *Statistics, Optimization and Information Computing*. — 2018. — Vol. 6, N 2. P. 233–239.
11. *Жиков В.В.* Усреднение дифференциальных операторов / В.В. Жиков, С.М. Козлов, О.А. Олейник. — М.: ФизМатЛит, 1993. — 464 с.
12. *Denkiwski Z.* Asymptotic behavior of optimal solutions to control problems for systems described by differential inclusions corresponding to partial differential equations / Z. Denkiwski, S. Mortola // *Journal of Optimization Theory and Applications*. — 1993. — Vol. 78. — P. 365–391.

Надійшла 05.04.2019

**МЕРЕЖЕВІ СТРУКТУРИ ТА СИСТЕМИ:
IV. ПАРАЛЕЛЬНЕ ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
НЕПЕРЕРВНОГО МОНІТОРИНГУ**

О.Д. ПОЛІЩУК, М.С. ЯДЖАК

Анотація. Формалізовано процедуру інтерактивного оцінювання об'єктів складних ієрархічно-мережевих систем. Для ефективної реалізації цієї процедури на багатоядерних комп'ютерах і кластерах запропоновано відповідні алгоритмічні конструкції, що виявляють перспективи розпаралелювання та враховують обмеженість можливостей обчислювальних ресурсів. Наведено оцінки складності та прискорення паралельних обчислень, які підтверджують високу ефективність використання запропонованих конструкцій. Отримані результати можуть бути застосовані для оцінювання в режимі реального часу з використанням сучасних програмних засобів багатьох складних систем, стан та поведінка яких неперервно змінюються у часі, зокрема транспортних систем, систем енерго- та життєзабезпечення, банківських і торговельних мереж, екосистем окремих регіонів тощо.

Ключові слова: мережева система, ієрархія, неперервний моніторинг, інтерактивне оцінювання, розпаралелювання, обчислювальне середовище, прискорення обчислень.

ВСТУП

Методи теорії оцінювання є потужним інструментом для аналізу стану та ефективності функціонування складних систем різного типу та призначення [1–3]. У працях [4–7] запропоновано методіку комплексного детермінованого оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем (СІМС), яка полягає у поєднанні методів локального, прогностичного, агрегованого та інтерактивного аналізу стану, якості функціонування та взаємодії елементів таких систем. Величезні обсяги даних, які описують поведінку реальних СІМС, потребують розроблення ефективних методів їх оброблення. У працях [8, 9] запропоновано алгоритми розпаралелювання методів локального та агрегованого оцінювання СІМС, а у [10] подано загальну схему розпаралелювання комплексної методіки регулярних (планових) оцінювань [11] системи. Не менш важливою є проблема оперативного оброблення та аналізу даних, які надходять у процесі неперервного моніторингу системи. Ця проблема достатньо ефективно вирішується методами інтерактивного оцінювання, детально описаними у праці [7]. У більшості випадків її доцільно

вирішувати в режимі реального часу, тому потрібно виявляти та залучати можливості паралельних обчислень. Зауважимо, що вхідні дані, які надходять у процесі неперервного моніторингу системи в центр(и) оброблення, можуть бути дещо спотвореними внаслідок певних пошкоджень на етапі передавання або похибок вимірювань (реєстрації). Тому для подальшого використання цих даних у методах інтерактивного оцінювання їх потрібно попередньо відфільтрувати, щоб усунути проблемні фрагменти. У зв'язку з цим побудовано й обґрунтовано низку високопаралельних алгоритмів цифрової фільтрації, орієнтованих на різні типи архітектур обчислювальних засобів спеціального (систолічні і квазісистолічні структури [12]) та універсального (засоби зі структурно-процедурною організацією обчислень [13], багатоядерні комп'ютери, кластери, гібридні архітектури, високопродуктивні обчислювальні середовища [14] тощо) призначення.

Мета роботи — розпаралелювання методів інтерактивного оцінювання СІМС і побудова відповідних алгоритмічних конструкцій для ефективної їх реалізації на підставі використання сучасних програмних та апаратних засобів.

НЕПЕРЕРВНИЙ МОНІТОРИНГ ТА ІНТЕРАКТИВНЕ ОЦІНЮВАННЯ СКЛАДНИХ ІЄРАРХІЧНО-МЕРЕЖЕВИХ СИСТЕМ

Однією з визначальних особливостей реальних мережеских та ієрархічно-мережеских систем є рух потоків у них. В одних випадках забезпечення руху потоків є основною метою утворення та функціонування таких систем (транспортних, систем ресурсопостачання, торговельних та інформаційних мереж тощо), у інших — основним процесом, який забезпечує їх життєдіяльність (рух крові, лімфи, нейроімпульсів у людському тілі, сезонну міграцію тварин і т. ін.). Затримка або зупинення руху потоків може призвести до збоїв або припинення існування таких систем. Часто проводити планові дослідження системи немає змоги через значні матеріальні та фінансові витрати [4, 11]. Це означає, що стан або якість функціонування системи, для якої під час останнього регулярного огляду отримано позитивні висновки, можуть перетнути «поріг безпеки» до моменту наступного планового дослідження. Окрім того, існують системи, неперервний моніторинг стану та процесу функціонування яких є обов'язковою умовою забезпечення нормальної життєдіяльності або самої системи (люди, що хворіють на діабет або гіпертонію), або оточуючого середовища (шкідливі та небезпечні виробництва, атомні електростанції тощо). Запропоновані у працях [7, 11] методи інтерактивного оцінювання дозволяють оперативно опрацьовувати результати неперервного моніторингу та привертати увагу до найбільш проблемних елементів системи, які створюють реальну загрозу для її подальшого функціонування. Застосування цих методів дає об'єктивні підстави для пришвидшення або відтермінування наступного планового оцінювання елементів системи та впорядковує цей процес. Це особливо актуально для великих СІМС, оскільки одночасне ретельне дослідження багатьох елементів системи часто є фізично неможливим.

Інтерактивне оцінювання здійснюється на рівні аналізу взаємодії таких об'єктів СІМС, як потоки P_j , $j = \overline{1, M}$ і лінія $[S_0, S_N]$, що є послідовністю вузлів S_i та ребер $D_i = (S_{i-1}, S_i)$, $i = \overline{1, N}$, які їх з'єднують. Тут M — кіль-

кість потоків, які проходять лінією за певний проміжок часу. Вважаємо, що проходження потоків є повністю детермінованим, тобто визначено графік їх руху. Для спрощення подальшого викладу вважаємо, що відправлення потоку з вузла S_0 відбувається без затримок.

Затримка потоку на ребрі може бути спричинена [7] такими обставинами, як незадовільний стан ребра, незадовільний стан потоку, неготовність вузла до приймання потоку тощо. Лише перша обставина стосується безпосередньо стану ребра. Затримка потоку у вузлі може бути спричинена такими обставинами, як незадовільний стан або організація роботи вузла, незадовільний стан потоку, неможливість відправлення потоку у зв'язку з тим, що наступне у напрямку руху ребро зайняте іншими потоками тощо. Як і у попередньому випадку, лише перша обставина стосується безпосередньо організації роботи вузла. Із проходженням потоків по лінії вплив наведених чинників може послідовно нагромаджуватися та компенсуватися. Деякі з них мають випадковий характер, а деякі можуть бути регулярними. Нерегулярні збої породжують суттєві проблеми у процесі функціонування СІМС лише у разі їх масовості і потребують розроблення спеціальних методів аналізу їх виникнення. Наприклад, такі збої можливі під час запровадження нових великих онлайн-сервісів через недостатню потужність обладнання, слабку захищеність від комп'ютерних вірусів, неякісне програмне забезпечення, яке підтримує процес їх функціонування тощо. Основною метою інтерактивного оцінювання є виявлення і локалізація саме регулярних негативних факторів, які зумовлюють відхилення від установленого графіка руху потоків.

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕДУРИ ІНТЕРАКТИВНОГО ОЦІНЮВАННЯ

Формально процедуру інтерактивного оцінювання об'єктів СІМС можна подати як послідовність таких кроків [7].

1. Обчислення локальних оцінок $e(P_j, S_i, T_k)$ якості оброблення потоку P_j у вузлі S_i та $e(P_j, D_i, T_k)$ якості проходження потоком P_j ребра D_i за період T_k тривалістю T^0 для $j = \overline{1, M}$; $i = \overline{1, N}$; $k = \overline{1, K}$.

2. Побудова на підставі локального оцінювання оцінок першого рівня узагальнення, а саме:

а) оцінок $E(P_j, S_i, T^K)$ вузла S_i та $E(P_j, D_i, T^K)$ ребра D_i за результатами оброблення потоку P_j протягом періоду T^K , де $T^K = KT^0$, для $j = \overline{1, M}$; $i = \overline{1, N}$;

б) оцінок $E_{\mathbf{P}}(S_i, T_k)$ вузла S_i та $E_{\mathbf{P}}(D_i, T_k)$ ребра D_i за результатами проходження сукупності потоків $\mathbf{P} = \{P_j\}_{j=1}^M$ протягом періоду T_k для $i = \overline{1, N}$; $k = \overline{1, K}$;

в) оцінок $E_{\mathbf{S}}(P_j, T_k)$ оброблення потоку P_j у послідовності вузлів $\mathbf{S} = \{S_i\}_{i=1}^N$ та $E_{\mathbf{D}}(P_j, T_k)$ проходження потоку ребрами $\mathbf{D} = \{D_i\}_{i=1}^N$, що розміщені на лінії, протягом періоду T_k для $j = \overline{1, M}$; $k = \overline{1, K}$.

3. Обчислення на підставі оцінок першого рівня оцінок другого рівня узагальнення, зокрема:

а) оцінок $E_S(P_j, T^K)$ оброблення потоку P_j у послідовності вузлів \mathbf{S} та $E_D(P_j, T^K)$ проходження потоку ребрами \mathbf{D} , які розміщені на лінії, протягом періоду T^K для $j = \overline{1, M}$;

б) оцінок $E_P(S_i, T^K)$ вузла S_i та $E_P(D_i, T^K)$ ребра D_i за результатами проходження сукупності потоків \mathbf{P} протягом періоду T^K для $i = \overline{1, N}$;

в) оцінок $E_{P, S}(T_k)$ оброблення сукупності потоків \mathbf{P} у послідовності вузлів \mathbf{S} та $E_{P, D}(T_k)$ проходження цих потоків послідовністю ребер \mathbf{D} , розміщених на лінії, за період T_k для $k = \overline{1, K}$.

4. Побудова на підставі оцінок другого рівня оцінок третього рівня узагальнення, а саме:

а) оцінок $E_{P, S}(T^K)$ оброблення сукупності потоків \mathbf{P} у послідовності вузлів \mathbf{S} та $E_{P, D}(T^K)$ проходження потоками ребер \mathbf{D} , розміщених на лінії, протягом періоду T^K ;

б) агрегованих оцінок $E_P(T_k)$ проходження сукупності потоків \mathbf{P} лінією протягом періоду T_k для $k = \overline{1, K}$.

5. Обчислення на підставі агрегованих оцінок третього рівня узагальнення усередненої оцінки четвертого рівня $E_P(T^K)$ проходження сукупності потоків \mathbf{P} лінією протягом періоду T^K .

Детальний аналіз наведеної вище процедури інтерактивного оцінювання об'єктів СІМС дозволяє зробити такі висновки про підходи до її можливого виконання:

- усі оцінки в межах кожного з пунктів 1–4 можуть бути обчислені одночасно, тобто паралельно;
- оцінки кожного з пунктів 2–5 є оцінками певного рівня узагальнення, при цьому оцінки вищого рівня будуються на підставі оцінок нижчого рівня узагальнення; отже, можемо говорити про паралельно-послідовний спосіб оброблення даних;
- безпосереднє обчислення самих оцінок ґрунтується на виконанні векторних операцій;
- процедура оцінювання є сукупністю із 5 фрагментів з різним ступенем паралелізму, тому для попереднього оцінювання паралельних обчислень слід використовувати таку характеристику, як середній ступінь паралелізму;
- реалізація процедури оцінювання може бути доволі ефективною на сучасних векторно-конвеєрних обчислювальних системах, які мають ієрархічну структуру і натеper є одним з найпотужніших (хоча і дорогих) обчислювальних засобів, а також на кластерах і багатоядерних комп'ютерах.

Очевидно, що залежно від конкретної мети оцінювання та типу досліджуваної складної системи може реалізовуватись не вся описана вище про-

цедура, а лише окремі її кроки або деякі фрагменти цих кроків. У цій роботі розглянемо особливості паралельної реалізації всієї наведеної вище процедури інтерактивного оцінювання об'єктів СІМС.

АЛГОРИТМІЧНІ КОНСТРУКЦІЇ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Для виконання описаної вище процедури інтерактивного оцінювання СІМС розглянемо алгоритмічні конструкції організації паралельних обчислень у разі, коли немає обмежень на обсяг (кількість ядер, процесорних елементів, обчислювальних вузлів; ємність оперативної пам'яті вузла) обчислювальних ресурсів і коли такі обмеження є суттєвими. У першому випадку зможемо виявити й оцінити потенційний паралелізм операцій у процедурі оцінювання, а в другому випадку — більш ретельно підійти до реалізації згаданої процедури на конкретному паралельному комп'ютері з наперед визначеним обсягом обчислювальних ресурсів. Для задання паралельних гілок будемо використовувати примітиви *fork*, *join* (розгалуження, злиття) [9, 15]. У разі відсутності обмежень на обсяг обчислювальних ресурсів пропонується алгоритмічна конструкція для виконання процедури інтерактивного оцінювання складається з чотирьох паралельних фрагментів і має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 & \text{fork } (h_1^0, h_2^0, \dots, h_{l_0}^0) \text{ join,} \\
 & \text{fork } (h_1^1, h_2^1, \dots, h_{l_1}^1) \text{ join,} \\
 & \text{fork } (h_1^2, h_2^2, \dots, h_{l_2}^2) \text{ join,} \\
 & \text{fork } (h_1^3, h_2^3, \dots, h_{l_3}^3) \text{ join,} \\
 & \quad h^4,
 \end{aligned} \tag{1}$$

де $h_i^0, i'=\overline{1, l_0}$; $h_j^1, j'=\overline{1, l_1}$; $h_k^2, k'=\overline{1, l_2}$; $h_{l'}^3, l'=\overline{1, l_3}$ — паралельні гілки, у яких обчислюються відповідно локальні оцінки та оцінки першого, другого і третього рівнів узагальнення; h^4 — фрагмент, у якому обчислюється оцінка четвертого рівня узагальнення $E_{\mathbf{P}}(T^K)$; $l_0 = 2MNK$; $l_1 = 2(M(N + K) + NK)$; $l_2 = 2(M + N + 2K)$; $l_3 = K + 2$.

Згідно з працею [7] кожна з локальних оцінок $e(P_j, S_i, T_k)$, $e(P_j, D_i, T_k)$, $j = \overline{1, M}$; $i = \overline{1, N}$; $k = \overline{1, K}$ може набувати за уточненою більшою шкалою одне із чотирьох значень, які можна обчислювати одночасно. Тоді для реалізації обчислень у кожній з гілок $h_i^0, i'=\overline{1, l_0}$ потрібно виконати щонайбільше 8 арифметичних операцій (7 операцій додавання і 1 операцію ділення).

