

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

№ 1

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:

• **Теоретичні та прикладні проблеми і методи системного аналізу**

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

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

• **Проблемно і функціонально орієнтовані комп'ютерні системи та мережі**

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

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

№ 1

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. SAKALAUŠKAS, 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:

• **Theoretical and applied problems and methods of system analysis**

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

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

• **Problem- and function-oriented computer systems and networks**

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

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 25.03.2019. 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

КПШ ім. Ігоря Сікорського, Видавництво «Політехніка»

вул. Політехнічна, 14, корп. 15, м. Київ, 03056. Тел. (044) 204-81-78

Наклад 127 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

1 • 2019

ЗМІСТ

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ І МЕТОДИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

Згуровський М.З., Перестюк М.М. Моделювання ліній розлому цивілізацій на початку XXI століття в контексті їх фундаментальних відмінностей 7

Данилов В.Я., Гуськова В.Г., Бідюк П.І., Жиров О.Л. Система підтримання прийняття рішень для прогнозування фінансових процесів на основі принципів системного аналізу 20

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ВИСОКОПРОДУКТИВНІ КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ

Brajon Jordan, Makarenko Alexander. Game of life with non-regular space with boundaries: glider case 37

Мельник І.В., Починок А.В. Система конструктивних геометричних параметрів моделі електронних гармат високовольтного тліючого розряду, які формують профільні електронні пучки 50

Луцьо В.В., Сільвестров А.М. Математична модель двомашинного асинхронного двигуна з рухомим індуктором 66

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

Панкратова Н.Д., Хорошун Л.П., Яхин С.Л. Построение модели динамики производственно-рыночных процессов в двухсекторной макроэкономике 75

Zaychenko Yuriy, Zaychenko Helen. Fuzzy GMDH and its application to forecasting financial processes 91

Запорожко І.А., Борозенець Д.А., Зубчук В.І. Оцінювання адаптивних резервів людини за даними пульсометрії 110

ПРОБЛЕМНО І ФУНКЦІОНАЛЬНО ОРІЄНТОВАНІ КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ

Rysmennyi Ihor, Kyslyi Roman, Petrenko Anatoly. Edge computing in multi-scope service-oriented mobile healthcare systems 118

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ, ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ І ТЕОРІЯ ІГОР

Бохонов Ю.Є. Знаходження періодичного розв'язку рівняння Мат'є із запізненням 128

Яковлева А.П., Круть В.М. Проблема пригнічення корупції з використанням оптимального керування 132

Реферати 141

Відомості про авторів 149

SYSTEM RESEARCH AND INFORMATION TECHNOLOGIES

1 • 2019

CONTENTS

THEORETICAL AND APPLIED PROBLEMS AND METHODS OF SYSTEM ANALYSIS	
<i>Zgurovsky M.Z., Perestyuk M.M.</i> Modeling the lines of the breakdown of civilizations at the beginning of the 21st century in the context of their fundamental differences	7
<i>Danylov V.Y., Huskova V.H., Bidiuk P.I., Jirov O.L.</i> Decision support system for forecasting financial processes on the basis of system analysis principles	20
PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES, HIGH-EFFICIENCY COMPUTER SYSTEMS	
<i>Brajon Jordan, Makarenko Alexander.</i> Game of life with non-regular space with boundaries: glider case	37
<i>Melnyk I.V., Pochynok A.V.</i> The system of constructive geometrical parameters of model of high voltage glow discharge electron guns, producing profile electron beams	50
<i>Lutso V.V., Silvestrov A.M.</i> Mathematical model of a two-machine induction motor with rotating inductor	66
DECISION MAKING AND CONTROL IN ECONOMIC, TECHNICAL, ECOLOGICAL AND SOCIAL SYSTEMS	
<i>Pankratova N.D., Khoroshun L.P., Yakhin S.L.</i> Construction of a model of dynamics of production market processes in two-sector macroeconomics	75
<i>Zaychenko Yuriy, Zaychenko Helen.</i> Fuzzy GMDH and its application to forecasting financial processes	91
<i>Zaporozhko I.O., Borozenets D.A., Zubchuk V.I.</i> Assessment of human adaptive reserves by pulse wave	110
PROBLEM- AND FUNCTION-ORIENTED COMPUTER SYSTEMS AND NETWORKS	
<i>Pysmennyi Ihor, Kyslyi Roman, Petrenko Anatoly.</i> Edge computing in multi-scope service-oriented mobile healthcare systems	118
METHODS OF OPTIMIZATION, OPTIMUM CONTROL AND THEORY OF GAMES	
<i>Bokhonov Yu. Ye.</i> Finding of periodic solution of the Mathieu equation with the delay	128
<i>Yakovleva A.P., Krut V.M.</i> The problem of corruption suppression using optimal control	132
References	141
Information about the authors	149

МОДЕЛЮВАННЯ ЛІНІЙ РОЗЛОМУ ЦИВІЛІЗАЦІЙ НА ПОЧАТКУ XXI СТОЛІТТЯ В КОНТЕКСТІ ЇХ ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ ВІДМІННОСТЕЙ

М.З. ЗГУРОВСЬКИЙ, М.М. ПЕРЕСТЮК

Анотація. Продовжено цикл моделювання ліній розлому цивілізацій за Самуелем Хантінгтоном, розпочатий у 2008 р., у контексті фундаментальних культурних відмінностей цих цивілізацій з часовим інтервалом 10 років. Моделювання ґрунтується на застосуванні кількісного і якісного аналізу відмінностей між світовими культурами на основі модифікації підходу Самуеля Хантінгтона. На підставі результатів кластеризації відстаней, числових значень загальних розломів між цивілізаціями і сукупних відмінностей цивілізацій сформовано бачення на ближче і віддалене майбутнє щодо можливих об'єднань і конфліктів між світовими культурами. Порівняльний аналіз за результатами досліджень, проведених у 2008 р., дозволив отримати дані, які можуть стати науково-обґрунтованою базою для передбачення створення ряду об'єднань та альянсів країн світу, а також для моделювання поведінки та розвитку окремих країн світу.

Ключові слова: зіткнення цивілізацій, цивілізаційна модель світу, лінії розломів цивілізацій, етнокультурний цивілізаційний розподіл, світові конфлікти, перевірка гіпотез, експертне опитування.

ВСТУП

Прагнення людини припідняти завісу пройдешнього та передбачити хід подій має таку саму довгу історію, як і її спроби зрозуміти навколишній світ. Проте не зважаючи на численні різноманітні прогнози та передбачення, зроблені в різні роки, не може не вражати ідентичність їх висновків щодо можливих перспектив розвитку людства у XXI столітті. Причому ці прогнози часто торкаються принципово різних аспектів глобального процесу розвитку; вони ґрунтуються на різних методологіях, ідеологіях, парадигмах і переважна більшість з них одноголосно стверджують — XXI століття переломне в планетарній історії людства [1].

У своїй праці «Зіткнення цивілізацій?» Самуель Хантінгтон прогнозує, що ідеологічне протистояння між двома протиборчими таборами, яке відбувалося під час «холодної війни» у XXI столітті переросте в протистояння цивілізаційне між різними великими угрупованнями людей: *«У класових і ідеологічних конфліктах ключовим було питання: «За кого ти? На чьому*

ти боці?». У конфлікті ж цивілізації питання ставиться інакше: «*Хто ти?»*. Ідеться про те, що дано і не підлягає змінам» [1]. Автор передбачав, що домінуючим фактором світової політики стануть саме цивілізації, а зовнішність світу визначатиметься їх взаємодією і зіткненнями.

Це створить принципово інший, порівняно із сьогоденням, світовий порядок, у якому конфлікти між різними цивілізаціями переважатимуть над конфліктами всередині окремо взятих цивілізацій. Причому наймасштабніші конфлікти майбутнього розгорнуться вздовж ліній розлому між цивілізаціями: «...найважливіші кордони, що розділяють людство, і переважні джерела конфліктів будуть визначатися культурою: Нація-держава залишиться головною дійовою особою в міжнародних справах, але найбільш значущі конфлікти глобальної політики будуть розгортатися між націями і групами, що належать до різних цивілізацій. Зіткнення цивілізацій стане домінуючим фактором світової політики. Лінії розлому між цивілізаціями — це і є лінії майбутніх фронтів» [1]. У своїх дослідженнях Самуель Хантінгтон визначив вісім базових цивілізацій: Китайська, Японська, Індуїстська, Ісламська, Західна, Православна, Латиноамериканська, Африканська.

Метою наведених досліджень є продовження циклу моделювання ліній розлому цивілізацій за Самуеля Хантінгтона [1], розпочатого в 2008 р. [2, 3], у контексті фундаментальних культурних відмінностей цих цивілізацій з часовим інтервалом 10 років. Моделювання ґрунтується на застосуванні кількісного і якісного аналізу відмінностей між світовими культурами на основі модифікації підходу С. Хантінгтона.

У наведеному дослідженні, спираючись на теорію етнокультурного розподілу цивілізацій Самуеля Хантінгтона та застосовуючи математичний апарат системного і багатофакторного регресійного аналізу, робимо спробу кількісно оцінити та проаналізувати фази еволюційного розвитку, процеси змішування часткового або повного поглинання одними цивілізаціями інших. Досліджуються також кількісні характеристики розломів між існуючими цивілізаціями, їх зміни з часовим інтервалом 10 років та закономірності впливу наростання глобальних світових загроз на світовий цивілізаційний порядок.

У процесі проведення моделювання виконано такі етапи [4, 5]:

- 1) розроблення системи критеріїв для оцінювання культурних відмінностей між цивілізаціями;
- 2) уточнення цивілізаційного розподілу, запропонованого С. Хантінгтоном;
- 3) розроблення і проведення експертного оцінювання цивілізаційних відмінностей;
- 4) оброблення даних оцінювання і розрахунок значень ліній «розломів» між цивілізаціями.

Розглянемо кожен з цих етапів дослідження.

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КРИТЕРІЇВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ КУЛЬТУРНИХ ВІДМІННОСТЕЙ МІЖ ЦИВІЛІЗАЦІЯМИ

З метою чіткої диференціації було сформовано набір інформативних та універсальних критеріїв для оцінювання культурних відмінностей між цивілі-

заціями. За підсумками роботи групи експертів та на основі застосування методу Дельфі (експертного оцінювання) [6] розроблено систему з восьми базових критеріїв, які найповніше характеризують культурні відмінності між цивілізаціями:

1. Цінність життя людини (VHL)

діапазон: «Життя людини нічого не варте» – «Життя людини – найвища цінність».

2. Свобода особистості в суспільстві (PFS)

ступінь свободи пересування, свободи висловлювання поглядів, свободи в особистому житті...

3. Статус жінки в суспільстві (SWS)

діапазон: «Повне домінування чоловічої статі» – «Гендерний паритет» – «Повне домінування жінки».

4. Ступінь проникнення релігії в життя (DRL)

діапазон: «Релігійні та церковні інститути взагалі не впливають на життя людей» — «Релігійні та церковні інститути визначальним чином впливають на життя людей».

5. Етнічна однорідність (EU)

ступінь толерантності міжетнічних відносин всередині цивілізації.

6. Відкритість або закритість щодо інших культур (OCC)

ступінь відкритості або закритості цивілізації.

7. Традиціоналізм в культурі і мисленні (TCT)

схильність до змін у традиціях і світогляді.

8. Ступінь радикалізму в політичному житті (RPL)

стабільність політичного життя та швидкість змін політичних курсів.

На цьому ж етапі дослідження групою експертів-міжнародників з питань соціології та геополітики було розроблено перелік з 10 базових характеристик, за допомогою яких максимально ідентифіковано культурні відмінності між цивілізаціями [2, 3]. Ці характеристики такі:

1. **Віра:** вірування, переконання, освіченість.

2. **Зміни:** розвиток, удосконалення, модернізація, прогрес.

3. **Конфлікти:** війни, тероризм, геноцид, цивільні протистояння.

4. **Свободи:** незалежність, демократичність, права і обов'язки, громадянство.

5. **Ідентифікація:** нація, національність, етнос, клан, група, релігія, асиміляція, адаптація.

6. **Судження:** добро і зло, моральність, відповідальність, традиційність, ввічливість, інтелігентність.

7. **Знання:** науковість, мудрість.

8. **Природа:** екологія, біосфера, сталий розвиток.

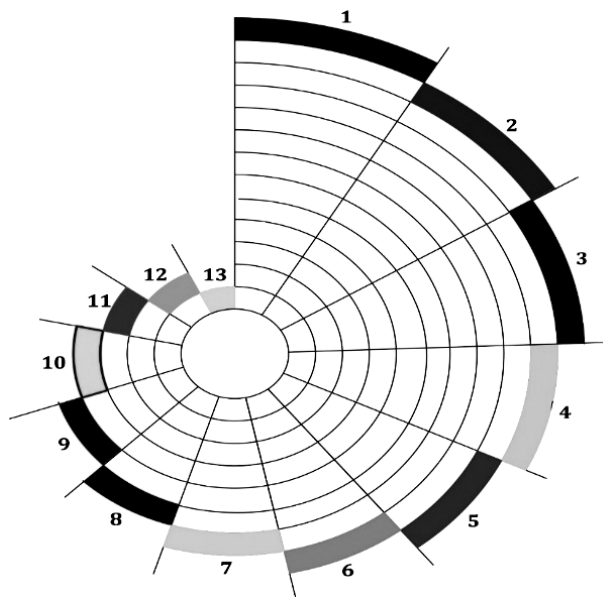
9. **Політика:** ідеологія і ліберальність, консерватизм і неоконсерватизм, фундаменталізм, помірність та радикалізм, «ліві» та «праві».

10. **Складові соціуму:** гендер, сім'я, касти та клани.

УТОЧНЕННЯ ЦИВІЛІЗАЦІЙНОГО РОЗПОДІЛУ, ЗАПРОПОНОВАНОГО С. ХАНТІНГТОНОМ

На другому етапі дослідження було уточнено цивілізаційний розподіл Самуеля Хантінгтона і виконано кластеризацію країн за критеріями належності до цивілізацій. На основі методу Дельфі з використанням нечітких кластерів проведено науково-обґрунтовану кластеризацію країн за критеріями та ознаками, притаманними культурам відповідних цивілізацій та їх субцивілізацій (відмінності між якими рідко бувають чітко вираженими, хоча цивілізаційні розбіжності є цілком реальними).

Для проведення експертного оцінювання культурних відмінностей між цивілізаціями на основі використання наведених вище восьми критеріїв було створено групу експертів, які мали багаторічний досвід міжнародної діяльності в групах відповідних країн та розроблено форму експертного опитувальника (рис. 1). Експерти оцінили культурні відмінності між цивілізаціями для кожного з восьми критеріїв, привласнюючи цим відмінностям кількісні значення, з використанням системи оцінок за шкалою Міллера (7 +/- 1) [6].



1	2	3	4	5	6	7
Майже ідентичні	дуже малі відмінності	малі відмінності	середні відмінності	великі відмінності	дуже великі відмінності	Повна протилежність

Рис. 1. Експертний опитувальник оцінювання культурних відмінностей між цивілізаціями

Перелік цивілізацій (кластерів) формувався шляхом досягнення компромісу між історичними та ментальними ознаками їх культур і спробою ідентифікувати найбільш вагомі культурні особливості кожної з цивілізацій. На етапі доуточнення цивілізаційного розподілу країн визначено тринадцять цивілізацій (рис. 2):

-
1. Західна – Північноамериканська
 2. Західна – Європейська
 3. Конфуціанська
 4. Японська
 5. Ісламська – Арабська
 6. Ісламська – Тюрська
 7. Ісламська – Малайська
 8. Індуїська
 9. Слов'янська – Східно- Православна
 10. Слов'янська – Центрально-Східна – Європейська – Православна
 11. Слов'янська – Західна – Католицька
 12. Латиноамериканська
 13. Африканська

Рис. 2. Уточнений (відносно теорії С. Хантінгтона [1]) перелік цивілізацій

РОЗРОБЛЕННЯ І ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРТНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЦИВІЛІЗАЦІЙНИХ ВІДМІННОСТЕЙ

На основі інтелектуального оброблення даних з експертних опитувальників було розглянуто задачу формалізації групового експертного оцінювання альтернатив. Нехай $m = 18$ експертів провели оцінку $n = 13$ об'єктів за $l = 8$ показниками. Результати оцінювання подані у вигляді величини x_{ij}^h , де j — номер експерта; i — номер об'єкта; h — номер показника порівняння. Оскільки в дослідженні оцінка об'єктів виконується методом послідовного порівняння, то величини $x_{ij}^h (i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}; h = \overline{1, l})$ являють собою бали (числа). Для отримання групової оцінки скористаємось середніми значеннями оцінок за відповідними критеріями, привласненими експертами кожній парі цивілізацій:

$$x_i = \sum_{h=1}^l \sum_{j=1}^m q_h x_{ij}^h k_j \quad (i = \overline{1, n}),$$

де q_h — коефіцієнти ваги показників, за якими виконується порівняння; k_j — коефіцієнти компетентності експертів. Коефіцієнти ваги показників

та компетентності експертів є нормованими величинами: $\sum_{h=1}^l q_h = 1; \sum_{j=1}^m k_j = 1.$

Групова експертна оцінка, отримана підсумовуванням індивідуальних оцінок з коефіцієнтами компетентностей експертів та ваги показників зі зміною властивостей об'єктів у кардинальних шкалах, ґрунтується на припущенні про виконання аксіом фон Неймана–Моргенштерна. Це припущення застосовується як для індивідуальних, так і для групових оцінок та умов нерозрізненості об'єктів у груповому співвідношенні, якщо вони нерозрізнені у всіх індивідуальних оцінках [7].

Оскільки компетентність експертів оцінюється за ступенем узгоджувальності їх оцінок з груповою оцінкою об'єктів, то процедуру обчислення відповідних коефіцієнтів проведено у рекурентній формі:

$$x_i^t = \sum_{j=1}^m x_{ij} k_j^{t-1} (i = \overline{1, n}); \lambda^t = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} x_i^t (t = 1, 2, \dots); k_j^t = \frac{1}{\lambda^t} \sum_{i=1}^n x_{ij} x_i^t, \sum_{j=1}^m k_j^t = 1.$$

Кількісні значення коефіцієнтів компетентності експертів наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Коефіцієнти компетентності експертів

Номер експерта	Коефіцієнти компетентності експертів за критеріями порівняння цивілізацій								Середньозважена оцінка компетентності експерта
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0,080	0,077	0,079	0,067	0,074	0,071	0,081	0,066	0,074
2	0,051	0,046	0,042	0,052	0,061	0,050	0,059	0,049	0,051
3	0,043	0,052	0,061	0,037	0,061	0,048	0,062	0,042	0,051
4	0,046	0,057	0,060	0,059	0,050	0,043	0,049	0,040	0,051
5	0,054	0,049	0,045	0,044	0,044	0,042	0,046	0,050	0,047
6	0,052	0,048	0,050	0,053	0,078	0,068	0,052	0,057	0,057
7	0,066	0,055	0,062	0,065	0,057	0,056	0,058	0,058	0,060
8	0,064	0,054	0,060	0,057	0,054	0,049	0,053	0,055	0,056
9	0,073	0,059	0,062	0,054	0,043	0,057	0,064	0,057	0,059
10	0,062	0,065	0,059	0,053	0,057	0,062	0,052	0,065	0,060
11	0,055	0,056	0,058	0,051	0,047	0,057	0,052	0,053	0,054
12	0,056	0,063	0,053	0,068	0,060	0,052	0,066	0,058	0,060
13	0,055	0,066	0,074	0,089	0,063	0,074	0,078	0,070	0,071
14	0,047	0,038	0,049	0,044	0,051	0,051	0,035	0,067	0,048
15	0,048	0,043	0,045	0,040	0,038	0,045	0,036	0,047	0,043
16	0,051	0,046	0,045	0,051	0,046	0,052	0,045	0,051	0,048
17	0,049	0,060	0,049	0,058	0,059	0,062	0,055	0,059	0,056
18	0,049	0,064	0,048	0,059	0,056	0,061	0,056	0,055	0,056

ОБРОБЛЕННЯ ДАНИХ ОЦІНЮВАННЯ І РОЗРАХУНОК ЗНАЧЕНЬ ЛІНІЙ РОЗЛОМІВ МІЖ ЦИВІЛІЗАЦІЯМИ

З використанням отриманих значень коефіцієнтів компетентності (табл. 1) за відповідними критеріями порівняння всіх експертів та середньозваженої оцінки компетентності кожного експерта шляхом нормування максимальним значенням коефіцієнтів компетентності експертів за кожним критерієм були обчислені групові оцінки попарного порівняння тринадцяти цивілізацій за вісьмома критеріями.

Узагальнену міру потужності напруженості (ступінь розлому) між усіма парами цивілізацій за вісьмома відповідними критеріями подано у вигляді суперпозиції (рис. 3).

$$\mathcal{J}_{conf}^{civ(i,j)} = \Phi \left(\mathcal{J}_{VHL}^{i,j}, \mathcal{J}_{PFS}^{i,j}, \mathcal{J}_{SWS}^{i,j}, \mathcal{J}_{DRL}^{i,j}, \mathcal{J}_{EU}^{i,j}, \mathcal{J}_{OCC}^{i,j}, \mathcal{J}_{TCT}^{i,j}, \mathcal{J}_{RPL}^{i,j} \right).$$

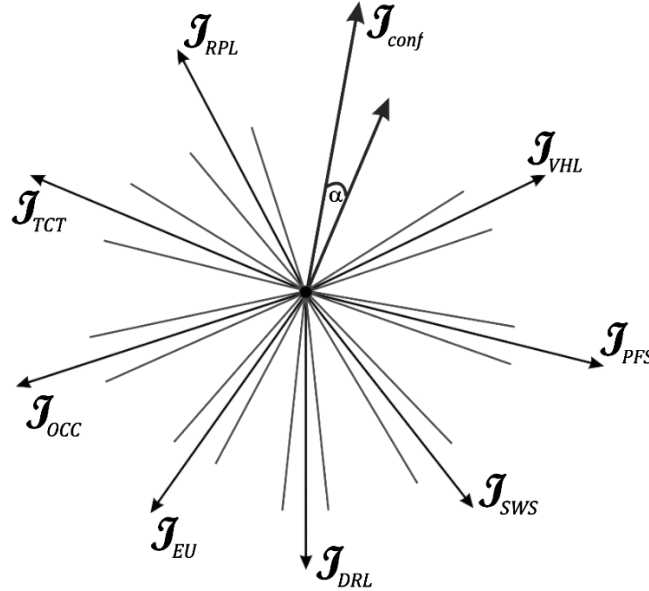


Рис. 3. Узагальнена міра потужності напруженості (ступінь розлому) між усіма парами цивілізацій

Для кожної пари цивілізацій евклідову норму радіуса-вектора напруженості подано у вигляді

$$\|\mathcal{J}_{conf}^{civ(i,j)}\| = \sqrt{\left(\mathcal{J}_{VHL}^{i,j}\right)^2 + \left(\mathcal{J}_{PFS}^{i,j}\right)^2 + \left(\mathcal{J}_{SWS}^{i,j}\right)^2 + \left(\mathcal{J}_{DRL}^{i,j}\right)^2 + \left(\mathcal{J}_{EU}^{i,j}\right)^2 + \left(\mathcal{J}_{OCC}^{i,j}\right)^2 + \left(\mathcal{J}_{TCT}^{i,j}\right)^2 + \left(\mathcal{J}_{RPL}^{i,j}\right)^2}.$$

Кількісну міру + напруженості визначено як проекцію норми цього вектора на ідеальний вектор з координатами (1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1):

$$\mathcal{J}_{conf}^{civ(i,j)} = \sqrt{\left(\mathcal{J}_{VHL}^{i,j}\right)^2 + \left(\mathcal{J}_{PFS}^{i,j}\right)^2 + \left(\mathcal{J}_{SWS}^{i,j}\right)^2 + \left(\mathcal{J}_{DRL}^{i,j}\right)^2 + \left(\mathcal{J}_{EU}^{i,j}\right)^2 + \left(\mathcal{J}_{OCC}^{i,j}\right)^2 + \left(\mathcal{J}_{TCT}^{i,j}\right)^2 + \left(\mathcal{J}_{RPL}^{i,j}\right)^2} \cos \alpha.$$

Кут відхилення α радіуса-вектора $\mathcal{J}_{conf}^{civ(i,j)}$ від ідеального вектора (1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1) знайдено через значення вимірів:

$$\alpha = \arccos \frac{\mathcal{J}_{VHL}^{i,j} \cdot \mathcal{J}_{PFS}^{i,j} \cdot \mathcal{J}_{SWS}^{i,j} \cdot \mathcal{J}_{DRL}^{i,j} \cdot \mathcal{J}_{EU}^{i,j} \cdot \mathcal{J}_{OCC}^{i,j} \cdot \mathcal{J}_{TCT}^{i,j} \cdot \mathcal{J}_{RPL}^{i,j} : \left(\mathcal{J}_{VHL}^{i,j} + \mathcal{J}_{PFS}^{i,j} + \mathcal{J}_{SWS}^{i,j} + \mathcal{J}_{DRL}^{i,j} + \mathcal{J}_{EU}^{i,j} + \mathcal{J}_{OCC}^{i,j} + \mathcal{J}_{TCT}^{i,j} + \mathcal{J}_{RPL}^{i,j}\right)}{2\sqrt{2} \cdot \sqrt{\left(\mathcal{J}_{VHL}^{i,j}\right)^2 + \left(\mathcal{J}_{PFS}^{i,j}\right)^2 + \left(\mathcal{J}_{SWS}^{i,j}\right)^2 + \left(\mathcal{J}_{DRL}^{i,j}\right)^2 + \left(\mathcal{J}_{EU}^{i,j}\right)^2 + \left(\mathcal{J}_{OCC}^{i,j}\right)^2 + \left(\mathcal{J}_{TCT}^{i,j}\right)^2 + \left(\mathcal{J}_{RPL}^{i,j}\right)^2}}$$

$$0 \leq \alpha \leq \arccos \frac{1}{2\sqrt{2}}.$$

Отже, проекція норми відповідного радіуса-вектора на ідеальний вектор характеризує потужність напруженості (ступінь розлому) між парами

цивілізацій, а просторове положення вектора $\mathcal{J}_{conf}^{civ(i,j)}$ в системі координат

$(\mathcal{J}_{VHL}^{i,j}, \mathcal{J}_{PFS}^{i,j}, \mathcal{J}_{SWS}^{i,j}, \mathcal{J}_{DRL}^{i,j}, \mathcal{J}_{EU}^{i,j}, \mathcal{J}_{OCC}^{i,j}, \mathcal{J}_{TCT}^{i,j}, \mathcal{J}_{RPL}^{i,j})$ характеризує міру гармонізації.

Згідно з методикою приведення у відповідність набору групових оцінок усіх пар цивілізацій за вісьмома критеріями до інтегрованих загальних кількісних значень отримано загальну матрицю коефіцієнтів потужності напруженості (розломів) між цивілізаціями (табл. 2). Графічну інтерпретацію значень потужності напруженості (розломів) між цивілізаціями показано на рис. 4.

Таблиця 2. Матриця коефіцієнтів потужності напруженості між цивілізаціями

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
0,00	0,19	0,59	0,66	0,66	0,67	0,68	0,72	0,51	0,33	0,36	0,54	0,50	1
	0,00	0,44	0,44	0,55	0,52	0,42	0,47	0,35	0,27	0,16	0,39	0,42	2
		0,00	0,35	0,40	0,37	0,29	0,26	0,53	0,45	0,39	0,44	0,33	3
			0,00	0,42	0,41	0,38	0,50	0,60	0,40	0,43	0,52	0,36	4
				0,00	0,29	0,36	0,45	0,63	0,50	0,54	0,47	0,27	5
					0,00	0,31	0,37	0,63	0,51	0,51	0,50	0,31	6
						0,00	0,26	0,58	0,47	0,42	0,42	0,24	7
							0,00	0,61	0,48	0,48	0,49	0,38	8
								0,00	0,49	0,36	0,53	0,52	9
									0,00	0,22	0,43	0,48	10
										0,00	0,43	0,43	11
											0,00	0,31	12
												00	13

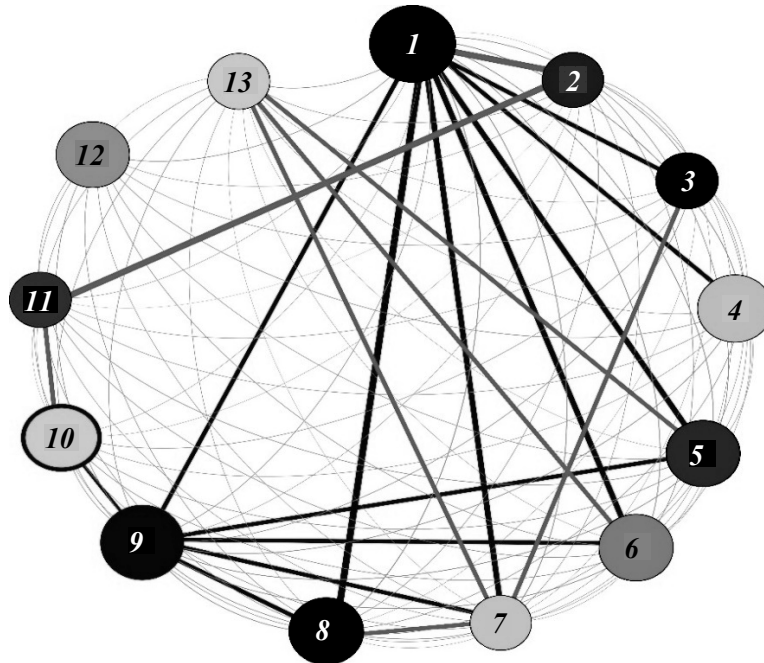


Рис. 4. Графічна інтерпретація значень потужності напруженості (розломів) між цивілізаціями

Використання згаданої методики дозволило з урахуванням взаємозв'язку сукупності відмінностей кожної цивілізації від решти цивілізацій світу розрахувати коефіцієнти конфліктності для кожної з тринадцяти цивілізацій (табл. 3).

Таблиця 3. Коефіцієнти конфліктності цивілізацій

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,555	0,401	0,413	0,460	0,475	0,462	0,419	0,472	0,533	0,424	0,402	0,457	0,386

Порівнявши відповідні значення конфліктності цивілізацій, отримані в 2008 р. і у 2018 р., визначаємо оцінки зростання інтегральної конфліктності світу з часовим інтервалом 10 років (2008–2018 рр.) (рис. 5).

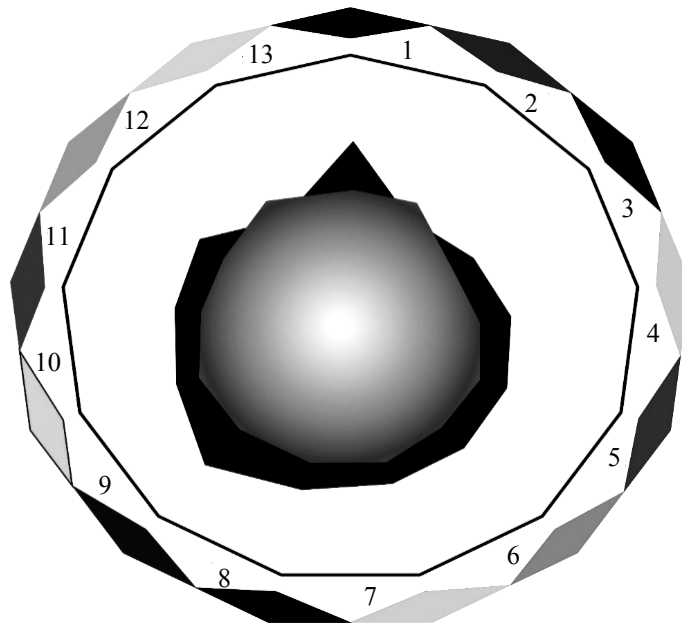


Рис. 5. Візуалізація зростання інтегральної конфліктності світу з часовим інтервалом 10 років (2008–2018 рр.)

Слід відзначити деякі тенденції зростання конфліктності цивілізацій.

1. Глобальні конфлікти у світі на національному і міжнародному рівнях на часовому відрізку 2017–2045 рр. монотонно зростають (рис. 6) [8]. Темпи цього зростання значно збільшились за останнє десятиріччя, починаючи з 2008 р. (рис. 7).

2. Найпотужніше зростання інтегрального показника напруженості спостерігається у Західно-Північноамериканській та Слов'янсько-Східно-Православній цивілізаціях, зокрема між ними та в середньому їх з рештою світу близько 15%. Особливо слід відзначити зростання напруженості між ними та Японською, Індуїстською цивілізаціями та країнами Ісламського блоку, що становить близько 21%. Наразі спостерігається також загострення всередині Ісламського блоку та між Конфуціанською і Японською цивілізаціями; показник зростання напруженості в середньому становить понад 21%.