Обчислення оцінок першого рівня узагальнення $E(P_j, S_i, T^K)$, $E(P_j, D_i, T^K)$; оцінок другого рівня узагальнення $E_{\mathbf{S}}(P_j, T^K)$, $E_{\mathbf{D}}(P_j, T^K)$, $E_{\mathbf{P}}(S_i, T^K)$, $E_{\mathbf{P}}(D_i, T^K)$ для $j = \overline{1, M}$; $i = \overline{1, N}$; оцінок третього рівня уза-

гальнення $E_{P,S}(T^K), E_{P,D}(T^K)$ та оцінок четвертого рівня узагальнення $E_P(T^K)$ потребує виконання K арифметичних операцій (($K-1$) операцію додавання та 1 операцію ділення).

Також встановлено, що для обчислення оцінок першого рівня узагальнення $E_P(S_i, T_k), E_P(D_i, T_k), E_S(P_j, T_k), E_D(P_j, T_k)$ та оцінок другого рівня узагальнення $E_{P,S}(T_k), E_{P,D}(T_k)$ для $i = \overline{1, N}; j = \overline{1, M}; k = \overline{1, K}$ необхідно виконати $3M-1$ арифметичну операцію (M операцій множення, $2(M-1)$ операцій додавання та 1 операцію ділення). Тут слід зауважити, що для обчислення оцінок $E_{P,S}(T_k), E_{P,D}(T_k); k = \overline{1, K}$ пропонується й інший підхід [7], який потребує виконання $3N-1$ арифметичну операцію (N операцій множення, $2(N-1)$ операцій додавання та 1 операцію ділення).

Обчислення оцінок третього рівня узагальнення $E_P(T_k), k = \overline{1, K}$ зводиться до виконання 5 арифметичних операцій (2 операцій множення, 2 операцій додавання та 1 операції ділення).

На підставі викладеного отримуємо, що загалом для реалізації конструкції (1) потрібно виконати

$$\max \{3M-1, K\} + \max \{3M-1, 3N-1, K\} + \max \{K, 5\} + K + 8 \quad (2)$$

паралельних операцій.

У разі послідовної реалізації описаної вище процедури інтерактивного оцінювання потрібно виконати

$$36MNK + 6M^2K + 6K(N+M) + 4K \quad (3)$$

арифметичних операцій.

Припустімо, що t_1, t_2, t_3 — відповідно час виконання арифметичних операцій додавання, множення та ділення і при цьому зазвичай $t_1 < t_2 < t_3$. Використовуючи наведені оцінки складності обчислень (2) та (3) і поклавши $M = N = K = L$ (для реальних СІМС L є доволі великим), отримуємо відповідно вирази для часу виконання процедури інтерактивного оцінювання у послідовному режимі та на підставі застосування паралельно-послідовного способу згідно з алгоритмічною конструкцією (1):

$$2L^3(17t_1 + 2(t_2 + t_3)) + 2L^2(t_1 + 2t_2 + 3t_3) + L(2t_2 - 7t_1 + 9t_3) + 3(t_3 - t_1);$$

$$2L(3t_1 + t_2) + t_1 - 5t_3.$$

Далі, вважаючи, що L є якзавгодно великим, отримуємо, що прискорення обчислень за (1) є близьким до значення

$$AL^2 + BL + C,$$

де

$$A = 2 + \frac{11t_1 + 2t_3}{3t_1 + t_2}; \quad B = 1 + \frac{3t_3 - 2t_1 + t_2}{3t_1 + t_2}; \quad C = 0,5 + \frac{4,5t_3 + 0,5t_2 - 5t_1}{3t_1 + t_2}.$$

Звідси випливає висновок, що за зроблених вище припущень стосовно часу виконання арифметичних операцій та M, N, K прискорення обчислень може вимірюватися десятками тисяч і більше разів.

Отже, алгоритмічна конструкція (1) дозволяє оцінити потенційні можливості розпаралелювання процедури інтерактивного оцінювання. Хоча загалом кожен із паралельних її фрагментів має різну кількість автономних гілок і в межах цих фрагментів гілки можуть мати різну складність, використання згаданої конструкції в окремих випадках дасть можливість значно прискорити обчислювальний процес на обчислювальних засобах як зі спільною, так і з розподіленою пам'яттю.

У разі обмеження обчислювальних ресурсів для реалізації процедури інтерактивного оцінювання на сучасних паралельних засобах можна скористатися конструкцією:

$$\begin{aligned}
 & \text{fork } (g_1^0, g_2^0, \dots, g_p^0) \text{ join,} \\
 & \text{fork } (g_1^1, g_2^1, \dots, g_p^1) \text{ join,} \\
 & \text{fork } (g_1^2, g_2^2, \dots, g_p^2) \text{ join,} \\
 & \text{fork } (g_1^3, g_2^3, \dots, g_p^3) \text{ join,} \\
 & h^4,
 \end{aligned} \tag{4}$$

де p — кількість паралельних гілок, які реально можна одночасно виконати на наявній обчислювальній системі; $g_l^0, l = \overline{1, p}$ — паралельні гілки, у кожній з яких обчислюється l_0/p локальних оцінок; $g_l^1, g_l^2, g_l^3; l = \overline{1, p}$ — паралельні гілки, у яких обчислюється відповідно $l_1/p, l_2/p, l_3/p$ оцінок першого, другого і третього рівнів узагальнення. Тут вважається, що $l_0, l_1, l_2, l_3 \in \text{кратними до } p$. Обчислення оцінок згідно з конструкцією (4) можна організувати так, щоб гілки в межах кожного з паралельних фрагментів мали приблизно однакову складність.

Ураховуючи наведені вище формули для складності обчислення кожної оцінки, установимо час виконання кожного із чотирьох паралельних фрагментів U_0, U_1, U_2, U_3 у конструкції (4), а, отже, і загальний час U реалізації усієї конструкції. Оскільки обчислення всіх локальних оцінок мають приблизно однакову складність, то звідси випливає, що час реалізації обчислень у кожній з гілок $g_l^0, l = \overline{1, p}$ набуває значення

$$U_0 = 2MNK(12t_1 + 2t_3) / p.$$

Оцінки першого рівня загальності за складністю можна поділити на два типи. Обчислення оцінок окремого типу розподілимо між p гілками. Отже, для реалізації обчислень у кожній з гілок $g_l^1, l = \overline{1, p}$ потрібен час:

$$U_1 = 2(MNK(3t_1 + t_2) + M^2K(2t_1 + t_2) + MN(t_3 - t_1) + (KN + KM)(t_3 - 2t_1)) / p.$$

Оцінки другого рівня узагальнення за складністю можна поділити на три типи. Аналогічно обчислення оцінок окремого типу розподілимо між p гілками. Унаслідок цього отримаємо час реалізації обчислень у кожній з гілок $g_l^2, l = \overline{1, p}$:

$$U_2 = 2((KN + KM)(3t_1 + t_2) + (M + N)(t_3 - t_1) + 2K(t_3 - 2t_1)) / p.$$

За складністю оцінки третього рівня узагальнення можна поділити на два типи. Обчислення K оцінок одного типу розподілимо між p гілками. Однак дві з цих гілок будуть найдовшими, оскільки в них ще обчислюватимуться по одній оцінці зі складністю K . Отже, для виконання обчислень у кожній з двох найдовших гілок з набору $g_l^3, l = \overline{1, p}$ потрібен час:

$$U_3 = K((2(t_1 + t_2) + t_3) / p + t_1) + t_3 - t_1.$$

У наведених вище формулах для часу вважається, що M, N, K є кратними до p .

Таким чином, обчислення згідно з конструкцією (4) будуть виконані за час:

$$U = 2(MNK(15t_1 + t_2 + 2t_3) + KM^2(2t_1 + t_2) + (KM + KN)(t_1 + t_2 + t_3) + (MN + M + N)(t_3 - t_1) + K(2,5t_3 + t_2 + (p - 3)t_1)) / p + 2(t_3 - t_1). \quad (5)$$

Зауважимо, що у наведеній формулі враховано час U_4 обчислень у фрагменті h^4 :

$$U_4 = (K - 1)t_1 + t_3.$$

На підставі формул (3) і (5) за умов $M = N = K = L, L \gg p$, для якзавгодно великого L отримуємо, що пришвидшення паралельних обчислень у даному разі є близьким до свого оптимального значення, тобто до p .

Отже, конструкція (4) дозволяє доволі ефективно реалізовувати методику інтерактивного оцінювання на наявних обчислювальних засобах зі спільною та розподіленою пам'яттю з наперед відомим (обмеженим) обсягом ресурсів.

Зауважимо, що певні резерви розпаралелювання містять і безпосередньо фрагменти обчислення оцінок, оскільки в них усюди використовується операція скалярного добутку векторів, яка ефективно реалізовується у системах на базі векторно-конвеєрних процесорів. Кластерні системи та системи зі спільною пам'яттю, побудовані на таких процесорах, натепер одні з найпродуктивніших у своєму класі, проте є доволі дорогими [16] обчислювальними засобами.

ВИСНОВКИ

Ця робота є продовженням циклу робіт [11, 17, 18], у яких досліджуються мережеві структури та системи, а також низки робіт [8–10, 12–14, 19, 20], присвячених проблемам ефективної реалізації методики комплексного оцінювання СІМС на сучасних паралельних обчислювальних системах різної архітектури. Зокрема, формалізовано процедуру інтерактивного оцінювання об'єктів таких систем у вигляді послідовності кроків. Наведено та досліджено алгоритмічні конструкції для паралельної реалізації цієї процедури. Отримані оцінки прискорення підтверджують їх високу ефективність.

Оскільки запропоновані конструкції є сукупністю фрагментів з автономних паралельних гілок, то їх реалізація на сучасних обчислювальних системах зі спільною (багатоядерні комп'ютери) та розподіленою (кластери, гібридні архітектури, високопродуктивні обчислювальні середовища) пам'яттю не викликає труднощів. Отримані в роботі результати можуть бути використані для оцінювання в режимі реального часу СІМС з різних предметних галузей, оскільки сама методика оцінювання є доволі універсальною. Указано деякі можливі шляхи подальшого прискорення обчислень під час реалізації процедури інтерактивного оцінювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Owen C.L. Evaluation of complex systems / C.L. Owen // *Design Studies*. — 2007. — № 28, N 1. — P. 73–101.
2. Norros L. Usability evaluation of complex systems / L. Norros, P. Saviola // STUK, Helsinki, 2004. — 44 p.
3. Bar-Yam Y. About Engineering Complex Systems: Multiscale Analysis and Evolutionary Engineering. In: *Engineering Self-Organising Systems* / Ed. by Y. Bar-Yam // Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. — P. 16–31.
4. Поліщук Д.О. Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем: I. Опис методики / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2015. — № 1. — С. 21–31.
5. Поліщук Д.О. Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем: II. Локальне та прогностичне оцінювання / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2015. — № 2. — С. 26–38.
6. Поліщук Д.О. Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем: III. Агреговане оцінювання / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2015. — № 4. — С. 20–31.
7. Поліщук Д.О. Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем: IV. Інтерактивне оцінювання / Д.О. Поліщук, О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2016. — № 1. — С. 7–16.
8. Поліщук О.Д. Локальне оцінювання якості функціонування складних систем на підставі паралельних обчислень / О.Д. Поліщук, М.І. Тютюнник, М.С. Яджак // *Відбір і обробка інформації*. — 2010. — Вип. 32 (108). — С. 119–124.
9. Поліщук О.Д. Оцінювання якості функціонування складних систем на основі паралельної організації обчислень / О.Д. Поліщук, М.І. Тютюнник, М.С. Яджак // *Відбір і обробка інформації*. — 2007. — Вип. 26 (102). — С. 121–126.
10. Яджак М.С. Оптимізація методики комплексного оцінювання складних систем на підставі паралельних обчислень / М.С. Яджак, О.Д. Поліщук, М.І. Тютюнник // *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. — 2016. — № 4. — С. 347–356.
11. Поліщук О.Д. Мережеві структури та системи: III. Ієрархії та мережі / О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2018. — № 4. — С. 82–95.
12. Анисимов А.В. Построение оптимальных алгоритмов массовых вычислений в задачах цифровой фильтрации / А.В. Анисимов, М.С. Яджак // *Кибернетика и системный анализ*. — 2008. — № 4. — С. 3–14.

13. Яджак М.С. Оптимальный алгоритм решения задачи цифровой фильтрации с использованием адаптивного сглаживания / М.С. Яджак, М.И. Тютюнник // Кибернетика и системный анализ. — 2013. — № 3. — С. 142–151.
14. Яджак М.С. Паралельні алгоритми розв'язання просторової задачі цифрової фільтрації даних / М.С. Яджак // Інформатика та математичні методи в моделюванні. — 2017. — № 3. — С. 234–239.
15. Вальковский В.А. Распараллеливание алгоритмов и программ. Структурный подход / В.А. Вальковский. — М.: Радио и связь, 1989. — 176 с.
16. Рейтинговий список найпотужніших систем світу [Електронний ресурс]. — Режим доступу: www.top500.org.
17. Поліщук О.Д. Мережеві структури та системи: I. Поточкові характеристики складних мереж / О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2018. — № 2. — С. 42–54.
18. Поліщук О.Д. Мережеві структури та системи: II. Серцевини мереж та мультиплексів / О.Д. Поліщук, М.С. Яджак // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2018. — № 3. — С. 38–51.
19. Polishchuk O. Issues of Regional Development and Evaluation Problems / O. Polishchuk, D. Polishchuk, M. Yadzhak, M. Tyutyunnyk // AASCIT Communications. — 2015. — 2, N 4. — P. 115–120.
20. Polishchuk O. Big Data Processing in Complex Hierarchical Network Systems / O. Polishchuk, D. Polishchuk, M. Yadzhak, M. Tyutyunnyk // arXiv preprint arXiv: 1603.00633. — 2016. — 7 p.

Надійшла 18.09.2018

**ON THE WAY TO SOLVING THE PROBLEM
OF “SEMANTIC WEB – DATA BASE”**

Y.I. KISLENKO

Abstract. The present state of the problem of “Semantic Web – Data Base” is analyzed. “Semantic Web” is analyzed from the standpoint of the integration approach, covering the results of research in the fields of neurophysiology, psychology, philosophy; it allows to formally define the quantum of knowledge as a separate situation of the visual level and clearly define the scheme of its verbalization in the form of a basic semantic-syntactic structure. The main result of the integration approach is presented by the following thesis: “The structural level of the linguistic organization is derived from the structural and functional level of the neural organization of the visual path”. From here we have a productive conclusion: the structural and functional level of the language organization will be the same for all languages. The second component of the “Data Base” covers (should cover) the entire social cognitive potential of knowledge, presented by a plurality of accumulated texts. The structured level of knowledge base organization is presented by a very small fragment of the neural network, which reproduces a separate situation of text information, but which, through a plurality of separate tokens, of its constituents (with corresponding references to other structural formations) forms a practically cognitive neural network of a certain knowledge area.

Keywords: semantic Web, Data Base, integration approach, quantum of knowledge, the basic semantic-syntactic structure.

THE PROBLEM OF “SEMANTIC WEB – DATA BASE”

Tim Berners-Lee has been working on creation of the WWW web for over ten years. The main idea is to use a variety of agents for carrying out multiple tasks of users creating separate tracks between the data bits stored on different computers. Practically, this is the distributed system, which enables access to the variety of interrelated documents through the Internet. With the advent of WWW, which to some extent updated the hopes on modeling intellectual capabilities of human, the ideology, presented by the interrelation “Semantic Web - Data Base”, which has been heating the imagination of many researchers and generations up until now, has been created. The first part is related to the problems of perception and “understanding” of a message, while the second deals with generation and utilization of basic knowledge.

In the general case, those are the components of human cognitive potential, which embrace the whole communication process, considering all its constituents:

perception of a message, understanding its content, making a decision, verbalization of the decision, etc., which in general are connected with the first part of the interrelation – Semantic Web. For its time it was a revolutionary step, which dramatically influenced the formation of the whole cluster of information technologies, oriented on modeling human speech activity. However, it is worth mentioning that this aspiring program stimulates the search and development of certain directions of modeling the speech activity, and at the same time, it is still pretty far from cognitive abilities of alive neurosubstance.

The second component – “Data Base” as a part of human cognitive potential represented by global text information files, is practically formed in computer networks, while the first component – “Semantic Web”, responsible for “understanding” the message, and is still on the stage of initial search. Nevertheless, Tim Berners-Lee virtually suggested that realization of this ambitious intellectual project might happen in next twenty years. However, time is passing and the number of unresolved questions does not decrease, it even seems to increase, especially regarding semantics.

In the wake of the euphoria of solving these ambitious perspectives, entire groups, associations, institutes have been formed; presentations and polls have been conducted, etc. The results of surveys conducted by a group of researchers at Elon University (Janna Quitney Anderson — Pew Research Center's) and the American Life Project (May 4, 2010) are considered to be quite interesting. The main result is quite presentable, though cautious. The results of the survey conducted by the research centers on this project are quite revealing.

895 respondents were selected; they would have spoken about the possibility of realizing this project within certain timeframes. Evaluation of the results are the following (based on [1]):

- about 47% of respondents expressed moderate expectations regarding the possibility of realizing the project: “The project would not be as efficient as expected and the average users would not feel substantial difference when the project is realized” – this is the point of professionals who understand the complexity of the issue;
- almost 41% expressed hope that “by 2020 Semantic Web would succeed and would be able to provide better service for average user” — this is the point of those users who are quite unaware of situation and satisfied with the current condition of the Internet;
- the rest (12 %) did not express anything regarding the evaluation of this project.

Thus we can see that the society in general especially the professionals has taken a rather reserved view of the project and further development is nothing more than unfounded illusions regarding future perspectives. Of course, the problem posed and voiced by Tim Berners-Lee refers to one of the greatest challenges – modeling human speech activity, which is mainly realized by our neurosubstance.

We see that the problem of finding information in the gigantic repositories of data stored on electronic media is more or less solved, and partially satisfies the users who have extracted information either through libraries or in dusty repositories, fluttering innumerable folios in the pre-computer era. Yet, in our opinion, the problem of meaningful processing of information remains a priority for humanity.

Can we shift this creative function on to the shoulders of the computer? Naturally, the question arises, where does the problem lie, in which direction to go, and in general — are these issues solvable?

Practically, this program (to our mind) is intended for modeling the processes of using (understanding) of natural linguistic information, which in general quite often is “illogical and somehow playful and mistaken” and oriented on cognitive potential of interlocutor. The last remark is that current natural linguistic technologies are restricted to using them as key words. The key point is that our language is still not analyzed enough; there are still a lot of problem and uncertain issues. Practically, this is the main argument regarding the possibility of formalization of natural linguistic technologies. Obviously, various questions arise, such as what is the reason, why our knowledge about language are so poorly formalized, why, ..., why?

The Semantic Web — Data Base program attracts more and more attention to the problems of speech modeling, on the one hand, due to the wider use of computer technology for applied linguistic tasks, and on the other hand, as it defines a new vector for the development and use of information technologies in the field of modeling information processes in our neurosubstance. That means, we already face the problem of modeling quite complex psychological functions that could not be implemented at previous stages of the development of information technology. First of all, it concerns the modeling of speech activity.

INDIVIDUAL LANGUAGE SYSTEM

In the context of analyzing the interrelation “Semantic Web — Data Base” it is worth addressing to the accomplishments of remarkable Kyiver Lev Shcherba, who since his birth (since being six months old) has lived in Kyiv with his parents, graduated from the lyceum, studied on the first course of Kyiv university. Further, he proceeded studying in St. Petersburg, where under the supervision of Jan Baudouin de Courtenay he was conquering the highest ranks of European linguistic science. Shcherba’s collection of works “Language system and speech activity” and the work “On a three-fold aspect of linguistic phenomena and on experiments in linguistics” in particular are consider the highlight of his linguistic experience and future foresight [2]).

The main scientific work of L. Shcherba is the concept of individual language system (ILS) as a combination of linguistic processor (LP), responsible for structural and functional level of message organization, and basic knowledge (BK), where the complete cognitive potential of a subject presented on language level is stored and accumulated. The key distinction of human “individual language system” and computer models is that nowadays in information technologies all the cognitive potential (basic knowledge) is still presented on language level as fragmented variety of text information files, while in human system this potential is integrated to a single medium, presented by our neurosubstance. Nevertheless, we are fully aware of certain structural identity between Tim Berners-Lee’s method and Shcherba’s concept of ILS, where linguistic processor, responsible for structural and functional level of linguistic organization and provides the function of “understanding” of a message, and basic knowledge is responsible for the whole human cognitive potential. Note that the ISL concept was introduced by L. Shcherba back in 1927, i.e. almost a hundred years before there appeared a chance

to shift our linguistic competence on to the shoulders of computers. Well, let's use this ILS ideology as a combination of LP and BK for solving current problems of modeling human speech activity, create their corresponding models M_1 , M_2 , and lock them out on each other with the help bilateral connections (fig. 1).

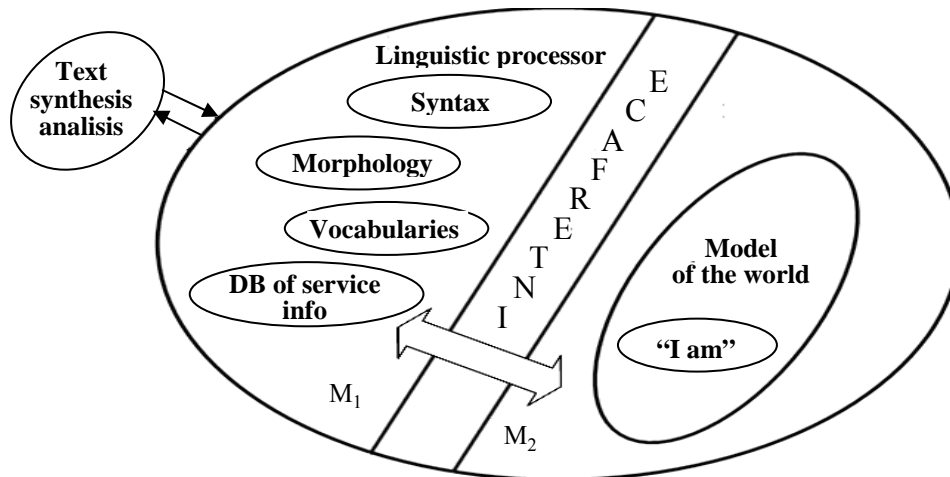


Fig.1. Individual language system: LP — linguistic processor; BK — natural linguistic basic knowledge

In general, the LP is responsible for identifying the structural and functional level of the organization of a separate message, while the basic knowledge (BK) is considered a repository of all cognitive potential, taking into account the structural and functional level of the linguistic organization, but this time it is the cognitive potential of a particular individual. We emphasize once more that there is a difference between human cognitive potentials and computer networks: at present, cognitive potential is represented in natural linguistic information technologies (NLITs) only by significant volumes of text (or speech) information, while human cognitive potential comprises also the information from all sensory levels (sight, hearing, touch, taste, smell).

When, apparently, everything is so transparent, the question arises, why aren't there no technologies for processing natural language information up to this time? The reason is that (on the one hand) the language is such a complex and multifaceted object for exploring, and especially for research, that it integrates practically all directions of analysis of this phenomenon, starting with biology, psychology, neurophysiology, philosophy, cybernetics, and other interdisciplinary areas, (and on the other hand), language is still not sufficiently structured for formal analysis and modeling.

The first author's attempt to integrate diversified knowledge on linguistic organization was in 1998, when on the occasion of century of establishing Kyiv Polytechnic Institute (KPI) the author's study guides "Language Architecture" [3] was published. In this guides, from the perspective of statistical average level of analysis of current state of structural linguistic organization (quite reflexively), the notion of "basic semantic and syntactic structure" "(BSSS)" as a basic structural element of linguistic organization was introduced. However, the research was some kind of generalization of that time knowledge regarding structural level of linguistic organization, and did not reveal anything new in the sphere of linguistics.

The qualitative leap of author's approach to structural and functional level of linguistic organization is based on many years of teaching the course “Sensory Systems” at the Department of Technical Cybernetics at Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute (KPI), during which the structural and functional organization of all systems of sensation, including the stages of perception and processing of arbitrary information, were carefully considered. The significant moment was the familiarization with the works of Semir Zeki, concerning the structural and functional level of the neuro organization of the visual pathway [4] and the work of J. Hawkins “On Intellect” [5], summarizing the functional identity of all sensory systems. Therefore, thorough analysis of the functional load of sensory systems, taking into account the unresolved problems of linguistics, allowed synthesizing a rather harmonious model of the formation and development of speech activity.

It is important to emphasize the significant stage of the author's plunging into neurophysiology of sensory systems after meeting and fruitful contacts with the academician O. Kryshchal, which stimulated publication of the article “Neurophysiological bases of linguistic organization” in the NASU Reports (upon the recommendation of O. Kryshchal) [6] and small but important author's monograph “From Thought to Knowledge”, published by Ukrainian chronicles in Kyiv in 2008 [7]. In these works the way from perceiving the information of visual level to translating it onto language level has been thoroughly researched. All this allowed making a solid conclusion that the structure of linguistic organization is greatly defined by the level of structural and functional neuroorganisation of visual pathway.

The title page presents a procedure for translating information of a figurative level onto language level in the form of a sequence of individual steps. In general, visual information enters the retina, which is filled with receptors of two types: sticks (in the number of $130 \cdot 10^6$ located on the periphery of the retina) and cones (in the number of $6 \cdot 10^6$, filling the central foveal area, and capable of thorough identification of the color range). When we want to get a detailed look at something from the surrounding environment, we project this particle (with the help of the lens muscles) to the central foveal area. Such fragment of the image will be determined as a situation. The situation is a fragment of visual component of environment, which gets to the central “foveal area” of retina and is processed to its full extent. In each particular situation all its components Obj/Subj, their dynamics Mov, their attributes Attr (Obj/Subj), Attr (Mov) and the extent of those attributes Attr (Attr).

In section 3.4 (Verbalization of visual information), taking into account the results of neurophysiologists and psychologists research, the procedure for processing a particular situation of a figurative level with subsequent translation of its results onto the language level is clearly traced. It is important to note that this is a procedure for processing only one situation, and it is implemented with a frequency of 25-75 Hz, tracking both the static and dynamic characteristics of the components.

Only a part of visual component, which gets on the central foveal area, that is a tenth part of a visual field, is thoroughly examined. However, it is processed quite elaborately: through identifying all objects/subjects, their attributes and the extent of these attributes, as well as identifying dynamic characteristics of all the defined components, with further identification of their attributes and the extent

of the attributes. This is, virtually, the scheme of processing of only one fragment of an image on the retina – a situation. Although, in order to explore the visual field totally we need to examine other situations as well. But on the way of evolution of visual pathway this function is realized in another way through using “sacade”, the system of sporadic scanning of the retina completely in order to find particular components. As we can see this algorithm is quite economical and we don’t have to scan the retina field each time, it is enough to scan only those zones, where the important (for the subject) components are. Thus, we examined the whole path of processing both of certain situation for identification of all its components with defining all objects, subjects, their attributes, extents of attributes, and the complete image, getting to the retina. If it is true, there is still one question — how the process of verbalization of information from sensory level to the language one is carried out.

The first attempt by the author to integrate the accumulated diversified knowledge of the linguistic organization (more precisely, about the stages of its formation and development) was presented in the form Pre-Conference (poster + workshop talk) on summit at the BICA-13 conference in Grandotel, Kyiv, where the integration platform of linguistic organization “Systematic approach to the modeling of speech activity” was presented.

The comprehensive view of such approach was shortly in BICA-14 journal by the article “Back to basics of speech activity” [8]. Practically, it meant the presentation of author’s vision of the problem of linguistic organization to European market. It is important that an extensive axiomatics of speech activity, which turned to be not only possible but also quite important for understanding diversified functioning of speech activity, was presented. The next work of Yu. Kislenko and postgraduate D. Serheev [9] was devoted to the problems of modeling of knowledge base on the mentioned principles.

INTEGRATION APPROACH TO THE ANALYSIS OF LINGUISTIC ORGANISATION

Tim Berners-Lee suggested the Semantic Web – Data Base interrelation about twenty years ago, but the sense of progress in its implementation is still not very visible. Why is this so? On the one hand, this is due to the fact that the problem itself touches upon the issues of modeling complex cognitive processes occurring in our neural circuit, and on the other hand, probably, when the problem is clearly defined and voiced, presumably there are already certain horizons (achievements and certain hopes) to solve it. Let’s try to evaluate the prospects of solving the problem more substantially, taking into account those developments that have already been implemented. In particular, the author’s last work “Personalized cognitive feedback as a powerful lever for accelerated social development” [10] is in some way related to the analysis of the cognitive processes that occur in our neural circuit and determine the progressive accumulation of cognitive potential. It is necessary to clearly identify the platform from which the study begins, in order to clearly understand how and where to go in this direction. Since the problem of “Semantic Web – Data Base” is related to modeling of cognitive processes in our neural circuit, and for their analysis, we have only a speech level available, then we face the problem of analyzing human cognitive activity.

Current state of classical linguistics

The stated research direction is a rather ambitious project, and the author absolutely soberly assesses its complexity. However, here we can trace such a solution: we should only turn to the analysis of the current stage of development of classical linguistics through the evaluation of modern achievements by recognized representatives of this direction. We should only recall that the first qualified study of the structural level of the linguistic organization was presented by “General rational grammar” (the grammar of Port-Royal in 1660) by the authorship of the logician and philosopher Antoine Arno and the grammarian Claude Lancelau [11]. The grammar was formed according to the results of the analysis of the structural level of the linguistic organization of significant volumes of texts, mainly religious. We must pay tribute to the creators of this work, who “felt” and identified the main features of linguistic organization in the form of a dichotomy “simple / complex” sentences, and also identified a certain category of “word combination” for which they did not have a clear definition at that time. Only now, we can assert that such a structure occupies the status of a separate full-fledged sentence, if we assume that the “missed” element of such a structure was just mentioned in the previous sentence and is still activated for a certain time in our neural circuit. This is practically a “saving” scheme of linguistic means, oriented on listener.

The feedbacks from prominent linguists on the current state of the structural level of the linguistic organization are presented in Table 1 from the work of BICA-13. We see that practically the entire linguistic elite is rather restrained in relation to the current state of our knowledge of the linguistic organization. Particular emphasis should be placed on the opinion of L. Astakhova (head of the department of the German language of the Dnipropetrovsk State University), who at one time clearly expressed her attitude to this problem: “Linguistic community has long been ripe for rejecting the existing theories of a sentence; the object of syntactic research is as well unknown” [12]. That is, these are key, painful issues of classical linguistics, which are still waiting to be solved.

The revelation of B. Horodetskyi regarding the current state of linguistics became an impetus for the formation of a coherent, holistic picture of the linguistic organization. This is a person who has edited the collection “New in Foreign Linguistics” for more than 10 years and kept the pulse on key pan-European linguistic problems. His verdict regarding the prospect of a language organization study looks very categorical, but rather constructive: “Many troubles in linguistics are due to the fact that language is still considered a form of reflection of “thought” rather than a scheme for the organization and presentation of knowledge. So, from here we have a powerful conclusion: in the realm of classical linguistics it is first necessary to deviate from the concept of “thought”.