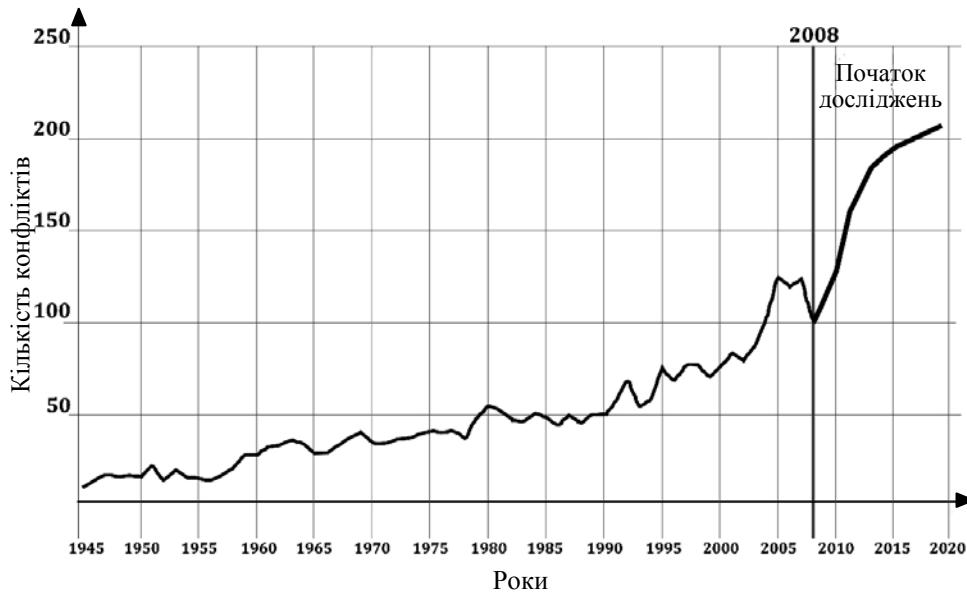


Рис. 6. Глобальні конфлікти у світі на національному і міжнародному рівнях (Джерело: Conflict Barometer, НІК — 2014–2017)

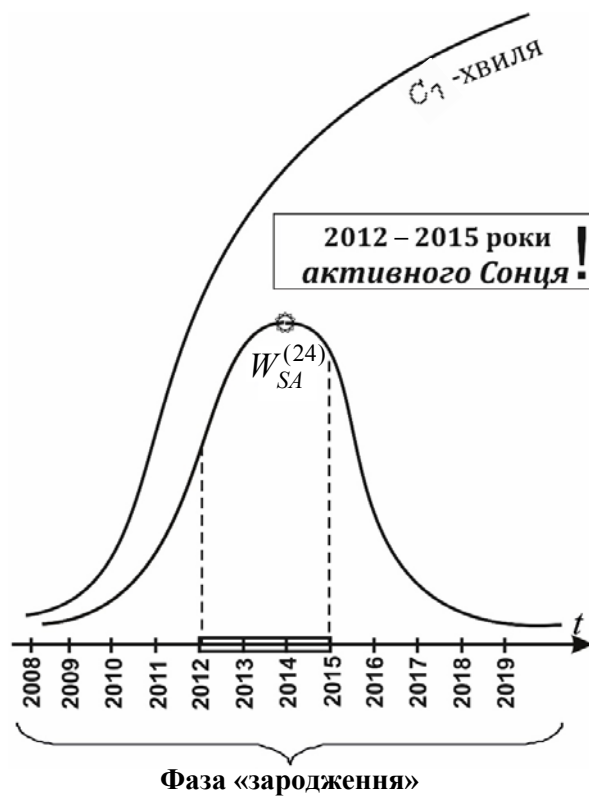


Рис. 7. Цюрихівський сонячний цикл $W_{SA}^{(24)}$, що відповідає еволюційній фазі «зародження» останньої сьомої хвилі глобальних системних світових конфліктів

На наступному кроці дослідження розраховано схильність цивілізацій до об'єднання (табл. 4) та протистояння (табл. 5), поклавши відповідні зна-

чення інверсними до максимальних рівнів напруженості (розломів) між цивілізаціями, що входять у відповідний блок:

$$P_{\text{union}} = 1 - \max[d(civ_a, civ_b)], P_{\text{conflict}} = \min[d(civ_a, civ_b)].$$

Таблиця 4. Рівень схильності цивілізацій до об'єднання, %

№ з/п	Цивілізаційні блоки	2018 р.	2008 р.
1	Західна – Європейська Слов'янська – Західно-Католицька	84	82
2	Західна – Північноамериканська, Західна – Європейська	81	97
3	Ісламська – Малайська Індуїстська	75	76
4	Конфуціанська Індуїстська	74	73
5	Ісламська – Малайська Конфуціанська	71	66
6	Африканська Ісламська – Арабська, Ісламська – Тюркська, Ісламська – Малайська	70	61
7	Конфуціанська Японська	65	86
8	Ісламська – Арабська, Ісламська – Тюркська, Ісламська – Малайська	65	88

Таблиця 5. Рівень схильності цивілізацій до протистояння, %

№з/п	Цивілізаційні блоки	2018 р.	2008 р.
1	Західна – Північноамериканська Індуїстська	72	51
2	Західна – Північноамериканська Ісламська – Арабська, Ісламська – Тюркська, Ісламська–Малайська	66	58
3	Слов'янська – Східно-Православна Індуїстська	61	47
4	Західна – Північноамериканська Конфуціанська, Японська	59	46
5	Слов'янська – Східно-Православна Ісламська–Арабська, Ісламська – Тюркська, Ісламська – Малайська	58	48

Потенційні конфлікти можуть відбуватися між цивілізаціями передусім по лініях розломів, числові значення яких найбільші. І навпаки: потенційні об'єднання цивілізацій можуть відбуватися по лініях розломів, числові значення яких найменші. На підставі результатів кластеризації відстаней числові значення загальних розломів між цивілізаціями і сукупні відмінності цивілізацій сформовано бачення на ближче і віддалене майбутнє щодо можливих об'єднань і конфліктів між світовими культурами.

За порівняльним аналізом та результатами досліджень, проведених у 2008 р. [2, 3], отримано дані, які можуть стати науково-обґрунтованою основою для передбачення створення ряду об'єднань та альянсів країн світу, а також для моделювання поведінки та розвитку окремих країн світу.

ВИСНОВКИ

1. З отриманих результатів моделювання бачимо, що зростання інтегральної конфліктності світу за період 10 років становить близько 11%, а максимальний розлом між цивілізаціями збільшився на 14 % (до 72%) на противагу 58% у 2008 р. Найпотужніше зростання інтегрального показника напруженості спостерігається на рівні близько 21% і ілюструє ступінь погіршення взаємовідносин між Західно-Північноамериканською та Японською, Індуїстською цивілізаціями, країнами Ісламського блоку; Конфуціанською і Японською цивілізаціями; між країнами всередині Ісламського блоку. Спостерігається також загострення між Західно-Північноамериканською і Слов'янською – Східно-Православною цивілізаціями та їх взаємовідносинами з рештою світу, зростання напруженості в середньому близько 15%.

2. Зростання інтегральної конфліктності світу підтверджує той факт, що наразі людство поступово входить у другу еволюційну фазу останньої сьомої хвилі глобальних системних світових конфліктів (рис. 7) [9]. Аналізуючи тенденції зміни інтегральної напруженості світу за період 2008–2018 рр., можна зробити висновок, що найвищий рівень загострення у світі військових та напіввійськових конфліктів припадає саме на період 2012–2015 рр. [8]. Цей факт може розглядатись як ще одне підтвердження історичної теорії циклів сонячної активності видатного біофізика минулого століття А.Л. Чижевського, у якій він обґрунтовує залежність життя біосфери та соціальних ритмів від ритмів Сонця. Згідно з його дослідженнями сонячна активність сприяє нагромадженню на планеті колосальної «колективної», «психічної» та «соціальної» енергії, а в подальшому призводить до її вивільнення. Саме з 2008 р. розпочався 11-річний 24-й цюріхський цикл сонячної активності (рис. 7), а його пік припадає саме на період 2012–2015 рр. Сьогодні світ стоїть на порозі системної кризи. Однак це завжди відбувається на зламі історичних тенденцій, де визначальними є не матеріальні, а ідеологічні фактори.

3. Незалежно один від одного два видатні вчені минулого століття В.І. Вернадський і М.М. Мойсеєв висловили дуже близьку думку: «Якщо людство не змінить кардинальним чином свою поведінку в планетарному масштабі, то вже в середині XXI століття можуть виникнути такі умови, за яких існування людства стане неможливим». Згідно з працями [10, 11] за продовження людством парадигми «задоволення власних інтересів» уже в середині XXI століття люди існувати не зможуть. Одним з підтвердження цих прогнозів стало виявлення закономірності перебігу системних світових конфліктів, послідовність життєвих циклів яких підлягає закону елементів ряду Фібоначчі [9]. Із 2008 р. розпочалось зародження останньої хвилі системних світових конфліктів, по закінченні якої, у 2097 р., послідовність Фібоначчі вироджується. Постає питання: яка доля очікує людство після 2097 р. і чи можливе існування XXII століття? Можливо настає заключний цикл еволюційного ланцюжка глобальних системних світових конфліктів?

Якщо людство зможе змінити парадигму свого існування в планетарному масштабі на іншу, наприклад на парадигму «гармонійне співіснування на Землі», то воно продовжить свою місію на планеті Земля. При цьому виявлена для попередньої парадигми закономірність плину системних світових конфліктів, що відповідає послідовності Фібоначчі, утратить свою силу для нової парадигми [9].

ЛІТЕРАТУРА

1. *Samuel P. Huntington* The Clash of Civilizations? / Samuel P. Huntington // *Foreign Affairs*. — 1993. — Vol. 72, N 3. — P. 22–49.
2. *Alexis Pasichny*. Two Methods of Analysis for Huntington’s “Clash of Civilizations” / Pasichny Alexis // *Social Sciences in Technologies*. — 2009. — P. 23–25.
3. *Michael Zgurovsky*. Modelling of the civilizations’ break lines in context of their fundamental cultural differences / Zgurovsky Michael, Pasichny Alexis // *System Research and Information Technologies*. — 2009. — N 1. — 18 p.
4. *Згуровський М.З.* Моделювання ліній розлому цивілізацій в контексті їх фундаментальних культурних відмінностей / М.З. Згуровський, М.М. Перестюк // Системний аналіз та інформаційні технології: матеріали 20-ї Міжнар. наук.-техн. конф. SAIT 2018. — К.: ННК «ІПСА» КПП ім. Ігоря Сікорського, 2018. — С. 10.
5. *Згуровський М.З.* Системне дослідження цивілізаційних розривів на початку 21-го століття / М.З. Згуровський, М.М. Перестюк // Сучасні проблеми математики та її застосування в природничих науках і інформаційних технологіях: матеріали міжнар. наук. конф., присвяченої 50-річчю фак-ту математики та інформатики Чернів. нац. ун-ту імені Юрія Федьковича, 17–19 верес. 2018 р. — Чернівці: ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2018. — С. 141–142.
6. *Zgurovsky M.Z.* System Analysis: Theory and Applications / M.Z. Zgurovsky, N.D. Pankratova // Springer-Verlag. — Berlin Heidelberg, 2007. — 447 p.
7. *Афоничкин А.И.* Управленческие решения в экономических системах: учебник для вузов / А.И. Афоничкин, Д.Г. Михаленко. — СПб.: Питер, 2009. — 480 с.
8. *Conflict Barometer*, НІК – 2014—2017. — Available at: <https://www.google.com/search?q=conflict+barometer+2018&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b-ab>
9. *Згуровський М.З.* Выявление закономерности течения системных мировых конфликтов / М.З. Згуровский, В.В. Ясинский // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2007. — № 2. — С. 7–12.
10. *Вернадский В.И.* Несколько слов о ноосфере / В.И. Вернадский // Успехи современной биологии. — 1944. — № 18. — Вып. 2. — С. 113–120.
11. *Моисеев Н.Н.* Сохранить человечество на Земле / Н.Н. Моисеев // Экология и жизнь. — 2000. — № 1. — С. 11–13.

Надійшла 29.01.2019

СИСТЕМА ПІДТРИМАННЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ФІНАНСОВИХ ПРОЦЕСІВ НА ОСНОВІ ПРИНЦИПІВ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

В.Я. ДАНИЛОВ, В.Г. ГУСЬКОВА, П.І. БІДЮК, О.Л. ЖИРОВ

Анотація. Запропоновано концепцію розв'язання задач адаптивного прогнозування на основі методології системного аналізу, що ґрунтується на комплексному використанні методів попереднього оброблення даних, математичного і статистичного моделювання, прогнозування та оптимального оцінювання станів досліджуваних процесів. Циклічне адаптування структури і параметрів моделі на основі множини статистичних характеристик процесу забезпечує отримання високоякісних коротко- та середньострокових оцінок прогнозів за умови наявності інформативних даних. Для ідентифікації і врахування можливих стохастичних, структурних і параметричних невизначеностей запропоновано використовувати оптимальну та цифрову фільтрацію і методи інтелектуального аналізу даних, такі як байєсівські мережі, адаптивні байєсівські мережі, гранулярні фільтри та інші інструменти. Можливі параметричні невизначеності мінімізуються шляхом застосування альтернативних методів оцінювання параметрів, таких як МНК, РМНК, ММП та Монте-Карло для марковських ланцюгів. Виконані дослідження запропонованої методики свідчать про можливість її застосування до аналізу широкого класу процесів довільної природи включаючи нелінійні нестационарні процеси у фінансах, економіці, екології та демографії.

Ключові слова: фінансові процеси, невизначеності, системний аналіз, адаптація, прогнозування.

ВСТУП

Системи підтримання прийняття рішень (СППР) — зручний сучасний інструмент оброблення статистичних/експериментальних даних і експертних оцінок для встановлення взаємозв'язків між змінними, побудови математичних моделей досліджуваних процесів, оцінювання прогнозів з метою прийняття кращого рішення, вибраного з множини альтернатив [1, 2]. Позитивними властивостями СППР порівняно з іншими інформаційно-аналітичними системами є такі: 1) має бути спроектована і реалізована з використанням принципів системного аналізу, на яких ґрунтується методика прийняття рішень особами, що приймають рішення (ОПР); 2) повинна бути активним учасником процесу прийняття рішень [1]; 3) у системі обов'язкова наявність бази знань для збереження чисельних процедур оброблення даних, обчислення оцінок параметрів моделей, критеріїв якості моделей, оцінок прогнозів і альтернативних рішень (альтернатив), правил вибору кращих моделей і рішень і т. ін.; 4) застосування активного контролю всіх етапів оброблення даних і знань за відповідними множинами формалізованих кількісних критеріїв якості; 5) модульна структура системи, яка забезпечує її оперативну модифікацію з метою розширення та поліпшення функціональних можливостей; 6) наявність оптимізаційних та адаптивних процедур для оцінювання

структури моделі, обчислення оцінок параметрів математичних і статистичних моделей та для генерування оптимальних траєкторій розвитку досліджуваних процесів і відповідних керувальних впливів (управлінських рішень); 7) розроблення інтерфейсу високого рівня, який відповідає вимогам адаптивності до користувачів різних ступенів підготовки та вимогам людського фактора і ергономіки. Система підтримання прийняття рішень спроектована з урахуванням названих властивостей та елементів, буде ефективним інструментом підтримання прийняття обґрунтованих рішень експертом і реальним учасником процесу прийняття рішень. Роботу присвячено розробленню СППР для розв'язання задач коротко- і середньострокового прогнозування нелінійних нестационарних фінансових процесів на основі модельного підходу.

Існуючі методи прогнозування, що ґрунтуються на аналітичних процедурах, логічних правилах та раціональному експертному мисленні, не завжди дозволяють отримати бажаний результат з якості оцінок прогнозів, а тому проблема значного підвищення їх якості завжди є актуальною. Ефективне високоякісне прогнозування потребує застосування сучасної методології системного аналізу до існуючих підходів та методів аналізу даних, побудови моделей і оцінювання прогнозів, коректної побудови математичних моделей процесів довільної природи на основі сучасних досягнень у галузі статистичного аналізу даних і теорії оцінювання. Деякі можливості адаптивного прогнозування з метою підвищення якості оцінок прогнозів розглядаються у працях [3–7], зокрема адаптивні методи експоненційного згладжування та фільтрації даних. Однак методи, подані в цих працях, не передбачають застосування системного підходу до прогнозування та управління і не дають відповіді на основне запитання, як організувати процес оброблення даних, щоб отримати більш точні оцінки прогнозів в умовах наявності невизначеностей структурного, параметричного і статистичного характеру.

Згадані невизначеності зумовлені передусім значною нестационарністю досліджуваного процесу, пропусками вимірювань, зашумленими даними, наявністю екстремальних значень, стрибкоподібних переходів між режимами і т. ін.. Ефективні (щодо якості остаточного результату) методи адаптивного оцінювання і прогнозування станів динамічних процесів за допомогою фільтра Калмана подані у праці [8]. Для адаптації алгоритму оцінювання та прогнозування стану процесу використовують обчислені в реальному часі оцінки статистичних характеристик збурень стану і похибок вимірювань. Процедури оптимальної фільтрації мають свої недоліки і переваги. Їх перевагами є можливість врахування у явному вигляді статистичних характеристик збурень стану і шумів вимірювань, отримання оптимальних оцінок змінних стану та їх прогнозів, оцінювання невимірюваних компонент вектора стану та одночасне оцінювання станів і деяких параметрів моделі. До недоліків можна віднести значне зниження якості оцінок прогнозів у випадку, коли кількість кроків прогнозування більша ніж один, можлива розбіжність процедури оцінювання станів і прогнозів унаслідок недостатньо високого ступеня адекватності моделі [9], необхідність застосування процедур коректної лінеаризації нелінійних процесів.

Тобто натепер існує необхідність створення нових методів і підходів до оцінювання моделей і прогнозів, які гарантовано забезпечать отримання ви-

сокоякісних оцінок прогнозів в умовах наявності невизначеностей, коротких вибірок та недостатньо високої інформативності статистичних даних. Така задача частково розв'язується в цій роботі за допомогою створення інформаційної СППР на основі системного підходу, який ґрунтується на використанні сучасних методів попереднього оброблення статистичних даних, адаптивного оцінювання структури і параметрів моделей, обчислення оцінок прогнозів та альтернативних рішень і застосування окремих множин статистичних критеріїв якості проміжних та остаточних результатів.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Мета роботи: 1) розробити концепцію адаптивного моделювання і прогнозування процесів довільної природи, поданих статистичними даними, з використанням методології системного аналізу, яка передбачає ієрархічний аналіз процесів моделювання та прогнозування, урахування невизначеностей структурного параметричного і статистичного характеру, адаптування структури і параметрів моделей до змін у процесах та застосування альтернативних методів обчислення оцінок прогнозів з метою пошуку кращих оцінок; 2) запропонувати нові обчислювальні схеми побудови прогнозних систем зі зворотним зв'язком на основі використання кількох множин статистичних параметрів якості моделей та оцінок прогнозів; 3) створити і реалізувати проект інформаційної СППР на основі запропонованої системної концепції адаптивного моделювання і прогнозування.

КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ

Структурну схему, що ілюструє системний підхід до організації процесу прогнозування, зображено на рис. 1. Підхід ґрунтується на детальному аналізі досліджуваного процесу, установленні типів наявних характерних невизначеностей, оцінюванні структури і параметрів моделі та обчисленні оцінок прогнозів за відповідними функціями. Для розв'язання цього комплексу задач необхідно спроектувати і реалізувати СППР. Деталізовану схему адаптивного моделювання і прогнозування показано на рис. 2.

Розглянемо більш детально кожний з етапів побудови СППР. Створення системи для адаптивного моделювання і прогнозування починається з вибору процесу, аналізу поточного стану, існуючих моделей і підходів до його математичного опису та прогнозування подальшого розвитку. Аналіз спеціальних літературних джерел може суттєво допомогти у встановленні факту існування моделі, необхідної для опису поведінки вибраного процесу. Це можуть бути математичні моделі у вигляді систем рівнянь (диференціальних, різницевих або алгебричних), закони розподілу вхідних та вихідних величин (статистичні моделі) або логічні моделі у вигляді множин правил, що характеризують логіку взаємодії входів і виходів процесу керування. В останні три десятиліття набувають популярності ймовірнісні методи і моделі різноманітних структур та моделі у вигляді правил нечіткої логіки, які мають хороше наближення до характеру мислення експерта. Вибір типу та структури моделі відіграє вагомий роль для реалізації подальших етапів створення прогнозної та керувальної систем.

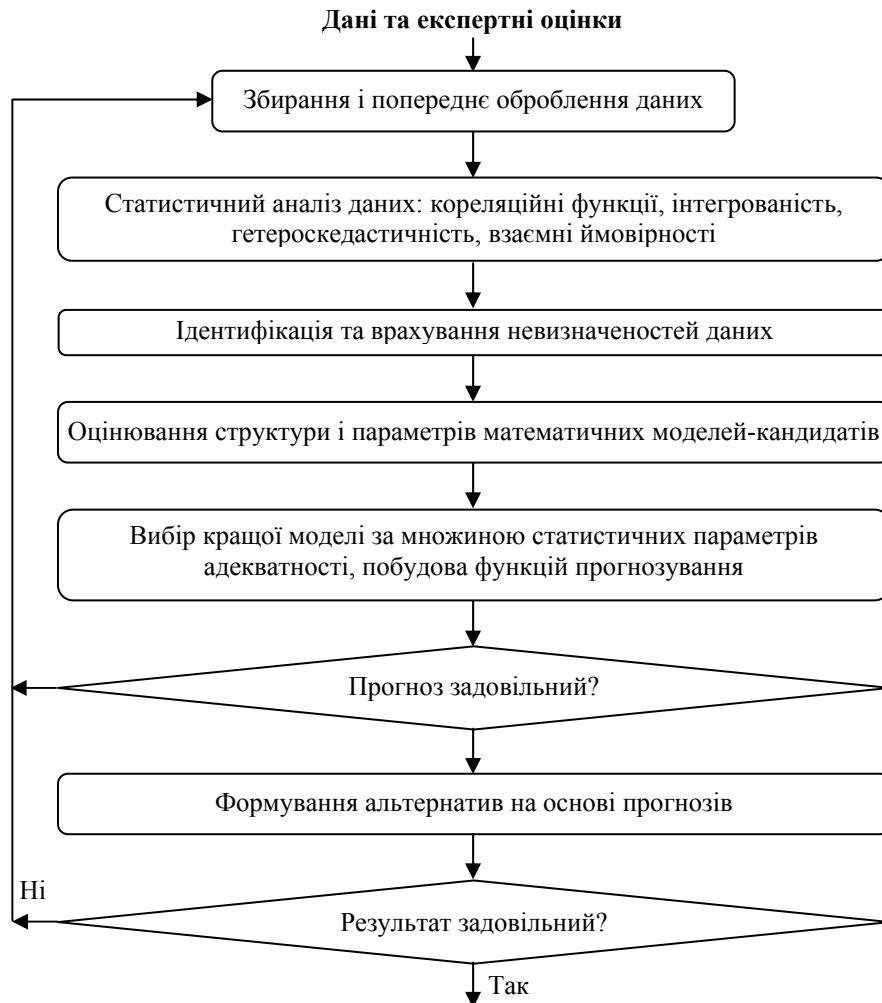


Рис. 1. Етапи реалізації системного підходу до моделювання і прогнозування

Так, модель, створена на основі теоретичних уявлень і закономірностей стосовно конкретного процесу, може потребувати лише деякого подальшого уточнення її параметрів за допомогою статистичних даних. А модель, яка повністю ґрунтується на статистичних дослідженнях, може потребувати значно більших обсягів інформації та часу для її побудови. Огляд літературних джерел також може бути корисним для оцінювання структури та адаптивного оцінювання параметрів моделі. Кожний метод має свої особливості та межі застосування, а тому необхідно знати ці особливості до його практичного застосування.

Система підтримання прийняття рішень ґрунтується на різновидах регресійних моделей, моделях у просторі станів, поліноміальних моделях у класі поліномів Колмогорова–Габора (моделі, що будуються за методом групового врахування аргументів) та байєсівських мережах (імовірнісні моделі у вигляді напрямлених ациклічних графів). Практика створення прогнозних систем для процесів довільної природи свідчить про те, що готових до використання моделей дуже мало. Навіть існуючі апробовані моделі потре-

бують коригування їх структури та/або параметрів з метою їх адаптування до конкретних умов використання і даних. Тому у більшості випадків необхідно будувати нову модель на основі поглибленого аналізу процесу та наявних даних. Якість даних відіграє надзвичайно важливу роль для побудови моделі, а тому під час формування бази даних необхідно керуватись відомими вимогами щодо їх інформативності, синхронності та коректності [4, 6].

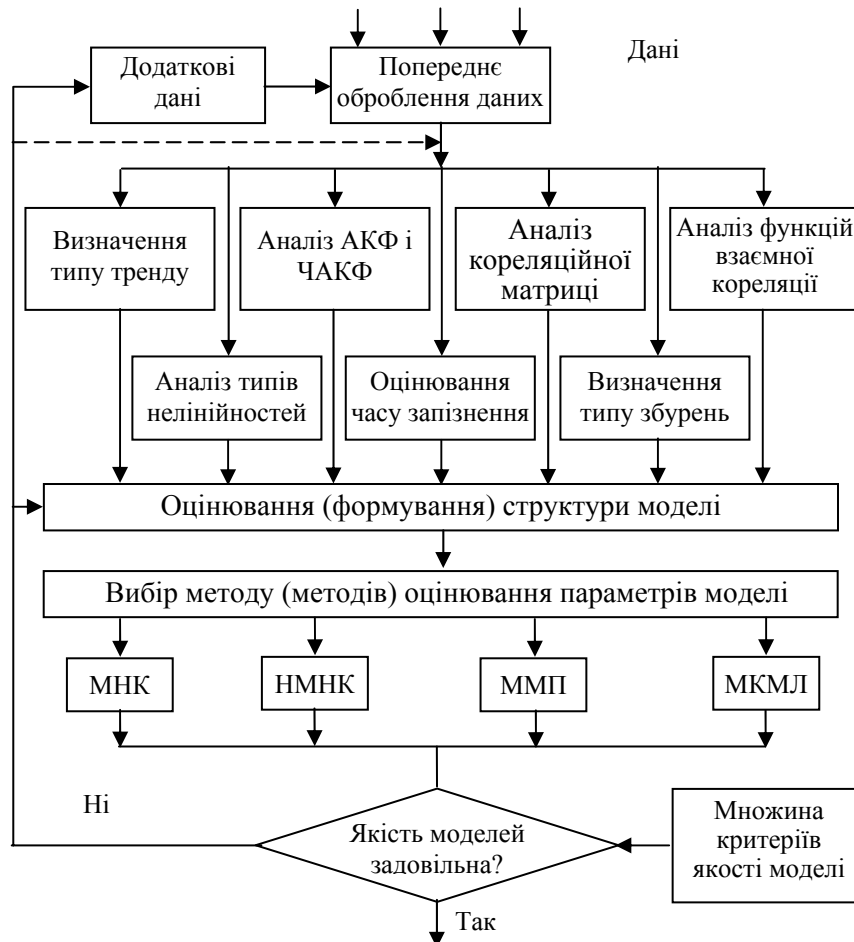


Рис. 2. Схема процесу адаптивного оцінювання моделі на основі статистичних (експериментальних) даних: АКФ — автокореляційна функція; ЧАКФ — часткова автокореляційна функція; МНК — метод найменших квадратів; НМНК — нелінійний метод найменших квадратів; ММП — метод максимальної подібності; МКМЛ — Монте-Карло для марковських ланцюгів

Попереднє оброблення даних потрібне для надання їм форми, яка забезпечить можливість коректного застосування методів оцінювання параметрів моделі та обчислення їх статистично значущих оцінок. Так, досить часто необхідно застосовувати належне нормування вимірювань у заданих межах, заповнювати пропуски даних, коригувати значні імпульсні (екстремальні) значення, логарифмувати великі значення, фільтрувати шумові складові та розв’язувати задачу мультиколінеарності. Фільтрація може бути цифровою або оптимальною залежно від конкретної постановки задачі та обсягу наявної інформації про досліджуваний процес (об’єкт).

На основі коректно підготовлених даних оцінюють структури і параметри математичних моделей-кандидатів вибраних процесів. Формування (оцінювання) структури моделі — ключовий момент її побудови. Пропонується визначати структуру моделі такою, що складається із семи елементів:

$$S = \{r, p, m, n, d, z, l\},$$

де r — розмірність моделі (кількість рівнянь, які створюють модель); p — порядок, тобто максимальний порядок диференціальних або різницьових рівнянь, які формують модель; m — кількість незалежних змінних у правій частині моделі; n — нелінійність та її тип (це нелінійності стосовно змінних або параметрів; також необхідно встановити порядок нелінійності стосовно змінних); d — час затримки (лаг) реакції системи стосовно моменту подачі вхідного впливу та його оцінка; z — зовнішнє збурення процесу та його тип (випадкове або рідкісно детерміноване); l — можливі обмеження на змінні. Структура оцінюється на основі аналізу особливостей функціонування процесу та відповідних статистичних даних, які описують його перебіг у часі. Детально процедуру оцінювання структури розглянуто у праці [4]. Для одного процесу оцінюють кілька моделей-кандидатів, а потім вибирають кращу з них за допомогою множини статистичних параметрів адекватності моделі. Такий підхід відчутно підвищує ймовірність побудови адекватної (кращої) моделі для конкретного застосування.

Часові ряди даних у техніці, економіці та фінансах мають детерміновану та випадкову складові. Поява випадкової складової зумовлена наявністю випадкових збурень, похибок вимірювань, неточністю оцінювання структури та обчислень. Тому під статистичною будемо розуміти модель процесу у вигляді розподілу випадкових величин. Обґрунтований вибір типу розподілу та оцінювання його параметрів за допомогою експериментальних даних являє собою процес побудови статистичної моделі процесу.

Побудована модель, навіть досить високого ступеня адекватності, ще не гарантує високої якості оцінок прогнозів, оскільки основна мета побудови прогнозу моделі — це належна високоякісна апроксимація основних статистичних характеристик процесу: математичного сподівання, дисперсії та коваріації. Тому після побудови моделі необхідно перевірити її на можливість застосування для розв'язання задачі прогнозування. Натепер існує широкий спектр методів прогнозування, які застосовують в економіці та фінансах. Однак далеко не всі методи забезпечують високоякісні прогнози у конкретних випадках їх застосування через різні причини, зокрема наявність невизначеностей та особливостей перебігу досліджуваних процесів. Тому вибір методу прогнозування не є простим; він потребує одночасного застосування кількох альтернативних методів і вибору кращого з них на основі аналізу отриманого результату або створення практичних схем оцінювання високоякісних комбінованих прогнозів.

Найпоширенішими сьогодні методами прогнозування розвитку процесів довільної природи є такі: методи на основі регресійних моделей, нечітка логіка, імовірнісні та ймовірнісно-статистичні методи, метод групового врахування аргументів (МГВА), нейронні мережі, нейронечіткі моделі, методи на основі «м'яких» обчислень (генетичні та імунні алгоритми), метод подібних траєкторій, метод (машина) на основі опорних векторів та деякі інші.

Кожний із цих методів тією чи іншою мірою може враховувати невизначеності структурного, статистичного і параметричного характеру. Кращі результати прогнозування процесів з невизначеностями можна отримати за допомогою МГВА, імовірнісних методів та нечіткої логіки. За своєю природою ці методи близькі до способів моделювання ситуацій та прийняття рішень людиною-експертом (ОПР), а тому їх застосування у системах управління та підтримання прийняття рішень зазвичай дають значний позитивний ефект. Сучасні напрями розвитку ймовірнісних методів моделювання і прогнозування ґрунтуються на використанні узагальнених лінійних моделей, ієрархічних і структурних моделей, гранулярних фільтрів, статичних і динамічних мереж Байєса [5, 6, 10, 15], які мають ряд істотних переваг перед іншими підходами.

Побудова функцій для багатокрокового прогнозування. Необхідно зазначити деякі корисні особливості моделей авторегресії (АР) та авторегресії з ковзним середнім (АРКС) для обчислення оцінок прогнозів на їх основі. В узагальненому вигляді таку модель можна подати таким чином:

$$y(k) = f[y(k-1), \dots, y(k-p), u(k-1), \dots, u(k-q), \theta] + \varepsilon(k),$$

де $y(k)$ — основна змінна; $u(k)$ — вхідна (керувальна) змінна; p, q — порядок АРКС відповідно; θ — вектор параметрів моделі; $\varepsilon(k)$ — випадковий процес, поява якого зумовлена наявністю випадкових зовнішніх збурень, похибками вимірювань, неточністю структури і параметрів; $k = 0, 1, 2, \dots$ — дискретний час, який зв'язаний з неперервним t періодом дискретизації вимірювань T_s : $t = k T_s$.

Використання у СППР моделей АР і АРКС дає змогу будувати функції прогнозування на основі побудованих моделей. Використання цих функцій спрощує процедури обчислення оцінок багатокрокових прогнозів. За означенням оцінка прогнозу на s кроків стосовно деякого моменту k визначається умовним математичним сподіванням функції, яка дає можливість обчислювати майбутні значення основної змінної за умови, що відома вся необхідна інформація про процес на момент k включно:

$$\hat{y}(k+s) = E_k[y(k+s)|y(k), y(k-1), \dots, y(0), \varepsilon(k), \varepsilon(k-1), \dots, \varepsilon(0)],$$

а функція прогнозування, отримана на основі моделі АР(1), має вигляд [4, 9]

$$\hat{y}(k+s) = E_k[y(k+s)] = a_0 \sum_{i=0}^{s-1} a_1^i + a_1^s y(k),$$

де $\hat{y}(k+s)$ — оцінка прогнозу змінної $y(k)$ на s кроків; E_k — умовне математичне сподівання стосовно k -го моменту часу; a_0, a_1 — коефіцієнти моделі АР(1). Функція прогнозування процесу АРКС(2,1) на три кроки має вигляд:

$$\begin{aligned} \hat{y}(k+3) &= E_k[y(k+3)] = a_0 + a_1 E_k[y(k+2)] + a_2 E_k[y(k+1)] = \\ &= a_0(1 + a_1 + a_1^2 + a_2) + (a_1^3 + 2a_1 a_2) y(k) + \end{aligned}$$

$$+ (a_1^2 a_2 + a_2^2) y(k-1) + \beta_1 (a_1^2 + a_2) \varepsilon(k),$$

де a_0, a_1, a_2 і β_1 – коефіцієнти моделі; для обчислення прогнозу використовують $\hat{\varepsilon}(k) = y(k) - \hat{y}(k)$; $y(k)$ – фактичне значення змінної в момент часу k ; $\hat{y}(k)$ – оцінка змінної, обчислена за моделлю, тобто $\hat{y}(k) = \theta^T \psi(k)$, де $\psi(k)$ – вектор вимірювань змінних у правій частині моделі. Рекурсивну формулу для обчислення оцінок прогнозів процесу АРКС(2,1) на довільну кількість кроків s можна записати так:

$$\hat{y}(k+s) = E_k[y(k+s)] = a_0 + a_1 E_k[y(k+s-1)] + a_2 E_k[y(k+s-2)].$$

Такі обчислювальні процедури забезпечують отримання незміщених оцінок прогнозів, дисперсія похибок яких збігається до скінченної константи зі збільшенням кількості кроків прогнозування за умови, що $E[\varepsilon(k)] = 0$ і коваріація $E[\varepsilon(k) \varepsilon(j)] = 0$, якщо $k \neq j$ [4, 8].

Однчасне обчислення оптимальних оцінок стану і прогнозів. Однчасне оптимальне оцінювання стану і прогнозування подальшого руху динамічної системи виконуються за допомогою згаданих вище методів оптимальної фільтрації, зокрема фільтра Калмана. Натепер існує декілька модифікацій фільтра Калмана, які забезпечують розв'язання задач оптимального згладжування даних, обчислення оцінок прогнозів за допомогою оптимальних оцінок вектора стану, оцінювання невимірюваних компонент вектора стану процесу та деяких параметрів моделей досліджуваних процесів. Основне рівняння фільтрації для вільної динамічної системи, яке ґрунтується на параметрах моделі процесу у просторі станів, має вигляд:

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}(k-1) + \mathbf{K}(k) [\mathbf{z}(k) - \mathbf{H} \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}(k-1)],$$

де $\hat{\mathbf{x}}(k)$ — оптимальна оцінка вектора стану $\mathbf{x}(k)$ у момент часу k ; \mathbf{A} — перехідна матриця станів процесу; $\mathbf{z}(k)$ — вектор вимірювань змінних на виході об'єкта; \mathbf{H} — матриця (коефіцієнтів) вимірювань; $\mathbf{K}(k)$ — оптимальний матричний коефіцієнт фільтра, який обчислюється за умови мінімізації функціонала:

$$J = \min_{\mathbf{K}} E \{ [\hat{\mathbf{x}}(k) - \mathbf{x}(k)]^T [\hat{\mathbf{x}}(k) - \mathbf{x}(k)] \},$$

тобто за умови мінімуму математичного сподівання суми квадратів похибок оцінок вектора стану процесу (значення \mathbf{K} визначається розв'язком відповідного рівняння Ріккаті). Алгоритм оцінювання вектора стану формує також однокроковий прогноз вектора стану:

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1, k) = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}(k),$$

за допомогою якого можна отримати оцінки прогнозів на довільну кількість кроків s :

$$\hat{\mathbf{x}}(k+s, k) = \mathbf{A}^s \hat{\mathbf{x}}(k).$$

Таким чином, значущість фільтра полягає у тому, що він виконує роль пристрою для згладжування і прогнозування, а тому його введення у СПІР

надає системі додаткові корисні функціональні можливості. Крім того, адаптивний фільтр дає змогу оцінювати статистичні характеристики збурення стану і похибок вимірювань, які не завжди можна визначити апріорно [7, 8, 12].

Адаптація байєсівської мережі. Одним з потужних сучасних імовірнісних інструментів розв'язання задач прогнозування, класифікації та підтримання прийняття рішень є графічні моделі причинно-наслідкових зв'язків у формі байєсівських мереж (БМ) [10, 15]. Для побудови структури БМ використано алгоритм на основі статистичного аналізу рядів даних, які характеризують еволюцію змінних мережі [10]. У СППР реалізовано алгоритм адаптування структури мережі до нових даних, що надходять у реальному часі. Для пояснення процедури адаптації мережі введемо такі позначення: $Z = \{X_1, \dots, X_n\}$ — множина вузлів БМ, яка визначається кількістю змінних у базі даних; $E = \{(X_i, X_j) | X_i, X_j \in Z\}$ — множина дуг мережі; X_i — вузол БМ, що відповідає спостереженням однієї змінної з бази даних; $n = |Z|$ — кількість вузлів БМ; r_i — кількість значень, що можуть прийматися вузлом X_i ; v_{ik} — k -е значення змінної X_i ; Π_i — множина вузлів-предків вузла X_i ; Φ_i — множина можливих ініціалізацій Π_i ; $q_i = |\Phi_i|$ — кількість можливих ініціалізацій Π_i ; ϕ_{ij} — j -а ініціалізація множини вузлів-предків Π_i вузла X_i ; B_S — структура БМ; B_P — імовірнісна специфікація БМ, тобто частина опису моделі — імовірнісні характеристики БМ; $\theta_{ijk} = p(X_i = v_{ik} | \phi_{ij}, B_P)$, при цьому сума ймовірностей $\sum_k \theta_{ijk} = 1$; $f(\theta_{ij1}, \dots, \theta_{ijr_i})$ — щільність розподілу ймовірностей для вузла X_i та ініціалізації ϕ_{ij} ; D_0 — вихідна база даних спостережень; S_0 — структура БМ, отримана внаслідок попереднього пакетного оброблення бази D_0 ; D_1 — база даних нових спостережень, не використаних у побудові S_0 ; S_1 — структура БМ, отримана після адаптації S_0 до нових даних D_1 . Ставилось завдання розроблення алгоритму адаптування вихідної БМ $G = \langle Z, E \rangle$ зі структурою S_0 , побудованого за вихідною базою спостережень D_0 , до нових спостережень D_1 . Тобто потрібно сформулювати оновлену структуру мережі $S_1 \Leftrightarrow D_1$. При цьому експериментальні (статистичні) дані можуть мати довільний розподіл ймовірностей, а процеси, які описуються цими даними, — нестационарний характер, тобто математичне сподівання $M[X_i] \neq \text{const}$ і дисперсію $M\{X_i - M[X_i]\}^2 \neq \text{const}$.

Адаптація побудованої мережі до нових даних виконується у такій послідовності:

1. Реалізація процедури коригування структурної частини моделі:
 - видалення дуг, що не відповідають множині даних;
 - додавання нових дуг.
2. Процедура коригування імовірнісної частини моделі.

Оскільки на початковому етапі навчання БМ імовірнісну складову моделі задають таблиці умовних розподілів ймовірностей, отримані безпосе-

редньо на підставі частотного аналізу появи значень змінних у спостереженнях, тому відразу визначимо зміни в процедурі коригування імовірнісної частини моделі. Щоб полегшити коригування імовірнісної частини моделі, корисно зберігати не таблиці розподілу умовних імовірностей, а значення N_{ijk} . Це дає змогу швидше оновлювати дані про розподіл умовних імовірностей, а самі значення умовних імовірностей можна обчислювати за формулою Діріхле

$$p(X_i = v_{ik} | \Pi_i = \varphi_{ij}) = \frac{N_{ijk} + 1}{N_{ij} + r_i}.$$

Коригуючи структуру БМ, порядок обходу вузлів визначаємо за внеском кожного вузла у значення умовної ймовірності $p(D_1 | D_0, S_0) =$

$$= \prod_{i=1}^n \frac{\prod_{s=1}^{R_i} \prod_{t=1}^{Q_i} \prod_{u=1}^{m_{its}} (N_{its} + u)}{\prod_{t=1}^{Q_i} \prod_{u=1}^{M_{it}} (N_{its} + r_i - 1 + u)}.$$

Суть аналізу інформаційної важливості дуг по-

лягає у такому. На етапі перевірки дуг на необхідність видалення для кожного вузла обчислюється значення $K_{\text{delete}}(S_0)$ для поточної конфігурації множини вузлів-предків, а також значення $K_{\text{delete}}(S_{-1}^m)$ для конфігурацій, які являють собою результат видалення однієї з M ($1 \leq m \leq M$) вхідних дуг з поточного вузла. Якщо виконується умова $K_{\text{delete}}(S_{-1}^m) \leq K_{\text{delete}}(S_0)$, то m -а дуга залишається у структурі мережі, оскільки видалення цієї дуги призводить до зменшення значення локального функціонала якості (тобто для поточного вузла). Інакше дуга заноситься в список (множину) дуг, що підлягають подальшій перевірці на необхідність видалення. Список відсортовується за збільшенням значення $K_{\text{delete}}(S_{-1}^m)$. Список дуг аналізується послідовно. Подальша перевірка полягає в обчисленні значення локального функціонала якості за вихідної конфігурації і конфігурацій, які отримуємо з видалення однієї з дуг, що залишилися в списку. Тактика вилучення і додавання дуг застосована в інкрементному варіанті адаптаційного алгоритму. Оскільки результатом реалізації байєсівського підходу є вибір стратегії адаптації на основі функціонала

$$P(S_1 | D_1, D_0, S_0) = \arg \max_S \frac{P(S | D_0)P(D_1 | S, D_0)}{P(D_1 | S_0, D_0)},$$

то процедура вилучення і додавання дуг здійснюється таким чином.

Якщо врахувати вид розв'язання оптимізаційної задачі адаптації БМ, то тактика вилучення дуг повинна приводити до зменшення першої складової чисельника $P(S | D_0)$, оскільки вона досягає максимуму за умови $S = S_0$ у результаті формування початкової структури БМ. Таким чином, для отримання позитивного ефекту від адаптації необхідно компенсувати втрати від вилучення дуг ефектом від додавання нової дуги. Оскільки вихідною умовою алгоритму K2 є наявність упорядкованої послідовності вузлів, то пошук дуги-претендента на додавання здійснюється саме в такий спосіб. Оцінка

дуги виконується шляхом обчислення значення локального функціонала якості. Відповідно претендент на додавання повинен визначати конфігурацію вхідних дуг, що має найбільше значення локального функціонала якості [9].

Оцінювання адекватності моделей і якості прогнозів. Важливим моментом процесу прогнозування є об'єктивне визначення якості отриманого прогнозу. Оскільки оцінки прогнозів — це випадкові величини, то для визначення їх якості необхідно використовувати множину відповідних статистичних критеріїв — саме множину, а не один критерій, оскільки кожен критерій характеризує одну властивість оцінки прогнозу. Іноді якість оцінок прогнозів визначають лише за допомогою середньоквадратичної похибки (СКП). Однак значення СКП — це лише одна з множини можливих статистик, яка залежить від масштабу даних, а тому цієї характеристики явно недостатньо для аналізу якості прогнозу.

Якість лінійних та псевдолінійних моделей оцінюють за допомогою декількох статистичних критеріїв якості, зокрема таких, як коефіцієнт множинної детермінації (R^2), який характеризує інформативність моделі відносно інформативності даних; статистика Дарбіна–Уотсона (DW), що визначає ступінь автокорельованості похибок моделі; інформаційний критерій Акайке (AIC) і статистика Байєса–Шварца (BSC); сума квадратів похибок моделі ($\sum e^2(k)$); F – статистика Фішера та ін.

Поглиблене оцінювання якості прогнозів досягається за рахунок використання критеріїв, які дають відносні оцінки якості (наприклад, коефіцієнт Тейла) та оцінки якості у відсотках (наприклад, середня абсолютна похибка у відсотках (САПВ)). Переваги їх використання полягають у тому, що вони не залежать від масштабу даних і легко інтерпретуються ОПР. Середню абсолютну похибку у відсотках і коефіцієнт Тейла обчислюють за виразами:

$$САПВ = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \frac{|y(k+i) - \hat{y}(k+i, k)|}{|y(k+i)|} \cdot 100 = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \frac{|e(k+i)|}{|y(k+i)|} \cdot 100;$$

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{s} \sum_{k=1}^s [y(k+i) - \hat{y}(k+i)]^2}}{\sqrt{\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s y^2(k+i) + \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \hat{y}^2(k+i)}},$$

де s — кількість кроків прогнозування; $y(k+i)$ — фактичні значення даних; $\hat{y}(k+i)$ — оцінки прогнозів відносно k -го момент часу, на який наявна вся інформація про досліджуваний процес. Коефіцієнт Тейла U — це важлива характеристика якості моделі і прогнозу за означенням $0 \leq U \leq 1$. Якщо $U \rightarrow 0$, то оцінки прогнозів наближаються до фактичних значень ряду і модель має високий ступінь адекватності. Тобто U дає змогу встановити придатність моделі (і метод оцінювання прогнозу на її основі) для оцінювання прогнозу в принципі.

Для автоматизованого вибору кращої моделі можна скористатись інтегральним критерієм якості [9]:

$$V_N(\theta, D_N) = e^{1-R^2} + \frac{SSE}{N} + \left\{ \begin{array}{l} \ln(AIC + BSC), \quad \text{якщо } AIC + BSC > 0 \\ e^{AIC+BSC}, \quad \text{якщо } AIC + BSC \leq 0 \end{array} \right\} + \\ + e^{2-DW} + \ln(\text{СКП}) + \ln(\text{САПВ}) + e^U,$$

де D_N — дані, що використовуються для оцінювання структури і параметрів моделі; СКП — середньоквадратична похибка однокрокового прогнозу на навчальній (історичній) вибірці; U — коефіцієнт Тейла (наближається до нуля, якщо модель придатна для прогнозування).

Альтернативний варіант використаного інтегрального критерію такий:

$$V_N(\theta, D_N) = e^{|1-R^2|} + \ln\left(1 + \frac{SSE}{N}\right) + e^{|2-DW|} + \ln(1 + \text{СКП}) + \ln(1 + \text{САПВ}) + e^U,$$

де N — кількість вимірів часового ряду даних. Потужність цих критеріїв перевірено експериментально і встановлено, що вони дають можливість вибрати кращу модель з одиничною ймовірністю.

У багатьох випадках кращих результатів прогнозування можна досягти за рахунок усереднення або комбінування за допомогою вагових коефіцієнтів оцінок прогнозів, отриманих за допомогою різних методів. При цьому необхідно задовольнити такі умови: похибки оцінок прогнозів, отриманих за різними методами, мають бути некорельованими, а дисперсії цих похибок — близькими за своїми значеннями.

Адаптивне обчислення оцінок прогнозів. Для збереження якості оцінок прогнозів в умовах нестаціонарності досліджуваного процесу, а також для підвищення якості прогнозування процесів з довільними статистичними характеристиками необхідно застосовувати адаптивні схеми оцінювання прогнозів. Вихідними величинами для аналізу якості прогнозів та формування адаптивних схем їх оцінювання є значення похибок прогнозів та статистичні характеристики їх якості. Для розв'язання задачі *структурної адаптації* прогнозу моделі до змін у досліджуваному процесі та до вимог щодо якості прогнозу можна скористатись такими обчислювальними можливостями:

- періодичний аналіз типу розподілу даних і його параметрів та врахування отриманого результату під час вибору методу оцінювання параметрів моделі;
- автоматизований аналіз часткової автокореляційної функції (ЧАКФ) залежної (основної) змінної з подальшим коригуванням структури моделі шляхом уведення/вилучення додаткових лагових значень;
- почергове введення у модель можливих регресорів та аналіз їх впливу на якість прогнозу; особливо корисними для оцінювання прогнозів є регресори, які вводяться в модель з лагами, більшими за одиницю, — це так звані *провідні індикатори*, що надають можливість коректно обчислювати прогнози на ту кількість кроків, що відповідає фактичному лагу; формування додаткових індикаторів на основі регресорів;
- автоматизований аналіз функції часткової взаємної кореляції основної змінної з регресорами з метою коригування лагових значень регресора у правій частині рівняння;

- автоматизований вибір оптимальних вагових коефіцієнтів у процедурах експоненційного згладжування, пошуку подібних траєкторій, регресії на опорних векторах та деяких інших методах;
- автоматизований аналіз залишків регресійних моделей з метою встановлення їх інформативності та коригування структури моделі процесу на основі результатів аналізу;
- адаптивне формування масивів вимірів змінних стану процесу за допомогою методів ієрархічного комплексування (інтегрування) даних, що забезпечує підвищення їх інформативності.

Задача *параметричної адаптації* моделі до даних розв'язується завдяки застосуванню повторного (рекурсивного) оцінювання параметрів математичних і статистичних моделей з надходженням нових даних, що сприяє уточненню параметрів моделі та підвищенню якості прогнозу. При цьому для оцінювання однакових структур застосовуються різні методи, що дозволяє отримувати додаткові моделі-кандидати для подальшого аналізу.

Застосування тієї чи іншої схеми адаптації залежить від конкретної постановки задачі, якості та наявного обсягу експериментальних (статистичних) даних, сформульованих вимог до якості оцінок прогнозів та часу, який може бути наданий для виконання обчислень. Кожний метод адаптивного формування оцінки прогнозу має свої особливості, які повинні бути враховані під час створення системи адаптивного прогнозування.

ПРИКЛАДИ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ ПІДТРИМАННЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Приклад 1. Прогнозування процесів утворення валового внутрішнього продукту (ВВП) та інфляції. Для автоматичного перебирання можливих структур моделей використано алгоритм аналізу порядку моделей AP, APKC, заснований на властивості ЧАКФ відображати істотні зв'язки між елементами вибірки та на зміні порога під час аналізу значень цієї функції. Параметри, які задавались раніше експертом, змінювались у заданих межах, забезпечуючи отримання множини моделей. Інтерактивне вікно системи у побудові моделі APKC показано на рис. 3. Для оцінювання параметрів моделі передбачено такі методи: МНК, рекурсивний МНК, модифікований рекурсивний МНК та метод максимальної правдоподібності (ММП)); автоматизовано аналізується наявність тренда та оцінюються порядки обох складових моделі.

Виконано аналіз процесів ВВП та інфляції України, ВВП США, індекс РТС. Використано методи аналізу стаціонарності процесу і побудовано моделі процесів з урахуванням результатів тестів щодо їх нестаціонарності. Виконано автоматичний вибір кращих параметрів моделей за інтегрованим критерієм якості модельно-прогнозних характеристик. Так, для ВВП України кращою виявилася модель 7-го порядку з використанням методу оцінювання параметрів МНК (САПВ = 6,8%); ці результати досягнуто із застосуванням автоматичного перебирання. Для процесу рівня інфляції кращою виявилася модель AP(3) з використанням тренду, описаного поліномом 3-го

порядку (САПВ = 7,3%); цих результатів також досягнуто із застосуванням автоматичного перебирання. При цьому для моделей АР обчислено і порівняно близько 120 моделей, а для моделі АРКС — близько 1000.

Тести оцінювання процесів ВВП США і індексу РТС показали наявність гетероскедастичності процесів. Під час моделювання і прогнозування змінної дисперсії кращими були моделі: для ВВП США — модель АРУГ(2), обчислена з використанням модифікованого методу максимальної правдоподібності (САПВ = 15,7%); для моделі індексу РТС — модель АРУГ(3) (САПВ = 13,4%). При цьому для кожного процесу було обчислено і порівняно близько 265 моделей. Ці результати досягнуто з використанням алгоритму автоматичного перебирання моделей.

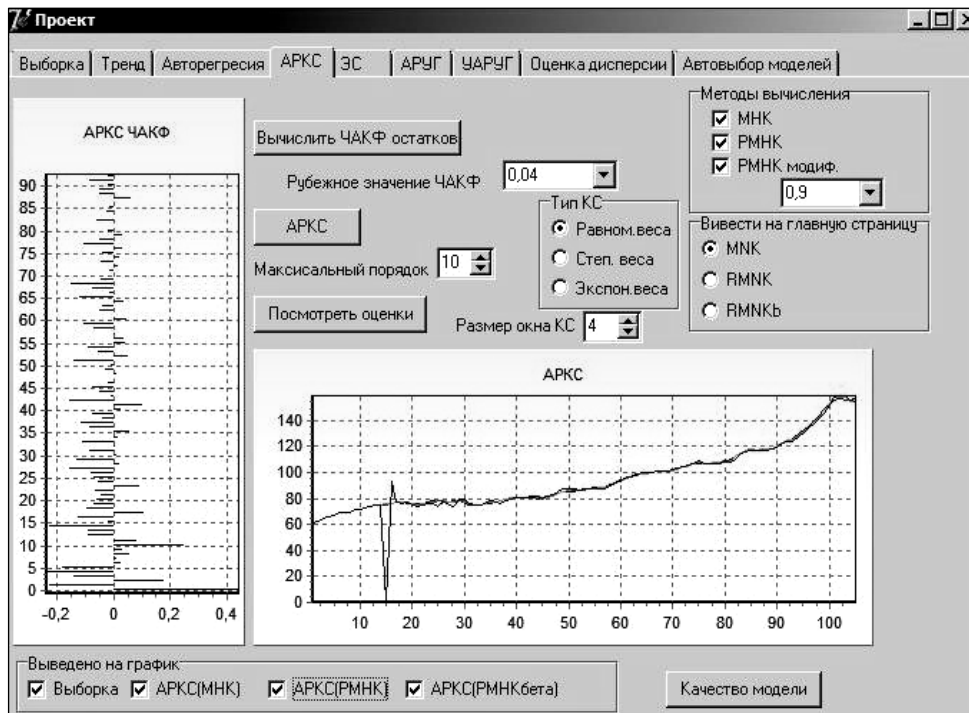


Рис. 3. Вікно програми для оцінювання АРКС

Приклад 2. Прогнозування процесів ціноутворення на біржі з використанням індикаторів технічного аналізу. Відомо, що досвідчені трейдери на біржах досить успішно використовують індикатори технічного аналізу, які формують на основі даних про фактичний рух цін протягом визначеного проміжку часу. Створено ряд індикаторів технічного аналізу, які часто використовують трейдери, і аналітики фінансових структур, серед яких: *Pivot Point*, *Woodie's Pivot Points*, *Fibonacci's Pivot Points*, *Camarilla's Pivot Points* [11].

Спочатку були побудовані регресійні моделі. Як приклад даних взято мінімальні щоденні ціни валютної пари USD/CAD (273 значення) за 2007р. За допомогою описаного вище підходу спочатку побудовано модель множинної регресії. Для прогнозування мінімальної ціни на наступний день логічно вибрати як регресори S_1 , S_2 , S_3 ; отримано таку модель:

$$y(k) = -0,017 + 2,175 \cdot S_1(k) - 5,487 \cdot S_2(k) + 4,573 \cdot S_3(k); \quad (1)$$

$$R^2 = 0,979; \quad SSR = 0,0035; \quad AIC = -8,269; \quad DW = 1,963,$$

де k — дискретний час. Кількість збігів напрямів руху оцінок прогнозу для регресійної моделі складає 203 (або 74,35 %).

Побудова моделей логістичної регресії та дерева класифікацій.

Оскільки в процесах формування цін біржових активів є участки з нелінійностями довольного характеру, то для описання таких даних необхідно використовувати нелінійні моделі. Однією з досить простих моделей такого типу є логістична регресія, яку використано в роботі. Для прогнозування напрямку руху ціни побудовано моделі логістичної регресії та дерева класифікації [12–14]. Якщо у момент часу $t + 1$ ціна активу виявляється вищою ніж у момент часу t , то позначаємо це зростання через 1, а спадання відповідно через 0. Ці значення застосовано як вхідні для моделі логістичної регресії та класифікаційного дерева. Такі ж позначення використано для зростання і спадання відповідних вихідних значень індикатора *Pivot Point*, які позначимо через $\hat{S}_1, \hat{S}_2, \hat{S}_3, \hat{P}, \hat{R}_1, \hat{R}_2, \hat{R}_3$ і подамо їх на вхід логістичної регресії і класифікаційного дерева.

Для підвищення якості прогнозів у модель логістичної регресії та дерева класифікації введено значення прогнозів руху цін, отримані за допомогою регресійної моделі (1) з використанням позначень зростання та спадання, запропонованих вище. Для мінімальної ціни нова модель логістичної регресії має вигляд:

$$g_{\max 2}(x_1) = \frac{e^{x_1(k)}}{1 + e^{x_1(k)}};$$

$$x_1(k) = -0,751 + 0,134 \cdot \hat{S}_1(k) + 0,415 \cdot \hat{S}_2(k) - 0,403 \cdot \hat{S}_3(k) - 0,251 \cdot \hat{P}(k) + \\ + 0,609 \cdot \hat{R}_1(k) + 0,081 \cdot \hat{R}_2(k) - 0,089 \cdot \hat{R}_3(k) + 2,231 \cdot \hat{y}(k),$$

де $\hat{y}(k)$ — вихідна змінна регресійної моделі, що набуває значення 1 за прогнозу зростання ціни та 0 — за прогнозу спадання. За порогового значення ймовірності 0,45 кількість збігів напрямів руху ціни становила 75,6%. У разі використання дерева класифікації та порогового значення ймовірності 0,32 похибка першого роду склала 54, другого – 13; кількість збігів напрямів руху ціни дорівнювала 73,92%. Таким чином, кращою виявилася модель логістичної регресії з використанням оцінок прогнозу за регресійною моделлю. Статистичні характеристики прогнозів свідчать про їх високу якість і можливість використання у правилах виконання операцій на біржі.

Окрім розглянутих процесів, запропоновано концепцію адаптивного оцінювання моделей та прогнозів апробовано до інших фінансово-економічних процесів. У всіх випадках досягнуто значне (у десятки разів) зменшення часу, необхідного для виконання обчислювальних експериментів та проаналізованого значно більшу множину структур математичних моделей, ніж це можливо у ручному режимі.

ВИСНОВКИ

Розроблено концепцію розв'язання задачі адаптивного прогнозування на основі методології системного аналізу, яка відрізняється тим, що ґрунтується на комплексному використанні методів попереднього оброблення і аналізу даних, адаптивного статистичного моделювання, прогнозування та оптимального оцінювання станів процесів довільної природи. Реалізація концепції надає такі переваги під час моделювання і прогнозування: швидкість пошуку кращої моделі зростає у десятки разів; автоматизований пошук дає можливість дослідити набагато більшу множину можливих структур ніж вручну, що збільшує ймовірність досягнення кращого результату; процес пошуку кращої моделі оптимізується завдяки використанню комплексного критерію якості; СППР інтегрує ідеологічно різні методи моделювання і прогнозування, що дає змогу подальшого підвищення якості оцінок прогнозів завдяки зваженому об'єднанню оцінок, отриманих за різними методами. На основі запропонованої концепції створено інформаційну СППР для моделювання і прогнозування фінансово-економічних процесів, використання якої забезпечує отримання високоякісних оцінок прогнозів для процесів вибраного класу. При цьому САПВ, як правило, не перевищує 8% для рівня процесу, а для дисперсії 16%.

За прогнозування напрямку руху ціни біржового активу за моделлю логістичної регресії та класифікаційним деревом забезпечено коректне визначення напрямку руху процесу з імовірністю 0,69–0,75. Найкращий результат досягнуто за симбіозом лінійної регресійної моделі та логістичної регресії. При цьому ймовірність коректного прогнозування руху мінімальної ціни становила 75,6%, що є хорошим результатом для процесів даного класу.

У подальших дослідженнях доцільно розширити функціональні можливості СППР за рахунок уведення нових моделей байєсівського типу, використати множину альтернативних методи обчислення оцінок прогнозів і застосувати вдосконалені схеми адаптивного (на основі адаптації структури і параметрів моделі) та комбінованого прогнозування з можливістю підвищення якості попереднього оброблення даних, що використовуються для побудови моделей.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Holsapple C.W.* Decision support systems / C.W. Holsapple, A.B. Winston. — Saint Paul (USA): West Publishing Company, 1996. — 850 p.
2. *Turban E.* Decision support systems / E. Turban, J.E. Aronson. — New Jersey: Prentice Hall, 2001. — 865 p.
3. *Лукашин Ю.П.* Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования / Ю.П. Лукашин. — М.: Финансы и статистика, 2003. — 414 с.
4. *Бідюк П.І.* Аналіз часових рядів / П.І. Бідюк, В.Д. Романенко, О.Л. Тимошук. — К.: НТУУ «КПІ», 2013. — 600 с.
5. *Press S.J.* Subjective and objective Bayesian statistics / S.J. Press. — Hoboken (New Jersey): John Wiley & Sons, Inc., 2013. — 560 с.
6. *Rossi P.E.* Bayesian statistics and marketing / P.E. Rossi, G.M. Allenby, R. McCulloch. — New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd, 2005. — 348 p.

7. *Diebold F.X.* Forecasting / F.X. Diebold. — Pennsylvania: University of Pennsylvania, 2018. — 800 p.
8. *Згуровский М.З.* Аналитические методы калмановской фильтрации / М.З. Згуровский, В.Н. Подладчиков. — К.: Наук. думка, 1995. — 285 с.
9. *Ng B.M.* Adaptive dynamic Bayesian networks / B.M. Ng // Joint Statistical Meetings, Salt Lake City (USA), July 29 – August 2, 2007. — P. 1–7.
10. *Zgurovsky M.Z.* Method of constructing Bayesian networks based on scoring functions / M.Z. Zgurovsky, P.I. Bidyuk, O.M. Terentyev // Cybernetics and System Analysis. — 2008. — Vol. 44, N 2. — P. 219–224.
11. <http://www.mataf.net/en/tools/home/> / Database.
12. *Nong Y.* The Handbook of Data Mining / Y. Nong. — New Jersey: Arizona State University Publishers, 2003. — 1201 p.
13. *Altman E.I.* Application of Classification Techniques in Business, Banking and Finance / E.I. Altman, R.B. Avery, R.A. Eisenbeis, J. Sinkey. — Greenwich: JAI Press, 1981. — 418 p.
14. *Hosmer D.W.* Applied Logistic Regression / D.W. Hosmer, S. Lemeshow. — New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000. — 380 p.
15. *Cowell R.G.* Probabilistic networks and expert systems / R.G. Cowell, A.P. Dawid, S.L. Lauritzen, D.J. Spiegelhalter. — New York: Springer, 1999. — 323 p.

Надійшла 26.01.2019

GAME OF LIFE WITH NON-REGULAR SPACE WITH BOUNDARIES: GLIDER CASE

JORDAN BRAJON, ALEXANDER MAKARENKO

Abstract. The purpose of this article is to present the work done on the implementation of rules for gliders in a game of life with a non-regular network with boundaries. First of all, we will recall the basic principle of the game of life by mentioning some structures that appear regularly and are very important as gliders. We will improve the accuracy of the collision rules between gliders. Then, we will introduce non-regular space by adding a new state for cells in boundaries. Thus it will be necessary to give the rules relating to this new cellular automaton. We will finally deal with logic gates by giving which we obtained this modified game of life.

Keywords: cellular automata, gliders, internal boundaries, logical operations.

INTRODUCTION

The purpose of this article is to present the work done on the implementation of rules for gliders in a game of life with non-regular network with boundaries. First of all we will recall the basic principle of the game of life by mentioning some structures that appear regularly and are very important as gliders. We will precise the collision between gliders. Then we will introduce non-regular space by adding a new state for cells in boundaries. Thus it will be necessary to give the rules relating to this new cellular automaton. We finally will deal with logic gates by giving which we obtained with this game of life modified.

BASICS IN THE GAME OF LIFE

The game of life is a cellular automaton discovered by John Conway in 1970. It is undoubtedly the best known cellular automata and it has been fascinating researchers for almost 50 years. John Conway manages to find a system with simple rules and a complex behavior: it is called emergence. Unpredictable complex phenomena emerge from simple rules. This idea of emergence is at the heart of many fields such as mathematics, physics, artificial intelligence or economics but also the social sciences, philosophy or the media [1]. Thus the game of life is an object of study for mathematicians but not only. The philosopher Daniel Dennett declares that "every philosopher should study the Game of Life carefully and it is only by succeeding in thinking about the ideas of conscience and free will in such a world that we will understand its true nature" [2]. The game of life can be lik-

ened to a plan and infinite network of cells. These cells can be in two states: dead or alive. Generally dead cells are represented by white boxes and living cells by black boxes. The game of life is a discrete dynamic system which means that a given configuration will evolve over time, evolution is not continuous but discrete. The evolution rule is applied synchronously to the entire network. This rule is very simple and it can be summarized as follows:

- a living cell stays alive if it has two or three living neighbors otherwise it dies;
- a dead cell becomes alive if it has exactly three live neighbors otherwise it remains dead. The neighbors of a cell are the cells in Moore's neighborhood of order 1 [3]. In other words, the eight cells whose distance associated with the infinite norm [4] is 1 (see fig. 1).



Fig. 1. Living cell (in black) and its eight neighbours (in grey). An example of evolution is given fig. 2.

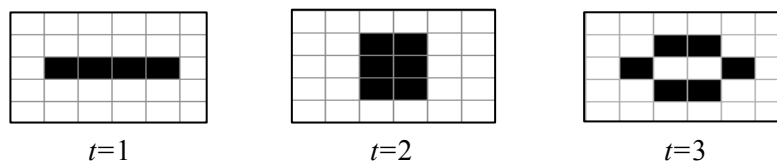


Fig. 2. Evolution of a simple structure

To deepen the brief notions that we have just seen, the following videos are very complete and very accessible [5] et [6]. Many are working on the game of life. And some of them are studying variants among which we can mention: the addition of a probability in counting the number of neighbors [7] and [8], the modification of the rule of local evolution [9], applying the local transition rule asynchronously [10]. We will also be interested in a variant of the game of life, as we will see later.

SPECIAL PATTERN: GLIDERS

When we consider a random initial configuration with many cells and we study its evolution over time we often observe the same phenomenon. A transitory regime that seems chaotic where the different living cells interact with each other, then an established regime where appear different characteristic patterns of the game of life. Among these patterns there are: still life (see fig. 3), oscillators (see fig. 4 and fig. 5) and the spaceships (see fig. 6). Still life is a pattern that does not change from one generation to the other, oscillators returns to their initial state after a finite number of generations and spaceships translate themselves across the space after a finite number of generations. The vessels are therefore characterized by three numbers (a, b, c) where a denotes the horizontal shift, b the vertical shift and c the number of steps necessary to recover the initial configuration shifted by a cells horizontally and b cells vertically.

The reader will get more information on these patterns and on the game of life in general in the article written by Jean-Paul Delahaye [2]. In this part we will focus more particularly on the glider spaceship.

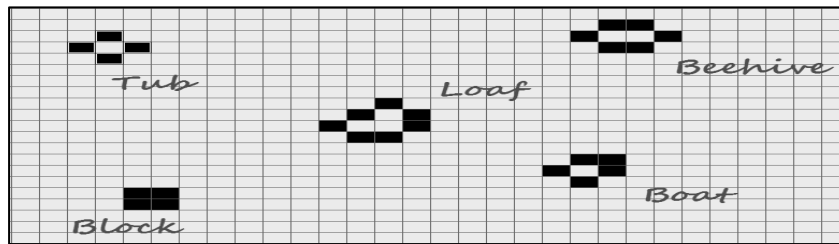


Fig. 3. Still life patterns

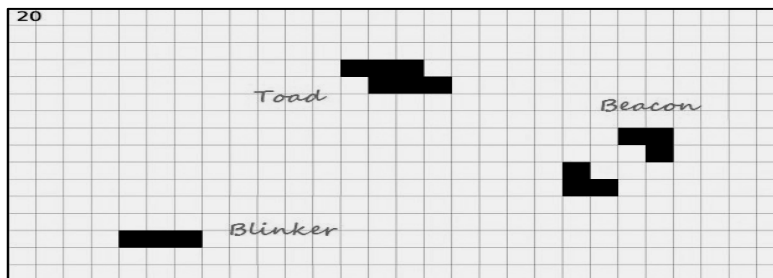


Fig. 4. Oscillators 1/2

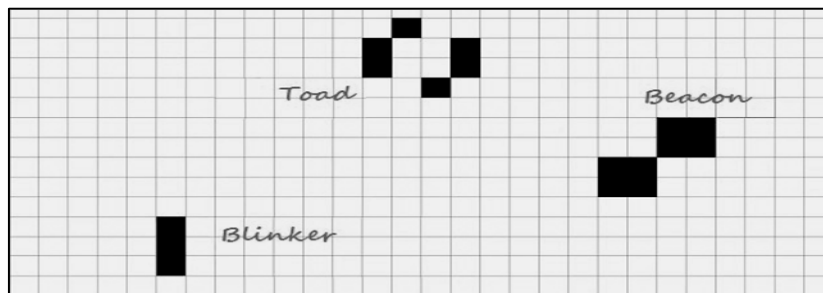


Fig. 5. Oscillators 2/2

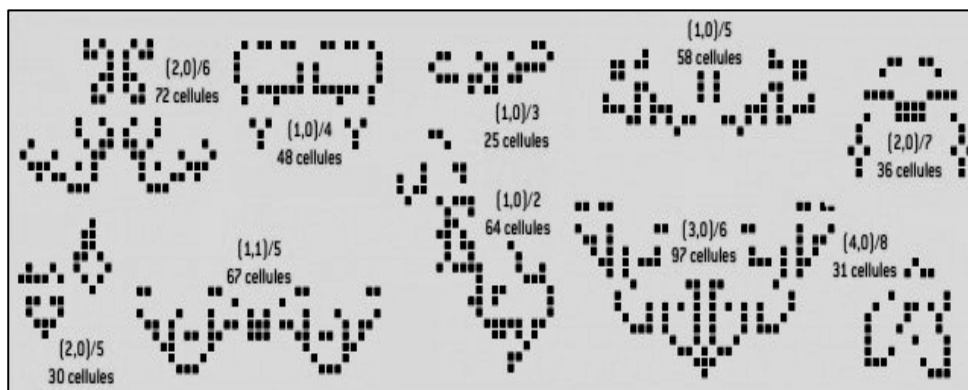


Fig. 6. Some spaceships characterized by (a, b)/c

Let's begin by explaining how ships are particularly interesting objects of study that arouse the interest of different researchers working on the game of life. First of all they allowed to show that there are some configurations whose the growth is infinite in space. Then, and this is with no doubt the most

important point, they allow interaction between different regions of space. The spaceships are the vectors of the information and for this reason they will be useful for the implementation of logical gates.