The revelation of B. Gorodetsky regarding the current state of linguistics became an impulse for formation of coherent consistent picture of the linguistic organization. This is a person who has been editing the collection “New in Foreign Linguistics” for more than 10 years and kept the pulse on key problems of European linguistics. His verdict on the perspectives of linguistic organization research looks rather categorical, but still constructive: “A lot of linguistic problems are related to the fact that a language is still considered as a form of conveying a thought rather than a scheme of organization and transferring the knowledge [13].

Therefore, hence we have a powerful conclusion that in the realm of classical linguistics, it is first necessary to deviate from the concept of “thought” and master and use the productive platform of “knowledge”.

Thus, for us, the generalized assessment of the current state of classical linguistics and the way out of this critical state, when the concept of “knowledge” is adopted as the basis of the research, instead of the “thought”, suggested by B. Gorodetskyi becomes the directional sign. This is a very appropriate suggestion, since current linguistics still defines language as the scheme of reproduction of “thought”, which is a standard scholastic situation, when one (not clearly defined concept) is interpreted through another, which is also not so well defined. However, the question remains – what is defined as “knowledge”, how is it formed for a human and how is it used?

Table 1. Current state of classical linguistics

Authors	Unresolved problems of classical linguistics
Whitney W., F. de Saussure	Language is a system of linguistic units of different levels with no logical connection between them.
Piotrowski R. (St. Petersburg)	Linguistics is not a theoretical science built on experimental data, it is a exploitative science based on brief samples [20]
Astakhova L. Dnipropetrovsk state university)	Linguistic community has long been ripe for rejecting the existing theories of a sentence; the object of syntactic research is as well unknown [12]
Grammar – 70	All current knowledge of classical linguistics cannot be considered from the perspective of a whole system [19]
Grammar Port- Royal	The problem of word combination still has not been resolved [11]
Gorodetsky B.	A lot of linguistic problems are related to the fact that a language is still considered as a form of conveying a thought rather than a scheme of organization and transferring the knowledge [13]

The answer is formed naturally and fairly transparently if one traces the entire chain of perception of information by the sensory system and the successive stages of its processing. Knowledge is the end product of a very powerful intellectual activity of a person, covering the stages of perception and processing of information by the sensory system, with subsequent identification of the obtained results in the cerebral cortex with the subsequent possible translation it onto the language level. This definition embraces the entire chain of transformations from figurative to language level, but further, we will explore the entire sequence of stages more thoroughly.

Therefore, it is important to observe what is happening on the way of perception, formation and use of linguistic information, but this is an appeal to neurophysiology that is rapidly developing in the modern world and provides answers to many questions. Figure 2 presents a difference in the approaches to the process of synthesis of linguistic material. Classical linguistics was formed on a set of finished texts, not plunging into solving problems regarding the nature of formation and processing of a linguistic message. By this time, it adheres to the idea that “we perceive a human through language”. On the other hand, when we stand in the position that “text is the end product of a rather powerful intellectual activity of a person” which necessarily includes the stages of taking into account the dependencies of the perception of the environment by the sensory system (ranging

from retinal functions that determine all components of a particular situation and ending with the functional load of the visual cortex, which defines all their attributes), we can find out what knowledge is, how it is formed and used.

Integration approach to structural level of linguistic organization covers the results of recent researches of linguistic organization in various joint spheres, such as biology (Haeckels law); neurophysiology of visual pathway (Hubel, Wiesel, Semir Zeki, Jeff Hawkins); psychology of perceiving the environment (defining a situation); philosophy (the structure of a message in the triunity of time, space and action); cybernetics (ontogenetic parallels law) etc.

Defining the category of “knowledge”

We can present a certain sequence of language message formation taking into account the following steps. Our sight, like other sensor systems (Semir Zeki, [4], J. Hawkins [5]), works discretely at 25–75 Hz frequencies. So, for the “knowledge quantum” that is perceived and processed by a human, it is worth taking a separate discrete (separate frame) of visual perception of the environment when it is assumed that human perceives a lion’s share (80-90 percent) of all the information that comes in general through sensory system through the visual system.

Speech activity is one of the most significant functions of human society and, probably, one of the least explored areas of society’s existence and functioning. However, to date much knowledge in many areas of research of various spheres of its operation has been received and accumulated. For that reason, while exploring this issue it is worth “integrating” together all the knowledge received in different spheres.

Speech activity as a research object

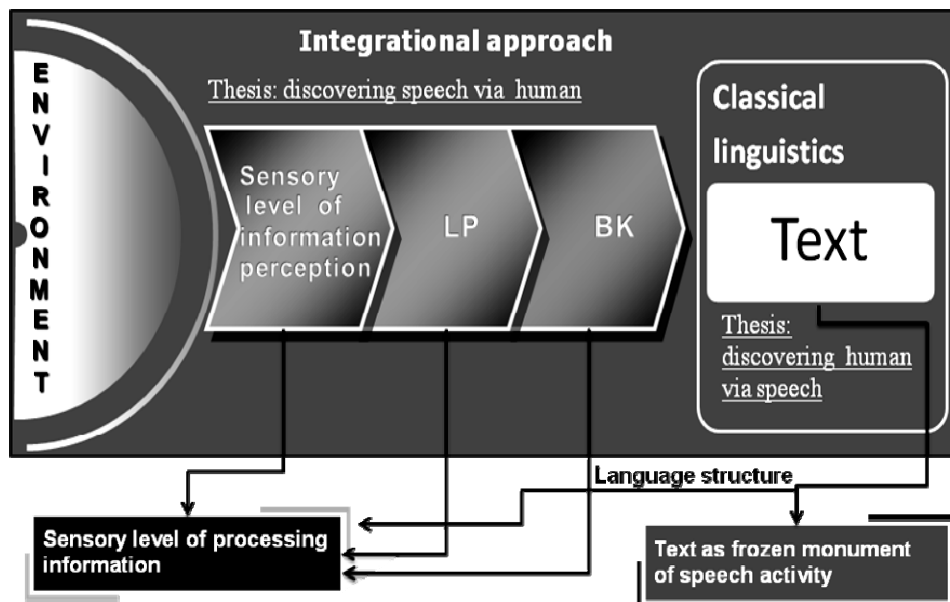


Fig. 2. Integration approach to creation of linguistic organization: Defining principle — “we perceive the language through human”

Despite author’s “solid experience” in the domain of the linguistic organization (generally about 40 years, and over fifty publications), he managed in a cer-

tain way to form a rather clear scheme for the establishment, formation and use of speech activity.

Practically, halfway comprehensive and uncontroversial picture regarding linguistic organization has been formed over the last decade, when the author gradually started overcoming the problems of speech activity taking into consideration current researches in various related fields. Relation of integration approach and classical linguistics is well illustrated by the slides from author's work for the Conference BICA-13 in the form Pre-Conference. On the slides, the comparative characteristics of integration approach regarding the long-established accomplishments of modern linguistics. Classical linguistics adheres to the idea that "we perceive a human through the language", while the integration approach changes the vector of research for the opposite – "we perceive language through human"; that means we are going to consider the way how human perceive the environment, how process, generates, and translates it on language level, as well as how human uses it.

Such approach practically settles a lot of problems of classical approach to structural level of linguistic organization since it traces the whole path of perceiving and processing of certain knowledge quantum through the visual pathway. Thus, we are considering a "knowledge quantum" of visual level as a particular "frame", which we further define as "situation". Taking into account the researches of neurophysiologists of visual pathway, we can define this notion as follows: "situation is a fragment of visual component of environment which gets to the central foveal area of retina and is processed to its full extent".

On average, to the "central foveal area" of retina (according to psychologists) only ten percent of the information perceived by the retina gets. However, when about a hundred objects / subjects fall into the retina, in general, we see that no more than ten components gets to the central foveal area, which are then processed fully, and after that, they can be translated into the language level. Surprisingly this number totally coincides with the statistical data of linguists, who state that the length of a simple sentence does not exceed seven plus or minus two components. The general scheme of processing information through the visual pathway was well illustrated in author's monograph "From thought to knowledge" [7], in which the schematic overview of the sequence of stages on the way to realizing the interrelation "Reality–Text" was presented (fig. 3).

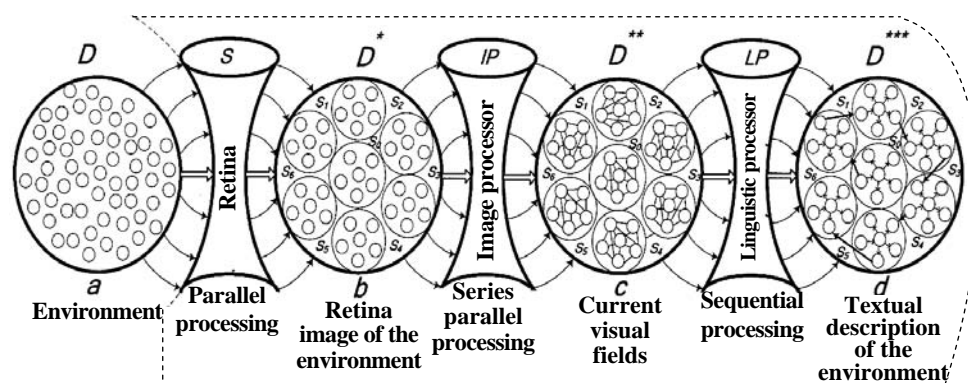


Fig. 3. The stages of processing the environment in the direction "Reality–Text": *D* — the environment getting to the retina; *S* — the variety of situations, that could be processed sequentially; *D*^{*} — identifying situations; *IP* — image processing; *D*^{**} — image level of processing the situations; *LP* — linguistic processor; *D*^{***} — symbol level of presenting the environment

It is important to mention the perception of the environment through visual pathway, hence processing of received information, is conducted with a frequency of 25–75Hz. Such scheme ensures clear identification of not only static, but also dynamic objects.

Stages of formation of the “Basic semantic and syntactic structure”

How does the individual situation is processed by the visual pathway? — Careful researches of neurophysiologists give the answer to this question. According to Semir Zeki [4], who has been summarizing the results of studies of the visual pathway during the last half of the century, we have:

experimentally-confirmed the presence of ensembles of neurons (hundreds / thousands), which select all objects / subjects (Obj / Subj) from a separate situation (the third level of retina);

experimentally-confirmed the presence of ensembles of neurons (hundreds / thousands), which, select dynamic components with movement identification (Mov) from a separate situation (fourth, fifth levels);

experimentally-confirmed the presence of ensembles of neurons in the visual cortex of the brain (hundreds / thousands), which identify their attributes Attr (Obj), Attr (Subj), Attr (Mov) for all found components (Obj / Subj) and their dynamical characteristics (Mov);

experimentally-confirmed the presence of ensembles of neurons in the cortex of the brain (hundreds / thousands), which also determine the extent Attr (Attr) for the found attributes.

So, neurophysiologists gave us a clear answer to how the process of treating the visual pathway of a particular situation is performed: with defining all of its components, identification of dynamic characteristics, as well as with the clear ability to differentiate all the diversity of attributes. Therefore, after processing a separate quantum of knowledge - situation, a person should only “mark” the components of the situation determined by the visual pathway with corresponding language labels. But this is a very difficult, hard and long process of language formation in human society.

The answer to how is the situation translated into the linguistic level was given by A.N. Gvozdev, who had comprehensively and very carefully been traced the peculiarities of the process of forming the linguistic system of his son Eugene for seven years. He did what often many parents try to do, but he was a person with higher linguistic qualifications who systematically and purposefully compared every new step of mastering the language with a specific environment. The results of the research were published in the academic edition in 1949 with dedication to his son [14]. These observations show a clear (Fig. 4) staged scheme of formation of the linguistic system of a child, which ends at about three years.

At this age, the child finishes the process of forming the main structural element of linguistic organization — the basic semantic and syntactic structure (BSSS), as the main scheme of verbalization of a particular situation. Researchers of child's language even claim that at this period the child becomes a “professor of linguistics” at the level of processing the household language level. But this is a very difficult, important and responsible period both for parents and for the

child, when you need to calmly and effortlessly compare and correct each component of every real situation (subject, object, action, time, space, reason, condition, consequence etc.) with the language equivalents of their verbalization. We should mention Masaru Ibuka and his bestseller “Kindergarten Is Too Late” [15], which excites all parents and future mothers. Why is it “late”? – Because, by this time child’s neural network is the most plastic and effectively “sucks” (like a sponge) all information about the outside world. Over time, this ability becomes less effective, and experts argue that if a child has not mastered the language by five years, then, in practice, he is not able to become a full member of the society. Fig. 4 represents this level in stages (1-5), when the child learns the procedure of verbalization of a particular situation; the last stage (stage 6) represents the process of synthesizing the message at the polypredicative level.

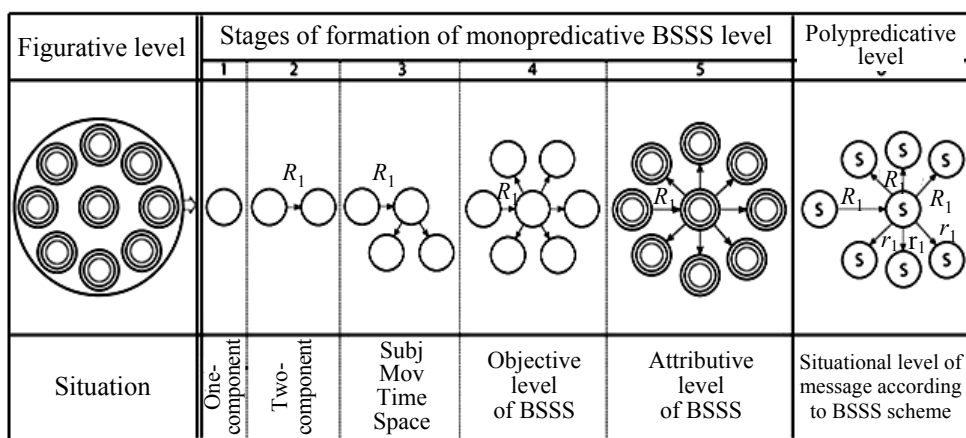


Fig. 4. Staged scheme of formation of the linguistic system of a person

The sequence of these stages, and considering their functional load, a clear organization of the verbalization scheme of a particular situation emerges in the form of a standard procedure which is mastered by a child at the age of 2,5-3 years. Basically (according to the definition) — the structure of the BSSS is a two-component, monopredicative scheme describing any situation from the real or virtual world, all components of which are updated at the attributive level. Practically, the Fig. 4 presents the sequence of stages of the child’s learning the message structure of any complexity.

The functional organization of the BSSS structure (monopredicative level) is mastered quite easily and on time, while the polydynamic scheme of message organization is learned later and harder; quite confidently the child masters it at the age of ten or twelve years. The peculiarity of formation of the linguistic order of the polypredicative level is that the system of functional connections remains adequate to the BSSS with certain transformations, and a whole structure of the BSSS may be put in the place of each component and so on, proceeding to the level of reproduction of the recursive scheme of the message organization. In general, the way of formation of this structure is carefully analyzed by the work “To the origins of speech activity” [8], and the structure of the BSSS itself is presented at Fig. 5.