The glider mentioned above is particularly popular because of its simplicity and rapid discovery. It moves from one horizontal cell and from one vertical cell every four generations. Each of them are represented fig. 7.

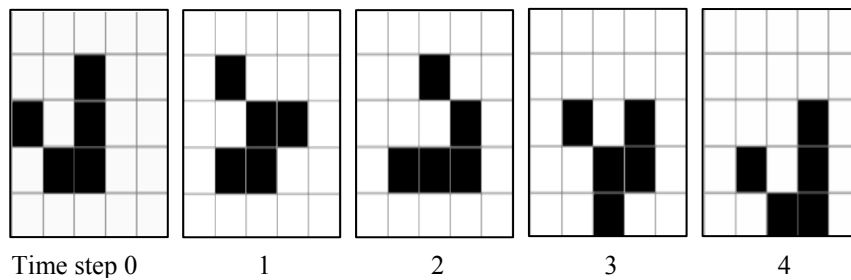


Fig. 7. Configurations of a glider which moves down and to the right

It is important to note that the symmetry of the network on which we study the game of life (in an infinite plane) assures us that from a ship moving in a given direction, we can obtain by symmetry three other ships moving in three other directions by successive rotation of $\pi/2$ angle. For this reason it is enough to specify the horizontal and vertical displacement of a ship without specifying the direction of movement. Then we can get four gliders moving each along the four diagonals of space. There are represented on the fig. 8.

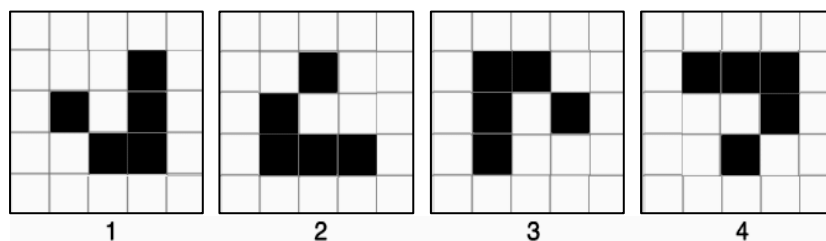


Fig. 8. Four gliders which moves down right (1), down left (2), up left (3) and up right (4)

As mentioned above these gliders will allow interactions between different space areas. More specifically what will be interesting and will be at the end of this part is the interaction of two gliders. When two gliders meet, these will interact to give a few generations later a new configuration. We intuitively call it a collision. Between two gliders there are 73 different collisions. After a collision, two gliders can disappear entirely or reveal certain configurations such as still life or oscillators or even give birth to a new glider. In his article [11], Jean Philippe Renard show a few configurations where two gliders can collide. We will just deal with the collisions useful for the implementation of logical gates. We need two kind of collisions: those that annihilate the two gliders (see fig. 9) and those giving birth to a new glider (see fig. 10 and 11). As for annihilation, the fig. 9 gives the position of the two gliders just before the collision (the one on the left moving down right and the one on the right moving down left). After 4 iterations there are no living cells left, the two gliders have completely disappeared.

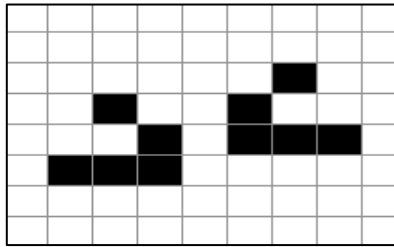


Fig. 9. Configuration of two gliders before collision which would annihilate them

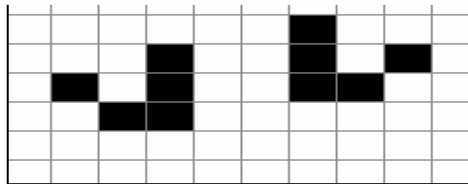


Fig. 10. Configuration of two gliders before collision which would give another glider

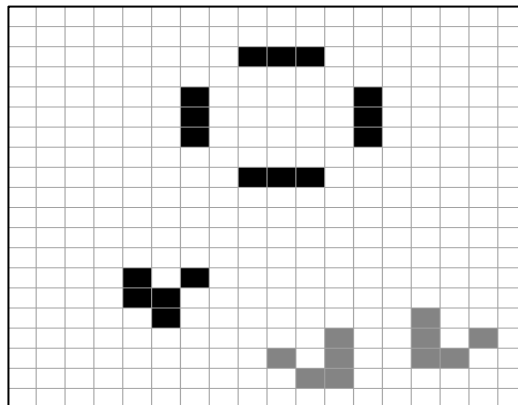


Fig. 11. Configuration of two gliders before (grey) and after (black) collision which would give another glider. Non-regular space

Regarding the creation of a new glider, the fig. 10 gives the position of the gliders just before collision. After 62 calculation steps, we get 4 blinkers and a new glider moving down left. The fig. 11 superimposes the relative position of the two gliders before collision and the result of collision obtained 62 generations later. There are other faster collisions (62 steps being relatively long on the time scale that interest us in this study) that give rise to a new glider. In addition they do not let appear unwanted blocks (the blinkers in this case). Unfortunately the gliders then created do not move in the desired direction.

As we saw above (cf part 1), the game of life is defined on a two-dimensional network. Many are those who have studied the game of life and some of them have worked on modified versions. On the other hand, few have proposed a study on a different network than the plane space usually used. However we can quote the work of Alexander Makarenko [12]. The implementation of a game of life defined on an irregular network will be the subject of this part. To do this we propose, like Alexander Makarenko [12], to add a third frozen state that will represent the irregularities of our initially two-dimensional network. Thus, in addition to the two current states: living cells (black boxes) and dead cells (white

boxes), a third state which will be called "walls" (represented by green boxes) will be taken into account. This will allow us to modify the networks as we want (an example is given fig. 12).

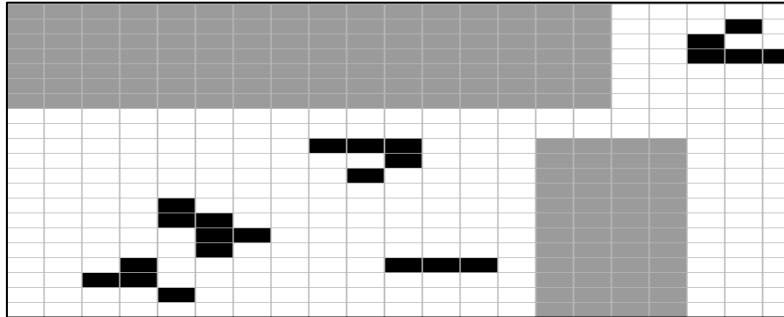


Fig. 12. Non-regular network with walls (in grey)

This new three-state cellular automaton is not entirely defined since it remains to give the local evolution rules. The walls being in a permanent state and the living or dead cells behaving like in the traditional game of life as long as they do not touch the walls it remains only to define the behavior of the living and dead cells when they are in contact with a wall. We will get as many different results as it is possible to choose different rules. This leaves us with an important choice (cf property 1) and gives us hope that the study of such games of life with non-regular networks is a vast subject of research that could be exploited in the future.

Property 1 (number of rules in a network with walls) There are 3^{12610} over cellular automata of game life having three states with one of them is permanent and having a order one neighborhood of Moore as the game of life.

Proof 1 (proposition 1) Let be an over cellular automata of the game life with three states: state 0, state 1 et state 2. Suppose that state 2 is a permanent state so the restriction of A to states 0 and 1 is isomorphic to the game of life. Counting the number of such cellular automata is equivalent to counting the number of local rules that can be chosen under such conditions. First, if a box is in state 2, it remains in this state. There is therefore no choice. So let's take the example of a box in state 0 or 1 (two possible choices). If all it's neighborhood consists of boxes in state 0 or 1, another time we have no choice because the evolution will be governed by the rule of the game of life. Only neighborhoods with at least one cell in state 2 are interesting. It is therefore necessary to choose k cells out of 8 that will be in state 2 with $k \in [1, 8]$ which give $\binom{8}{k}$ possible choices.

With the remaining $8-k$ cells there is a choice between cell in state 0 or cell in state 1 that is 2^{8-k} choices. Finally, there is:

$$2 \cdot \sum_{k=1}^8 2^{8-k} = 2 \cdot (3^8 - 2^8) = 12610$$

patterns for which the next state of the cell is not yet defined.

For each of these patterns we have the choice between state 0, state 1 or state 2 which give 3^{12610} possible rules.

Remark 1 (scientific notation) $3^{12610} = 3,16 \times 10^{6016}$.

New local transition rules. In this part we will give the rules we have chosen but especially how we got them and in what interest.

Motivation and approach

The first idea was to modify the network by adding frozen cells called "walls" in order to find some basic optical results. Among them are the laws of reflection of Snell Descartes. The light rays represent the information (modeled by gliders), in contact with a dioptr (the walls) they are reflected and refracted. Only reflection has been retained since the first idea of obtaining an analogy with optics has been replaced by the desire to implement logic gates. The goal is to obtain, compared to what has already been achieved, different results: simpler and more practical to use (see part 5).

From this objective we have therefore looked for rules that allow the gliders to bounce on the walls. At first, we focused on the study of the bounce on a horizontal wall of a glider moving down and to the right (fig. 13).

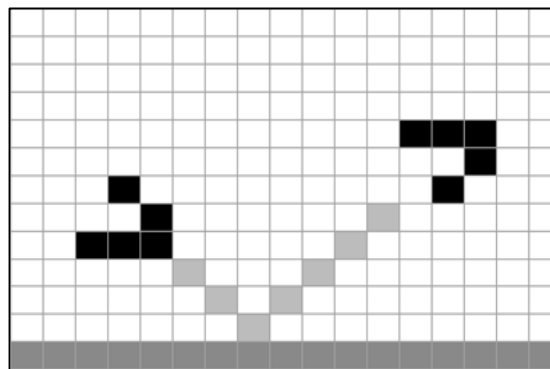


Fig. 13. Wanted trajectory (in weak grey) of a glider (in black) before (on the left) and after (on the right) interaction

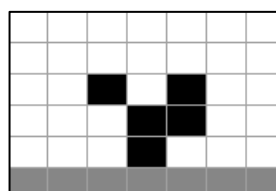


Fig. 14. First contact between a wall and a glider moving down right

There are too many different rules (cf property 1) to look into all of them one by one. By observing all possible configurations of a glider moving down and to the right on the fig. 7, we can notice that it will collide with a wall in the position described fig.14 (cf remark 2).

Therefore we need to know only a tiny part of the rules to calculate the evolution of this pattern. In our example only the four configurations shown in fig. 15 are useful. Indeed, we assume that a dead cell with three walls below and dead cells around (see fig. 16) remains dead.

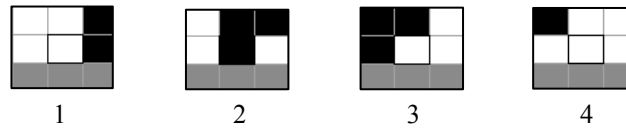


Fig. 15. The four configurations in which we need to give the next state of the red framed cell in order to have the next generation of the pattern given fig. 14

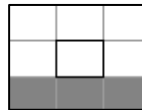


Fig. 16. Dead cell resting on a wall (bottom) surrounded by dead cells

It is therefore necessary to determine the next state of the red framed box for each of these four configurations. In each case two choices are possible: alive state or dead state. There is no creation of walls and the walls are in a permanent state.

Remark 2 (first contact with a wall). We previously stated that the first contact of a glider moving down and right was given by the configuration of the fig. 14 and therefore that only the four patterns shown fig. 15 were interesting. This is true only if the glider is not modified before coming into contact with the wall. For this we considered that a dead box with three walls below, two dead boxes (left and right) remained dead (see fig. 19 and 20 from configuration 10 to 17).

The approach chosen is to focus only on the configurations encountered (fig. 15) then to examine the different possible cases. In the next step, the red framed cell becomes either alive or dead. Thus, noting n the number of configurations ($n = 4$ in the first step), we have 2^n cases to consider. For each of them, we calculate the evolution of the glider in contact with the wall. For example, by choosing the red framed cells of patterns 1, 2, 3 and 4 of fig. 15 respectively become a living, dead, living and dead cell, we obtain the evolution described in the fig. 17.

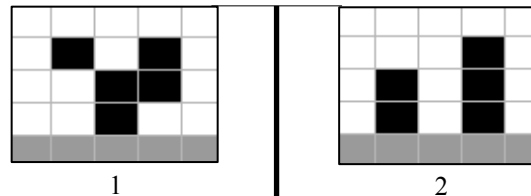


Fig. 17. Evolution from configuration 1 to configuration 2 with the rules described above

At this point we reiterate what we have just realized, which means that we only retain the necessary configurations to predict the evolution of the new pattern (knowing that the evolution of a cell in one of the four configurations of fig. 15 is already given). We then obtain three new configurations (fig. 18 for which it will be necessary, in each of the three cases, to choose if the red framed cell becomes alive or dead.

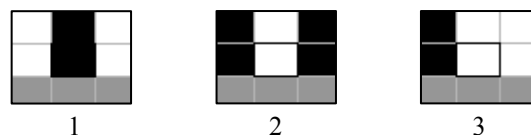


Fig. 18. The three configurations in which we need to give the next state of the framed cell in order to have the next generation of the pattern on the right of fig. 17

We continue until we obtain one of the four patterns of a glider moving up and right (this pattern should not touch the wall).

Rules obtained

Finally, we found a local rule involving only the evolution of 24 configurations allowing a glider moving down and right to bounce from above on a horizontal wall. This local rule is represented fig. 19.

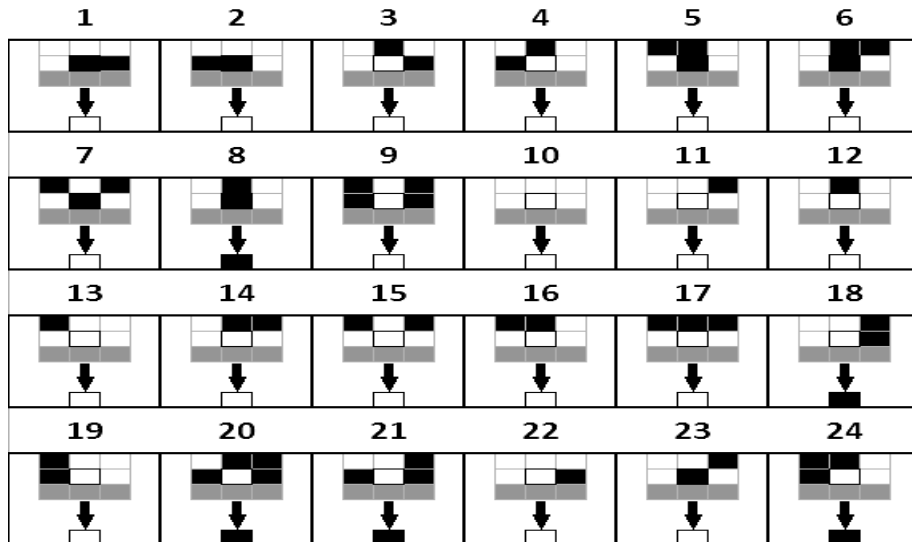


Fig. 19. Local rule allowing a glider moving down and right to bounce from above on a horizontal wall

By symmetry, one can easily find a local rule allowing a glider moving down and left to bounce from above on a horizontal wall. We have shown it fig. 20.

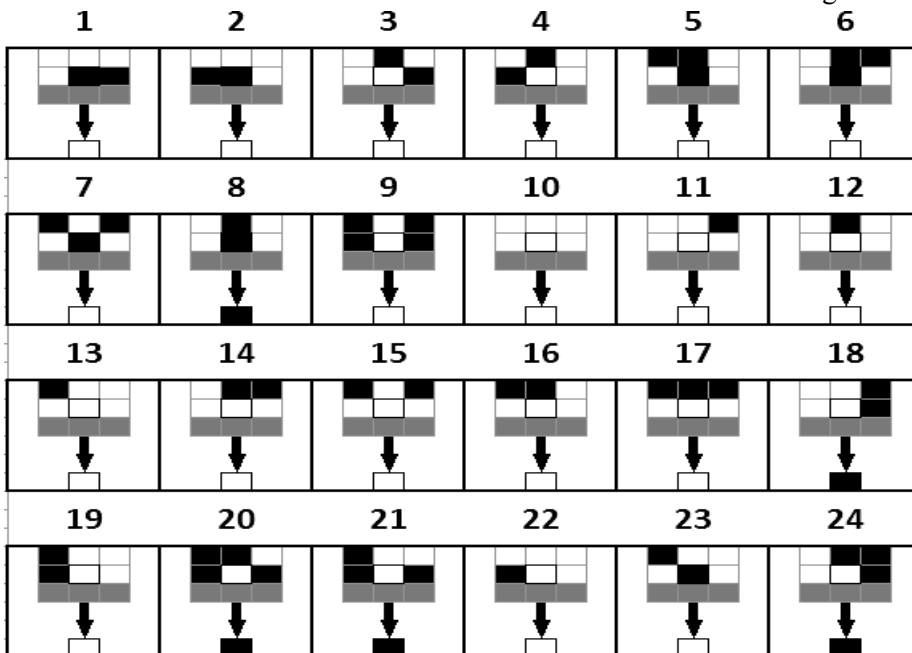


Fig. 20. Local rule allowing a glider moving down and left to bounce from above on a horizontal wall

We can notice that the evolution of the red framed cells having for neighborhood the patterns 18 and 19 of the two rules represented fig. 19 and fig. 20 are incompatible. In other words, it will not be possible from these results to find a local rule to bounce upwards on a horizontal wall at the same time a glider moving down right and a glider moving down left.

This does not mean that there is none, but we did not continue our research to find one since, as we will see (see part 5), we do not need such a rule for the implementation of logic gates.

Gliders can bounce from eight different ways:

- on a horizontal wall from the top (a glider moving down right and a glider moving down left);
- on a horizontal wall from the bottom (a glider moving up right and a glider moving up left);
- on a vertical wall from the right (a glider moving down left and a glider moving up left);
- on a vertical wall from the left (a glider moving down right and a glider moving up right). By symmetry and with the rules of figures 19 and 20, it is possible to obtain a single rule allowing four different types of rebounds among the eight described above (a choice to be made on the two possible for each dash because of the incompatibility).

In our case, we chose to keep the following rules:

- bounce from the top of a glider moving down right on a horizontal wall;
- bounce from the bottom of a glider moving up right on a horizontal wall;
- bounce from the right of a glider moving down left on a vertical wall;
- bounce from the left of a glider moving down right on a vertical wall.

Finally we obtain a local rule giving the evolution of 96 of the 12 610 possible configurations. This leaves many opportunities to work and obtain new results by keeping what has already been done. The rule giving the evolution of the 96 configurations is not explicitly given in this report. Indeed it is directly obtained by applying the appropriate symmetries of the rule represented fig. 19 or fig. 20.

LOGICAL GATES

The purpose of this part is to present the logical gates [13, 14] that have been implemented from game of life with non-regular network we have just seen. We will begin by recalling a few generalities about logical functions, then briefly recall what has already been done about the implementation of logic gates with the game of life before presenting our study. Finally we will give a striking comparison showing the difference between the complexity of the current implementation and the simplicity of the implementation carried out during this study.

Logic gates using Gosper glider guns

John Conway proved that the game of life was a universal cellular automaton [15]. This means that the game of life is able to simulate all calculations made by a computer. For more information, consult Nicolas Ollinger's [16] and Guillaume Theyssier's [17] thesis which deal with universality.

The universality of Conway's cellular automaton makes it possible, among other things, to generate prime numbers [18], to create a Turing machine [19] and even more surprisingly to create a game of life from the game of life itself. What will interest us here is the implementation of logic gates.

As we saw in the section on gliders (part 2), these can carry information. It is for this reason that we find them without exception in all the applications that we have just mentioned and the implementation of logic gates does not deviate from the rule. Specifically, the structure that appears in each of these applications is the glider gun (see fig. 21). The latter makes it possible to continuously generate gliders, which makes it an extremely interesting pattern. Bill Gosper is an American computer scientist who, by introducing this glider gun, at the same time proved the conjecture of Conway asserting that there is a pattern whose number of living cells increase all the time.

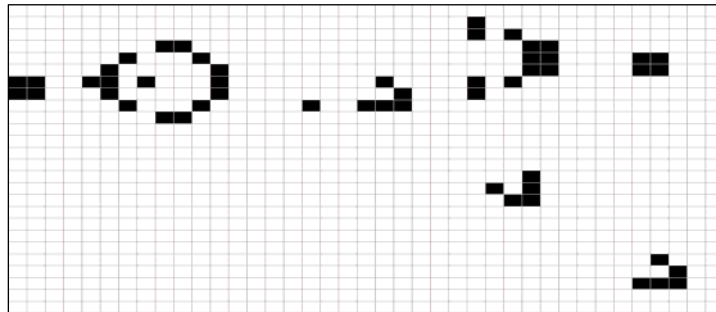


Fig. 21. Glider guns

Currently the implementation of logic gates is based on the combination of several glider guns whose gliders interact with each other to finally let or not pass a glider beam. Thus the value at the entrance or exit is 1 if there is a beam of gliders otherwise it is 0. This implementation is difficult and tedious, we will not detail it here since it is very well explained by Jean-Philippe Renard [11].

Implementation of logic gates in a non-regular network

As far as we are concerned, the implementation of logic gates we have made is based on three points. First of all the information is no longer represented by a glider beam as described above but by a single glider. We no longer need to resort to glider guns, which is a big novelty. Then we set up a particular network with "walls". Each logical gate is a particular configuration of space, a feature that is exploited by bouncing the gliders wisely as described in part 4. Finally, the method relies on collisions between gliders. And especially the two collisions that we analyzed in part 2.

Generally the logic gates set up have two ducts at the top (representing the two inputs). A glider in the conduit means that the entry is at 1 otherwise it is at 0 (see fig. 22). And a conduit down (representing the exit). The particular configuration of the rest of the network will allow or not to obtain a glider in the lower conduit depending on the nature of the logic gate.

Each of the four logic gates have been implemented. Namely: the NOT gate, the OR gate, the AND gate and the XOR gate.

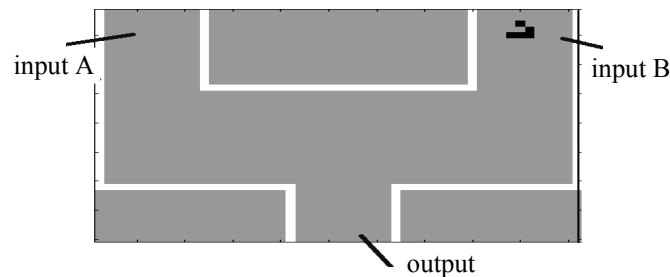


Fig. 22. Logic gate with two inputs $A = 0$ and $B = 1$

CONCLUSION

The previous work provides a significant improvement in what has been done so far. Indeed, the consideration of a variant of the game of life with a non-regular network allowed us to introduce new local rules near irregularities. These rules were chosen in such a way as to be able to obtain a particular property: the rebound of the gliders on a wall. From this specificity, it is then possible to implement logic gates much more intuitive and much easier to use than the logic gates that have been created so far.

Moreover, the large number of rules that can be chosen and the networks that can be considered gives hope that many interesting results can be obtained by deepening the subject. This study therefore provides an innovative result but it also opens up new and interesting perspectives.

REFERENCES

1. *EMERGENCE*. — Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/emergence>. 2019
2. *Delahaye J.-P.* Le royaume du jeu de la vie / J.-P. Delahaye // *Pour la Science*. — 2009. — N. 378. — P. 86–91.
3. *Wolfram S.* New kind of science / S. Wolfram // Wolfram Media Inc., USA. — 2002.
4. *Illiachinski A.* Cellular Automata. A Discrete Universe / A. Illiachinski. — Singapore: World Scientific Publishing, 2001.
5. *Delahaye J.P.* L'automata des chiffres / J.P. Delahaye // *Pour la Science*. — 2010. — N. 394. — P. 80–85.
6. *Wuensche A.* Discrete Dynamics Lab. www.ddlab.com/ 2016
7. *Goldengorin B.* Some applications and prospects of cellular automata in tra@c problems Cellular Automata / B. Goldengorin, A. Makarenko, N. Smilianec. — 2006.
8. *Vlassopoulos N.* An FPGA design for the stochastic Greenberg-Hastings cellular automata / N. Vlassopoulos, N. Fates, H. Berry, B. Girau // *Proc. Int. Conf. on High Performing Computing & Simulation 2010*. — P. 565–574.
9. *Sipper M.* Co-evolving non-uniform cellular automata to perform computation / M. Sipper // *PhysicaD*. — 1990. — Vol. 92. — P. 193–208.
10. *Fates N.* A Guided Tour of Asynchronous Cellular Automata / N. Fates. — arXiv: 1406.0792v2. 2014. — 33 p.
11. *Rennard J.-P.* Implementation of logical functions in the Game of Life / J.-P. Rennard // *Collision-Based Computing*, ed. A. Adamatzky, Springer, London, 2002. — P. 491–512.

12. *Faccetti L.* ‘Game of Life’ with Modifications: Non-regular Space, Different Rules and Many Hierarchical Levels / L. Faccetti, A. Makarenko // *Int. J. Information Content & Processing*. — 2017. — Vol. 4, N. 1. — P. 21–50.
13. *Hopcroft J.E.* Introduction to Automata Theory, Languages and Computation / J.E. Hopcroft, R. Mortwani, J.D. Ullman // Pearson, 2006.
14. *Linz P.* An Introduction to Formal Languages and Automata 4th Edition / P. Linz. — Jones & Parlett Publishers, 2006.
15. *Berlekamp E.* Winning Ways for your Mathematical Plays / E. Berlekamp, J. Conway, R. Guy. — 1982. — Vol. 2, chapter 25 What is Life. Academic Press.
16. *Ollinger N.* Automates cellulaires: structures / N. Ollinger // LIP, ENS Lyon PhD Thesis. — 2002. — 90 p.
17. *Theyssier G.* Automates cellulaires: un modèle de complexités / G. Theyssier // PhD Thesis, ENS LYON, Lyon, 2005. — 178 p.
18. *Wolfram S.* Random sequences generation by cellular automata / S. Wolfram // *Applied Mathematics*. — 1986. — Vol. 7. — P. 123–169.
19. *Rendell P.* A Turing Machine In Conway’s Game Life. In: *Designing Beauty. The Art of Cellular Automata, Emergence? Complexity and Computation*. Eds. Adamatzky A., Martinez G. Springer, Cham, 2016. — P. 149–154.

Received 27.01.2019

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

СИСТЕМА КОНСТРУКТИВНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОННИХ ГАРМАТ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ, ЯКІ ФОРМУЮТЬ ПРОФІЛЬНІ ЕЛЕКТРОННІ ПУЧКИ

І.В. МЕЛЬНИК, А.В. ПОЧИНОК

Анотація. Розглянуто систему конструктивних параметрів моделі електродних систем електронних гармат високовольтного тліючого розряду, які формують профільні електронні пучки з кільцевим фокусом. Відмітною рисою запропонованої моделі є те, що як ключовий параметр обрано кут нахилу твірної поверхні конусного анода до осі симетрії електродної системи. Сформовано систему нерівностей, які визначають геометричні, фізичні та обчислювальні обмеження на конструктивні параметри модельованої електродної системи, а також технологічні допуски на них. Як результат проведених досліджень створено повну, замкнену та несуперечливу систему геометричних параметрів моделі електродних систем електронних гармат високовольтного тліючого розряду, які формують профільні електронні пучки із кільцевим фокусом. Сформовані обмеження на конструктивні параметри моделі, подані у вигляді системи нерівностей, використано у програмному комплексі, призначеному для моделювання електродних систем електронних гармат високовольтного тліючого розряду, з метою контролю входних параметрів моделі на початковому етапі комп'ютерного моделювання.

Ключові слова: система параметрів моделі, конструктивні параметри, геометричні параметри, електронна гармата, електродна система, високовольтний тліючий розряд, профільний електронний пучок.

ВСТУП

Електронні гармати на основі високовольтного тліючого розряду (ВТР) широко застосовують для реалізації електронно-променевої технології у різних галузях промисловості, зокрема в електронній промисловості, приладобудуванні, металургії, машинобудуванні, автобудуванні та авіабудуванні [1–7]. Це зумовлено тим, що гармати ВТР мають низку переваг порівняно із традиційними технологічними електронними гарматами з розжарюваними катодами, серед яких варто відзначити такі [1, 2, 7]:

- 1) стабільність роботи гармат ВТР протягом тривалого часу в середовищі різних газів, зокрема інертних та активних;
- 2) відносно дешевизну електронних гармат ВТР і технологічного вакуумного обладнання, яке забезпечує їх роботу;
- 3) простоту керування струмом розряду електронних гармат газодинамічним способом та з використанням допоміжних низьковольтних розрядів;
- 4) можливість формування профільних електронних пучків з кільцевим фокусом, які забезпечують рівномірне прогрівання циліндричних виробів по всьому периметру.

Серед цих переваг однією з найбільш значущих є можливість формування профільних електронних пучків, оскільки вони забезпечують швидкодійне проведення технологічних операцій, які неможливо виконувати з використанням електронних пучків з точковим фокусом або лазерних пучків. Серед таких операцій слід виокремити автоматичне моноімпульсне зварювання корпусів електронних приладів і термічне оброблення циліндричних виробів з їх рівномірним прогріванням по всьому периметру [1, 7].

Спрощену конструктивну схему електродної системи ВТР, призначеної для формування порожнистого конусного електронного пучка з кільцевим фокусом, зображено на рис. 1.

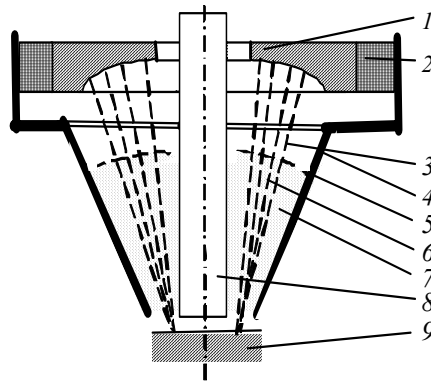


Рис. 1. Конструктивна схема аксіально-симетричної електродної системи ВТР, призначеної для формування порожнистого конусного електронного пучка: 1 — катод; 2 — високовольтний ізолятор; 3 — електронний пучок; 4 — анод; 5 — плазмова межа; 6 — електронний пучок; 7 — анодна плазма; 8 — допоміжний циліндричний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

Така електродна система (рис. 1) — один з можливих варіантів формування електронного пучка з кільцевим фокусом. Крім цього, у літературі розглядаються й аналізуються електродні системи ВТР, які формують дискові та трубчасті електронні пучки [1, 7, 8]. Проте теоретично можна показати, що з геометричного погляду такі системи є окремим випадком електродної системи, показаної на рис. 1, яка формує порожнистий конусний електронний пучок із заданим кутом збіжності.

Проблема полягає у тому, що на тепер не існує точних та адекватних математичних моделей, які б описували складні фізичні процеси, що перебігають в електродних системах технологічних гармат ВТР, які формують профільні електронні пучки. Тут окремим складним завданням є формування системи конструктивних геометричних параметрів для такої моделі. Саме ця важлива науково-технічна та інженерна проблема і буде розглянута у роботі.

ЗАГАЛЬНА КОНЦЕПЦІЯ ФОРМУВАННЯ ФІЗИКО-ТОПОЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОНІВ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ, ЯКІ ФОРМУЮТЬ ПРОФІЛЬНІ ЕЛЕКТРОННІ ПУЧКИ

Узагальнену методику формування фізико-топологічних моделей джерел електронів ВТР, які формують профільні електронні пучки, розглянуто

у працях [9, 10]. Вона полягає у тому, що межа анодної плазми 5, яка окремо показана на рис. 1, розглядається як прозорий для електронів електрод із фіксованим потенціалом, який є близьким до анодного.

За умови великих значень струму розряду можна вважати, що плазмова межа паралельна поверхні сферичного катода [1, 9, 10], а за умови малих значень струму форма плазмової межі зазвичай визначається експериментально через фотографування розрядного проміжку та комп'ютерний аналіз отриманих фотографій з використанням карт зображень і методів розпізнавання образів [10, 11]. Якщо розглядати лише перший випадок, який відповідає значенням максимального струму розряду, положення плазмової межі визначається на підставі того, що об'єм, який займає плазма, не залежить від геометрії електродної системи. Це дозволяє спочатку визначити положення анодної плазми у простій лінійній системі із плоскими електродами, а після цього перерахувати це значення для об'єму анодної порожнини в електродній системі, зображеній на рис. 1. Правомірність такого підходу також теоретично й експериментально обґрунтовано у працях [1, 9].

За умови відомої геометрії плазмової межі для моделювання самоузгодженої електронно-іонної оптики в електродній системі ВТР, зображеній на рис. 1, можуть бути застосовані відомі алгоритми, сформульовані у працях [9, 10]. Для аналізу розподілу електричного поля використовується числовий розв'язок рівняння Пуассона в циліндричних координатах, а для розрахунку просторового заряду — модифікований метод недеформованих тубок струму.

Отже, важливим завданням є формування замкненої та несуперечливої системи геометричних параметрів для електродної системи, конструктивну схему якої зображено на рис. 1. Така система параметрів передбачає не лише формування набору конкретних геометричних величин, але і введення взаємозв'язків між ними та відповідних обмежень [12–14].

ГЕОМЕТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРОДНОЇ СИСТЕМИ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ, ЯКА ФОРМУЄ ПОРОЖНИСТИЙ КОНУСНИЙ ЕЛЕКТРОННИЙ ПУЧОК, ТА ЇХ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ЗАВДАННЯМИ ПРОЕКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ГАРМАТ

Головними вимогами до системи геометричних параметрів фізико-топологічної моделі електродної системи ВТР, яку необхідно сформувати, є повнота, несуперечливість та простота визначення цих параметрів [12]. Крім цього, необхідно зменшити до мінімуму кількість розмірних параметрів, вимірювання яких під час інженерного проектування гармати може давати значні похибки. Виходячи із цих міркувань, усі параметри фізико-топологічної моделі розглядалися через зв'язок з кутом нахилу α твірної конусної поверхні анода до осі симетрії електродної системи. За такої умови зв'язки між конструктивними геометричними розмірами електродної системи формувалися через тригонометричні співвідношення.

Такий підхід до формування системи параметрів моделі відповідає не лише вимогам повноти та несуперечливості, але й умові універсальності моделі. Річ у тім, що через зміну параметра α можна моделювати різні типи

електродних систем ВТР, які формують профільні електронні пучки з кільцевим фокусом. Наприклад, електродні системи, які формують трубчасті електронні пучки, можна розглядати як системи, для яких значення $\alpha = 0^\circ$, а для систем, які формують дискові пучки, значення $\alpha = 90^\circ$ [8]. У праці [8] розглянуто базові рівняння для фізико-топологічних моделей електродних систем ВТР, які формують дискові та профільні електронні пучки, і через числове розв'язування цих рівнянь знайдено залежності положення плазмової межі відносно катода від геометричних розмірів електродної системи. Проте через велику кількість розмірних параметрів та складність системи нелінійних рівнянь для отриманої системи рівнянь не знайдено аналітичного розв'язку [8].

У зв'язку з цим відмітною рисою системи параметрів моделі електродних систем ВТР, яка пропонується у роботі, є її простота, яка полягає у тому, що взаємозалежні геометричні розміри зв'язуються між собою через значення кута α . За такої умови зв'язки між параметрами значно спрощуються і відсутність функції квадратного кореня, використання якої є притаманним для систем геометричних параметрів у разі формування зв'язків між лінійними розмірами, дозволяє звести математичну модель до кубічного рівняння відносно висоти анодної плазми, а таке рівняння може бути розв'язано аналітично.

Базові геометричні розміри для електродної системи ВТР, конструктивну схему якої зображено на рис. 1, показано на рис. 2. Головними із цих розмірів є висота анодної плазми $d_{\text{п}}$, положення плазмової межі відносно катода $d_{\text{кп}}$, товщина катода $h_{\text{к}}$, висота анода $h_{\text{а}}$, максимальний радіус основи конусного анода $r_{\text{а}}$, мінімальний радіус основи конусного анода $r_{\text{кон}}$, який відповідає області виведення електронного пучка з електронної гармати до технологічної камери, радіус сфери катода $R_{\text{к}}$, максимальний поперечний розмір сферичної поверхні катода біля анода $r_{\text{к1}}$, мінімальний поперечний розмір сферичної поверхні катода біля циліндричного електрода $r_{\text{к2}}$, радіус циліндра $r_{\text{п}}$ та його висота $h_{\text{п}}$.

Зрозуміло, що геометричні параметри $d_{\text{п}}$ і $d_{\text{кп}}$ є внутрішніми параметрами моделі, а $R_{\text{к}}$, $r_{\text{кон}}$, $r_{\text{к1}}$, $r_{\text{к2}}$, $r_{\text{п}}$, $h_{\text{п}}$ — конструктивними. Тому пошук залежностей $d_{\text{п}}$ від конструктивних параметрів завжди є головним завданням моделювання на першому етапі проектування газорозрядних електронних гармат, оскільки анодна плазма в електронно-оптичних системах ВТР розглядається як рухомий електрод із заданим потенціалом, положення якого залежить від конструктивних параметрів електродної системи, а також від тиску в камері гармати, перерахованого на довжину електродної системи [1], та від прискорювальної напруги [1, 9, 10].

У теорії ВТР система алгебричних рівнянь, які описують положення плазмової межі відносно катода, записується у вигляді [2, 15]:

$$\left(\frac{\partial\varphi}{\partial n}\right)_{r\in\Gamma} = \sqrt{\frac{n_e k T_e}{\varepsilon_0 A(\varphi^*)}}, \quad A(\varphi^*) = \frac{1}{4} \left(\sqrt{1 + \frac{2q\varphi^*}{kT_e}} + e^{-\frac{2q\varphi^*}{kT_e}} - 2 \right), \quad (1)$$

де n_e — концентрація електронів у плазмі; T_e — їх температура; q — заряд іонів плазми; ϵ_0 — електрична стала; k — стала Больцмана; ϕ^* — приелектродний потенціал, який залежить від складу використовуваного технологічного газу. Зазвичай значення параметра ϕ^* лежить у межах кількох вольтів.

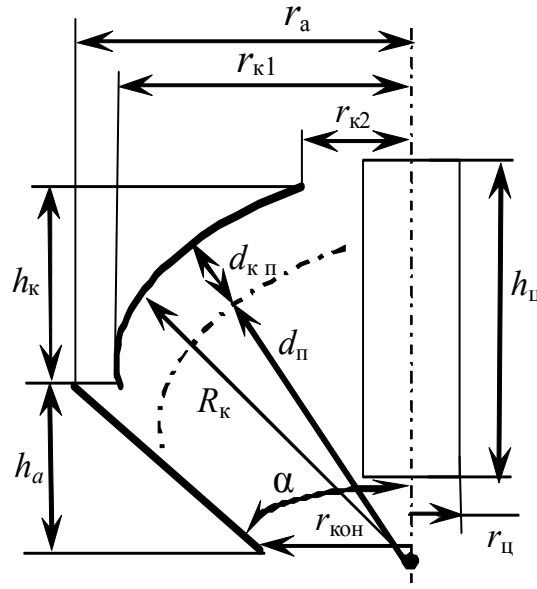


Рис. 2. Геометричні параметри електродної системи ВТР, спрощену конструктивну схему якої зображено на рис. 1

Проте, оскільки розв'язування нелінійної системи рівнянь (1) для електродних систем ВТР із складною геометрією викликає певні обчислювальні труднощі, фахівці під час формування відповідних математичних моделей намагаються використовувати спрощені підходи, основані на апроксимації експериментальних даних про положення плазмової межі. Зокрема, у працях [9, 10] показано й обґрунтовано припущення, що для великих струмів розряду плазмова межа паралельна поверхні катода, а об'єм анодної плазми не залежить від геометрії електродної системи. Це дозволяє визначати об'єм плазмової межі у системах ВТР зі складною геометрією електродів з використанням простого співвідношення [1]

$$V_{\text{л}} = V_{\text{к}}, \quad (2)$$

де $V_{\text{л}}$ — об'єм плазмової межі в еквівалентній лінійній електродній системі; $V_{\text{к}}$ — її об'єм в електродній системі (див. рис. 1). У лінійній електродній системі об'єм анодної можна розрахувати за таким співвідношенням [1]:

$$V_{\text{л}} = \pi r_{\text{а}}^2 \left(L - \frac{I_{\text{л}}}{Q_{e0} \left(\chi \gamma + \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} \right) - \frac{5 \mu_{i0} k T_e}{R_{\text{к}}^2 p_{\text{а}0}^2 e} \sqrt{\frac{m_i}{k T_e}}} \right), \quad (3)$$

де $I_{\text{л}}$ — струм розряду в лінійній електродній системі; $r_{\text{а}}, R_{\text{к}}, L$ — геометричні розміри лінійної системи; $m_{\text{е}}, m_{\text{і}}$ — маса електрона та маса іонів залишкового газу відповідно; $Q_{\text{е0}}$ — усереднений перетин перезарядження іонів на атомах газу; χ — середній коефіцієнт подовження траєкторій електронів у ВТР; $T_{\text{е}}$ — температура електронів у плазмі; γ — коефіцієнт відбиття електронів від поверхні анода; $\mu_{\text{і0}}$ — рухомість електронів в анодній плазмі. Щодо обчислення положення плазмової межі у системі електродів ВТР, яка формує порожнистий конічний електронний пучок, конструктивну схему якої зображено на рис. 2, то для неї об'єм, який займає анодна плазма, можна розрахувати як об'єм тіла обертання [16]:

$$V_{\text{к}} = \int_a^b r^2(z) dz, \quad (4)$$

де $r(z)$ — аналітична функція, яка описує геометрію плазмової межі; a та b — межі інтегрування, які визначаються лінійними розмірами електродної системи (рис. 2). Якщо плазмова межа вважається паралельною поверхні катода, тоді об'єм анодної плазми обчислюється через кут α як об'єм кульового сегмента. Ураховуючи формулу (4), маємо

$$V_{\text{к}} = \pi \left(\left(\frac{4}{3} (R_{\text{к}} - d_{\text{п}})^3 - r_{\text{к1}}^3 \right) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) - r_{\text{ц}}^2 (R_{\text{к}} - d_{\text{п}}) - \frac{4}{3} r_{\text{ц}}^2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) + r_{\text{ц}}^2 (r_{\text{кон}} - d_{\text{п}}) \right). \quad (5)$$

Прирівнюючи співвідношення (3) та (5) з урахуванням співвідношення (2), можна отримати кубічне рівняння залежно від параметра $d_{\text{кп}}$ і розв'язати його з використанням формул Кордано [16]. Якщо плазмова межа не є паралельною поверхні катода, для описання її геометричної форми можна використовувати співвідношення [10, 11]:

$$r(z) = \sqrt{C (\ln(A) - \ln(z - B))}, \quad (6)$$

де A, B, C — напівемпіричні коефіцієнти, які визначаються за допомогою фотографування розрядного проміжку та комп'ютерного аналізу яскравості отриманих фотографій з використанням карт зображень та методів розпізнавання образів [11]. Але рівняння (6) можна розв'язати лише числовим способом.

Щодо товщини катода $h_{\text{к}}$, то цей геометричний параметр не впливає на електронно-оптичні властивості електродної системи, проте, оскільки ступінь нагрівання катода іонним потоком суттєво впливає на значення коефіцієнта вторинної іонно-електронної емісії, цей конструктивний параметр з урахуванням внутрішніх термодинамічних параметрів системи охолодження визначає енергетику розряду та струм електронного пучка. Математичні моделі для визначення температури катода та залежності коефіцієнта вторинної іонно-електронної емісії від температури для електродних систем ВТР, які формують електронні пучки з точковим фокусом, наведено у пра-

цях [10, 17]. З іншого боку, параметр h_k пов'язаний з геометричними параметрами R_k і h_t тригонометричним співвідношенням

$$h_k = R_k \left(\cos(\alpha) - \sqrt{1 + \left(\frac{r_{\text{ц}}}{h_{\text{ц}}} \right)^2} \right). \quad (7)$$

Із використанням співвідношення (7) можна оцінити температуру катода та струм електронного пучка [17].

ОБМЕЖЕННЯ, ЯКІ НАКЛАДАЮТЬСЯ НА ПАРАМЕТРИ МОДЕЛІ

Зрозуміло, що не для всіх значень параметрів електродної системи, наведених на рис. 2, можлива технічна реалізація такої системи. Тому на визначені у попередньому розділі конструктивні параметри моделі накладається низка обмежень, зумовлених різними факторами. У зв'язку з цим у теорії проектування електронних систем розрізняють геометричні, фізичні, обчислювальні та технологічні обмеження [12–14]. Найпростішими є геометричні обмеження, які зумовлені можливою некоректністю описання топології визначеної електродної системи через невиконання законів геометрії для визначених значень параметрів. Невиконання геометричних обмежень зазвичай призводить до обчислювальних помилок під час розв'язання задачі моделювання, тому перевірка цих обмежень на початку виконання програми моделювання є важливим критерієм надійності роботи таких комп'ютерних програм. Фізичні обмеження накладаються на значення геометричних параметрів моделі у тому випадку, коли вони не суперечать законам геометрії, але є неможливими з огляду на відповідні фізичні закономірності. Наприклад, значення $(r_{k2} - r_{\text{ц}})$ для параметрів електродної системи (див. рис. 1) має відповідати правилу забезпечення надійної електричної ізоляції для заданих значень прискорювальної напруги і тиску технологічного газу [18]. Обчислювальні обмеження на значення параметрів моделі накладаються тоді, коли вони не мають ні геометричних, ні фізичних обмежень, але гранична величина точності числових алгоритмів розрахунку та можливості наявних комп'ютерних засобів не дозволяють виконувати точні розрахунки для параметрів зі значеннями, більшими або меншими за задану граничну величину [19]. Зазвичай обчислювальні обмеження накладаються на значення параметрів моделі тоді, коли немає відповідних геометричних та фізичних обмежень [12].

Технологічні обмеження визначаються технологією виготовлення елементів електродної системи та інженерними вимогами до максимальних допусків на розкид значень заданих геометричних розмірів і кутів [19].

Насамперед слід відзначити, що система геометричних параметрів, заданих на рис. 2, є надлишковою. Поздовжній розмір сферичної поверхні катода, заданий радіусом r_{k1} , пов'язаний із радіусом сфери катода R_k та кутом α співвідношенням

$$r_{k1} = R_k \sin(\alpha), \quad (8)$$

а відстань від плазмової межі до поверхні катода $d_{\text{кп}}$ виражається через висоту плазми $d_{\text{п}}$ та радіус сфери катода R_k :

$$d_{кп} = R_k - d_k. \quad (9)$$

Рівняння (8) зв'язує конструктивні параметри електродної системи, а рівняння (9) — внутрішні параметри з конструктивним параметром R_k .

Проте значення $r_{к1}$ і $r_{к2}$ зручно використовувати для обчислення фізичних обмежень, які зумовлюють ізоляційні властивості електродної системи, а значення $d_{кп}$ є більш зручним для аналізу особливостей електронно-оптичних властивостей електродної системи, хоча під час розв'язування рівняння (2) зазвичай зручніше шукати параметр $d_{п}$ [1, 9, 10].

Зрозуміло, що на параметри електродної системи (рис. 2) накладаються такі геометричні обмеження:

$$r_{к2} > r_{п}; \quad r_a > r_{к1}; \quad \alpha > \arctg\left(\frac{r_{п}}{h_{п}}\right). \quad (10)$$

Існує інше геометричне обмеження, яке накладається на мінімальний поздовжній розмір катода $r_{к2}$:

$$r_{к2}^{\min} = R_k \sin\left(\arctg\left(\frac{r_{п}}{h_{п}}\right)\right) = \frac{R_k r_{п}}{h_{п} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{r_{п}}{h_{п}}\right)^2}}. \quad (11)$$

Проте на параметри $r_{к2}$, r_a та α накладаються більш строгі фізичні обмеження, пов'язані із забезпеченням вимог до електричної міцності розрядного проміжку. Згідно із теорією газового розряду мінімальна відстань між електродами, за умови заданої прискорювальної напруги $U_{пр}$ і тиску в розрядній камері p , обчислюється відповідно до закону Пашена за співвідношенням [18]

$$d_{\min} = \frac{2,72 U_{пр}}{A p} \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right), \quad (12)$$

де A — напівемпіричний коефіцієнт; γ — коефіцієнт вторинної іонно-електронної емісії для визначеного матеріалу катода. Згідно зі співвідношенням (12) нерівності (10) переписуються у вигляді:

$$r_{к2} > r_{п} + d_{\min}; \quad r_a > r_{к1} + d_{\min}; \quad \alpha > \arctg\left(\frac{r_{п} + d_{\min}}{h_{п}}\right). \quad (13)$$

Співвідношення (11) з урахуванням першої нерівності системи (13) набирає вигляду

$$r_{к2}^{\min}(r_{п}) = \left(1 - \frac{R_k}{h_{п} \sqrt{1 + \left(\frac{r_{п}}{h_{п}}\right)^2}}\right) r_{п} > d_{\min}. \quad (14)$$

Оскільки нерівність (14) є нелінійною, знайти залежність $r_{к2}^{\min}(r_{ц})$ можна лише з використанням числових розрахунків. Відповідні графічні залежності для різних значень параметрів моделі R_k і $h_{ц}$, які отримані з використанням засобів програмування системи MatLab [20, 21], показано на рис. 3.

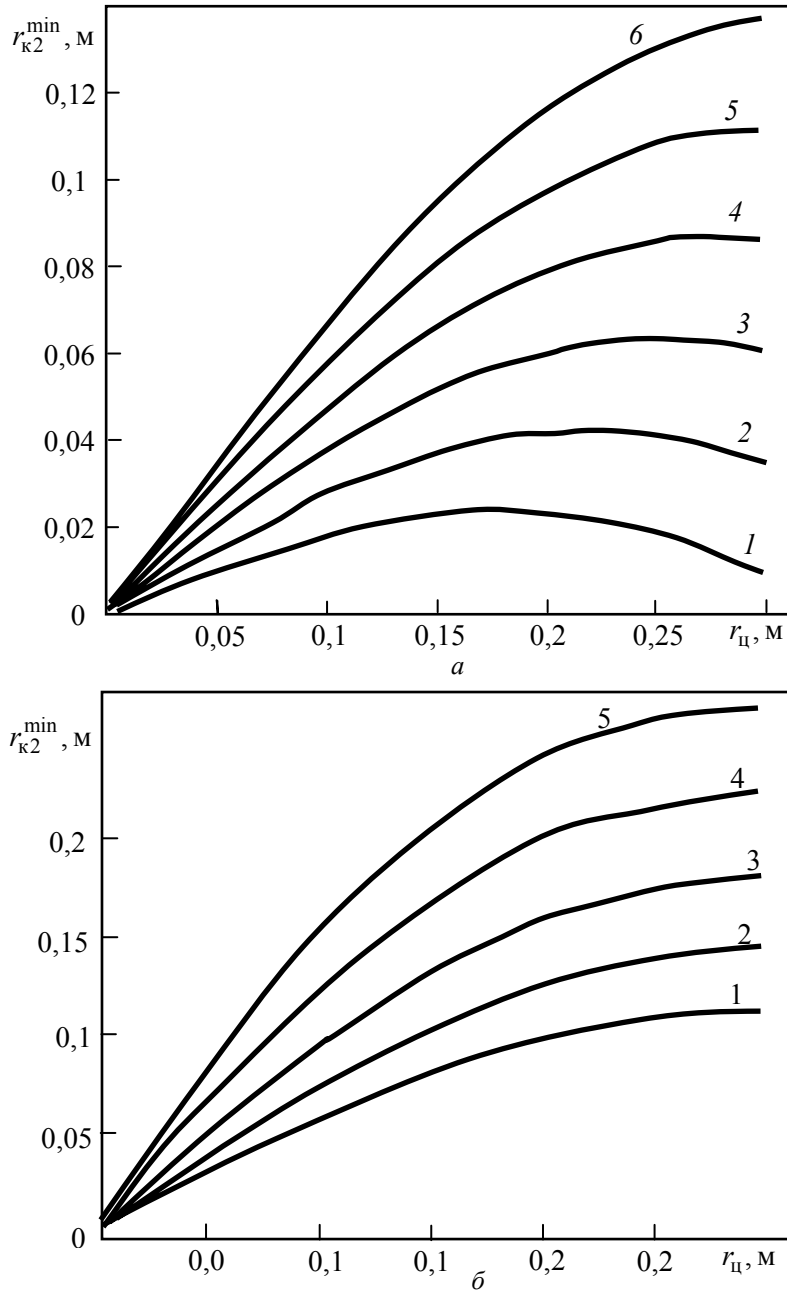


Рис. 3. Залежність мінімального значення поздовжнього розміру катода біля циліндра $r_{к2}^{\min}$ від радіуса циліндра, радіуса сфери катода a — $h_{ц} = 0,5$ м; 1 — $R_k = 0,85$ м, 2 — $R_k = 0,8$ м, 3 — $R_k = 0,75$ м, 4 — $R_k = 0,7$ м, 5 — $R_k = 0,65$ м, 6 — $R_k = 0,6$ м та висоти циліндра; $\bar{\sigma}$ — $R_k = 0,8$; 1 — $h_k = 0,5$ м, 2 — $h_k = 0,45$ м, 3 — $h_k = 0,4$ м, 4 — $h_k = 0,35$ м, 5 — $h_k = 0,3$ м

Іншим геометричним обмеженням на параметри моделі електродної системи ВТР можна надати вигляду

$$h_{\text{ц}} < R_{\text{к}}, \quad r_{\text{кон}} > r_{\text{ц}}, \quad h_{\text{ц}} > h_{\text{к}}, \quad r_{\text{к1}} > r_{\text{к2}}, \quad r_{\text{а}} > r_{\text{кон}}. \quad (15)$$

На підставі наведених міркувань для мінімального значення кута α з урахуванням співвідношення (14) можна записати

$$\alpha_{\text{min}} = \arctg\left(\frac{r_{\text{к2}}^{\text{min}}}{h_{\text{ц}}}\right), \quad (16)$$

тоді співвідношення (16) стає більш строгим, ніж третя нерівність системи (10). Максимальне значення кута $\alpha = 90^\circ$ відповідає електродній системі, яка формує дисковий електронний пучок [8].

Для висоти анодного електрода $h_{\text{а}}$ також існують геометричні обмеження:

$$h_{\text{а}} < R_{\text{к}} - h_{\text{к}}, \quad h_{\text{а}} < R_{\text{к}} - h_{\text{ц}}. \quad (17)$$

Мінімальне значення радіуса сфери катода $R_{\text{к}}$ задається обмеженнями:

$$R_{\text{к}} > h_{\text{а}} + h_{\text{к}}, \quad R_{\text{к}} > h_{\text{ц}}, \quad (18)$$

які є наслідком нерівностей (17). А на максимальне значення радіуса сфери катода геометричних та фізичних обмежень не існує; окремий випадок $R_{\text{к}} = \infty$ відповідає плоскій поверхні катода. Тому для цього випадку накладається лише обчислювальне обмеження, яке для використовуваних алгоритмів розрахунку електронно-оптичних властивостей електродної системи та застосованих обчислювальних засобів встановлено на рівні

$$R_{\text{к}} < 10^6 \text{ м}. \quad (19)$$

ТЕХНОЛОГІЧНІ ДОПУСКИ НА ГЕОМЕТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ МОДЕЛІ

Наведемо тепер оцінку технологічних допусків на конструктивні параметри електродної системи, наведеної на рис. 2. У загальному випадку можливі технологічні допуски можна оцінити в ході обчислювальних експериментів через аналіз впливу змін відповідного конструктивного розміру на фокальні параметри електронного пучка [14]. Такий метод в обчислювальній математиці називається методом малих збурень і у загальному випадку записується у вигляді таких простих співвідношень [14]:

$$\varepsilon_F = \frac{\partial F(x)}{\partial x} \Delta x; \quad \varepsilon_d = \frac{\partial d_{\text{п}}(x)}{\partial x} \Delta x, \quad (20)$$

де x — змінний конструктивний параметр; F — положення фокуса електронного пучка; $d_{\text{п}}$ — товщина фокального кільця; ε_F — допустиме значення зміни положення фокуса пучка; ε_d — допустиме значення зміни товщини фокального кільця. Зрозуміло, що в разі використання співвідношення (20) значення ε_F і ε_d задаються в абсолютних одиницях і мають розмірність вимірюваної величини. Якщо зручніше визначати технологічні допус-

ки у відносних одиницях, співвідношення (20) можна переписати у вигляді [10, 14, 19]:

$$x_p = x_{обч} \left(1 \pm \frac{\Delta x|_{\varepsilon_F = \Delta F(x)}}{x} \right); \quad x_p = x_{обч} \left(1 \pm \frac{\Delta x|_{\varepsilon_{d_n} = \Delta d_n(x)}}{x} \right), \quad (21)$$

де $x_{обч}$ — модельне значення конструктивного параметра; x_p — його реальне значення з урахуванням відносної похибки виготовлення деталей електродної системи. У співвідношеннях (21) знак \pm відповідає можливій зміні заданого значення розміру x у бік як збільшення, так і зменшення. Проте часто у технології виготовлення точних приладів є допустимими лише односторонні зміни заданих параметрів. У такому випадку у співвідношеннях (21) замість знака \pm ставиться або знак $+$, або знак $-$ залежно від можливого напрямку зміни відповідного параметра. Числові експерименти з моделювання електродної системи ВТР (рис. 2) показали, що на параметри моделі мають бути накладені такі технологічні обмеження:

$$\begin{aligned} R_{к.р} &= R_{к.обч} (1 \pm 0,0012), \quad \alpha_p = \alpha_{обч} (1 \pm 0,0014), \quad r_{ц.р} = r_{ц.обч} (1 - 0,0125); \\ r_{к2.р} &= r_{к2.обч} (1 + 0,0131), \quad r_{к1.р} = r_{к1.обч} (1 - 0,0142); \quad r_{а.р} = r_{а.обч} (1 + 0,0112), \\ r_{кон.р} &= r_{кон.обч} (1 + 0,014); \\ h_{ц.р} &= h_{ц.обч} (1 \pm 0,015), \quad h_{а.р} = h_{а.о.о} (1 \pm 0,0137); \\ h_{к.р} &= h_{к.обч} (1 \pm 0,052), \end{aligned} \quad (22)$$

де індекс p відповідає реальним значенням параметрів, а індекс $обч$ — модельним. Обчислені значення для технологічних допусків відповідають величині $\frac{\Delta x}{x} = 0,05$, тобто відносному відхиленню фокальних параметрів електронного пучка на 5%.

З отриманих співвідношень (22) видно, що найбільш строгі обмеження близько 0,1% накладаються на значення радіуса сфери катода R_k та на кут α . Це збігається з відомими з основ електронної оптики теоретичними відомостями про те, що радіус емісійної поверхні катода і кут нахилу анодної поверхні до осі симетрії системи найбільше впливають на електронно-оптичні властивості електродних систем [20]. Для більшості інших параметрів значення допустимого відхилення $\delta = \frac{\Delta x}{x}$ становило близько 1%, а для параметра h_k — близько 5%. Слід зазначити, що величина δ визначалась за співвідношеннями (21), а потім обирались мінімальні значення цієї величини за параметрами ε_F та ε_{d_n} , тобто [12, 19]

$$\delta = \frac{\Delta x_{\min}|_{\varepsilon_F, \varepsilon_{d_n}}}{x}. \quad (23)$$

Згідно з конструктивною схемою електродної системи (рис. 2) значення $r_{ц1}$ і $r_{к1}$ можуть змінюватись тільки у бік збільшення, а значення $r_{к2}$ і r_a — лише у бік зменшення, що зумовлено необхідністю забезпечення електричної міцності розрядного проміжку відповідно до співвідношення (12). Усі розрахунки величини d_{min} виконувались для значень $U_{пр} = 15$ кВ; $p = 5$ Па; $\gamma = 4,3$, матеріал катода — алюміній, робочий газ — азот. Параметр $r_{кон}$ також вважався таким, що може змінюватись лише у бік збільшення, оскільки зменшення цього параметра призводить до значного збільшення втрат потужності електронного пучка через осідання електронів на стінці анода біля вихідного отвору. Отримані співвідношення (22) були використані для розроблення технологічної документації на виготовлення експериментального зразка електронної гармати ВТР.

КОНТРОЛЬ ВХІДНИХ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОДНОЇ СИСТЕМИ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ З ВИКОРИСТАННЯМ ГРАФІЧНОГО ІНТЕРФЕЙСУ КОРИСТУВАЧА ТА ДІАЛОВОВИХ ВІКОН

Отримані результати щодо обмежень на параметри моделі, задані співвідношеннями (10)–(22), використані у програмному комплексі, призначеному для моделювання електронно-оптичних властивостей електродних систем ВТР, які формують профільні електронні пучки. Це дозволило значною мірою підвищити надійність роботи створених програмних засобів та уникнути обчислювальних помилок під час роботи програми. Процедура контролю вхідних параметрів моделі реалізовано з використанням засобів програмування системи MatLab [21, 22]. Вікно вхідного інтерфейсу цієї програми показано на рис. 4, а діалогове вікно для введення геометричних конструктивних параметрів моделі — на рис. 5.

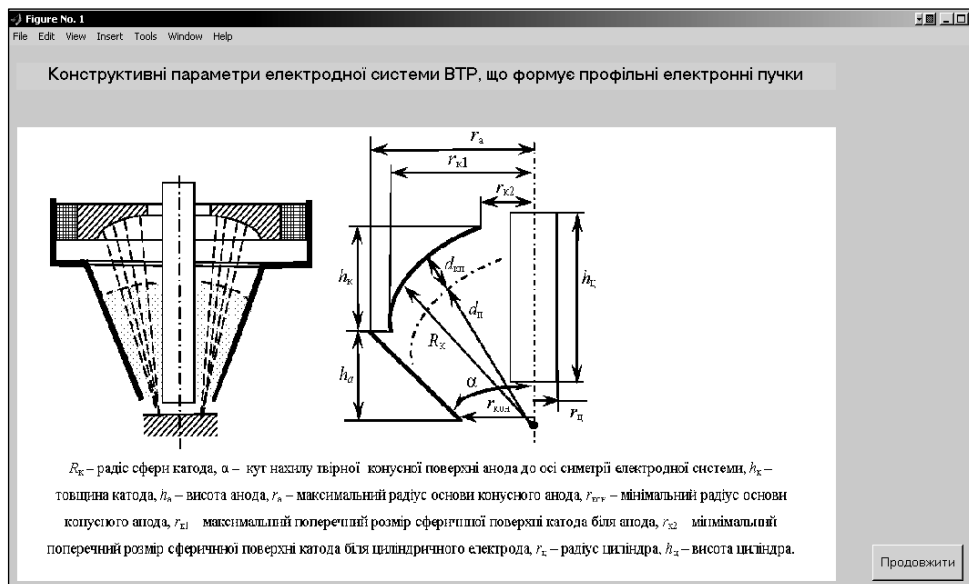


Рис. 4. Вхідний інтерфейс програми моделювання електродної системи ВТР, конструктивна схема якої наведена на рис. 2, екранна копія

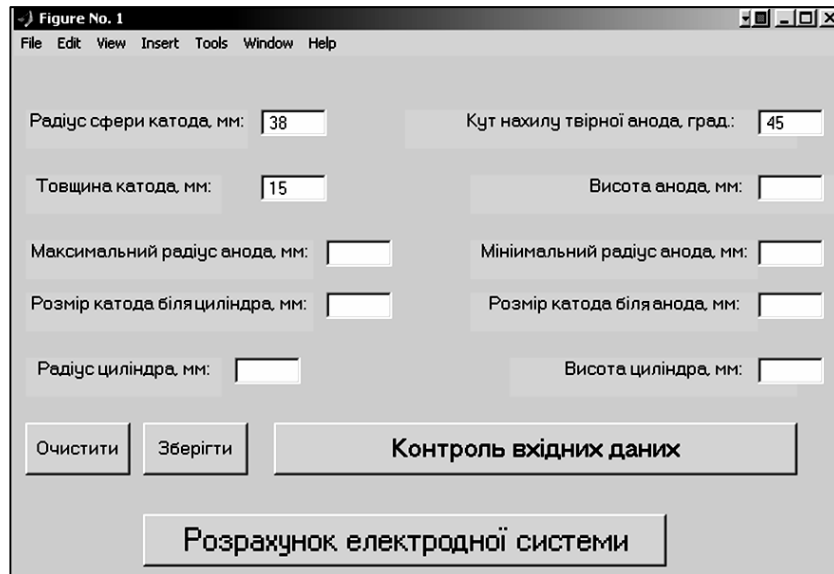


Рис. 5. Діалогове вікно для введення конструктивних розмірів електродної системи ВТР, зображеної на рис. 2, екранна копія

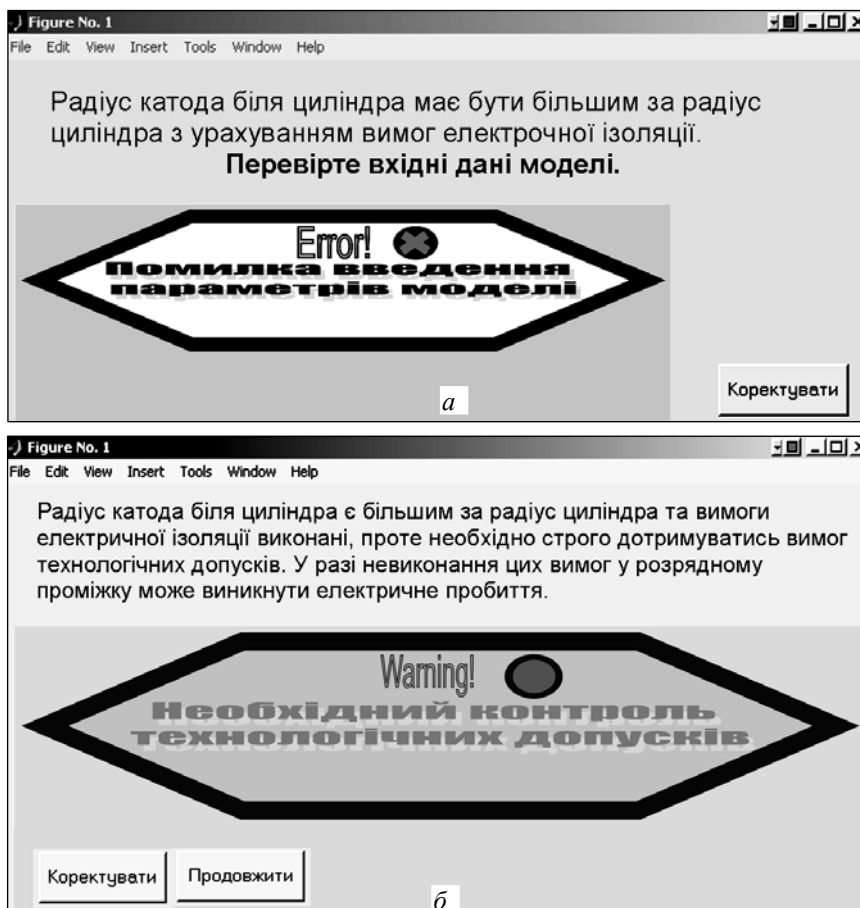


Рис. 6. Діалогові вікна контролю вхідних параметрів моделі газорозрядної гармати ВТР, яка формує профільні електронні пучки: *a* — вікно повідомлення про помилку вхідних параметрів, екранна копія; *б* — вікно з попередженням про необхідність строго дотримання технологічних допусків, екранна копія

Перевірити коректність уведених параметрів моделі за співвідношеннями (7–19, 22) можна натисненням відповідної кнопки «Контроль вхідних даних» у діалоговому вікні. У разі натиснення кнопки «Розрахунок електродної системи» також виконується відповідний контроль параметрів моделі, що дозволяє уникнути помилки розрахунків. У випадку, коли в ході контролю вхідних параметрів моделі виявляються помилки, виводяться діалогові вікна з відповідними повідомленнями про необхідність коригування вхідних даних; одне з таких вікон показано на рис 6, а. У програмі окремо аналізується випадок, коли обмеження (7)–(19) виконуються, але невиконання вимог до технологічних допусків, заданих співвідношеннями (22), може призвести або до пробивання газового проміжку, або до істотних втрат струму електронного пучка в області його виведення з розрядної камери гармати в технологічну камеру. Одне з діалогових вікон із таким попередженням показано на рис. 6, б.

АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ВИСНОВКИ

Запропонована система конструктивних параметрів фізико-топологічної моделі електродних систем ВТР, які формують профільні електронні пучки, є повною, замкненою та несуперечливою. Обмеження, які накладаються на геометричні параметри моделі, записані у вигляді строгих правил через математичні нерівності та реалізовані у програмному комплексі, призначеному для моделювання таких електродних систем. Головною відмінною особливістю запропонованої моделі та її перевагою над попередніми є те, що як ключовий конструктивний параметр розглядається кут нахилу твірної конусного анода до осі симетрії системи. Уведення цього ключового параметра дало змогу зробити розроблену модель досить універсальною і розглядати електродні системи ВТР, які формують не лише порожнисті конусні, але й дискові та трубчасті електронні пучки. Це дозволило звести до мінімуму кількість геометричних параметрів конструкції електродної системи та встановити зв'язки між взаємозалежними параметрами через прості тригонометричні співвідношення. На базові конструктивні параметри моделі накладаються не лише геометричні, але й відповідні фізичні, технологічні та обчислювальні обмеження. Тестування розробленого програмного комплексу, призначеного для моделювання електродних систем ВТР, які формують профільні електронні пучки, показало високу надійність роботи розроблених програмних засобів.