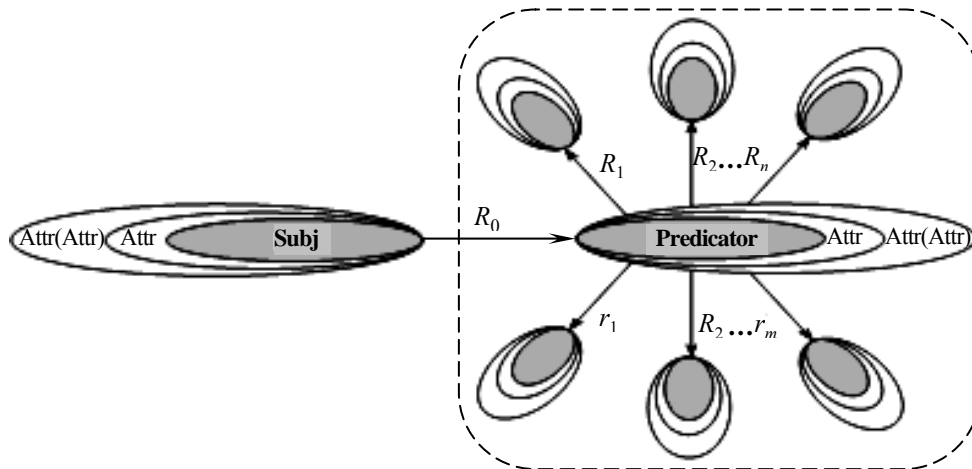


Fig. 5. Basic semantic and syntactic structure: Subj — subject; Pred — predicate; R_0 — main relations (mother-predicate); $R_1 \dots R_n$ — predicative relation; $r_1 \dots r_m$ — syntagmatic relations; Predicator — core of the predicate

Forming messages at the polypredicative level

The BSSS structure (Subj – Pred) reflects only to the monopredicative level of organization of a message, whereas the message can be formed generally on the predicative level, which combines several BSSS structures. Generally, this will be a structure similar to the BSSS structure (Fig. 3), where the whole structure of the BSSS may be put in the place of a separate component. At the same time, only the system of relations, which connects separate situations, changes. The issue of forming messages at the polypredicative level is well researched by Yu. Kyslenko, A. Khimicha “The structural and functional level of organization of the linguistic processor for informational natural and linguistic technologies” [16].

The fundamental difference between the formation of messages of the polypredicative level is the usage of another semantic load as components of a separate structure, as well as systems of relations in comparison with the BSSS structure. When the situational relations of the BSSS structure determine actual coordinates of the situation in the surrounding world or environment (time, space, reason, condition, consequence, etc.) then, in case of the polypredicative type, these coordinates are formed in relation to another situation, using a relative relation type: “where there is S_1 , then S_2 occurs”, “when S_1 is implemented, then S_2 will be”, and so on. In practice, the polypredicative message has a strict organization and is clearly identified by a linguistic processor. Transformation of predicative and situational relations is clearly analyzed in the following publication. Generally, the scheme of forming a message of the polypredicative level can relate not only to the system of relations of the BSSS structure, but also affect the relation at the attributive level (let's recall a familiar example – “This is the house that Jack built. This is the malt that lay in the house that Jack built...”). It is important that the structure of the polypredicative message is also clearly identified by the linguistic processor.

It should be once again mentioned that if an environment is perceived by a person as a sequence of individual situations, each of which is processed by the visual system under the same scheme, then the structural organization of the lan-

guage, almost regardless of nationality, color of the color of skin etc. should be processed under a standard scheme. Of course, languages differ significantly in terms of lexical composition, schemes of formation of polypredicative level, but their structural and functional organization have many common issues.

The final part to the integration approach

When the integration approach to the linguistic organization determines that the linguistic organization is derived from the structural and functional level of the neural organization of the visual pathway of a person and does not depend on the nationality, color of skin, place of residence, etc., but is determined only by the human genome, then we come to a significant conclusion that at the neural level each separate situation should be processed in the same way - with defining all components of the environment OBJ / SUBJ, their movement Mov, with further identification of all their attributes ATTR (Obj / Subj), ATTR (Mov) and also the extend of the specified attributes ATTR (ATTR). That is, the study of a situation at the structural and functional level of the neural organization of the visual pathway occurs in the same way, regardless of nationality, place of residence, color of skin, etc. The difference is in the linguistic organization of certain components (language labels), which identify the results of processing of a situation, in the levels of lexical identification of certain environmental components, in the order of their use, and also at the level of formation of mono/poly- predicative structures. Actually, this level finishes the analysis of the structural level of a particular situation, which is translated into the linguistic level by the BSSS structure.

Therefore, we have a significant conclusion that all the cognitive potential received, generated and accumulated by humanity, at the linguistic level (regardless of the language), will be structured by almost the same way based on the sequence of the BSSS structures (see Fig. 4), despite certain differences in their organization at lexical level, and at the text formation level in general. So, we can now talk about the organization and accumulation of a global cognitive knowledge base with free access thereto. Certain developments in this field have already been made.

PROSPECTS OF FORMATION OF SEMANTIC WEB

Information load of Semantic Web

The integration approach gave us a coherent system of the structural level of the linguistic organization, which is based on the standard BSSS structure. This is the syntax of the language organization of an arbitrary message. So, naturally, the question arises - what is semantics, and how is it formed? In our opinion, semantics (semantics of a message) is a system of binary relations between elements of the BSSS structure, the order and direction of which are determined by the scheme presented at Fig. 4.

If we take the BSSS structure as a basis and remove all the relations identified by the system of relations: R_0 is the main relation “mother-predicate”, which connects Subj and Predicat together; R_1, \dots, R_m — relations that clearly identify all the predicative components of the predicate; r_1, \dots, r_m — situational relations that determine the coordinates of a particular situation (time, space, reason, conditions, consequence of actualization of a particular situation), what does remain? Apparently, there is an unordered dump of lexeme with no semantic loading at the entire message.

It is worth noting, however, that the semantic load of all components of a situation is gradually realized, shaped and generalized by the child in the way of mastering the linguistic organization. That is, the process of mastering the language also means the formation of a semantic message system at a monopredicative (age up to 3–5 years) and a polypredicative levels (age from about five to twelve years).

Still, the question remains of how does the recipient identify these attitudes at the stage of perceiving the text? The answer will also likely be clear - either by using a certain lexical load of components that determine, for example, time (hours, minutes, seconds), stages of the day (morning, day, night, etc.), etc., or through the link to other situations, which were uniquely identified earlier.

This small excursion to the semantic relations of the BSSS structure draws the attention of the readers to the problem of formation and usage ("understanding") of semantic relations to search for relevant information; moreover, they are clearly identified either in separate word forms or have a relative reference scheme to other quantifies of knowledge. Well, we can proceed with analyzing this problem.

So, there is the problem of synthesizing the Semantic Web in such a way that, in part, it was possible to identify semantic links from textual information. We perfectly (and almost automatically) identify these relations, because during the long evolutionary way, we have worked out such schemes for identification of semantic relations, which ensure adequate perception and reproduction of text at the stages of analysis and synthesis of the message. Again, please remember that the semantic load of a separate BSSS structure is determined by a system of functional (semantic) relations of its constituents. So, we can predict the Semantic Web for one component of the message presented by the BSSS structure. One should only consider that for our language, the order of BSSS formation can be free.

We live in the period of computerization, we often quantify our thoughts with "bits" or "bytes", but not always use "knowledge". The language, the writing, is a great achievement of humanity, it is something that distinguishes man from animals. We have learned to record our thoughts, our experience for the term of preservation, which far exceeds the life cycle of a person.

It is time to pass it to your computer, in other words - to put knowledge to the machine, presented by a plurality of texts accumulated and saved by humanity. We can confidently identify the temporal and spatial relations, reason, condition, consequence, etc. in the texts. This knowledge should be "put" into the memory of the computer in the form of a linguistic processor (LP) and used. These are almost simple problems that can help programs "understand" the text by identifying individual functional relations between the words. This is the main meaning and purpose of the computer – not to lose the accumulated knowledge and learn to understand and use it.

Again, we return to the problems of modeling the Individual Language System (ILS), which clearly separates two components: the linguistic processor (LP) and the basic knowledge (BK). Let's carefully form the BK, where, at the textual level, there will be formed all the major accumulated cognitive potential and "gradually" we will form a linguistic LP processor to teach the "foolish" machine to "understand" the text, gradually putting separate bricks of knowledge thereto, presented by the plurality of interactions of the same BSSS structures. It is important to capture the semantic load of the individual BSSS functional relations (to be

a reason, to be time, to be a place, etc.). The structure of such relations can be easily and unambiguously identified by a linguistic processor. All components of the situation - Obj, Subj, predicate, situational relations (time, space, reason, consequence, conditions) - are easily identifiable and work for us).

Let's remember A.S. Narinjani and his school, which deals with problems of "time", "space", etc., Let's also recall N. Leontiev, who argued that the texts always have all the information necessary for a thorough analysis of the message and the use of this information. This issue is partly covered by the publication of the author "Structural and functional level of organization of the linguistic processor", which actually analyzes the means of identifying situational relations for the mono/poly- predicative levels of linguistic communication organization [17]. These works also presented a virtual experiment regarding the possibility of searching the Internet for a "full text". The main components here are components of Subj-Pred, situational relations (time, space, movement), predicative relations.

It is important to emphasize that the system of relations of the BSSS structure at the mono/poly- predicative levels cements the set of components of the "lexemes" into a monolithic knowledge quantum, which determines the "semantic load" of a message. That is why special attention should be paid to connecting the set of unsystematic lexemes to a semantically executed message. What do we have now?

Comparative analysis of various schemes of formation of "Semantic Web"

The integration approach to the structural level of the linguistic organization, presented in Section 3, gives a clear vision of the linguistic organization both at the monoprostand level, which is confined exclusively to the BSSS structure, and at the polypredicative level, covering a plurality of such structures, based on general level of the recursive scheme of the organization of the message. However, the basis of the structural level of the linguistic organization has always been the basic semantic and syntactic structure — BSSS.

In practice, the basis of the entire structural level of the linguistic organization is the basic structure, the semantic framework of which is determined by the system of relations of the BSSS structure both situational and predicative, presented at Fig. 4. Below is the list these relations:

- ratio R_0 — the main relation of the structure that identifies the connection "Subject-Predicate" — (Subj-Mov);
- the predicate itself with the "Predicator" core, which covers the verb (or its transformations according to the schemes of the adjectives or adverbs, based on two groups of relations - situational and predicative;
- situational relations r_1, r_2, \dots, r_n — determine time, space, reason, conditions, consequences of action. . . in the environment;
- the predictive relationships R_1, R_2, \dots, R_m R_1, R_2, \dots, R_m determine other entities / objects that are involved in the actualization of the action identified by the predictor Pred.

It is important to emphasize: the total number of elements that are simultaneously defined by one situation does not exceed from seven to ten. This is the average number of components that can simultaneously be processed by our visual pathway. In case of a polypredicative message, this number will depend on

a plurality of sequentially reproduced situations. It is also worth considering the number of attribute relations of all involved objects / subjects, when they are identified as: Attr (Obj / Subj), Attr (Mov), Attr (Attr). This is a system of components that uniquely identify the attributive level of an environmental situation. The person is not able to perceive the situation in more details on a figurative level and identify it, respectively, at the language one.

So, when we have determined the scheme of perception of an environmental situation, and transform it into linguistic level, we can now correctly put the question about the possibility and effectiveness of using this system of relations to search for information in powerful natural and linguistics (NL) information repositories.

Modern ways of presentation of Semantic Web

We have just studied how adequately, fully and thoroughly a person may perceive environmental information, considering the semantic load of all components of a situation and translate it into the language level. Here the process of the recipient is actualized in the direction of "Reality – Text", whereas for users (listeners / readers) it is important to reproduce this dependence in the opposite direction – "Text – Knowledge".

The problem for the readers to apply to the gaining potential of knowledge presented at the computer level, is solved so far, considering the artificial languages of NL texts. Such first attempt was implemented in the form of SGML (Standart Generalized Markup Language), approved in the 80's when a certain list of instructions (tags) was created to reproduce the text structure. HTML is a simplified version of SGML structure that defined a certain set of Tags, their attributes, and the internal structure of the text defined by the DTD rules for certain types of document. However, it is important to emphasize that, in fact, the texts themselves, as cognitive enhancements of our neural network, are by no means connected with the Tags used for formal presentation of texts; nor does it consider the semantic relations between Tags, the number of which is limited. Considering the situation, the specialists have already expressed the idea that HTML today does not fully meet the requirements of both the developers themselves and the users. The proposed version of XML (according to the design of the developers) itself should "synthesize" a specific set of tags by text; but this means that it must have its own "intelligence" in all areas of knowledge. Currently there is no answers of how to formalize this semantic problem!

Given these unresolved issues, the specialists state that: the evolution of data structuring systems under the Obj-Attr scheme gradually brings researchers to the complication of tags, which ultimately requires the ability to analyze the entire structured level of text information.

Because of the analysis of the current state of the problems of searching information on the Internet, considering the speed of computers, the possibility of presentation of information in distributed systems there raises a question – should one refer to a "full text" search? Certain proposals have already been stated [18], although the author has not yet found this proposal.

The author is not an expert in computer technology but has achieved a good level of generalization of the structural level of the linguistic organization, which is derived from the structural and functional level of the neural organization of the visual pathway, and therefore - will be the same for all languages at the structural

and functional level of their organization. In connection with this, there is a suggestion: to transform the search system according to the BSSS standards, as a generalized scheme of synthesis, analysis and presentation of a linguistic organization regardless of a language.

Let's consider modern schemes of indexing the linguistic material, which are used for searching in modern technologies.

Using triplestore

The indicated ratio covers a large amount of developments related to the knowledge and modeling of two diverse ways of modeling the linguistic activity of a person. The first component is Semantic Web, which is related to modeling the process of “understanding” the text information, while the second — the Data Base is associated with modeling the processes of accumulation and use of human cognitive potential. So, it's worth differentiating these, interconnected problems, to thoroughly analyze their features.

The concept Semantic Web was introduced by Sir Timothy Berners-Lee in the early 2000's. Conceptually, this is the development of the Internet in the direction of presentation of knowledge (again this uncertain term “knowledge”!). By this time, Internet resources present this concept by unstructured WEB3.0 xb WEB of DATA content, which is accompanied by certain metainformation. A similar representation allows to create (intelligent / semantic) information systems that are oriented towards “understanding” the content. The ideology of Semantic Web uses many formalisms fixed in standards.

The main scheme of information representation in Semantic Web is a triple, which updates the combination of subject, predicate and object. The structure of this representation is presented in Table 2.

Table 2

Subj	Predicate	Object
my apartment	has	my computer
my apartment	has	my beg
my apartment	is in	Philadelphia

The concept of triple is so generalized that with the help of an unlimited number of triples we can describe anything. Next, in Semantic Web, as well as in general, in Computer Sciences it has been agreed to share data and data model (metadata). In this case, the model / metadata are implemented in the form of the ratio of ontology / taxonomy using OWL / RDFS, and the actual data are realized in the form of RDF-triples.

The peculiarity of Semantic Web is that there is no clearly defined structure, as in the world of relational data, where the types of relations between the elements are recorded and stored in accordance with the model. The structure is quite complicated. In 2000, many different schemes of triplestores were created. Triplestore is the foundation of Semantic Web.

MIVAR approach to forming the “Semantic Web – Data Base” model

Another approach to solving the problem of “Semantic Web - Data Base” was proposed by O.O. Varlamov (Moscow), where for the presentation of text information and search implementation, there was used another triade – “mivar” as a

ratio "If ... S_1 ... , then ... S_1 ... ". This is, in practice, a model of metadata, which, according to the author's idea, should solve the problems of the relation of "Semantic Web – Data Base" in both directions:

- on one hand, it is used to create, accumulate and use the global database and the rules of their use based on adaptive discrete, mivar informative space based on the triade "object, property, relationship". It was assumed that the technology could be used both for accumulation of knowledge (Data Base formation) and for search of information (Semantic Web);
- on the other hand, the mivar technology was developed to form a logical conclusion using the ratio "If ... S_1 ... then ... S_n ...", where S_1, S_n are related situations connected by certain logical connections.