Отримані у роботі результати мають велику практичну цінність для фахівців, які займаються проектуванням електронних гармат ВТР та їх упровадженням для реалізації сучасних електронно-променевих технологій у серійному та масовому виробництві.

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. Крейнфельд, 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, Т.В. Лапшук та ін. — 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, J.P. Heinss 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, V.G. Melnyk 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. *Denbnovetsky S.V. Model Of Beam Formation In A Glow Discharge Electron Gun With A Cold Cathode* / S.V. Denbnovetsky, J. Felba, V.I. Melnik, I.V. Melnik // Applied Surface Science, 111 (1997). — P. 288–294.
10. *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.
11. *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.
12. *Норенков И.П. Основы теории и проектирования САПР* / И.П. Норенков, В.Б. Маничев. — М.: Высш. шк., 1990. — 336 с.
13. *Мельник И.В. Классификация моделей электронно-оптических систем с точки зрения методологии САПР* / И.В. Мельник // Электроника и связь. — 2007. — № 2(37). — С. 20–31.
14. *Мельник И.В. Инженерные допуски на конструктивные параметры технологических источников электронов высоковольтного тлеющего разряда* / И.В. Мельник // Электроника и связь, темат. вып. «Проблемы электроники». — 2007. — Ч. 1. — С. 66–70.
15. *Ильин В.П. Численные методы решения задач электрофизики* / В.П. Ильин. — М.: Наука, 1985. — 336 с.
16. *Справочник по математике для инженеров и учащихся ВУЗов* / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. — М.: Наука, 1981. — 720 с.
17. *Мельник В.И. Моделирование температурных режимов работы катода источников электронов высоковольтного тлеющего разряда на основе решения уравнения теплового баланса* / В.И. Мельник, И.В. Мельник // Вестн. Херсон. нац. техн. ун-та. — 2010. — Вып. 3 (39). — С. 311–315.

18. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер. — М.: Наука, 1987. — 592 с.
19. Денбновецкий С.В. Основы автоматизированного проектирования электронных пирборов / С.В. Денбновецкий, Л.Д. Писаренко, В.К. Резниченко. — К.: Вища. шк., 1987. — 335 с.
20. Силадьи М. Электронная и ионная оптика / М. Силадьи. — М.: Мир, 1990. — 640 с.
21. Мельник І.В. Система науково-технічних розрахунків MatLab та її використання для розв'язання задач із електроніки: навч. посіб. у 2 т. Т. 1. Основи роботи та функції системи. — К.: Ун-т «Україна», 2009. — 507 с.
22. Мельник І.В. Система науково-технічних розрахунків MatLab та її використання для розв'язання задач із електроніки: навч. посіб. у 2 т. Т. 2. Основи програмування та розв'язання прикладних задач. — К.: Ун-т «Україна», 2009. — 327 с.

Надійшла 18.12.2018

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДВОМАШИННОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З РУХОМИМ ІНДУКТОРОМ

В.В. ЛУЦЬО, А.М. СІЛЬВЕСТРОВ

Анотація. Запропоновано метод моделювання двомашинного асинхронного агрегата, що ґрунтується на розділенні моделей первинної і вторинної асинхронних машин на дві окремі структурні одиниці. Моделювання первинної машини від початку виконується у нерухомій відносно статора системі координат, у той час, як моделювання вторинної машини забезпечується переходом з рухомої в нерухому систему координат за допомогою оберненого перетворення Парка. У ході розроблення математичної моделі побудовано структурні схеми окремих блоків моделі і встановлено взаємозв'язки між ними. Ця математична модель згідно з результатами попередніх досліджень у галузі моделювання асинхронних машин дозволяє виявити особливості роботи досліджуваного класу електричних машин. Може бути використана для розроблення і дослідження електроприводу на їх основі.

Ключові слова: асинхронний двигун, двомашинний агрегат, математична модель, рухомий індуктор, нерухома система координат, обернене перетворення Парка.

Для дослідження особливостей роботи нових видів електричних машин, як і пошуків напрямів їх найбільш ефективного використання, важливу роль відіграє наявність адекватної математичної моделі, яка б забезпечувала можливість спостереження перебігу необхідних фізичних процесів.

Відмітними особливостями двомашинних агрегатів з рухомим індуктором (PI) як окремого класу електричних машин є досягнення високої швидкості обертання асинхронного електроприводу з можливістю її регулювання в широких межах без застосування перетворювача частоти; можливість отримання різної потужності і швидкості обертання на двох валах без використання редуктора або диференціала, забезпечення плавного безреостатного пуску електроприводу тощо.

Для уточнення побудови конструктивних елементів під час проектування та визначення особливостей функціонування даного класу електричних машин виникає потреба в розробленні їх математичної моделі. Для дослідження обрано конструкцію двомашинного асинхронного двигуна з рухомим індуктором (рис. 1).

Електродвигун складається з корпусу 1, у якому закріплено статор 2 з трифазною обмоткою 3. На валу 4 закріплено високошвидкісний ротор 5 з короткозамкненою (КЗ) обмоткою 6. Концентрично відносно статора 2 і ротора 5 розміщено PI 7 з трифазною обмоткою 8 і КЗ з обмоткою 9. Напряга живлення подається на обмотку 3 статора 2 через коробку виводів 14, а на обмотку 8 індуктора 7 — через щітковий вузол 15 і контактні кільця 16, які закріплені на поверхні порожнистого вала 12. Детальний опис конструкції наведено у праці [1].

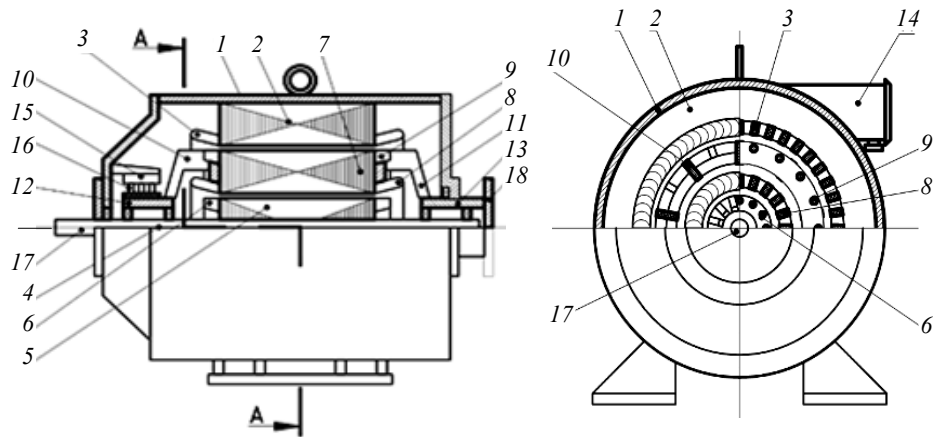


Рис. 1. Конструкція двомашинного асинхронного двигуна з рухомим індуктором

Пристаюючи до математичного опису, уведемо такі припущення:

- вплив магнітних полів первинної і вторинної машин агрегата одного на одне настільки малий, що ним можна знехтувати;
- тертя у всіх підшипниках двомашинного агрегата відсутнє.

Для опису моделі двомашинної конструкції скористаємось такими принципами індексування. Величини, які стосуються статора, мають індекс 1, КЗ обмотки ПІ — 2, трифазної обмотки ПІ — 3, ротора — 4, первинної машини в цілому — один штрих, вторинної машини в цілому — два штрихи.

Вхідними величинами для двомашинного асинхронного двигуна (рис. 2) є напруга живлення статора \vec{U}_1 і напруга живлення ПІ \vec{U}_3 , статичний момент навантаження на валу ПІ M_2 і на валу ротора M_4 . Вихідними величинами можна вважати кутову частоту обертання ПІ ω_2 , кутову частоту обертання ротора ω_4 , напругу, а також M_1 і M_3 — електромагнітні моменти первинної і вторинної машин відповідно.

Первинна і вторинна машини мають між собою прямий (за швидкістю) і зворотний (за крутним моментом) зв'язки (рис. 2). Прямий зв'язок являє собою прискорення обертового магнітного поля вторинної машини залежно від частоти обертання ПІ ω_2 , яка для вторинної машини є вхідною величиною. Зворотний зв'язок являє собою вплив електромагнітного моменту вторинної машини M_3 на навантаження первинної машини, для якої він є вхідною величиною. Таким чином, знаючи як пов'язані між собою первинна і вторинна машини, змодельємо їх як окремі асинхронні машини із КЗ ротором.

В основі математичної моделі двомашинного асинхронного двигуна лежить метод зображувальних векторів [2, 3].

Математична модель первинної машини у нерухомій координатній системі $\alpha\beta$ по суті нічим не відрізняється від моделі звичайного асинхронного двигуна із КЗ ротором і може бути описана таким чином.

Система рівнянь електричної рівноваги для первинної машини має вигляд:

$$\begin{cases} U_{1\alpha} = I_{1\alpha}R_1 + \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt}; \\ U_{1\beta} = I_{1\beta}R_1 + \frac{d\psi_{1\beta}}{dt}; \\ 0 = I_{2\alpha}R_2 + \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} + Z'_p\omega_2\psi_{2\beta}; \\ 0 = I_{2\beta}R_2 + \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} - Z'_p\omega_2\psi_{2\alpha}, \end{cases} \quad (1)$$

де U, I, ψ — проекції векторів напруги, струмів і потокозчеплення відповідно обмотки статора (з індексом 1) і КЗ обмотки РІ (з індексом 2) на осі нерухомої відносно статора системи координат $\alpha\beta$; Z'_p — кількість пар полюсів первинної машини; R_1, R_2 — активні опори кіл статора і КЗ обмотки РІ.

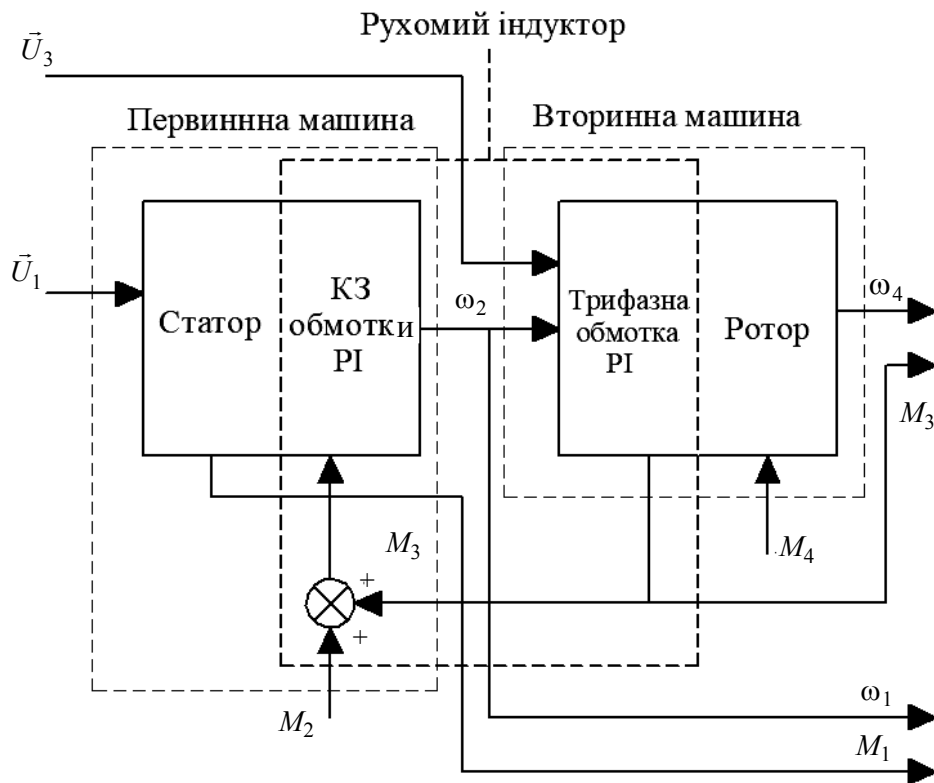


Рис. 2. Структурна схема моделі двомашинного асинхронного двигуна з рухомим індуктором

Проекції векторів напруг $U_{1\alpha}, U_{1\beta}$ визначимо як

$$\begin{cases} U_{1\alpha} = U_m \sin(\omega_1 t); \\ U_{1\beta} = -U_m \cos(\omega_1 t), \end{cases} \quad (2)$$

де $\omega_1 = 2\pi f_1$ — кутова частота напруги живлення первинної машини; U_m — діюче значення напруги живлення; f_1 — частота напруги живлення первинної машини.

Зображена на рис. 3 структурна схема відповідає системі рівнянь (2), а подача одиничного сигналу на вхід забезпечує можливість керувати моментом подачі живлення на вхід первинної машини.

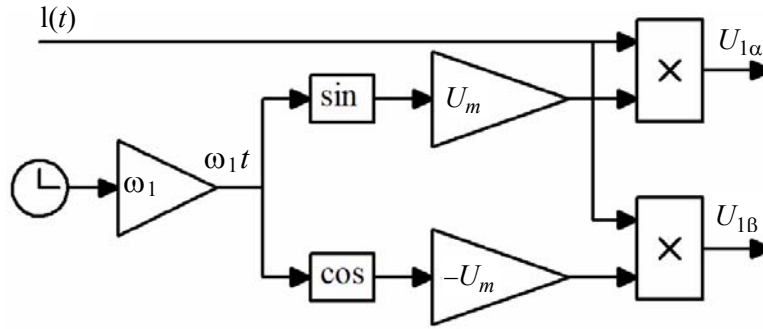


Рис. 3. Структурна схема формувача проєкції просторового вектора напруги на осі нерухомої відносно статора системи координат $\alpha\beta$

Струми у системі рівнянь (1) можна знайти як

$$\begin{cases} I_{1\alpha} = \frac{1}{\sigma' L_1} (\psi_{1\alpha} - k_2 \psi_{2\alpha}); \\ I_{1\beta} = \frac{1}{\sigma' L_1} (\psi_{1\beta} - k_2 \psi_{2\beta}); \\ I_{2\alpha} = \frac{1}{\sigma' L_1} (\psi_{2\alpha} - k_1 \psi_{1\alpha}); \\ I_{2\beta} = \frac{1}{\sigma' L_1} (\psi_{2\beta} - k_1 \psi_{1\beta}), \end{cases} \quad (3)$$

де $k_1 = \frac{L'_m}{L_1}$, $k_2 = \frac{L'_m}{L_2}$ — коефіцієнти магнітних зв'язків статора і КЗ обмотки РІ відповідно; L_1, L_2 — повні індуктивності кіл статора і КЗ обмотки РІ; L'_m — взаємна індуктивність первинної машини; $\sigma' = 1 - k_1 k_2$ — коефіцієнт розсіювання первинної машини.

Підставивши рівняння струмів із системи (3) у систему (1) і переписавши його для поточозчеплень, отримаємо:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt} = U_{1\alpha} - \frac{R_1}{\sigma' L_1} \psi_{1\alpha} + k_2 \frac{R_1}{\sigma L_1} \psi_{2\alpha}; \\ \frac{d\psi_{1\beta}}{dt} = U_{1\beta} - \frac{R_1}{\sigma' L_1} \psi_{1\beta} + k_2 \frac{R_1}{\sigma L_1} \psi_{2\beta}; \\ \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} = -\frac{R_2}{\sigma' L_2} \psi_{2\alpha} - Z'_p \omega_2 \psi_{2\beta} + k_1 \frac{R_2}{\sigma L_2} \psi_{1\alpha}; \\ \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} = -\frac{R_2}{\sigma' L_2} \psi_{2\beta} - Z'_p \omega_2 \psi_{2\alpha} + k_1 \frac{R_2}{\sigma L_2} \psi_{1\beta}. \end{cases} \quad (4)$$

Увівши позначення

$$T_1' = \frac{\sigma' L_1}{R_1}, T_2' = \frac{\sigma' L_2}{R_2}, \quad (5)$$

систему (4) запишемо і вигляді

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt} = U_{1\alpha} - \frac{1}{T_1'} \psi_{1\alpha} + k_2 \frac{1}{T_1'} \psi_{2\alpha}; \\ \frac{d\psi_{1\beta}}{dt} = U_{1\beta} - \frac{1}{T_1'} \psi_{1\beta} + k_2 \frac{1}{T_1'} \psi_{2\beta}; \\ \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} = -\frac{1}{T_2'} \psi_{2\alpha} - Z_p' \omega_2 \psi_{2\beta} + k_1 \frac{1}{T_2'} \psi_{1\alpha}; \\ \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} = -\frac{1}{T_2'} \psi_{2\beta} - Z_p' \omega_2 \psi_{2\alpha} + k_1 \frac{1}{T_2'} \psi_{1\beta}. \end{cases} \quad (6)$$

Рівняння електромагнітного моменту первинної машини, записане для потোকзчеплень, таке:

$$M_1 = \frac{3 Z_p' k_2}{2 \sigma' L_1} (\psi_{2\alpha} \psi_{1\beta} - \psi_{2\beta} \psi_{1\alpha}). \quad (7)$$

За третім законом Ньютона моментом навантаження для рухомого індуктора первинної машини є електромагнітний момент вторинної машини і статичний момент на валу рухомого індуктора. Тоді рівняння руху індуктора має вигляд

$$J' \frac{d\omega_2}{dt} = M_1 - M_3 - M_2, \quad (8)$$

де J' — сумарний момент інерції первинної машини.

Зображена на рис. 4 модель відповідає системі рівнянь (6) з урахуванням рівнянь (7) і (8).

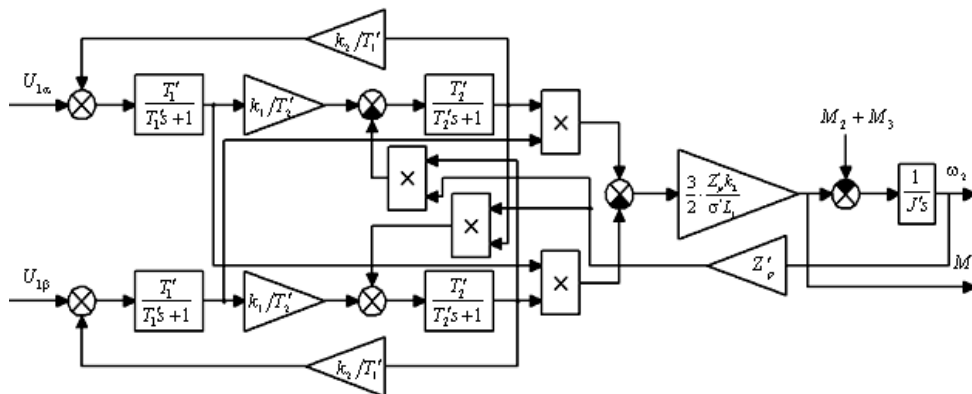


Рис. 4. Структурна схема моделі первинної машини у координатах $\alpha\beta$

Математична модель вторинної машини також являє собою модель асинхронного двигуна із КЗ ротором. На відміну від первинної машини трифазна обмотка вторинної, вбудована в ПІ, а тому обертається з кутовою частотою ω_2 .

Проекції просторового вектора напруги живлення вторинної машини \vec{U}_3 на осі системи координат dq , рухомої відносно статора зі швидкістю обертання ПІ ω_2 , збігаються із проекціями вектора напруги живлення первинної машини \vec{U}_1 на осі нерухомої системи координат $\alpha\beta$ у тому випадку, якщо виконується рівність $\omega_1 = \omega_3$. У загальному випадку справедливі вирази:

$$\begin{aligned} U_{3d} &= U_m \sin(\omega_3 t); \\ U_{3q} &= -U_m \cos(\omega_3 t), \end{aligned} \quad (9)$$

де $\omega_3 = 2\pi f_3$ — кутова частота мережі живлення вторинної машини; U_m — амплітуда значення синусоїдальної напруги живлення; U_{3d}, U_{3q} — проекції вектора напруги живлення вторинної машини на осі системи координат dq , які моделюються за структурною схемою, зображеною на рис 5.

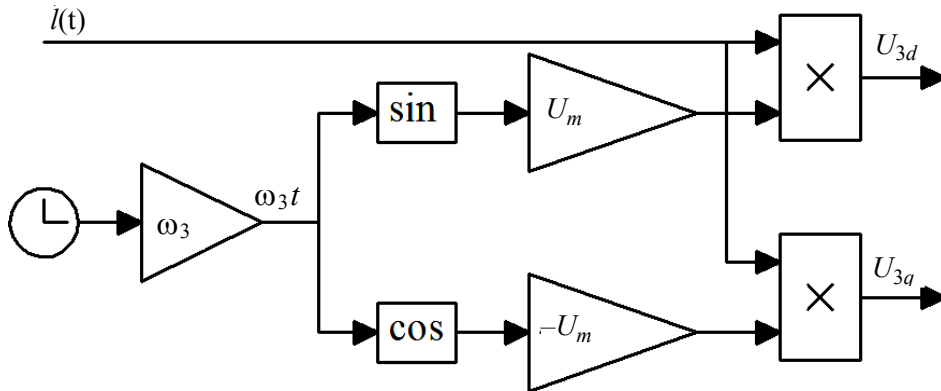


Рис. 5. Структурна схема формувача проекцій вектора трифазної напруги ПІ на осі системи координат dq

Для того щоб записати напругу живлення вторинної машини у нерухомій системі координат $\alpha\beta$, скористаємось оберненим перетворенням Парка [3, 4] та виразом (9):

$$\begin{bmatrix} U_{3\alpha} \\ U_{3\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_k & -\sin \gamma_k \\ \sin \gamma_k & \cos \gamma_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{3d} \\ U_{3q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{3d} \cos \gamma_k - U_{3q} \sin \gamma_k \\ U_{3d} \sin \gamma_k + U_{3q} \cos \gamma_k \end{bmatrix}. \quad (10)$$

У системі рівнянь (10) γ_k пов'язані зі швидкістю обертання ПІ і відповідно системи координат dq за співвідношенням

$$\omega_2 = \frac{d\gamma_k}{dt}, \quad (11)$$

і являє собою кут, який утворюють між собою системи координат $\alpha\beta$ і dq .

Структурна схема моделі перетворювача координат (рис. 6) на вході має величини $U_{3\alpha}, U_{3\beta}, \omega_2$, а на виході U_{3d}, U_{3q} .

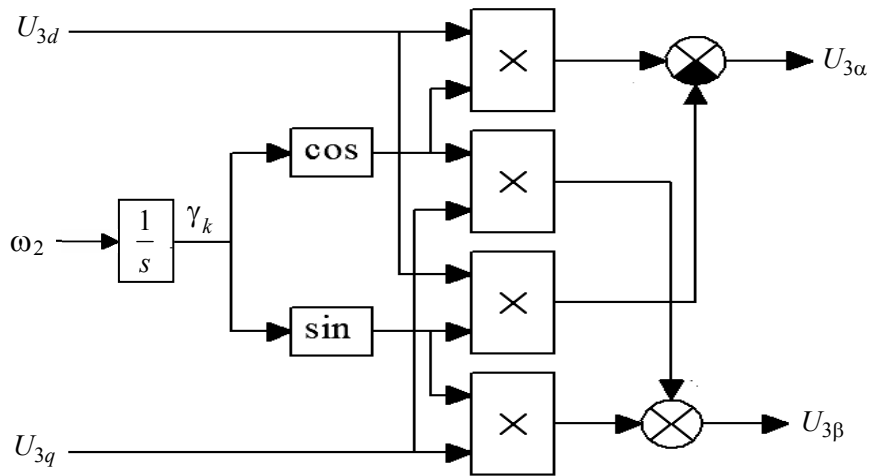


Рис. 6. Структурна схема перетворювача координат з рухомої системи координат dq у нерухому систему координат $\alpha\beta$

Таким чином, просторовий вектор напруги живлення вторинної машини прискорюється на швидкість рухомого індуктора ω_2 відносно ротора. Аналогічно із системи (4) запишемо рівняння електричної рівноваги для вторинної машини відносно потокозчеплень:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{3\alpha}}{dt} = U_{3\alpha} - \frac{1}{T_1''} \psi_{3\alpha} + k_4 \frac{1}{T_1''} \psi_{4\alpha}; \\ \frac{d\psi_{3\beta}}{dt} = U_{3\beta} - \frac{1}{T_1''} \psi_{3\beta} + k_4 \frac{1}{T_1''} \psi_{4\beta}; \\ \frac{d\psi_{4\alpha}}{dt} = -\frac{1}{T_2''} \psi_{4\alpha} - Z_p'' \omega_4 \psi_{4\beta} + k_3 \frac{1}{T_2''} \psi_{3\alpha}; \\ \frac{d\psi_{4\beta}}{dt} = -\frac{1}{T_2''} \psi_{4\beta} - Z_p'' \omega_4 \psi_{4\alpha} + k_3 \frac{1}{T_2''} \psi_{3\beta}, \end{cases} \quad (12)$$

де ψ — проекції векторів потокозчеплення відповідно трифазної обмотки ПІ (з індексом 3) і КЗ обмотки ротора (з індексом 4) на осі нерухомої відносно статора системи координат $\alpha\beta$; Z_p'' — кількість пар полюсів вторинної машини; $k_3 = \frac{L_m''}{L_3}$, $k_4 = \frac{L_m''}{L_4}$ — коефіцієнти магнітних зв'язків трифазної обмотки ПІ і КЗ обмотки ротора відповідно; L_3, L_4 — повні індуктивності кіл трифазної обмотки ПІ і КЗ обмотки ротора відповідно; L_m'' — взаємна індуктивність вторинної машини.

Коефіцієнти T_1'', T_2'' аналогічно із виразу (5) мають значення:

$$T_1'' = \frac{\sigma'' L_3}{R_3}; \quad T_2'' = \frac{\sigma'' L_4}{R_4},$$

де R_3, R_4 — активні опори кіл трифазної обмотки ПІ і КЗ обмотки ротора відповідно; $\sigma'' = 1 - k_3 k_4$ — коефіцієнт розсіювання вторинної машини.

Рівняння електромагнітного моменту вторинної машини, записане для поточкозчеплень, має такий вигляд:

$$M_3 = \frac{3}{2} \cdot \frac{Z_p'' k_A}{\sigma'' L_3} (\Psi_{4\alpha} \Psi_{3\beta} - \Psi_{4\beta} \Psi_{3\alpha}). \quad (13)$$

Тоді рівняння руху ротора набуває вигляду:

$$J'' \frac{d\omega_4}{dt} = M_3 - M_4, \quad (14)$$

де J'' — сумарний момент інерції буду таким:

Системі рівнянь (12) з урахуванням рівнянь (13) і (14) відповідає структурна схема, зображена на рис. 7.

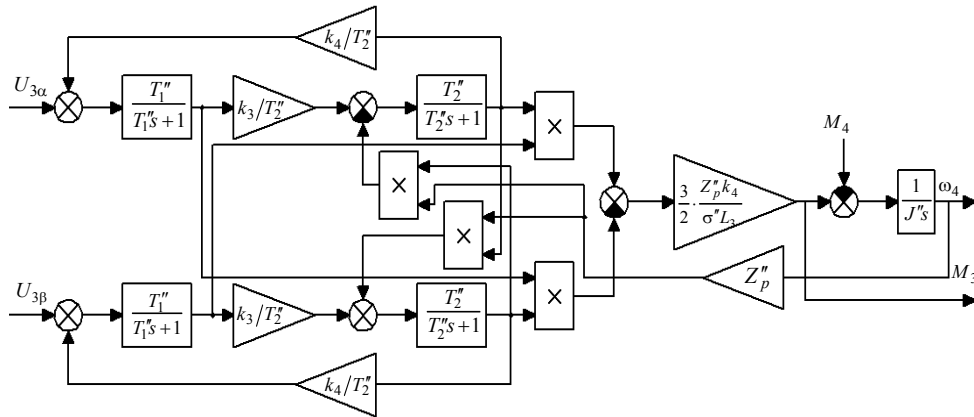


Рис. 7. Структурна схема моделі вторинної машини у координатах $\alpha\beta$

Маючи структуру окремих елементів моделі двомашинного асинхронного двигуна і знаючи зв'язки, які забезпечують їх взаємодію, складемо загальну модель.

На структурній схемі двомашинного асинхронного двигуна із PI (рис. 8) структурні блоки первинної і вторинної машин відповідають рис. 4 відповідно. Блок координатного перетворювача $dq \rightarrow \alpha\beta$ відповідає структурній схемі на рис. 6, а блоки формування проєкцій векторів напруги живлення на осі координатних систем $\alpha\beta$ і dq — структурній схемі на рис. 3 і 5 відповідно.

Із невеликими змінами у моделі на рис. 8 можна спостерігати струми первинної і вторинної машин, а також усі інші необхідні змінні.

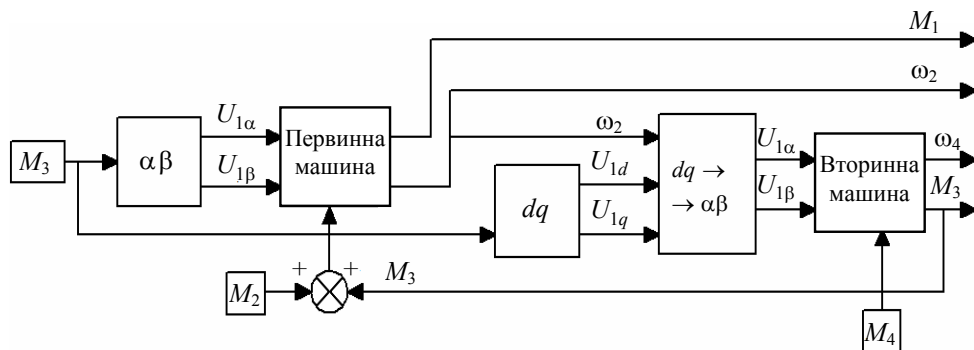


Рис. 8. Структурна схема моделі двомашинного асинхронного двигуна з PI

ВИСНОВКИ

У розробленій математичній моделі забезпечується прямий зв'язок первинної і вторинної асинхронних машин за швидкістю, а зворотний — за моментом. Моделювання вторинної машини як асинхронної машини з РІ виконується перетворенням системи координат з рухомої в нерухому з використанням перетворення Парка.

На роторі двомашинної конструкції знімається сумарна потужність двох електричних машин, за винятком випадків, коли вал РІ має додатково власний момент навантаження, а кутова частота обертання ротора відповідно являє собою суму власних кутових частот первинної і вторинної машин. Виходячи із моделі критичний момент навантаження двомашинної конструкції визначається передусім критичним моментом вторинної машини, значення якого має перевищувати критичний момент первинної.

ЛІТЕРАТУРА

1. Патент України на корисну модель UA 109114 U. Асинхронний двигун / А.М. Сільвестров, В.Ф. Шинкаренко, О.Ф. Мінець. — № u109114; заявл. 24.02.2016; опубл. 10.08.2016. — Бюл. № 15/2016.
2. Моделювання електромеханічних систем: підруч. / О.П. Чорний, А.В. Луговий, Д.Й. Родькін. — Кременчук: Кременч. держ. ун-т, 2001. — 376 с.
3. Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1) / В. Б. Терехин. — Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2010. — 292 с.
4. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навч. посіб. / О.І. Толочко. — К.: НТУУ «КПІ», 2016. — 150 с.

Надійшла 19.02.2019

**ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ
ПРОИЗВОДСТВЕННО-РЫНОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ
В ДВУХСЕКТОРНОЙ МАКРОЭКОНОМИКЕ**

Н.Д. ПАНКРАТОВА, Л.П. ХОРОШУН, С.Л. ЯХИН

Аннотация. Предложена математическая модель динамики производственно-рыночных процессов в макроэкономике, в основу которой положены связанные дифференциальные уравнения баланса производства с учетом производительности, износа, производственного накопления и участия людей, а также баланса денежно-товарных потоков в двухсекторной модели макроэкономике при расширенном воспроизводстве. Проведено обобщение модели производства на случай существования видов капитала с различными производительностью, производственным накоплением, амортизацией и участием людей. Рассмотрены конкретные задачи, описывающие рост, спад и циклический характер производства, а также инфляцию.

Ключевые слова: модель, макроэкономика, капитал, блага, производительность, накопление, амортизация, денежная масса, цена, инфляция.

ВВЕДЕНИЕ

В основе существования и развития человеческого общества лежит удовлетворение его материальных потребностей [1–3], которое осуществляется экономической деятельностью общества, представляющей собой единство производства, распределения, обмена и потребления общественного продукта. Решающей фазой общественного развития является производство, от которого зависят фазы распределения, обмена и потребления. Тем не менее последние оказывают существенное обратное воздействие на общественное производство, определяя характер и формы его развития.

Материальные потребности присущи как отдельным людям в виде желания иметь товары и услуги, так и отдельным фирмам и предприятиям. Это потребности в машинах, оборудовании, инструментах, сооружениях, транспортных средствах, необходимых для производства и транспортирования продукции, которые представляют собой реальный капитал или инвестиционные продукты. Государственным органам управления также присущи материальные потребности, связанные с обеспечением образования, защиты прав и здравоохранения граждан, развития науки и обороноспособности страны, решения проблем экологии и т.п.

Производство товаров и услуг связано непосредственно с экономическими ресурсами. К ним относятся человеческие ресурсы в виде целесообразной трудовой деятельности людей, природные ресурсы, являющиеся предметом труда людей, и произведенные людьми средства труда, образующие вместе с предметами труда средства производства. Экономические ресурсы всегда относительно ограничены, в то время как материальные потребности общества постоянно увеличиваются. Поэтому конечной целью экономической деятельности общества является максимальное повышение благосостояния людей, связанного с производством и распределением потребительских продуктов или благ. Решение этой проблемы достигается путем повышения эффективности функционирования национальной экономики в целом, что измеряется увеличением количества товаров и услуг, получаемых в процессе производства, при заданном объеме затраченных ресурсов. Среди способов повышения эффективности национальной экономики выделяют такие направления [4]: обеспечение полной занятости ресурсов, достижение полного объема производства, достижение наиболее рационального распределения ресурсов между производством различных видов продукции, повышение технического уровня производства.

Практическое осуществление повышения эффективности экономики должно опираться на изучение механизма функционирования и поведения производителей и потребителей и их взаимодействия в производстве и на рынке. Это является основой для построения математических моделей [5–7] производственно-рыночных процессов для проведения аналитических и численных исследований.

Закономерности функционирования отдельных предприятий, производящих и реализующих конкретную продукцию на конкретных рынках, изучает микроэкономика. Целью предпринимательской деятельности является получение прибыли. В зависимости от результата предприятие успешно функционирует или разоряется.

В целом национальная экономика в масштабе страны включает в себя функционирование и взаимодействие всех многочисленных предприятий. И хотя в основе существования и развития экономики лежит взаимосвязь спроса и предложения на всех микроуровнях, тем не менее на макроуровне проявляются качественно новые процессы и проблемы. Изучение их требует построения новых математических моделей и решений, которые составляют предмет макроэкономики, рассматривающей агрегированное (совокупное) функционирование экономической системы, включая работу всех макроэкономических агентов и рынков.