Somewhere at one of the conferences of the Seminar "Artificial Intelligence" in Katsiveli (Crimea) the author managed to hear to the report O.O. Varlamov. At that time, according to the speaker, there was accumulated a mivar base, which included several million mivaras. A positive point is the use of logical conclusion about the plurality if mivars. Such base can also be presented by the triples "If ... S_1 ... , then ... S_n ...",

However, despite the principled opportunity to present the environment through such triplets, the procedure itself turned out to be quite complicated and unusual for users of the natural language. On the other hand, real text turned into a meta-text that is not badly perceived by the computer, but people who were engaged in this unnatural transformation of the text, had a lot of problems.

BSSS-option

It's time to present the problem of searching the information under the "full text", which is based on the basic semantic and syntactic structure of the BSSS, as the main and standard structure of the presentation of text information. So, it is worth to compare the existing Semantic Web presentation schemes with the system of relations of the BSSS structure (Fig. 5).

For the system "triples – store" we have a set of standard triples "Subj – Pred – Obj", through the sequence of which (according to users) it is possible to reproduce (present in a certain way) an arbitrary text.

For the mivar approach, on the one hand, the standard scheme of the triples "Subj – Pred – Obj" is used, and for forming the logical conclusion, there is used the sequence of triples of another kind "If ... S_1 ... then ... S_n ..." is used.

However, in both cases, experts who perform the procedure of indexing the textual information under the unnatural scheme of text processing, express certain claims to customers.

Let's now look at the system of relations of the BSSS structure, which we have mastered since childhood and perceive and use in a completely natural way. The integration approach covers a system of simple binary relations:

Subj – Pred	Subj – Attr(Subj)	Attr(Subj) – Attr(Attr)
Pred – Obj1	Obj1 – Attr(Obj1)	Attr(Obj1) – Attr(Attr)
Pred – Obj2	Obj2 – Attr(Obj2)	Attr(Obj2) – Attr(Attr)
Pred – Objn	Objn – Attr(Obj2)	Attr(Objn) – Attr(Attr)

This is almost the system of relations of a separate structure of our native language, which we use daily - it is part of our language: (noun, verb, adjective,

adverb), the combination of which form the standard BSSS structure of a separate message. If to use the system of relations of the native language, which we perceive automatically, then our head will not ache. However, for the linguistic processor to automatically identify them, one, probably, should work a bit.

PROSPECTS FOR THE FORMATION OF THE NATURAL LANGUAGE “DATA BASE” ON THE PRINCIPLES OF NEUROPHYSIOLOGY

Then we will continue the study the process of forming the structural level of the “Data Base”, considering certain features of the organization of our neural network. The publication Kislenko–Sergeyev [9] presents a model of memory organization, where the cognitive element of the linguistic organization is the BSSS structure itself. There arises, of course, the question – how can a set of cognitive structures pass through a separate node of the neural network (analogue of the neuron)?

Here we come to the concept of “lexeme”, which, in practice, presents a model of a separate neuron, through which there can be many options for implementation of individual components of other BSSS. Lexema, practically defines all possible variants of usage of a wordform, which ensures the possibility of its entry to any level of the cognitive element of the linguistic message. For modern computer equipment, this is a simple procedure when we have a whole bank of lexemes for each language, as presented as the first step towards the formation of a cognitive structure.

The next step – there is “built” a corresponding framework of the BSSS structure (as an element of the cognitive web) based on the set of corresponding lexemes, through which many cognitive connections may pass. Thus, a real text is formed based on the separate of actant of lexemes, etc. (this is where the required lexemes are not in the dictionary). Continuing this procedure, we form a separate BSSS structure, through the “body” of which many connections may pass. That is, a separate lexeme can be a constructive element in creating a set of other similar structures. This is practically the procedure for the formation of a separate element of the BSSS structures, through which several other BSSS structures can pass. In general, such model represents integrational properties of the biological neuron.

To implement such functions, there was suggested to use the “marker” device (see Fig. 5); A separate BSSS structure, when reproducing a text, receives its unique marker (identifier). Thus, we have a model for forming a cognitive network of separate text, where each component of the message (except for BSSS) has its own unique number. Well, the procedure is complicated – but it can be performed automatically, freeing a person from this unskilled hard routine. This practically means that, with a limited number of lexemes (vocabulary), we will be able to reproduce virtually unlimited number of real texts. In a certain way, we are trying to implement the model of information accumulation in our neural network at the neural level. This is a virtually definite model of the neural network, where on the plurality of models of individual “neurons – lexemes” can be actualized a practically significant set of individual quants of knowledge in the form of BSSS structures, reproducing the cognitive potential of individual fields of knowledge – astronomy, mathematics, physics, etc.

Is it possible to implement such a cognitive neural network? - Basically – Yes. When taking into account the possibilities of forming and using powerful

distributed systems for the following functions: preservation of dictionaries of different languages, preservation of appropriate vocabularies of lexemes, formation of linguistic processors for the decomposition of arbitrary messages based on the BSSS structures, automatic marker formation system for each BSSS structure, a powerful translation system, where the elements of the translation are not words – but separate situation ... and so on.

What do we have in the final version? There is a large list of components for normal formation and operation of a whole cluster of Information Natural and Linguistic Technologies (INLT); a clear list of important tasks, each of which is being already solved as of date; there is only a lack in systematicity the entire chain of formation, processing and use of natural and linguistic information is not carefully researched.

Nevertheless, it is positive that these issues have already been put on the agenda, certain fields of research and design have been carefully described and investigated; young, ambitious, unbounded people join the development. It is also important that the set of lexemes of a particular area of research may be synthesized for a significant number of other quanta of knowledge, which provokes an ambitious question regarding the prospects of the possibility of automatic synthesis of new Knowledge. It is difficult, but this is probably the principle of the global artificial neural network, which is developed by the achievements in many scientific fields.

This model covers a plurality of models of individual quanta of knowledge presented at the level of the set of BSSS structures, which removes many problems, since a single quantum of knowledge is equally presented in all languages. At the same time, almost, all problems with implementation of such network are removed, if the basis of its formation is determined by the real text without any restrictions. Apparently, distributed information systems will be the basis for solving the problem of "Semantic Web – Data Base". We can present a fragment of the neural organization of the proposed knowledge base structure (Fig. 6), where a separate element of the BSSS structure is updated with an appropriate lexeme associated with other lexemes of the reproduced text by a plurality of unique markers.

The linguistic processor, which allocates separate BSSS structures (for mono or poly- predicative organizations), translates them to the lexeme level, automatically forming a unique marker for each situation. This is, basically, a model of what is being implemented in our neural network on a plurality of neurons; this is a model of a neuron through which many relations with other quanta of knowledge can pass.

The main conclusion is considered rather optimistic: "there is proposed a model of automatic formation of the cognitive potential of the community in the form of a system of integration of all accumulated text material in various fields of human activity (physics, mathematics, biology, etc.) based on the standard BSSS structure as a unified scheme of textual information presentation".

This means that we proceed to the constructive level of formation of the "cognitive potential of the society" in various areas of human intellectual activity, because we have structural capability of formation, accumulation and correction of knowledge presented at the linguistic level by a plurality of reports, research results, monographs, textbooks etc. Perhaps, the first research in this field is the

work of Toby Segaran “Programming the collective mind”, Symbol - Plus 368 p. [18] (unfortunately, I have not yet been able to get acquainted with this work). This is an interesting perspective direction of research, formation and generalization of collective achievement of humanity in different fields of activity.

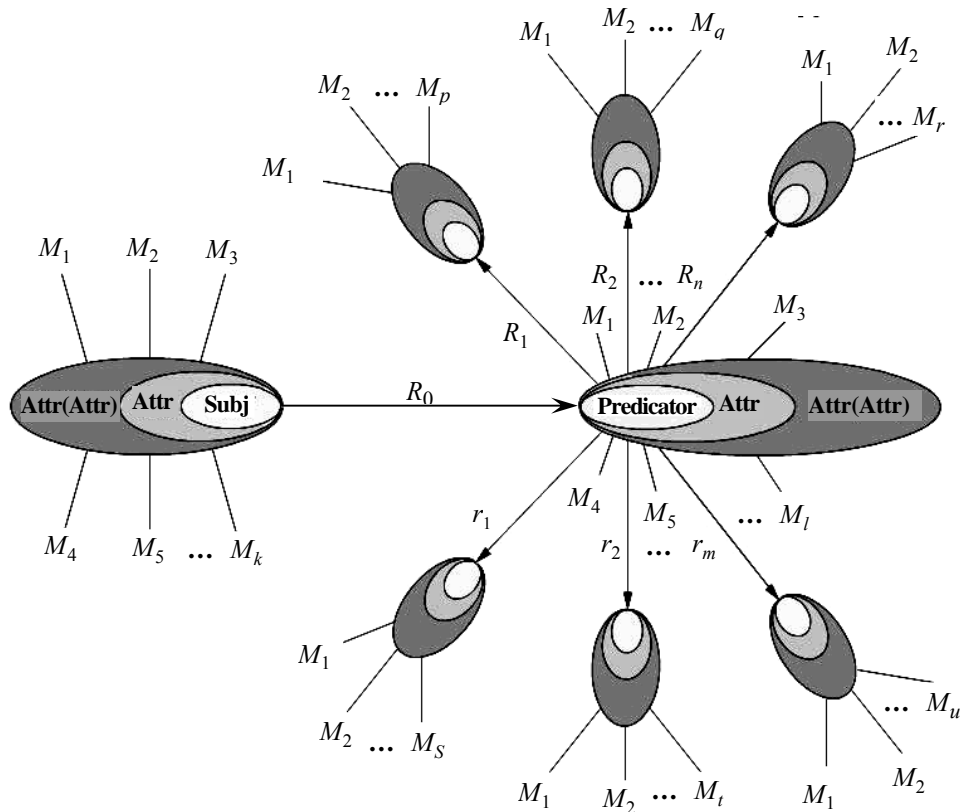


Fig. 6. The structure of the neural network fragment: Subj — BSSS subject; Attr (Subj) — subject’s attribute; Attr(Attr) — extend of the attribute; Predicator — core of BSSS structure; Attr(Pred) — predicative attribute; Attr(Attr(Pred)) — extend of the attribute of predicative

If the quantum of knowledge for the perception of a person of the environment presents a separate situation of a sensory level, and its verbalized form is the BSSS structure, then it will be a “cognitive element” of perception, accumulation and formation of the cognitive potential of the community, formed in separate areas of scientific research.

In practice, this section is devoted to the problems of formation of the “Data Base” on the principles of organization and operation of our neural network. In many ways, the proposed model functionally resembles the work of our neurosubstantium: perceives, “understands” and accumulates linguistic (text) information.

SEARCH FOR THE SEMANTIC UNIT OF LINGUISTIC ACTIVITY

Basically, the previous section gave us an answer to this question. However, it is important to analyze the way of solving this issue. The presumption of formulation of such a question is determined by the rapid (powerful) development of computer technologies and the use of their capabilities, even for the simulation

of the most complex intellectual functions of a person. However, before transferring individual functions of intellectual activity to a computer, it is necessary: to clearly understand the statement of the problem and the question, the main principles of the linguistic organization, the scheme of language communication, reproduction of the environment by the means of language, "understand the message", etc., formalize these solutions for implementation at the computer level, or distribution systems.

1. The first stage has almost been performed by Sir Timothy Berners-Lee – he clearly set the problem of studying the linguistic activity as an acronym "SEMANTIC WEB – DATA BASE", which affects the main principles of the linguistic organization.

2. The second stage, initiated by Sir Timothy Berners-Lee, in the form of computer realization of this problem by using simplified speech message presentation models only through a plurality of triples (Subj, Pred, Obj); O.O. Varlamov has complicated the message presentation scheme by simultaneous use of the triples (Subj, Pred, Obj) and the logical functions "if .. S_1 .. then .. S_n ", which connect separate situations in the form of messages of a monopredicative level.

3. The third stage (we can assume) is presented by the author's work ("Back to basics of speech activity") [8], it forms a new platform for studying the language activity, by introducing the concept of the Basic Semantic and Syntactic Structure (BSSS), which is derived from the structural and functional level of neural organization of the visual pathway and which will be the same for all humanity. That is, for the unit of perception, processing and "understanding" of language material it is necessary to take a separate BSSS, which simultaneously becomes a semantic unit of formation and presentation of an arbitrary text. The BSSS structure was presented at Fig. 5.

Of course, the question arises as to how complex is this presentation of natural language for a computer comparing with previous versions - the arguments here are as follows:

- 1) BSSS is a derivative from the structural and functional level of the neural organization of the visual pathway - hence, it will be the same for all languages;
- 2) BSSS is clearly and unambiguously formalized at the structural level;
- 3) it is completely conscious and correctly perceived by a person;
- 4) it appears as a structural unit for formation of an arbitrary message;
- 5) if the BSSS structure can be clearly and unambiguously presented at the linguistic level, then, apparently, in the same formalized way it can be translated to the computer level;
- 6) perhaps the main thing: it is possible to form a computer technology for processing PM texts in an automatic mode without a compulsory scheme for the formation of metatext for the computer.

FINAL PART

Only in the process of working with the given topic (in fact, during the last final stage), the author himself realized the clear semantic load of the correlation between notions "Semantic Web – Data Base".

"Semantic Web" is a semantic matrix (standard relationship system), which we constantly use at the stages of analysis or synthesis of speech messages. This

is the level of our linguistic competence regarding the structural and functional levels of linguistic organization that provide us with and guarantee adequate character of implementation of the communication process in the modes of synthesis / analysis of speech communication. Our linguistic competence is formed, as they say “with mother’s milk” and the person / child masters the linguistic system at about 2,5-3 years, and confidently uses it at about 10-12 years.

There has been created (synthesized) nothing better than the “matrix of linguistic communication in the form of basic semantic and syntactic structure” by the nature, since this scheme is derived from the structural and functional level of the neural organization of the visual pathway; so, it is standard – the same for all humanity. This is a generalized scheme of how a person perceives all available information on the sensory or linguistic level, and the ability to translate it into the language level in the form of a messages of the mono/poly- predicative level.

Data Base, in this case, is a generalized scheme of accumulation, storage and presentation of the accumulated product by our linguistic activity for perpetual storage. And all attempt to change, transform, improve this communication scheme are useless. The only possible scheme of reproduction of the human cognitive potential is the BSSS structure. We should work for the computer to be able to understand this structural organization in the form of BSSS sequence.

Data Base is the big cognitive potential accumulated by humanity throughout the development of civilization, stored in papyrus, manuscripts, books, audio / video records. That is, all efforts should be directed for the computers, networks, distributed systems to store and generalize, but not lose the main values of our civilization.

Well, after carefully analyzing the structural level of the linguistic organization, we can come up with a more reasoned analysis of the individual language system (see Fig. 1), the components of which are the interconnected powers of the linguistic processor (LP) and the basic knowledge (BK). The first component defines the structural and functional levels of organization of the language channel as the basic scheme of perception and accumulation of the cognitive potential of humanity at the linguistic level, while the second – the BK defines the collective cognitive potential of a person, which stores all information both at the figurative level (obtained through the entire sensor system), and at the language level received through the perception of information by visual or audio channels. The latter, upon the request of the recipient, can always be translated to the language level.