В макроэкономике принято рассматривать четыре макроэкономических агента или сектора: предприятия, домохозяйства, государство и иностранный сектор. Макроэкономические рынки образуют рынок ресурсов, рынок благ и финансовый рынок. Основные проблемы, рассматриваемые в макроэкономике, сводятся к изучению валового внутреннего продукта (ВВП), денежного обращения, общего уровня цен и инфляции, занятости и безработицы, экономического роста и экономического цикла, макроэкономической политики государства, международной торговли.

Известные модели и методы современной макроэкономики [1–3] сводятся к качественно-графическому и алгебраическому описанию макроэко-

номических явлений и процессов. основополагающим принимаются алгебраическое уравнение обмена, представляющее собой равенство ВВП в денежной форме сумме всех элементов совокупных затрат (кейнсианская модель), а также равенство произведений уровня цен на физический объем ВВП и количества денег на скорость их обращения (монетаристская модель). Эффективность капитальных вложений описывается производственной функцией в виде зависимости объема выпускаемой продукции от объемов капитала и труда. Из известных производственных функций Кобба–Дугласа с идеальной и Леонтьева с нулевой взаимозаменяемостями капитала и труда последняя ближе к реальности, так как конкретные производственные мощности всегда предполагают определенное количество людей, занятых в их работе. Однако эти уравнения предполагают равновесное состояние экономики, поэтому они неприменимы к изучению нестационарных процессов, таких как подъем и спад производства, инфляция, инвестирование, экономические циклы. Описание этих явлений возможно лишь на основе динамических моделей производственных и рыночных процессов [3, 5, 7, 10].

В работе предлагается создание модели динамики производственно-рыночных процессов в двухсекторной макроэкономике на основе построения дифференциальных уравнений динамики производства с учетом производительности, амортизации и накопления капитала, а также товарно-денежных процессов в двухсекторной модели макроэкономике при расширенном воспроизводстве.

УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ ПРОИЗВОДСТВА

В реальном производстве заняты конкретные единицы реального капитала, каждая из которых требует участия определенного количества людей. Поскольку в макроэкономике используются агрегированные параметры, самую простую динамическую модель материального производства товаров можно построить, положив, что в нем занято n единиц реального капитала, каждая из которых имеет производительность p в единицу времени и предполагает участие l людей. Тогда, обозначив символом u количество единиц произведенной продукции, можно записать:

– производство продукции в единицу времени

$$\dot{u} = pn ; \quad (1)$$

– общее количество занятых в производстве людей

$$L = ln . \quad (2)$$

Если за единицу времени принять 1 год, то левая часть уравнения (1) представляет собой ВВП или национальный доход в материально-вещественной форме и может быть записана, согласно конечному использованию, в виде суммы

$$\dot{u} = \dot{m} + \dot{n} + an , \quad (3)$$

где \dot{m} — приращение в единицу времени потребительских продуктов и услуг или благ; \dot{n} — приращение в единицу времени инвестиционных продуктов или реального капитала; an — компенсация износа (амортизации) капитала; a — норма износа капитала в единицу времени.

Уравнение (1) содержит две неизвестные функции времени u, n или u, t с учетом выражения (3). Для его замыкания необходимо сформулировать еще одно уравнение, описывающее закон изменения во времени реального капитала в зависимости от ВВП, которое в общем случае приобретает вид

$$F(t, n, \dot{n}, \ddot{n}, \dots, u, \dot{u}, \ddot{u}, \dots) = 0. \quad (4)$$

Хотя отдельный предприниматель осуществляет накопление капитала во времени самостоятельно, исходя из рыночной конъюнктуры и своих возможностей, в агрегированном виде объективно осуществляется некоторый конкретный закон вида (4), который совместно с уравнением производства (1) определяет характер экономического развития во времени. Самый простой вариант закона (4) получим, приняв, что накопление капитала в текущем периоде линейно зависит от дохода этого периода, т.е. с учетом амортизации капитала можем записать

$$\dot{n} + an = s\dot{u}, \quad (5)$$

где s — норма накопления капитала (производственного накопления [7]), являющаяся безразмерной величиной, не превосходящей единицу. Подставляя (5) в (1), получим дифференциальное уравнение первого порядка относительно реального капитала:

$$\dot{n} = (sp - a)n. \quad (6)$$

Если параметры s, p, a постоянны или являются функциями времени, то уравнение (6) будет линейным и его решение представляется экспоненциальной функцией

$$n = n_0 \exp \left[\int_0^t (sp - a) dt \right], \quad (7)$$

где n_0 — начальное количество капитала. Из уравнений (1) и (7) находим национальный доход как функцию времени:

$$\dot{n} = n_0 p \exp \left[\int_0^t (sp - a) dt \right]. \quad (8)$$

Отношение приращения в единицу времени национального дохода (8) к национальному доходу определяет экономический рост

$$\frac{\ddot{u}}{\dot{u}} = \frac{\dot{p}}{p} + sp - a. \quad (9)$$

Из уравнения (9), как частный случай при $p = \text{const}$, $a = 0$, следует известная формула Домара–Харрода для экономического роста.

Как видим, при линейных законах производства (1) и накопления капитала (5) динамика национального дохода определяется четырьмя (n_0, p, a, s) , а динамика экономического роста — тремя (p, a, s) параметрами. При этом основным регулирующим фактором является норма накопления капитала s . Так, при условии $s < \frac{a}{p}$ наблюдается спад производства.

При условии $s = \frac{a}{p}$ производство инвестиционных продуктов компенсирует износ. При $s > \frac{a}{p}$ происходит рост производства, а при $sp + \frac{\dot{p}}{p} - a > 0$ — экономический рост.

В реальной экономике инвестиции зависят от изменений дохода в течение нескольких предыдущих периодов [3], что можно описать, удерживая в уравнении (4) производные по времени от дохода \dot{i} . Для учета изменения дохода в течение трех периодов воспользуемся линейным законом накопления капитала в виде

$$\dot{n} + an = s\dot{i} + c\ddot{i} + q\ddot{\ddot{i}}. \quad (10)$$

Подставляя уравнение (1) в (10) и принимая параметры p, a, s, c, q постоянными, получим дифференциальное уравнение второго порядка, описывающее динамику капитала:

$$qp\ddot{n} - (1 - cp)\dot{n} + (sp - a)n = 0. \quad (11)$$

Корни характеристического уравнения, построенного на основе (11), будут такими:

$$r_{1,2} = \gamma \pm \delta, \quad \gamma = \frac{1 - cp}{2qp}, \quad \beta = \frac{sp - a}{qp}, \quad \delta = \sqrt{\gamma^2 - \beta^2}, \quad (12)$$

т.е. в зависимости от значений p, a, s, c, q они могут быть действительными или комплексными. В случае действительных корней ($\gamma^2 > \beta^2$) решение уравнения (11) выражается через гиперболические функции

$$n = e^{\gamma t} (C_1 ch\delta t + C_2 sh\delta t), \quad C_1 = n_0, \quad C_2 = \frac{\dot{n}_0 - \gamma n_0}{\delta}, \quad (13)$$

где n_0, \dot{n}_0 — начальные значения капитала и скорости его изменения. Подставляя (13) в (1), находим национальный доход и экономический рост

$$\dot{i} = pe^{\gamma t} (C_1 ch\delta t + C_2 sh\delta t), \quad \frac{\ddot{i}}{\dot{i}} = \frac{C_1\gamma + C_2\delta + (C_1\delta + C_2\gamma)th\delta t}{C_1 + C_2th\delta t}. \quad (14)$$

С течением времени экономический рост стремится к постоянной величине $\gamma + \delta$. При условии $\gamma + \delta > 0$ наблюдается ограниченный экономический рост и неограниченный рост национального дохода. Условие $\gamma + \delta < 0$ свидетельствует об экономическом спаде и стремлении к нулю национального дохода. При условии $\gamma + \delta = 0$ экономический рост стремится к нулю и осуществляется ограниченный рост или спад национального дохода соответственно при $\dot{n}_0 > 0$ и $\dot{n}_0 < 0$.

В случае комплексных корней (12) ($\gamma^2 < \beta^2$) решение уравнения (11) имеет колебательный характер

$$n = e^{\gamma t} (C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t), \quad C_1 = n_0, \quad C_2 = \frac{\dot{n}_0 - \gamma n_0}{\delta}, \quad \omega = \sqrt{\beta^2 - \gamma^2} \quad (15)$$

или

$$n = Ce^{\gamma t} \cos(\omega t - \alpha), \quad C = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}, \quad \alpha = \operatorname{arctg} \frac{C_2}{C_1}. \quad (16)$$

Период колебаний, или цикл, равен $T = \frac{2\pi}{\omega}$, т.е. определяется значениями параметров p, a, s, c, q . Национальный доход и экономический рост определяются такими выражениями

$$u = Cpe^{\gamma t} \cos(\omega t - \alpha), \quad \frac{\ddot{u}}{\dot{u}} = \gamma - \omega \operatorname{tg}(\omega t - \alpha). \quad (17)$$

Решения (15)–(17) имеют смысл в пределах временного интервала, где капитал и национальный доход имеют положительные значения, т.е. в интервале, равном половине цикла. В действительности при спаде производства в экономике происходят структурные изменения, т.е. значения параметров p, a, s, c, q изменяются, что приводит к изменению решений (15)–(17). Возможность экономического цикла, описываемого системой уравнений (1), (10), вполне реальна. Он, согласно (12), осуществляется при условии

$$s > \frac{(1 - cp)^2 + 4apq}{4p^2q}. \quad (18)$$

Так как макроэкономика изучает агрегированное функционирование всей совокупности конкретных экономических агентов [8, 9], то уравнение материального производства (1) и замыкающие его законы накопления капитала (4), (6), (10) описывают динамику производства в среднем, оперируя средней производительностью p единицы капитала, средней нормой амортизации a , средней нормой накопления s капитала и средним количеством l людей, занятых в работе единицы капитала. В действительности же единицы капитала могут существенно отличаться друг от друга значениями указанных параметров, поэтому можно ввести произвольное число степеней свободы, записав уравнение производства в более общем виде:

$$\dot{u} = \sum_{i,j} p_i n_{ij}, \quad (19)$$

где n_{ij} — количество единиц капитала с производительностью p_i и участием l_j людей.

Уравнение (19) необходимо дополнить законом накопления всех видов капитала. В самом простом случае, по аналогии с уравнением (5), запишем

$$\dot{n}_{ij} + a_{ij} n_{ij} = s_{ij} \dot{u}, \quad (20)$$

где a_{ij}, s_{ij} — соответственно матрицы нормы амортизации капитала в единицу времени и нормы накопления. Подставляя уравнение (19) в (20), приходим к системе дифференциальных уравнений, описывающих динамику всех видов капитала:

$$\dot{n}_{ij} + a_{ij} n_{ij} = s_{ij} \sum_{\alpha,\beta} p_{\alpha} n_{\alpha\beta}. \quad (21)$$

Общее число единиц капитала n , средняя производительность капитала p , среднее число занятых в работе единицы капитала людей l , общее

число занятых в производстве людей L , общая норма накопления всего капитала s и средняя норма износа всего капитала a определяются такими формулами:

$$n = \sum_{i,j} n_{ij}, \quad p = \frac{1}{n} \sum_{i,j} n_{ij} p_i, \quad l = \frac{1}{n} \sum_{i,j} n_{ij} l_i, \quad s = \sum_{i,j} s_{ij}, \quad a = \frac{1}{n} \sum_{i,j} a_{ij} n_{ij}. \quad (22)$$

Приращение благ \dot{m} , согласно (3), (22), определяется выражением

$$\dot{m} = \dot{u} - \sum_{i,j} \dot{n}_{ij} - \sum_{i,j} a_{ij} n_{ij}. \quad (23)$$

Проводя в уравнениях (21) суммирование по индексам i, j и учитывая соотношения (22), приходим к уравнению (6).

Уравнения динамики капитала (21) позволяют описывать технический прогресс как уменьшение числа единиц капитала с низкой производительностью и увеличение или появление числа единиц капитала с высокой производительностью. В обратном случае произойдет технический регресс.

Рассмотрим один из частных случаев уравнений (19)–(21), когда имеется n_1 и n_2 единиц капитала, каждая из которых имеет производительность и требует участия людей соответственно p_1, l_1 и p_2, l_2 . Уравнения (19), (20) в этом случае приобретут вид

$$\dot{u} = p_1 n_1 + p_2 n_2, \quad (24)$$

$$\dot{n}_1 + a_1 n_1 = s_1 \dot{u}, \quad \dot{n}_2 + a_2 n_2 = s_2 \dot{u}, \quad (25)$$

где a_1, s_1 и a_2, s_2 — нормы амортизации в единицу времени и накопления капитала соответственно 1-го и 2-го видов. Подставляя уравнение (24) в (25), получим систему уравнений

$$\dot{n}_1 = \alpha_{11} n_1 + \alpha_{12} n_2, \quad \dot{n}_2 = \alpha_{21} n_1 + \alpha_{22} n_2, \quad (26)$$

где

$$\alpha_{11} = s_1 p_1 - a_1, \quad \alpha_{12} = s_1 p_2, \quad \alpha_{21} = s_2 p_1, \quad \alpha_{22} = s_2 p_2 - a_2. \quad (27)$$

Корни характеристического уравнения системы будут действительными

$$r_{1,2} = \gamma \pm \delta, \quad \delta = \sqrt{\gamma^2 - \beta^2}, \quad \gamma = \frac{1}{2}(\alpha_{11} + \alpha_{22}), \quad \beta^2 = \alpha_{11}\alpha_{22} - \alpha_{12}\alpha_{21}, \quad (28)$$

и решения приобретут вид:

$$n_1 = e^{\gamma t} (C_{11} ch \delta t + C_{12} sh \delta t), \quad C_{11} = n_{10}, \quad C_{12} = \frac{(\alpha_{11} - \gamma)n_{10} + \alpha_{12}n_{20}}{\delta},$$

$$n_2 = e^{\gamma t} (C_{21} ch \delta t + C_{22} sh \delta t), \quad C_{21} = n_{20}, \quad C_{22} = \frac{\alpha_{21}n_{10} + (\alpha_{22} - \gamma)n_{20}}{\delta}, \quad (29)$$

где n_{10}, n_{20} — начальные значения капитала.

Национальный доход и экономический рост согласно уравнениям (24), (29) определяются формулами

$$\dot{u} = p e^{\gamma t} (R_1 ch \delta t + R_2 sh \delta t), \quad \frac{\ddot{u}}{\dot{u}} = \frac{R_1 \gamma + R_2 \delta + (R_1 \delta + R_2 \gamma) th \delta t}{R_1 + R_2 th \delta t},$$

$$R_1 = C_{11}p_1 + C_{21}p_2, \quad R_2 = C_{12}p_1 + C_{22}p_2. \quad (30)$$

С течением времени экономический рост стремится к постоянной величине $\gamma + \delta$. Ее положительное значение соответствует неограниченному росту национального дохода, а отрицательное – спаду к нулевому уровню. При нулевом экономическом росте, т.е. $\gamma + \delta = 0$, наблюдается ограниченный рост национального дохода при условии

$$p_1n_{10}a_2 + p_2n_{20}a_1 - 2\delta(p_1n_{10} + p_2n_{20}) > 0 \quad (31)$$

и его ограниченный спад в противном случае.

Рассмотрим систему с двумя видами капитала n_1 и n_2 при условии, что капитал n_1 производит только блага m , а капитал n_2 — оба вида капитала n_1 и n_2 . Тогда соответствующие уравнения производства имеют вид

$$\dot{m} = p_1n_1, \quad \dot{n}_1 + a_1n_1 + \dot{n}_2 + an_2 = p_2n_2, \quad (32)$$

где p_1, p_2 и a_1, a_2 — соответственно производительности и нормы амортизации соответствующих единиц капитала.

Зададим закон накопления капитала второго вида

$$\dot{n}_2 + a_2n_2 = s\dot{u} = s(p_1n_1 + p_2n_2). \quad (33)$$

Тогда на основе (32), (33) приходим к системе уравнений (26), коэффициенты которой определяются такими формулами:

$$\alpha_{11} = -(sp_1 + a_1), \quad \alpha_{12} = (1-s)p_2, \quad \alpha_{21} = sp_1, \quad \alpha_{22} = sp_2 - a_2. \quad (34)$$

Положив все коэффициенты уравнений (32)–(34) постоянными, находим корни (28) характеристического уравнения, которые будут действительными. Поэтому решения представляются формулами (29), (30), и экономический рост с течением времени стремится к постоянной величине $\gamma + \delta$. Ее положительное или отрицательное значения соответствуют неограниченному росту или спаду национального дохода. В случае $\gamma + \delta = 0$ наблюдается ограниченный рост национального дохода при условии

$$p_1n_{10}a_2 + p_2n_{20}(a_1 - p_1) - 2\delta(p_1n_{10} + p_2n_{20}) > 0 \quad (35)$$

и ограниченный спад в противном случае.

Если задать закон накопления капитала первого вида

$$\dot{n}_1 + \alpha_1n_1 = s\dot{u} = s(p_1n_1 + p_2n_2), \quad (36)$$

то на основе уравнений (32), (36) приходим к системе уравнений (26), где коэффициенты имеют значения:

$$\alpha_{11} = sp_1 - a_1, \quad \alpha_{12} = sp_2, \quad \alpha_{21} = -sp_1, \quad \alpha_{22} = (1-s)p_2 - a_2. \quad (37)$$

Корни характеристического уравнения системы (26), (37) определяются формулами (28), (37), но в отличие от (27), (34) могут быть как действительными, так и комплексными. В случае действительных корней ($\gamma^2 > \beta^2$) решения имеет вид (29), (30). В случае комплексных корней ($\gamma^2 < \beta^2$) решения системы (26), (37) имеют колебательный характер:

$$\begin{aligned} n_1 &= e^{\gamma t} (C_{11} \cos \omega t + C_{12} \sin \omega t), \quad C_{11} = n_{10}, \quad C_{12} = \frac{1}{\omega} [(\alpha_{11} - \gamma)n_{10} + \alpha_{12}n_{20}], \\ n_2 &= e^{\gamma t} (C_{21} \cos \omega t + C_{22} \sin \omega t), \quad C_{21} = n_{20}, \quad C_{22} = \frac{1}{\omega} [\alpha_{21}n_{10} + (\alpha_{22} - \gamma)n_{20}], \\ \omega &= \sqrt{\beta^2 - \gamma^2}. \end{aligned} \quad (38)$$

Национальный доход и экономический рост определяются формулами

$$\dot{i} = \text{Re}^{\gamma t} \cos(\omega t - \alpha), \quad \frac{\ddot{i}}{\dot{i}} = \gamma - \omega \text{tg}(\omega t - \alpha),$$

$$R = \sqrt{R_1^2 + R_2^2}, \quad R_1 = C_{11}p_1 + C_{21}p_2, \quad R_2 = C_{12}p_1 + C_{22}p_2, \quad \alpha = \arctg \frac{R_2}{R_1}. \quad (39)$$

Условие $\gamma^2 = \beta^2$ с учетом уравнений (28), (37) приводит к уравнению нормы накопления капитала s :

$$[(p_1 + p_2)s - p_2 - a_1 + a_2]^2 - 4s^2 p_1 p_2 = 0, \quad (40)$$

откуда корни равны:

$$s_{(1)} = \frac{p_2 - a_2 + a_1}{(\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2})^2}, \quad s_{(2)} = \frac{p_2 - a_2 + a_1}{(\sqrt{p_1} - \sqrt{p_2})^2}.$$

Отсюда следует, что при условиях $s < s_{(1)}$ и $s > s_{(2)}$ решения представляются формулами (29), (30) и с течением времени экономический рост стремится к постоянной величине $\gamma + \delta$. Ее положительное или отрицательное значения соответствуют неограниченному росту или спаду ВВП. В случае $\gamma + \delta = 0$ наблюдается ограниченный рост ВВП при условии

$$p_1 n_{10} (a_2 - p_2) + p_2 n_{20} a_1 - 2\delta (p_1 n_{10} + p_2 n_{20}) > 0 \quad (41)$$

и ограниченный спад в противном случае.

При условии $s_{(1)} < s < s_{(2)}$ решения выражаются формулами (38), (39), т.е. накопление капитала, национальный доход и экономический рост имеют циклический характер. Они имеют физический смысл в пределах временного интервала, где n_1 , n_2 , \dot{i} — неотрицательные значения.

Рассмотренные выше уравнения динамики производства базируются на различных вариантах уравнений производства продукции в единицу времени (1), (19), (24), (32) и уравнений накопления капитала (5), (10), (20), (25), (33), (36), в которых задается норма (доля) s , c , q , s_{ij} , s_1 , s_2 выпуска продукции, направляемая на инвестиции. Очевидно, что эту норму определяют предприниматели, являющиеся собственниками средств производства и продукции. Если дополнительно поступают в единицу времени инвестиции \dot{n}_i извне, то уравнение накопления капитала (5) принимает вид

$$\dot{n} + an = s\dot{i} + n_i. \quad (42)$$

Подставляя уравнение (1) в (42), получим неоднородное дифференциальное уравнение относительно капитала:

$$\dot{n} - (sp - a)n - \dot{n}_i = 0, \quad (43)$$

решение которого при постоянных s, p, a имеет вид

$$n = e^{(sp-a)t} \left[n_0 + \int_0^t \dot{n}_i(t) e^{-(sp-a)t} dt \right]. \quad (44)$$

В случае $\dot{n}_i = \text{const}$ из уравнения (44) следует

$$n = n_0 e^{(sp-a)t} + \frac{\dot{n}_i}{sp-a} (e^{(sp-a)t} - 1). \quad (45)$$

Соотношения (1)–(3), (44), (45) позволяют определить физический объем ВВП \dot{i} , благ \dot{m} и занятых в производстве людей L по заданным параметрам p, a, s, l, \dot{n}_i .

УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ ДЕНЕГ И ЦЕН

Рассмотрим двухсекторную модель экономики, когда в экономическом кругообороте выступают только два сектора — предприятия (сектор 1) и домашние хозяйства (сектор 2) при расширенном воспроизводстве. Предприятия, являющиеся владельцами материального капитала n , производят ВВП согласно (1), (3), используя рабочую силу (2) из домашних хозяйств. Производимые сектором (1) блага можно представить в виде

$$\dot{m} = \dot{m}_{11} + \dot{m}_{12}, \quad (46)$$

где $\dot{m}_{11}, \dot{m}_{12}$ — соответственно количества благ потребляемых секторами 1 и 2 в единицу времени (товарными запасами благ пренебрегаем). Если кроме рынка благ существуют только рынок труда, т.е. другими ресурсами предприятия обеспечены, то можно записать уравнения баланса денежных масс секторов:

$$\dot{M}_1 = \dot{M}_{21}^m - \dot{M}_{12}^T + \dot{M}_3 + \dot{M}_i, \quad \dot{M}_2 = \dot{M}_{12}^T - \dot{M}_{21}^m - \dot{M}_i + \dot{M}_{2s}. \quad (47)$$

Здесь M_1, M_2 — принимающие участие в кругообороте денежные массы секторов 1 и 2; \dot{M}_{21}^m — поток денег в единицу времени из сектора 2 в сектор 1 за счет купли-продажи благ \dot{m}_{12} ; \dot{M}_{12}^T — поток денег в единицу времени из сектора 1 в сектор 2 за счет купли-продажи труда \dot{T}_{21} , \dot{M}_3 — эмиссия денег в единицу времени в секторе 1; \dot{M}_i — поток сберегаемых в секторе 2 денег в единицу времени, направляемых на инвестирование в сектор 1; \dot{M}_{2s} — поток денег из денежных сбережений M_{2s} в секторе 2. Денежные потоки $\dot{M}_{21}^m, \dot{M}_{12}^T$ определяются соотношениями

$$\dot{M}_{21}^m = P\dot{m}_{12}, \quad \dot{M}_{12}^T = W\dot{T}_{21}, \quad (48)$$

где P — потребительская цена единицы благ; W — заработная плата.

Поток денег \dot{M}_{12}^T — это затраты сектора 1 на оплату труда по производству ВВП (1) в единицу времени. В предположении обеспеченности предприятий другими ресурсами, необходимыми для производства, приходим к равенству

$$\dot{M}_{12}^T = W\dot{T}_{21} = P'u, \quad (49)$$

где P' — затратная цена единицы ВВП. Тогда на основе равенств (48), (49) уравнения баланса денежных масс секторов (47) можно представить в виде

$$\dot{M}_1 = P\dot{m}_{12} - P'u + \dot{M}_3 + \dot{M}_i, \quad \dot{M}_2 = P'u - P\dot{m}_{12} - \dot{M}_i + \dot{M}_{2s}. \quad (50)$$

Финансовые инвестиции \dot{M}_i , поступающие из сектора 2 в сектор 1, идут на производство материальных инвестиционных продуктов \dot{n}_i . Если пренебречь запаздыванием материального потока \dot{n}_i по отношению к финансовому потоку \dot{M}_i , то связь между ними, по аналогии с равенством (49), можно представить в виде

$$\dot{M}_i = P'\dot{n}_i. \quad (51)$$

Система дифференциальных уравнений (1), (3), (43), (50), (51) описывает производственно-рыночные процессы закрытой двухсекторной экономики на основе совмещения материально-вещественного и стоимостного аспектов. Внешними или экзогенными параметрами здесь являются эмиссия денег \dot{M}_3 , денежные инвестиции \dot{M}_i и величины p, a, s, l . Внутренними или эндогенными являются параметры $M_1, M_2, P, P', L, \dot{u}, \dot{n}, \dot{m}, \dot{n}_i$, определяемые из решений уравнений, хотя известно [3], что различие между экзогенными и эндогенными параметрами может быть относительным и зависящим от вида конкретных производственно-рыночных процессов.

Умножение уравнений (50), (51) на одно и то же число не изменяет описываемых процессов, что свидетельствует о зависимости цен P, P' от денежной массы $M = M_1 + M_2$. В общем случае цены P, P' могут зависеть также от распределения денежной массы по секторам, т.е. в линейном приближении можно принять зависимости

$$P' = \gamma_{11}M_1 + \gamma_{12}M_2, \quad P = \gamma_{21}M_1 + \gamma_{22}M_2, \quad (52)$$

где $\gamma_{11}, \gamma_{12}, \gamma_{21}, \gamma_{22}$ — постоянные для конкретных экономических процессов. Тогда, подставив уравнения (52) в (50), получим систему дифференциальных уравнений относительно денежных масс секторов:

$$\begin{aligned} \dot{M}_1 &= (\gamma_{21}\dot{m}_{12} - \gamma_{11}\dot{u})M_1 + (\gamma_{22}\dot{m}_{12} - \gamma_{12}\dot{u})M_2 + \dot{M}_3 + \dot{M}_i, \\ \dot{M}_2 &= (\gamma_{11}\dot{u} - \gamma_{21}\dot{m}_{12})M_1 + (\gamma_{12}\dot{u} - \gamma_{22}\dot{m}_{12})M_2 - \dot{M}_i + \dot{M}_{2s}, \end{aligned} \quad (53)$$

которую можно преобразовать к виду

$$\dot{M} = \dot{M}_3 + \dot{M}_{2s}, \quad \dot{M}' + \varphi M' + \psi M = \dot{M}_3 + 2\dot{M}_i - \dot{M}_{2s}, \quad (54)$$

где обозначено:

$$M = M_1 + M_2, \quad M' = M_1 - M_2, \quad \varphi = (\gamma_{11} - \gamma_{12})\dot{u} + (\gamma_{22} - \gamma_{21})\dot{m}_{12},$$

$$\psi = (\gamma_{11} + \gamma_{12})\dot{u} - (\gamma_{22} + \gamma_{21})\dot{m}_{12}. \quad (55)$$

Если известны материально-вещественные потоки \dot{u} , \dot{m}_{12} , то можно записать решение системы (54):

$$M = M_0 + M_3 + M_{2s},$$

$$M' = \exp\left[-\int_0^t \varphi(t) dt\right] \left\{ M'_0 - \int_0^t [\psi(t)(M_0 + M_3 + M_{2s}) - \dot{M}_3 - 2\dot{M}_i + \dot{M}_{2s}] \exp\left[\int_0^t \varphi(t) dt\right] dt \right\}, \quad (56)$$

где M_0, M'_0 — начальные значения соответственно общей денежной массы и разности денежных масс секторов.

Подставляя уравнения (53) в (52), после некоторых преобразований получим дифференциальные уравнения соответственно относительно потребительской и затратной цены:

$$\dot{P} + \varphi P = \gamma(M_0 + M_3 + M_{2s})\dot{u} + \gamma_{21}\dot{M}_3 - \gamma_2\dot{M}_i + \gamma_{22}\dot{M}_{2s},$$

$$\dot{P}' + \varphi P' = \gamma(M_0 + M_3 + M_{2s})\dot{m}_{12} + \gamma_{11}\dot{M}_3 + \gamma_1\dot{M}_i + \gamma_{12}\dot{M}_{2s},$$

$$(\gamma = \gamma_{11}\gamma_{22} - \gamma_{12}\gamma_{21}, \quad \gamma_1 = \gamma_{11} - \gamma_{12}, \quad \gamma_2 = \gamma_{22} - \gamma_{21}). \quad (57)$$

При известных потоках \dot{u} , \dot{m}_{12} решения уравнений (57) определяется интегралами

$$P = \exp\left[-\int_0^t \varphi(t) dt\right] \times$$

$$\times \left\{ P_0 + \int_0^t [\gamma(M_0 + M_3 + M_{2s})\dot{u} + \gamma_{21}\dot{M}_3 - \gamma_2\dot{M}_i + \gamma_{22}\dot{M}_{2s}] \exp\left[\int_0^t \varphi(t) dt\right] dt \right\}$$

$$P' = \exp\left[-\int_0^t \varphi(t) dt\right] \times$$

$$\times \left\{ P'_0 + \int_0^t [\gamma(M_0 + M_3 + M_{2s})\dot{m}_{12} + \gamma_{11}\dot{M}_3 + \gamma_1\dot{M}_i + \gamma_{12}\dot{M}_{2s}] \exp\left[\int_0^t \varphi(t) dt\right] dt \right\}, \quad (58)$$

где P_0, P'_0 — начальные значения соответствующих цен.

В общем случае при производстве материальных инвестиционных продуктов \dot{n}_i за счет инвестиций \dot{M}_i из уравнения (51) следует, что ВВП \dot{u} , а следовательно и поток благ \dot{m}_{12} , зависят от P' , поэтому уравнения (54), (58) будут нелинейными. В этом случае их решение можно построить лишь численными методами.

Приведенные уравнения описывают нестационарные производственно-рыночные процессы в двухсекторной экономике. Стационарный или равновесный кругооборот в рассматриваемой модели осуществляются при условии

$$\begin{aligned} \dot{M}_1 = 0, \dot{M}_2 = 0, \dot{M}_3 = 0, \dot{M}_i = 0, \dot{M}_{2s} = 0, p = p^0, a = a^0, n = n^0, \\ \dot{i} = \dot{i}^0 = \dot{m}^0 + a^0 n^0, \dot{m} = \dot{m}^0, \dot{m}_{11} = \dot{m}_{11}^0, \dot{m}_{12} = \dot{m}_{12}^0, \\ P = P^0, P' = P'^0, M = M^0, \end{aligned} \quad (59)$$

где $p^0, a^0, n^0, \dot{i}^0, \dot{m}^0, \dot{m}_{11}^0, \dot{m}_{12}^0, P^0, P'^0$ — постоянные. В этом случае из уравнений баланса денежных масс (50) следует равенство

$$P^0 \dot{m}_{12}^0 = P'^0 (\dot{m}^0 + a^0 n^0) = M^0 V^0, \quad (60)$$

где $M^0 = M_1^0 + M_2^0$ — постоянная общая денежная масса, находящаяся в кругообороте; V^0 — постоянная скорость оборота денежной массы M^0 . Из уравнений (1), (3), (46), (60) находим ВВП и прибыли секторов 1 и 2 в материально-вещественной форме

$$\dot{i}^0 = p^0 n^0, \dot{m}_{11}^0 = [(1-r)p^0 - a^0]n^0, \dot{m}_{12}^0 = r p^0 n^0, \left(r = \frac{P'^0}{P^0} = \frac{\dot{m}_{12}^0}{\dot{i}^0} \right) \quad (61)$$

и в денежной форме

$$P^0 \dot{i}^0 = P^0 p^0 n^0, P^0 \dot{m}_{11}^0 = [(P^0 - P'^0)p^0 - P^0 a^0]n^0, P^0 \dot{m}_{12}^0 = P'^0 p^0 n^0. \quad (62)$$

Если пользоваться терминологией марксистской политической экономики, то \dot{m}_{11}^0 — это прибавочный продукт, а $P^0 \dot{m}_{11}^0$ — прибавочная стоимость. Прибавочная стоимость обусловлена разностью потребительской P^0 и затратной P'^0 цен.