The present study considers the functioning of LP and BK exclusively at the linguistic level. It is appropriate to emphasize the significant assistance of post-graduate students D.S. Serheiev and A. S. Khimicha in developing these issues. This is basically a team of like-minded people who have fruitfully worked on this ambitious program – modeling the speech behavior of a person in the form of an interconnected LP-BK system. The author expresses his sincere gratitude for cooperation in developing this area of research.

If Semantic Web is responsible for the process of perceiving and “understanding” the text, which, according to the integration approach, is based on a plurality of standard structures, then we can assume that the cognitive element of storage, and hence – the understanding and using the accumulated knowledge,

will be the basic semantic and syntactic structure itself. We should also note that the whole cognitive potential of a person is formed from a plurality of situations not only of symbolic, but also of figurative levels, preserving mother’s voice (with all its shades), appearance, character, all her attributes at the neural level.

The given work reproduces the results of the infinite stages of work on the declared “eternal” topic, and I should note the actual, or virtual attention and support that I constantly felt due to certain individuals.

In this way, I want to note the very pleasant audience and the spirit of communication at the “Artificial Intelligence” seminars, initiated by A.I. Shevchenko, the main priorities of which were: freedom of thought, freedom of imagination, goodwill and support for beginners. The last significant work of the author, “Personalized cognitive feedback, as a powerful lever of progressive acceleration of the development of society” was published due to support of Anatolii Ivanovych in the journal “Artificial Intelligence”, 2018, No. 1 [10].

Meetings and communication with the member of the academy O.O. Kryshtal were very productive. I would like to thank for acquaintance with his interesting treatises, covering the philosophical and linguistic problems of today, for his support to my search on the neurophysiological principles of linguistic activity; for submitting the article “Neurophysiological grounds of the structural organization of linguistic material”, which appeared at reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, Edition 11, 2007 [6], and which further inspired the author for the monograph “From thought to knowledge” (neurophysiological grounds), publishing house “Ukrainian Chronicle”, 2008 [7].

It is important to emphasize the importance, urgency and timeliness of creation of the BICA (Biologically Inspired Cognitive Architectures) magazine, which is focused on studying the cognitive processes occurring in our neural network. For the first time we met (as I recall) with O.V. Samsonovich in Katsiveli at the seminar “Artificial Intelligence”; I think that from that day, he had an idea about creating the BICA magazine.

I am very grateful for the support and presentation of my research in this magazine: presentation of the research direction (BICA-13, Kyiv, Grandhotel), publication of the work “To the origins of speech activity” (BICA-14) [8], support of this research from my graduate students Yuri Kyslenko, Danylo Sergeiev – “Cognitive architecture of speech activity and modeling thereof” (BICA-15) [9].

In this context, one should note that when the main vector of social development (according to B.F. Porshnev) is a “progressive acceleration process”, we can predict that “the increase in the authority and the ranking of research of this direction will also occur under the scheme with a progressive acceleration”.

The last work, “Personalized cognitive feedback, as a powerful lever of progressive acceleration of the development of society” [10], confirms that only a living neurosubstance of a single individual is capable of synthesizing new information that was absent in the database. Whether it possible to perform it by IT technology in future, is a rhetorical question. But even this is very useful for improving the cognitive potential of the society. All knowledge that can be synthesized by living neurosubstances of the society and translated into the language level, may potentially become an achievement of the artificial intelligence, preserved and transmitted for future generations.

In this context, one should mention the words of the famous Kyiv citizen concerning the influence of the individual on the “progressive acceleration of the development of society”, written on the walls of his Alma Mater – the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute: “

The work of an individual remains the spark that drives the society even more than collective work” (Igor Sikorsky).

LITERATURE

1. *Anderson Janna*. The Fate of the Semantic Web / Janna Anderson, Lee Raine. — Pew Research Center’s Internet & American Life Project. — May 4, 2010.
2. *Щерба Л.В.* О трояком аспекте языковых явлений и эксперименте в языкознании. Языковая система и речевая деятельность / Л.В. Щерба. — М., 1974.
3. *Кисленко Ю.І.* Архітектура мови (лінгвістичне забезпечення інтелектуальних інтегрованих систем): навч. посібник / Ю.І. Кисленко. — К.: Віпол, 1998. — 343 с.
4. *Зеки Семір.* Зрительный образ в сознании и мозге: сборник трудов / Семір Зеки // В мире науки. — № 11–12. — М.: Мир, 1992. — С. 33–41.
5. *Хокинс Дж.* Об интеллекте / Дж. Хокинс, С. Блейкли. — М.: Издат. дом «Вильямс», 2007. — 240 с.
6. *Кисленко Ю.І.* Нейрофізіологічне підґрунтя структурної організації мовного матеріалу (Представлено академіком НАН України О.О. Кришталь) / Ю.І. Кисленко // Доповіді НАНУ. — 2007. — №11. — С. 158–164.
7. *Кисленко Ю.* От мысли к знанию (нейрофизиологические основания): моногр. / Ю. Кисленко. — К.: Издательство «Український літопис», 2008. — 102 с.
8. *Kislenko Y.I.* Back to basics of speech activity / Y.I. Kislenko // *Biologically Inspired Cognitive Architectures*. — 2014. — Vol. 8. — P.46–68.
9. *Kyslenko Yuri.* Cognitive architecture of speech activity and modeling thereof / Y.I. Kislenko // *Biologically Inspired Cognitive Architectures*. — 2015. — Vol. 12. — P.134–143.
10. *Kislenko Y.I.* Personified cognitive feedback as a powerful instrument for progressive acceleration of social evolution / Y.I. Kislenko // *Штучний інтелект*. — 2018. — № 1. — P.63–95.
11. *Port-Royal Grammar*. — 1966.
12. *Ф. де Соссюр.* Курс общей лингвистики. — М., 1963.
13. *Пиотровский Р.Г.* Лингвистические уроки машинного перевода / Р.Г. Пиотровский // *Вопросы языкознания*. — 1985. — № 4.
14. *Астахова Л.И.* Предложение и его членение: прагматика, семантика, синтаксис / Астахова Л.И. — Днепропетровский ГУ, 1992.
15. *Грамматика современного русского литературного языка*. — М.: Наука, 1970.
16. *Городецкий Б.Ю.* Компьютерная лингвистика: моделирование языкового общения / Пер. с англ. / сост., ред. и вступ. ст. Б.Ю. Городецкого // Серия «Новое в зарубежной лингвистике». — Вып 24. — М.: Прогресс, 1989. — 432 с.
17. *Гвоздев А.Н.* Формирование у ребенка грамматического строя русского языка / А.Н. Гвоздев. — М.: Изд-во АПН, 1949.
18. *Кисленко Ю.І.* Структурно-функціональний рівень організації лінгвістичного процесора / Ю.І. Кисленко, А.В. Хіміч // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2018. — № 1. — С. 19–35.
19. *Ибука Масару.* После трех уже поздно / Масару Ибука. — М.: Знание, 2000. — 192 с.
20. *Кисленко Ю.І.* Проблемы и перспективы развития поисковых систем / Ю.І. Кисленко, А.В. Терентьев // *Искусственный интеллект*. — 2011. — № 3.
21. *Сегаран Тоби.* Программируем коллективный разум / Тоби Сегаран; пер. с англ. — Символ-Плюс. — 368 с.

Received 24.03.2019

From the Editorial Board: the article corresponds completely to submitted manuscript.

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ,
ВИСОКОПРОДУКТИВНІ КОМП'ЮТЕРНІ
СИСТЕМИ

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES,
HIGH-EFFICIENCY COMPUTER SYSTEMS

УДК 004.942:537.525

Алгоритм расчета фокальных параметров профильных электронных пучков, формируемых газоразрядными пушками / Мельник И.В., Починок А.В. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 2. — С. 7–17.

Рассмотрен алгоритм расчета фокусного расстояния полого конического электронного пучка, формируемого электронными пушками высоковольтного тлеющего разряда, а также расчета диаметра и толщины фокального кольца такого пучка. Предложенный алгоритм основан на модели свободного дрейфа электронов в анодной плазме и сформирован на основе законов электронной оптики с использованием методов дискретной математики и минимаксного анализа. Полученные результаты моделирования позволили установить важные закономерности, характеризующие зависимость фокальных параметров полого конического электронного пучка, формируемого электронными пушками высоковольтного тлеющего разряда, от конструктивных параметров электродной системы электронной пушки. Рис.: 5. Библиогр.: 21 назв.

UDC 004.942:537.525

Algorithm of calculation of focal parameters of profile electron beams, formed by the gas-discharge electron guns / Melnyk I.V., Pochynok A.V. // System Research and Information Technologies. — 2019. — № 2. — P. 7–17.

An algorithm of calculation of the focal distance of a hollow conical electron beam, formed by high voltage glow discharge electron guns, as well as the calculation of the diameter and thickness of a focal ring of such a beam, are considered in the article. The proposed algorithm is based on the model of free moving of electrons in the anode plasma and formed on the base of the laws of electron optics with using the methods of discrete mathematics and minimax analysis. Obtained simulation results allow to find the important regularities, which characterized the dependencies of focal parameters of a hollow conical electron beam, formed by the high voltage glow discharge electron guns, on the constructive parameters of electrodes' system of the electron gun. Figs.: 5. Refs: 21 titles.

УДК 519.004.942

Емпіричне дослідження впливу гравітаційного поля Місяця на глобальну температуру Землі / Мацукі Й., Бідюк П.І. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 2. — С. 18–27.

У дослідженні вивчається можливість гравітаційної хвилі Місяця, яка може впливати на глобальну температуру Землі із застосуванням математичного методу емпіричного аналізу з урахуванням даних глобальної температури, концентрації вуглекислого газу та відстані між Місяцем та Землею. Проведено регресійний аналіз глобальної температури стосовно гравітаційного поля Місяця, узятих із загальної теорії відносності, з теорії тяжіння Ньютона та вуглекислоти. Результат свідчить про вплив гравітаційного поля Ньютона на глобальну температуру Землі; вплив гравітаційної хвилі Місяця є незначним. Однак виявлено можливість впливу гравітаційної хвилі на гравітаційне поле Місяця у чотиривимірному неевклідовому просторі згідно з аналізом мультиколінеарності двох факторів, узятих з теорії Ньютона та загальної теорії відносності. Рис.: 1. Табл.: 3. Бібліогр.: 6 назв.

УДК 519.004.942

Эмпирическое исследование влияния гравитационного поля Луны на глобальную температуру Земли / Мацуки Й., Бидюк П.И. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 2. — С. 18–27.

В исследовании изучается возможность гравитационной волны Луны, которая может влиять на глобальную температуру Земли с применением математического метода эмпирического анализа с учетом данных глобальной температуры, глобального углекислого газа и расстояния между Луной и Землей. Проведен регрессионный анализ глобальной температуры относительно гравитационного поля Луны, взятых из общей теории относительности, из теории тяготения Ньютона и углекислоты. Результат свидетельствует о влиянии гравитационного поля Ньютона на глобальную температуру Земли; влияние гравитационной волны Луны незначительно. Однако обнаружена возможность влияния гравитационной волны на гравитационное поле Луны в четырехмерном неевклидовом пространстве согласно анализу мультиколлинеарности двух факторов, взятых из теории Ньютона и общей теории относительности. Рис.: 1. Табл.: 3. Библиогр: 6 назв.

УДК 004.855.5

Методи поліпшення точності діагностики деменції за допомогою скорочення розмірності ознак / Надеран М., Зайченко Ю.П. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 2. — С. 25–30.

Розглянуто проблему вибору набору ознак для діагностики деменції. Запропоновано набір ознак для поставленої проблеми й оцінено значущість кожної з них. Розроблено та досліджено алгоритм на основі ансамблю дерев рішень і методу опорних векторів для діагностики деменції. Експериментальні дослідження проведено на основі бази даних, поданої в Kaggle. Виконано порівняльний аналіз отриманих результатів з результатами наявних праць. Проаналізовано основні відмітні ознаки деменції Альцгеймера, застосовуваних методів лікування деменції Альцгеймера на ранній стадії, які можуть допомогти уникнути негативних наслідків, зумовлених прогресуванням захворювання. Метою роботи є підвищення точності діагностики деменції. Рис.: 1. Табл. 4. Бібліогр.: 7 назв.

УДК 004.855.5

Методы улучшения точности диагностики деменции при помощи сокращения размерности признаков / Надеран М., Зайченко Ю.П. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 2. — С. 25–30.

Рассмотрена проблема выбора набора признаков для диагностики деменции. Предложен набор признаков для поставленной проблемы и оценена важность каждого из них. Разработан и исследован алгоритм на основе ансамбля деревьев решений и метода опорных векторов для диагностики деменции. Экспериментальные исследования проведены на основе базы данных, представленной в Kaggle. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов с результатами существующих работ. Проанализированы основные отличительные признаки деменции Альцгеймера, применяемых методов лечения деменции Альцгеймера на ранней стадии, которые помогут избежать негативных последствий, связанных с прогрессированием заболевания. Целью работы является повышение точности диагностики деменции. Рис.: 1. Табл. 4. Библиогр.: 7 назв.

УДК 004.942

Оценивание кредитоспособности заемщиков кредитов методами интеллектуального анализа данных / Гуськова В.Г., Билюк П.И. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 2. — С. 31–48.

Рассмотрена актуальная задача оценки кредитоспособности на основе экспертного и скорингового подходов. Выполнен анализ предметной области и проанализированы основные методы математического моделирования и оценки кредитных рисков, предложены математические модели для анализа кредитных рисков индивидуальных заемщиков на основе альтернативных методов, разработаны математические модели для анализа кредитных рисков индивидуальных заемщиков на основе деревьев решений, логистической регрессии, сетей Байеса и нечеткой логики. Установлено, что модель на основе нечеткой логики для решения задачи определения вероятности дефолта для кредитного заемщика является более точной, на что указывают посчитанные точности моделей. Это обусловлено возможностью использования метода нечеткой логики с нечетким выводом Мамдани точнее устанавливать причинно-следственные связи между характеристиками-факторами задачи и их влиянием на исходную переменную. Рис.: 6. Табл.: 6. Библиогр.: 19 назв.

UDC 004.942

Evaluating the borrower's creditworthiness of loans using data mining methods / Guskova V.G., Bidiuk P.I. // System Research and Information Technologies. — 2019. — № 2. — P. 31–48.

The actual task of creditworthiness based on the expert and scoring approach was considered. The analysis of the subject area was performed and the main methods of mathematical modeling and a credit risk assessment were analyzed; mathematical models for analyzing the credit risks of individual borrowers based on alternative methods were proposed; mathematical models have been developed for analyzing the credit risks of individual borrowers based on decision trees, logistic regression, Bayesian networks, and fuzzy logic. It has been found that the model based on fuzzy logic for solving the problem of determining the probability of default for a loan borrower is more accurate, this is indicated by the calculated accuracy of models. This is due to the possibility of using the fuzzy logic method with fuzzy Mamdani's conclusion to precisely establish the cause-and-effect relationships between the characteristics-factors of the task and their influence on the initial variable. Figs.: 6. Tables: 6. Refs: 19 titles.

УДК 681.3

Оценка контролирующих и корректирующих свойств референтного словаря системы проверки и исправления орфографии / Литвинов В.А., Майстренко С.Я., Хурцилава К.В., Костенко С.В. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 2. — С. 49–64.

Рассмотрены модели оценивания свойств референтного орфографического словаря (РОС) системы проверки и исправления орфографии. Контролирующие свойства РОС определяются вероятностью необнаружения типовой ошибки и вероятностью ложного сигнала об ошибке. Поставлена задача оптимизации РОС по Парето, предложен пошаговый алгоритм ее решения, приведены данные экспериментальной оценки результативности алгоритма для выбранных словарей русского и украинского языков. Корректирующие свойства определяются вероятностями правильной и ложной коррекции типовых ошибок. Предложены модели оценки, приведены результаты моделирования для выбранных словарей. Показано, что РОС,

оптимизированный по контролирующим свойствам, обладает и лучшими корректирующими свойствами. Полученные результаты могут быть положены в основу инструмента сравнительной оценки, выбора и улучшения потенциальных свойств конкретного РОС для заданной предметной области. Рис.: 5. Табл.: 5. Библиогр.: 14 назв.

UDC 681.3

Evaluation of the detection and correction properties of the reference dictionary of the system for checking and correcting orthography / Lytvynov V.A., Maystrenko S.Ya., Khurtsylava K.V., Kostenko S.V. // System Research and Information Technologies. — 2019. — № 2. — P. 49–64.

The models for evaluating the properties of the reference orthographic dictionary (ROD) of the spelling check and correction system are considered. RODs' detecting properties are determined by the probability of not detecting the typical error and the probability of a false error notification. The task is formulated to optimize a ROD according to Pareto, a step by step algorithm is proposed for solving it, the results of the experimental evaluation of the algorithm's effectiveness are given. RODs' correcting properties are determined by the probabilities of the correct and erroneous correction of the typical errors. Models of their estimation are offered and simulation results are given for the selected dictionaries. It has been shown that ROD optimized for detecting properties also has better correcting properties. In general, the obtained results can be used as the basis for a tool for the comparative assessment, selection and improvement of the potential properties of a specific ROD for a given subject matter. Figs.: 5. Tables: 5. Refs: 14 titles.

УДК 519.86

Алгоритм определения состояний равновесия экономической системы с монополистами и разными типами поведения потребителей / Махорт А.Ф. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 2. — С. 65–82.

Применена модель равновесия вальрасового типа применена к описанию реакции экономической системы на влияние выбранных факторов. Исследование состоит в адаптации задачи об экономическом равновесии в случае экономической системы с разными типами поведения потребителей для использования более простых методов решения, относящихся к задаче с исключительно ненасыщаемыми потребителями. Обоснована возможность применения итерационных методов к решению задачи об экономическом равновесии. Указаны условия на заданные характеристики модели, которые обеспечивают сходимость итерационных методов. Приведенный алгоритм определения равновесных характеристик позволит выявить условия достижения состояний равновесия с заданными свойствами. Библиогр.: 7 назв.

UDC 519.86

Algorithms for determining equilibrium states of an economy under the presence of monopolies and consumers with different behaviours / Makhort A.P. // System Research and Information Technologies. — 2019. — № 2. — P. 65–82.

The equilibrium model of Walrassian type is applied to a description of a reaction of an economy system on an influence of selected factors. The research involves an adaptation of an equilibrium problem in case of an economy with different behaviours of consumers to use simpler solving methods that correspond to the case of exclusively insatiable consumers in the economy. An application of iterative methods for solving the economy equilibrium problem is justified. The conditions on the specified model characteristics that lead to a convergence of the iterative methods are presented. The proposed algorithm that determines the equilibrium characteristics allows to determine the conditions for reaching equilibrium states with specified properties. Refs: 7 titles.

УДК 602.1:519.85:53.082.9:616-07

Экспоненциальная оценка рекуррентной нейронной сети с дискретным запаздыванием / Марценюк В.П., Сверстюк А.С. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 2. — С. 83–93.

Разработан и применен метод расчета скорости экспоненциального затухания для модели рекуррентной нейронной сети на основе дифференциальных уравнений с дискретным запаздыванием. Экспоненциальная оценка получена на основе разностного неравенства для функционала Ляпунова. Рассмотрен пример экспоненциального оценивания для модели рекуррентной нейронной сети с тремя нейронами. Рис.: 1. Библиогр.: 23 назв.

UDC 602.1:519.85:53.082.9:616-07

An exponential evaluation for recurrent neural network with discrete delays / Martsenyuk V.P., Sverstiuk A.S. // System Research and Information Technologies. — 2019. — № 2. — P. 83–93.

The purpose of this study is to develop and apply a method for calculating the exponential fade rate for a model of a recurrent neural network based on discrete latency differential equations. An exponential estimate is obtained on the basis of the difference inequality for the Lyapunov function. An example of the exponential estimation for a model of a recurrent neural network with three neurons is presented. Figs.: 1. Refs: 23 titles.

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ, ОПТИМАЛЬНЕ
УПРАВЛІННЯ І ТЕОРІЯ ІГОР

METHODS OF OPTIMIZATION, OPTIMUM
CONTROL AND THEORY OF GAMES

УДК 517.9

Приближенное минимаксное оценивание функционалов от решения параболической задачи с быстроколеблющимися коэффициентами при нелинейных наблюдениях / Капустян Е.А., Наконечный А.Г. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 2. — С. 94–104.

Рассмотрена задача минимаксного оценивания функционалов от решений параболической задачи с быстроколеблющимися коэффициентами. Измеряется не сама величина, описывающая исследуемое явление, а наблюдается некоторое значение от решения с оператором, который определяет способ измерения. Проблема осложняется не только из-за быстроколеблющихся коэффициентов и неизвестных функций, которые входят в уравнения и начальные условия, а еще и потому, что наблюдение является нелинейным (имеет оператор типа суперпозиции). При значении малого параметра существование решения исходной задачи устанавливается при помощи традиционного минимаксного подхода. Переход к задаче с усредненными параметрами позволяет освободиться от нелинейности в наблюдении. Основным результатом работы является доказательство того, что минимаксная оценка задачи с усредненными коэффициентами является приближенной минимаксной оценкой исходной задачи. Библиогр.: 12 назв.

UDC 517.9

Approximate minimax estimation of functional from the solution of parabolic boundary-value problem with rapidly oscillating coefficients under nonlinear observations / Kapustian O.A., Nakonechnyi O.G. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 2. — P. 94–104.

The article deals with the problem of the minimax estimation of a functional from the solution of a parabolic boundary-value problem with rapidly oscillating coefficients. We measure not the value that describes the investigated process, but some value from the solution with an operator, which determines the way of measurement. The problem is complicated not only due to the rapidly fluctuating coefficients and unknown functions

that are included in the equation and initial conditions, but also due to the observation being nonlinear (it has a superposition type operator). At a value of the small parameter, the solution existence for the original problem is established using the traditional minimax approach. The transition to a problem with averaged parameters allows us to get rid of nonlinearity in the observation. The main result of the work is to prove that the minimax estimate of the problem with averaged coefficients is an approximate minimax estimate of the original problem. Refs: 12 titles.

МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ, МОДЕЛІ, ПРОБЛЕМИ І
ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНИХ
СИСТЕМ

MATHEMATICAL METHODS, MODELS,
PROBLEMS AND TECHNOLOGIES FOR
COMPLEX SYSTEMS RESEARCH

УДК 519.6+625.1

Сетевые структуры и системы: IV. Параллельная обработка результатов непрерывного мониторинга / Полищук А.Д., Яджак М.С. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 2. — С. 105–114.

Формализовано процедуру интерактивного оценивания объектов сложных иерархически-сетевых систем. Для эффективной реализации этой процедуры на многоядерных компьютерах и кластерах предложены соответствующие алгоритмические конструкции, определяющие перспективы распараллеливания и учитывающие ограниченность возможностей вычислительных ресурсов. Приведены оценки сложности и ускорения параллельных вычислений, подтверждающие высокую эффективность применения предложенных конструкций. Полученные результаты могут быть использованы для оценивания в режиме реального времени с применением современных программных средств многих сложных систем, состояние и поведение которых непрерывно изменяются во времени, в частности транспортных систем, систем энерго- и жизнеобеспечения, банковских и торговых сетей, экосистем отдельных регионов и т. п. Библиогр.: 20 назв.

UDC 519.6+625.1

Network structures and systems: IV. Parallel processing of continuous monitoring results / Polishchuk O.D., Yadzhak M.S. // System Research and Information Technologies. — 2019. — № 2. — P. 105–114.

The procedure for interactive evaluation of complex hierarchical network system components is formalized. Appropriate algorithmic constructions are proposed for an effective implementation of this procedure on multi-core computers and clusters. These constructions determine the prospect of parallelization and take into account the limited possibilities of computing resources. Estimates of complexity and speed up of parallel computations, which confirm the high efficiency of proposed constructions, are given. The obtained results can be used by means of modern software for real-time evaluation of many complex systems, the state and behavior of which constantly change over time, in particular transport systems, energy and life support systems, banking and trade networks, ecosystems of separate regions, etc. Refs: 20 titles.

НОВІ МЕТОДИ В СИСТЕМНОМУ АНАЛІЗІ,
ІНФОРМАТИЦІ ТА ТЕОРІЇ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

NEW METHODS IN SYSTEM ANALYSIS, COMPUTER
SCIENCE AND THEORY OF DECISION MAKING

УДК 004. 81

На шляху до вирішення проблеми «Semantic Web – Data Base» / Кисленко Ю.І. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 2. — С. 115–140.

Проаналізовано сучасний стан вирішення проблеми «Semantic Web – Data Base». Аналіз «Semantic Web» виконано з позицій інтеграційного підходу, що охоплює результати досліджень у сферах нейрофізіології, психології, філософії; це дозволяє формально визначити квант знань як окрему ситуацію зорового рівня та чіт-

ко окреслити схему її вербалізації у вигляді базової семантико-синтаксичної структури. Головний підсумок інтеграційного підходу репрезентовано тезою: «Структурний рівень мовної організації є похідним від структурно-функціонального рівня нейроорганізації зорового тракту». Звідси випливає продуктивний висновок: структурно-функціональний рівень мовної організації буде однаковим для всіх мов. Складова «Data Base» охоплює (повинна охоплювати) весь суспільний когнітивний потенціал знань, презентований множиною нагромаджених текстів. Структурний рівень організації бази знань презентовано невеликим фрагментом нейронної мережі, який відтворює окрему ситуацію текстової інформації, але який через множину окремих лексем її складових (з відповідними посиланнями на інші структурні утворення) формує когнітивну нейромережу певної галузі знань. Рис.: 6. Табл.: 2. Бібліогр.: 21 назв.

УДК 004. 81

На пути к решению проблемы «Semantic Web – Data Base» / Кисленко Ю.И. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 2. — С. 115–140.

Проанализировано современное состояние решения проблемы «Semantic Web – Data Base». Анализ «Semantic Web» выполнен с позиций интеграционного подхода, охватывающего результаты исследований в сферах нейрофизиологии, психологии, философии; это позволяет формально определить квант знаний как отдельную ситуацию зрительного уровня и четко очертить схему ее вербализации в виде базовой семантико-синтаксической структуры. Главный итог интеграционного подхода презентован тезисом: «Структурный уровень организации языка является производным от структурно-функционального уровня нейроорганизации зрительного тракта». Отсюда следует важный вывод: структурно-функциональный уровень языковой организации будет одинаковым для всех языков. Составляющая «Data Base» охватывает (должна охватывать) весь общественный когнитивный потенциал знаний, представленный множеством накопленных текстов. Структурный уровень организации базы знаний презентованный небольшим фрагментом нейронной сети, который воспроизводит отдельную ситуацию текстовой информации, но который через множество отдельных лексем (с соответствующими ссылками на другие структурные образования) формирует практически когнитивную нейросеть определенной области знаний. Рис.: 6. Табл.: 2. Библиогр.: 21 назв.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Бідюк Петро Іванович,

професор, доктор технічних наук, професор кафедри математичних методів системного аналізу ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Гуськова Віра Геннадіївна,

асистент кафедри математичних методів системного аналізу ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Зайченко Юрій Петрович,

професор, доктор технічних наук, професор ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Капустян Олена Анатоліївна,

старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук, заступник декана з наукової та міжнародної роботи факультету комп'ютерних наук та кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Україна, Київ

Кисленко Юрій Іванович,

доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної кібернетики КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Костенко Святослав Володимирович,

аспірант кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій, Україна, Київ

Литвинов Валерій Андроникович,

професор, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту проблем математичних машин і систем НАН України, Київ

Майстренко Світлана Яківна,

старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту проблем математичних машин і систем НАН України, Київ

Марценюк Василь Петрович,

професор, доктор технічних наук, професор кафедри інформатики та автоматички Університету в Бельско-Бялій, Польща, м. Бельско-Бяла

Махорт Андрій Пилипович,

старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник лабораторії математичного моделювання відділу синергетики Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, Київ

Мацукі Йошіо,

доктор технічних наук, завідувач лабораторії економетрики і прогнозування Світового центру даних з геоінформатики і сталого розвитку КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Мельник Ігор Віталійович,

професор, доктор технічних наук, професор кафедри електронних приладів та пристроїв факультету електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Надеран Марьям,

доктор філософії, студентка ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Наконечний Олександр Григорович,

професор, доктор фізико-математичних наук, завідувач кафедри системного аналізу та теорії прийняття рішень факультету комп'ютерних наук та кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Україна, Київ

Поліщук Олександр Дмитрович,

старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник лабораторії моделювання та оптимізації складних систем Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, Львів

Починок Аліна Володимирівна,

кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних систем і технологій Навчально-наукового інституту інформаційних технологій та менеджменту Університету державної фіскальної служби України, Київ

Сверстюк Андрій Степанович,

доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри медичної інформатики Тернопільського державного медичного університету імені І.Я. Горбачевського, Україна, Тернопіль

Хурцилава Костянтин Вікторович,

молодший науковий співробітник Інституту проблем математичних машин і систем НАН України, Київ

Яджак Михайло Степанович,

старший науковий співробітник, доктор фізико-математичних наук, завідувач лабораторії моделювання та оптимізації складних систем Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, Львів

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

для журналу

«СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ»

1. Стаття з анотаціями та іншою інформацією подається з використанням веб-сайту журналу (<http://journal.iasa.kpi.ua>).

Назва статті, прізвище та ініціали автора (авторів), а також анотація (від 700 до 1000 символів) подаються українською, російською та англійською мовами.

2. Текст статті набирається в редакторі Microsoft Word 2003 шрифтом Times New Roman із вирівнюванням по ширині.

3. На початку статті вказується індекс УДК, назва статті, ініціали та прізвище автора (авторів).

4. Список літератури подається в порядку посилання після тексту статті. Якщо є можливість, у списку вказується DOI кожного посилання.

5. Набір формул здійснюється в редакторі формул «Equations». Для змінних з індексами та без індексів застосовуються дужки клавіатурного набору, наприклад (x_i^j, y_k^l) .

6. Символи у формулах (крім особливих випадків) набираються курсивом. Допускаються прямі символи, але їх треба розмітити або включити до списку спеціальних символів.

7. Нумерувати необхідно тільки ті формули (винесені на середину рядків), на які є посилання в тексті.

8. Таблиці та рисунки виконуються в одному стилі, їм надається номер, назва і розташовуються після посилань у тексті. Не слід повторювати в статті підписи до рисунків та таблиць.

9. Стаття разом із таблицями, рисунками і списком літератури має бути не більше 15 сторінок. Оглядові статті обсягом до 25 сторінок приймаються за домовленістю із редколегією.

10. До рукопису додаються відомості про кожного автора: країна, місто, місце роботи, службова посада, вчений ступінь та звання, сфера наукових досліджень, контактні телефони, адреса та e-mail.