Для стационарного кругооборота из равенств (57), (59), (60) находим выражения для цен

$$P^0 = \frac{\gamma}{\gamma_1 + r\gamma_2} M^0, P'^0 = \frac{r\gamma}{\gamma_1 + r\gamma_2} M^0, \quad (63)$$

распределения денег по секторам

$$M_1^0 = \frac{r\gamma_{22} - \gamma_{12}}{\gamma_1 + r\gamma_2} M^0, M_2^0 = \frac{\gamma_{11} - r\gamma_{21}}{\gamma_1 + r\gamma_2} M^0 \quad (64)$$

и скорости оборота денежной массы

$$V^0 = \frac{r\gamma p^0 n^0}{\gamma_1 + r\gamma_2}. \quad (65)$$

Так как денежные потоки (48) равны для стационарного кругооборота, то денежная масса M^0 , участвующая в кругообороте, распределена по секторам равномерно ($M_1^0 = M_2^0 = 0,5M^0$). Поэтому из (64) следует равенство

$$\gamma_{11} + \gamma_{12} = r(\gamma_{22} + \gamma_{21}). \quad (66)$$

Новое стационарное состояние, согласно уравнениям (1), (3), (51), (59), будем характеризовать суммой параметров предыдущего состояния и приращений:

$$p^0 + \Delta p, \quad a^0 + \Delta a, \quad n^0 + \Delta n, \quad \dot{u}^0 + \Delta \dot{u}, \quad \dot{m}^0 + \Delta \dot{m}, \quad \dot{m}_{11}^0 + \Delta \dot{m}_{11}, \quad \dot{m}_{12}^0 + \Delta \dot{m}_{12}, \\ P^0 + \Delta P, \quad P'^0 + \Delta P', \quad M^0 + \Delta M_{\text{э}} + \Delta M_{2s}, \quad \Delta M_i. \quad (67)$$

При этом, как следует из уравнений (51), (57),

$$P^0 + \Delta P = \frac{\gamma(M^0 + \Delta M_{\text{э}} + \Delta M_{2s})}{\gamma_1 + (r + \Delta r)\gamma_2}, \quad P'^0 + \Delta P' = \frac{\gamma(r + \Delta r)(M^0 + \Delta M_{\text{э}} + \Delta M_{2s})}{\gamma_1 + (r + \Delta r)\gamma_2}, \\ r + \Delta r = \frac{\dot{m}_{12}^0 + \Delta \dot{m}_{12}}{\dot{u}^0 + \Delta \dot{u}}, \quad \Delta M_i = P'^0 \Delta n, \quad (68)$$

откуда получим выражения темпов инфляции

$$\frac{\Delta P}{P^0} = \frac{\mu - \varepsilon}{1 + \varepsilon}, \quad \frac{\Delta P'}{P'^0} = \frac{\mu + \sigma}{1 + \varepsilon}, \quad (69)$$

где обозначено:

$$\mu = \mu_{\text{э}} + \mu_{2s}, \quad \mu_{\text{э}} = \frac{\Delta M_{\text{э}}}{M^0}, \quad \mu_{2s} = \frac{\Delta M_{2s}}{M^0}, \quad \varepsilon = \frac{\gamma_2(r' - r)d}{(\gamma_1 + \gamma_2 r)(1 + d)}, \quad r = \frac{\dot{m}_{12}^0}{\dot{u}^0}, \\ r' = \frac{\Delta \dot{m}_{12}^0}{\Delta \dot{u}^0}, \quad d = \frac{\Delta \dot{u}}{\dot{u}^0}, \quad \sigma = \left(\mu + \frac{\gamma_1}{\gamma_2 r} \right) \frac{(r' - r)d}{r(1 + d)}, \quad r' - r = \frac{(1 + d)}{d} \Delta r. \quad (70)$$

Приращения ВВП и прибыли секторов 1 и 2 в материально-вещественной форме определяются такими формулами:

$$\Delta \dot{u} = p^0 \Delta n + \Delta p(n^0 + \Delta n), \\ \Delta \dot{m}_{11} = [(1 - r)p^0 - a^0] \Delta n + [(1 - r)\Delta p - \Delta r(p^0 + \Delta p) - \Delta a](n^0 + \Delta n), \\ \Delta \dot{m}_{12} = rp^0 \Delta n + [r\Delta p + \Delta r(p^0 + \Delta p)](n^0 + \Delta n). \quad (71)$$

В денежной форме соответственно имеем:

$$(P^0 + \Delta P)(\dot{u}^0 + \Delta \dot{u}) - P^0 \dot{u}^0 = P^0 \left[\frac{\mu - \varepsilon}{1 + \varepsilon} (\dot{u}^0 + \Delta \dot{u}) + \Delta \dot{u} \right], \\ (P^0 + \Delta P)(\dot{m}_{11}^0 + \Delta \dot{m}_{11}) - P^0 \dot{m}_{11}^0 = P^0 \left[\frac{\mu - \varepsilon}{1 + \varepsilon} (\dot{m}_{11}^0 + \Delta \dot{m}_{11}) + \Delta \dot{m}_{11} \right], \\ (P^0 + \Delta P)(\dot{m}_{12}^0 + \Delta \dot{m}_{12}) - P^0 \dot{m}_{12}^0 = P^0 \left[\frac{\mu - \varepsilon}{1 + \varepsilon} (\dot{m}_{12}^0 + \Delta \dot{m}_{12}) + \Delta \dot{m}_{12} \right]. \quad (72)$$

Соотношения (59)–(72) относятся к двум стационарным состояниям при скачкообразном изменении параметров по истечении длительного про-

межутка времени. Для изучения процесса во времени будем исходить из динамической постановки. Пусть в начальный момент времени $t = 0$ экономика находится в состоянии стационарного кругооборота (59), а в момент времени $t = t_1$ происходит скачкообразное изменение параметров:

$$\begin{aligned} \dot{M}_3 &= \Delta M_3 \delta(t - t_1), \quad \dot{M}_i = \Delta M_i \delta(t - t_1), \quad \dot{M}_{2s} = \Delta M_{2s} \delta(t - t_1), \\ M_3 &= \Delta M_3 \sigma(t - t_1), \quad M_i = \Delta M_i \sigma(t - t_1), \quad M_{2s} = \Delta M_{2s} \sigma(t - t_1), \\ \dot{u} &= \dot{u}^0 + \Delta \dot{u} \sigma(t - t_1), \quad \dot{m}_{12} = \dot{m}_{12}^0 + \Delta \dot{m}_{12} \sigma(t - t_1), \end{aligned} \quad (73)$$

где $\delta(t - t_1)$ — δ -функция Дирака; $\sigma(t - t_1)$ — функция единичного скачка. Подставив равенства (73) в (58), находим зависимость от времени темпов инфляции для потребительской и затратной цен:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{P^0} &= \frac{1}{\gamma} (\gamma_1 + \gamma_2 r) (\gamma_{21} \mu_3 + \gamma_{22} \mu_{2s} - \gamma_2 \mu_i) e^{-\alpha(t-t_1)} + \frac{\mu - \varepsilon}{1 + \varepsilon} (1 - e^{-\alpha(t-t_1)}), \\ \frac{\Delta P'}{P'^0} &= \frac{1}{\gamma r} (\gamma_1 + \gamma_2 r) (\gamma_{11} \mu_3 + \gamma_{12} \mu_{2s} + \gamma_1 \mu_i) e^{-\alpha c} + \frac{\mu + \varepsilon}{1 + \varepsilon} (1 - e^{-\alpha(t-t_1)}), \end{aligned}$$

где

$$\alpha = \dot{u}^0 (\gamma_1 + \gamma_2 r) (1 + d) (1 + \varepsilon), \quad \mu_i = \frac{\Delta M_i}{M^0} = \frac{r P^0 \Delta n}{M^0}.$$

Отсюда следует, что в краткосрочном периоде, т.е. при t , близком к t_1 , темп инфляции определяется первым слагаемым. С течением времени первое слагаемое убывает, а второе слагаемое возрастает. В долгосрочном периоде, т.е. при $\alpha(t - t_1) \gg 1$, приходим к стационарным значениям (69).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Удовлетворение материальных потребностей людей является основой существования и развития человеческого общества. Оно осуществляется эффективной экономической деятельностью общества, которая представляет собой единство производства, распределения, обмена и потребления общественного продукта. Решающей фазой общественного развития является производство, от которого зависят фазы распределения, обмена и потребления. Однако последние оказывают существенное обратное воздействие на производство, определяя его характер и эффективность функционирования. Основной задачей макроэкономики является выявление механизмов осуществления каждой фазы и построение математических моделей их функционирования с целью прогнозирования экономического развития и выбора оптимальных методов влияния на экономику в целом.

Производство базируется непосредственно на материальных и человеческих ресурсах. Поэтому моделирование производства описывается производственной функцией, которая представляет собой зависимости между выпуском продукции и затраченными ресурсами, среди которых наиболее широко употребляются капитал и труд людей. Из известных производствен-

ных функций Кобба–Дугласа с идеальной и Леонтьева с нулевой взаимозаменяемостями капитала и труда последняя ближе к реальности, так как конкретные производственные мощности всегда связаны с определенным количеством людей, занятых в их работе. Для отражения физической сущности реальных производственных процессов теорию производственных функций целесообразно строить на основе дифференциальных уравнений производства в материальной форме и замыкающих их уравнений накопления реального капитала с учетом амортизации. Их решение описывают рост, спад или циклический характер производства.

Известные макроэкономические теории денег и цен базируются на уравнении обмена в виде равенства произведений уровня цен на физический объем ВВП и количества денег на скорость их обращения (монетаристическая модель) или на равенстве национального дохода, сумме всех расходов (кейнсианская модель). Однако эти модели предполагают равновесное состояние экономики, поэтому они неприменимы к описанию нестационарных процессов, таких как инфляция, инвестирование, экономический подъем и спад. В этом случае целесообразно строить теорию на основе нестационарных уравнений баланса товарной и денежной масс в рассматриваемых экономических секторах при взаимообмене. В случае двухсекторной модели макроэкономики это связано с построением дифференциальных уравнений динамики денежных масс секторов и цен, что позволяет исследовать развитие инфляции во времени и ее зависимости от темпов приращения денежной массы, производства и потребления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Менкью Н.Г. Макроэкономика / Н.Г. Менкью; пер. с англ. — М.: Изд-во МГУ, 1994. — 226 с.
2. Матвеева Т.Ю. Введение в макроэкономику / Т.Ю. Матвеева. — М.: Изд. дом ГУ ВШЭ, 2007. — 511 с.
3. Селищев А.С. Макроэкономика / А.С. Селищев. — СПб: Питер, 2000. — 448 с.
4. Савченко А.Г. Макроэкономика / А.Г. Савченко, Г.О. Пухтаєвич, О.М. Тітьонко. — К.: Либідь, 1999. — 288 с.
5. Раяцкас Р.Л. Количественный анализ в экономике / Р.Л. Раяцкас, М.К. Плакунов. — М.: Наука, 1987. — 392 с.
6. Плакунов М.К. Производственные функции в экономическом анализе / М.К. Плакунов, Р. Раяцкас. — Вильнюс: Минтис, 1984. — 308 с.
7. Моделирование народнохозяйственных процессов: учеб. пособие для экон. вузов и факультетов / Под ред. В.С. Дадаева. — М.: Экономика, 1973. — 479 с.
8. Леонтьев В. Экономическое эссе. Теории, исследования, факты и политика / В. Леонтьев; пер. с англ. — М.: Политиздат, 1990. — 415 с.
9. Кейнс Дж.М. Избранные произведения / Дж.М. Кейнс; пер. с англ. — М.: Экономика, 1993. — 543 с.
10. Хорошун Л.П. Моделирование производственно-рыночных процессов в двухсекторной макроэкономике при расширенном воспроизводстве / Л.П. Хорошун, Н.Д. Панкратова, С.Л. Яхин // Доп. НАН України. — 2016. — № 11. — С. 36–43.

Поступила 11.02.2019

FUZZY GMDH AND ITS APPLICATION TO FORECASTING FINANCIAL PROCESSES

YURIY ZAYCHENKO, HELEN ZAYCHENKO

Abstract. This paper is devoted to the investigation and application of the fuzzy inductive modeling method known as Group Method of Data Handling (GMDH) in problems of Data Mining, in particular its application to solving the forecasting tasks in financial sphere. The advantage of the inductive modeling method GMDH is a possibility of constructing an adequate model directly in the process of algorithm run. The generalization of GMDH in case of uncertainty — a new method fuzzy GMDH is described which enables to construct fuzzy models almost automatically. The algorithm of fuzzy GMDH is considered. Fuzzy GMDH with Gaussian and bell-wise membership functions MF are considered and their similarity with triangular MF is shown. Fuzzy GMDH with different partial descriptions orthogonal polynomials of Chebyshev and Fourier are considered. The problem of adaptation of fuzzy models obtained by FGMDH is considered and the corresponding adaptation algorithm is described. The extension and generalization of fuzzy GMDH in case of fuzzy inputs is considered and its properties are analyzed. The experimental investigations of the suggested FGMDH were carried out.

Keywords: fuzzy GMDH, membership functions, models adaptation, forecasting.

INTRODUCTION

One of the most important problems in the sphere of economy and finance is the problem of forecasting economical and financial processes. The distinguishing features of the problem are the following:

- the form of functional dependence is unknown and only model class is determined, for example, polynomial of any degree or Fourier time series;
- short data samples;
- time series $x_i(t)$ in general case is non-stationary.

In this case, the application of conventional methods of statistical analysis (e.g. regression analysis) is impossible and it is necessary to utilize methods based on computational intelligence (CI). The Group Method of Data Handling (GMDH) developed by acad. A.G. Ivakhnenko [1] and extended by his colleagues [2] belongs to this class. GMDH is a self-organizing method allowing to discover internal hidden laws in the appropriate object area. The advantages of GMDH algorithms are the possibility of constructing optimal models from samples with a small number of observations and unknown relationships among variables. This method does not demand to know the model structure a priori; it is constructed by algorithm itself in the process of its run.

In case if input data are measured with errors which distribution is not normal and is unknown to a decision-maker then it is reasonable to construct fuzzy model using Fuzzy GMDH method. FGMDH was suggested in [3] where main ideas of the method and an algorithm of fuzzy GMDH was presented and investi-

gated in case when fuzzy coefficients of models have triangular membership functions. For finding optimal parameters of fuzzy model, the LP problem was introduced and solved. Later this method was extended to Gaussian and bell-wise MF [4]. It was shown that the structure of LP model for this problem is the same as for triangular MF. Further FGMDH method was extended to orthogonal polynomials as partial descriptions [5, 6].

Problem of adaptation of fuzzy models in FGMDH was considered in [5] and several adaptation methods were suggested and investigated. Numerous experimental investigations of fuzzy GMDH with different partial descriptions and MF were carried out and comparison with classical GMDH was performed [7].

The extension of FGMDH and its generalization in the case when input data is fuzzy were considered in [8]. The math model for determination of fuzzy coefficients was constructed and general FGMDH algorithm for fuzzy inputs was developed and investigated.

The goal of this paper is to present a review of the main results in the field of developing the fuzzy GMDH and experimental results of its applications to the forecasting in financial sphere.

OTHER FUZZY-BASED APPROACHES IN GMDH NETWORKS

The application of GMDH for structure optimization of fuzzy polynomial neural networks (FPNN) were developed and investigated in numerous works of Witold Pedrycz and his colleagues since 2002 [9-16]. They implemented a like approach as in fuzzy GMDH. In [9, 10], W. Pedrycz et al suggested hybrid neural network called fuzzy polynomial neural networks (FPNNs), a hybrid modeling architecture combining polynomial neural networks (PNNs) and fuzzy neural networks (FNNs).

The development of the FPNNs is based on the technologies of computational intelligence (CI). The structure of the FPNN results from a synergistic usage of FNN and PNN. FNNs contribute to the formation of the premise part of the rule-based structure of the FPNN while the consequence part of the FPNN is designed using PNNs. Each PN of the network realizes a polynomial type of partial description (PD) of the mapping between input and out variables: linear, quadratic or modified quadratic. The structure of the PNN is not fixed in advance but it is generated by GMDH to produce dynamic topology of the network.

The authors continued their investigations in the sphere of FPNN and for optimization of it topology suggested genetic algorithms (GAs) [11, 12]. Opposite to the conventional HFPNN which use the GMDH method for structure synthesis, they suggested to apply GA for structure optimization of both FNN and PNN. As a result, genetically optimized HFPNN (gHFPNN) was constructed. The augmented gHFPNN results in a structurally optimized structure and comes with a higher level of flexibility in comparison to the conventional HFPNN. In the sequel, two general optimization mechanisms are explored. First, the structural optimization is realized via GAs whereas the ensuing detailed parametric optimization is carried out in the setting of a standard least square method-based learning.

In [13, 14, 15], genetically optimized fuzzy relation-based polynomial neural networks were introduced and investigated using information granulation (IG gFRPNN). With the aid of the information granules based on C-Means clustering, the initial location of membership functions were determined and initial values of

polynomial function being used in the premise and consequence part of the fuzzy rules respectively. The GA-based design procedure being applied at each layer of the IG_gFRPNN leads to the selection of preferred nodes with specific local characteristics (such as the number of input variables, the order of the polynomial, a collection of the specific subset of input variables, and the number of membership functions) available within the network.

In the sequel, the structural optimization is realized via GAs, whereas the ensuing detailed parametric optimization is carried by the standard least square method-based learning. The development of gFRPNN was continued in [16] where the problem of constructing the FRPNN under conditions of high dimensions was considered. Parallel fuzzy polynomial neural networks (PFPNNs) with the aid of heterogeneous partition of the input space were suggested. In the design of the premise part of the rule, a weighted fuzzy clustering method is used not only to realize a non-uniform partition of the input space but to overcome a possible curse of dimensionality. While in the design of consequent part, fuzzy polynomial neural networks are utilized to construct optimal local models (high order polynomials) that describe the relationship between input variables and the output variable within some local region of the input space. Particle swarm optimization (PSO) was employed to adjust the design parameters of parallel fuzzy polynomial neural networks.

The development and investigations of hybrid GMDH- fuzzy neural networks were performed by joint group of scientists in NTUU “KPI” and KTURE (Kharkiv University of Radio-Electronics). In [17, 18], GMDH-wavelet neuro-fuzzy system was suggested and investigated using advantages of neuro-fuzzy networks and GMDH. In [19], GMDH-cascade neo-fuzzy networks were suggested and investigated in the problem of forecasting. In this work the structure of cascade neo-fuzzy network was constructed using GMDH which enabled to find the structure of network and weights of neurons. In [20], GMDH-neural network with spiking neurons was suggested.

This approach of developing hybrid GMDH-FNN systems was continued in [21] where the authors suggested evolving a hybrid GMDH-neuro fuzzy system. The hybrid system is grounded on both GMDH and the concept of evolving systems that makes it possible to define both optimal parameter values and the best structure in every specific case. The important property of the suggested system is that it does not require any high data volumes to get trained. Adjusting parameters in a parallel fashion gives an option of increasing a processing speed of data handling.

FUZZY GMDH: PRINCIPAL IDEAS AND MATHEMATICAL MODEL CONSTRUCTION

As it is well-known, the drawbacks of classical GMDH are the followings [3, 4]:

- GMDH utilizes least squared method (LSM) for finding the model coefficients but matrix of linear equations may be close to degenerate and the corresponding solution may appear non-stable and very volatile. Therefore, the special methods for regularization should be used;
- after application of GMDH point-wise estimations are obtained but in many cases it is needed find interval value for coefficient estimates;

– GMDH does not work in case of incomplete or fuzzy input data.

Therefore, in the last 10 years the new variant of GMDH – fuzzy GMDH was developed and refined which may work with fuzzy input data and is free of classical GMDH drawbacks [3]. As it is well known, GMDH is based on the following principles [1–3]:

- 1) the principle of multiplicity of models;
- 2) the principle of external complement which means that the whole sample should be divided into two parts – training subsample and test subsample;
- 3) the principle of self-organization;
- 4) the principle of freedom of choice.

Fuzzy GMDH is also based on these principles but construct fuzzy models. Let us consider its main ideas.

In [3–5], the linear interval model regression was considered:

$$Y = A_0 Z_0 + A_1 Z_1 + \dots + A_n Z_n, \quad (1)$$

where A_i is a fuzzy number of triangular form described by pair of parameters $A_i = (\alpha_i, c_i)$, where α_i is interval center, c_i is its width, $c_i \geq 0$.

Then Y is a fuzzy number with parameters determined as follows:

– the interval center:

$$\alpha_y = \sum \alpha_i z_i = \alpha^T z;$$

– the interval width:

$$c_y = \sum c_i |z_i| = c^T |z|.$$

For example, for the partial description of the kind

$$f(x_i, x_j) = A_0 + A_1 x_i + A_2 x_j + A_3 x_i x_j + A_4 x_i^2 + A_5 x_j^2$$

it is necessary to assign in the general model (1),

$$z_0 = 1, \quad z_1 = x_i, \quad z_2 = x_j, \quad z_3 = x_i x_j, \quad z_4 = x_i^2, \quad z_5 = x_j^2.$$

Let the training sample be $\{z_1, z_2, \dots, z_M\}$, $\{y_1, y_2, \dots, y_M\}$. Then for the model (1) to be adequate it is necessary to find such parameters $(\alpha_i, c_i)_{i=\overline{1, n}}$ satisfying the following inequalities:

$$\begin{cases} \alpha^T z_k - c^T |z_k| \leq y_k, \\ \alpha^T z_k + c^T |z_k| \geq y_k, \end{cases} \quad k = \overline{1, M}.$$

Let us formulate the basic requirements for the linear interval model of partial description of a kind (1).

It is necessary to find such values of the parameters (α_i, c_i) of fuzzy coefficients for which:

- 1) real values of observed outputs y_k would drop in the estimated interval for Y_k ;
- 2) the total width of the estimated interval for all sample points would be minimal.

These requirements lead to the following linear programming problem [3, 4]:

$$\min \left(C_0 M + C_1 \sum_{k=1}^M |x_{ki}| + C_2 \sum_{k=1}^M |x_{kj}| + C_3 \sum_{k=1}^M |x_{ki} x_{kj}| + C_4 \sum_{k=1}^M |x_{ki}^2| + C_5 \sum_{k=1}^M |x_{kj}^2| \right); \quad (2)$$

under constraints:

$$a_0 + a_1 x_{ki} + a_2 x_{kj} + a_3 x_{ki} x_{kj} + a_4 x_{ki}^2 + a_5 x_{kj}^2 - (C_0 + C_1 |x_{ki}| + C_2 |x_{kj}| + C_3 |x_{ki} x_{kj}| + C_4 |x_{ki}^2| + C_5 |x_{kj}^2|) \leq y_k, \quad (3)$$

$$a_0 + a_1 x_{ki} + a_2 x_{kj} + a_3 x_{ki} x_{kj} + a_4 x_{ki}^2 + a_5 x_{kj}^2 + (C_0 + C_1 |x_{ki}| + C_2 |x_{kj}| + C_3 |x_{ki} x_{kj}| + C_4 |x_{ki}^2| + C_5 |x_{kj}^2|) \geq y_k, \quad (4)$$

where $C_p \geq 0$, $p = 0, 5$, $k = \overline{1, M}$ and k is an index of a point.

As we can easily see the task (2) – (4) is linear programming (LP) problem. However, the inconvenience of the model (2) – (4) for the application of standard LP methods is that there are no constraints of non-negativity for variables a_i . Therefore for its solution it is reasonable to pass to the dual LP problem by introducing dual variables $\{\delta_k\}$ and $\{\delta_{k+M}\}$, $k = \overline{1, M}$. Using simplex-method for the dual problem and after finding the optimal values for the dual variables $\{\delta_k\}$, the optimal solutions (a_i, c_i) of the initial direct problem will be also found.

THE DESCRIPTION OF FUZZY GMDH ALGORITHM

Let us present the brief description of the algorithm FGMDH [3, 4].

1. Choose the general model type by which the sought dependence will be described.
2. Choose the external criterion of optimality (criterion of regularity or unbiasedness).
3. Choose the type of partial descriptions (for example, linear or quadratic one).
4. Divide the sample into training N_{train} and test N_{test} subsamples.
5. Put zero values to the counter of model number k and to the counter of layers r (iterations number).
6. Generate a new partial model f_k (1) using the training sample. Solve the LP problem (2) – (4) and find the values of parameters α_i, c_i .
7. Calculate using test sample the value of external criterion ($N_{ubk}^{(r)}$ or $\delta_k^{(2)}(r)$).
8. $k = k + 1$. If $k > C_N^2$ for $r=1$ or $k > C_F^2$ for $r>1$, then $k = 1$, $r = r + 1$ and go to step 9, otherwise go to step 6.
9. Calculate the best value of the criterion for models of r -th iteration. If $r = 1$, then go to step 6 otherwise, go to step 10.

10. If $|N_{ub}(r) - N_{ub}(r-1)| \leq \varepsilon$ or $\delta_k^{(2)}(r) \geq \delta_{k-1}^{(2)}(r)$, then go to 11, otherwise select F best models and assigning $r = r + 1$, $k = 1$, go to step 6 and execute $(r+1)$ -th iteration.

11. Select the best model out of models of the previous layer (iteration) using external criterion.

ANALYSIS OF DIFFERENT MEMBERSHIP FUNCTIONS

In the first paper devoted to fuzzy GMDH [3], the triangular membership functions (MF) were considered. But as fuzzy numbers may also have the other kinds of MF it is important to consider the other classes of MF in the problems of modeling using FGMDH. In [4], fuzzy models with Gaussian and bell-shaped MF were investigated.

Consider a fuzzy set with MF of the form:

$$\mu_B(x) = e^{-\frac{1}{2} \frac{(x-1)^2}{c^2}}.$$

Let the linear interval model for partial description of FGMDH take the form (1). Then the problem is to find such fuzzy numbers B_i with parameters (a_i, c_i) that:

- the observation y_k would belong to a given estimate interval for the set $Y(k)$ with degree not less than α , $0 < \alpha < 1$;
- the width of the estimated interval of the degree α would be minimal;

In [4, 6] it was shown that the problem of finding optimal fuzzy model will be finally transformed to the following LP problem:

$$\min \left(C_0 M + C_1 \sum_{k=1}^M |x_{ki}| + C_2 \sum_{k=1}^M |x_{kj}| + C_3 \sum_{k=1}^M |x_{ki} x_{kj}| + C_4 \sum_{k=1}^M |x_{ki}^2| + C_5 \sum_{k=1}^M |x_{kj}^2| \right); \quad (5)$$

under constraints:

$$\left. \begin{aligned} a_0 + a_1 x_{ki} + \dots + a_5 x_{kj}^2 + (C_0 + C_1 |x_{ki}| + \dots + C_5 |x_{kj}^2|) \sqrt{-2 \ln \alpha} &\geq y_k, \\ a_0 + a_1 x_{ki} + \dots + a_5 x_{kj}^2 - (C_0 + C_1 |x_{ki}| + \dots + C_5 |x_{kj}^2|) \sqrt{-2 \ln \alpha} &\leq y_k, \end{aligned} \right\} k = \overline{1, M}. \quad (6)$$

To solve this problem like in the case of triangular MF it is reasonable to pass to the dual LP problem of the form:

$$\max \left(\sum_{k=1}^M y_k \delta_{k+M} - \sum_{k=1}^M y_k \delta_k \right), \quad (7)$$

with constraints of equalities and inequalities:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^M \delta_{k+M} - \sum_{k=1}^M \delta_k &= 0; \\ \sum_{k=1}^M X_{ki} \delta_{k+M} - \sum_{k=1}^M X_{ki} \delta_k &= 0; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 & \sum_{k=1}^M X_{kj}^2 \delta_{k+M} - \sum_{k=1}^M X_{kj}^2 \delta_k = 0; \\
 & \left. \begin{aligned}
 & \sum_{k=1}^M \delta_k + \sum_{k=1}^M \delta_{k+M} \leq \frac{M}{\sqrt{-2 \ln \alpha}}, \\
 & \sum_{k=1}^M |X_{ki}| \delta_{k+M} + \sum_{k=1}^M |X_{ki}| \delta_k \leq \frac{\sum_{k=1}^M |X_{ki}|}{\sqrt{-2 \ln \alpha}}, \\
 & \dots\dots\dots \\
 & \sum_{k=1}^M |X_{kj}^2| \delta_{k+M} + \sum_{k=1}^M |X_{kj}^2| \delta_k \leq \frac{\sum_{k=1}^M |X_{kj}^2|}{\sqrt{-2 \ln \alpha}},
 \end{aligned} \right\} \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$\delta_k \geq 0, \quad k = \overline{1, 2M}. \quad (10)$$

Analyzing the dual LP program (5)–(10), it is easy to notice that this problem is always solvable as there is trivial solution $\delta_k = 1, k = \overline{1, 2M}$. Therefore the initial problem is also always solvable with any data.

Thus, fuzzy GMDH allows constructing fuzzy models and has the following advantages:

1. The problem of optimal model determination is transferred to the problem of linear programming which is always solvable.
2. There is so called interval regression model built as the result of the method performance.

**FUZZY GMDH WITH DIFFERENT PARTIAL DESCRIPTIONS:
ORTHOGONAL POLYNOMIALS**

As it is well known from the general GMDH theory, models-pretenders are generated in this method on the base of so called partial descriptions being elementary models of two variables. Usually as partial descriptions linear or quadratic polynomials are used. The alternative to this class of those elementary models is application of orthogonal polynomials. The choice of such polynomials as partial descriptions is determined by the following advantages:

- Owing to orthogonal property, the calculation of polynomial coefficients which approximate the simulated process goes faster than for non-orthogonal polynomials.
- The coefficients of polynomial approximating equation do not depend on the degree of initial polynomial model so if a priori the real polynomial degree is not known we may check the polynomials of various degrees and by this property the coefficients obtained for polynomials of lower degrees remain the same after transfer to higher polynomial degrees. This property is the most important during investigation of real degree of approximating polynomial when solving applied problems.

One of the properties of orthogonal polynomials widely used in this work is the *property of almost equal errors*. Owing to this the very large errors do not

happen, on the contrary, in most cases the error values are small. Therefore the damping of approximation errors occurs. The application of orthogonal polynomials as partial descriptions in FGMDH was suggested and investigated in [5, 6].

Chebyshev’s orthogonal polynomials

Chebyshev’s orthogonal polynomials in general case have the following form [5]:

$$F_\nu(\xi) = T_\nu(\xi) = \cos(\nu \arccos \xi), \quad -1 \leq \xi \leq 1.$$

These polynomials have the following orthogonality property:

$$\int_{-1}^1 \frac{T_\mu(\xi)T_\nu(\xi)d\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} = \begin{cases} 0 & \text{if } \mu \neq \nu; \\ \pi & \text{if } \mu = \nu \neq 0; \\ 2 & \text{if } \mu = \nu = 0, \end{cases} \quad (11)$$

where $\sqrt{1-\xi^2}$ is a weighting coefficient $\omega(\xi)$ in the equation (11).

The approximating Chebyshev’s orthogonal polynomial for \bar{y} is obtained on the base of function S minimization:

$$S = \int_{-1}^1 \omega(\xi) \left(y(\xi) - \sum_{i=0}^m b_i T_i(\xi) \right)^2 d\xi. \quad (12)$$

From (12) it follows that

$$b_k = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{y(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, & k = 0; \\ \frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{y(\xi)T_k(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, & k \neq 0. \end{cases} \quad (13)$$

Hence, the approximating equation is obtained in the form:

$$\bar{y}(\xi) = \sum_{k=0}^m b_k T_k(\xi).$$

As it may be readily seen from the presented expressions, coefficient b_k (13) does not depend on choice of degree m . Thus, the variable m does not demand recalculation of $b_j \forall j \leq m$ while such recalculation is necessary for non-orthogonal approximation.

The best approximating degree m^* may be obtained on the base of hypothesis that investigation results $y(i), i = 1, 2, \dots, r$, have independent Gaussian distribution in the bounds of some polynomial function \bar{y} of certain degree, e.g. $m^* + \mu$, where

$$\bar{y}_{m^* + \mu}(x_i) = \sum_{j=0}^{m^* + \mu} b_j x_i^j,$$

and the dispersion σ^2 of distribution $(y - \bar{y})$ does not depend on μ .

It is clear that for a very small m ($m = 0, 1, 2, \dots$) σ_m^2 decreases as m grows.

As in accordance with the previously formulated hypothesis dispersion does not depend on m , the best degree m^* is the minimal m for which $\sigma_m \cong \sigma_{m+1}$.

For determining m^* it is necessary to calculate the approximating polynomials of various degrees. As coefficients b_j in the equation do not depend on m , the determination of the best degree of polynomial is accelerated.

Let we have the forecasted variable Y and input variables x_1, x_2, \dots, x_n . Let us search the relation between them in the following form

$$Y = A_1 f_1(x_1) + A_2 f_2(x_2) + \dots + A_n f_n(x_n),$$

where A_i is a fuzzy number of triangular type given as $A_i = (\alpha_i, c_i)$, functions f_i are determined as follows [5, 6]:

$$f_i(x_i) = \sum_{j=0}^{m_i} b_{ij} T_j(x_i).$$

The degree m_i of function f_i is determined using hypothesis defined in the preceding section. Denoting $z_i = f_i(x_i)$, we get a linear interval model in classical form.

Investigation of Trigonometric Polynomials as Partial Descriptions

Let a function $f(x)$ be periodic with period 2π defined at the interval $[-\pi, \pi]$, and its derivative $f'(x)$ is also defined at $[-\pi, \pi]$. Then the following equality holds

$$S(x) = f(x) \quad \forall x \in [-\pi, \pi],$$

where

$$S(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{j=1}^{\infty} (a_j \cos(jx) + b_j \sin(jx)).$$

Coefficients a_j, b_j are calculated by Euler formulas:

$$a_j = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(jx) dx; \quad b_j = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(jx) dx.$$

Definition. A trigonometric polynomial of the degree M is called the expression:

$$T_M(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{j=1}^M (a_j \cos(jx) + b_j \sin(jx)).$$

The following theorem is true stating that exists such M , $2M < N$, which minimizes the expression [6]:

$$\sum_{j=1}^N (f(x_j) - T_M(x_j))^2.$$

Hence the coefficients of corresponding trigonometric polynomial are determined by formulas:

$$a_j = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i) \cos(jx_i); \quad b_j = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i) \sin(jx_i).$$

Let it be the variable Y to be forecasted and input variables x_1, x_2, \dots, x_n . Let us search the dependence among them in the form:

$$Y = A_1 f_1(x_1) + A_2 f_2(x_2) + \dots + A_n f_n(x_n),$$

where A_i is a fuzzy number of triangular type given as $A_i = (\alpha_i, c_i)$, functions f_i are determined in such a way:

$$f_i(x_i) = T_{M_i}(x_i).$$

The degree M_i of a function f_i is determined by the theorem described in the preceding section. Therefore if to assign $z_i = f_i(x_i)$, the linear interval model will be obtained in its classical form.

ADAPTATION OF FUZZY GMDH MODELS

While forecasting by self-organizing methods (fuzzy GMDH, in particular), the problem arises regarding the necessity of huge amount of repetitive calculations in case of the training sample size increase or while forecasting in real time when it is needed to correct the obtained model in accordance with new available data. Taking into account new information obtained while forecasting, adaptation may be done by two approaches. The *first* one is to correct parameters of a forecasting model with new data assuming that model structure did not change. The *second approach* consists in adaptation of not only model parameters but its optimal structure as well.

This way demands the repetitive use of full GMDH algorithm and is connected with huge volume of calculations. The second approach is used if adaptation of parameters does not provide good forecast and the new real output values do not drop in the calculated interval for its estimate.

In our consideration, the first approach is used based on adaptation of FGMDH model parameters to new available data. Here the recursive identification methods are preferably used, especially the recursive least squared method (LSM). In this method the parameters estimations on the next step are determined on the base of estimates on the previous step, model error and some information matrix which is modified during all estimation process and therefore contains data which may be used at the next steps of adaptation process [5].

Hence, model coefficients adaptation will be simplified substantially. If to store information matrix obtained while identification of optimal model using fuzzy GMDH, then for model parameters adaptation it will be enough to fulfill only one iteration by recursive LSM method.

The Application of Recurrent LSM for Model Coefficients Adaptation

Consider the following model:

$$y(k) = \theta^T \Psi(k) + v(k),$$

where $y(k)$ is a dependent (output) variable, $\Psi(k)$ is a measurements vector, $v(k)$ are random disturbances, θ is a parameters vector to be estimated.

The parameters estimate θ at the step N is performed due to such formula [5, 6]:

$$\widehat{\theta}(N) = \widehat{\theta}(N-1) + \gamma(N)[y(N) - \widehat{\theta}^T(N-1)\Psi(N)],$$

where $\gamma(N)$ is a coefficients vector which is determined by formula:

$$\gamma(N) = \frac{P(N-1)\Psi(N)}{1 + \Psi^T(N)P(N-1)\Psi(N)},$$

where $P(N-1)$ is so-called “information matrix” determined by formula:

$$P(N-1) = P(N-2) - \frac{P(N-2)\Psi(N-1)\Psi^T(N-1)P(N-2)}{1 + \Psi^T(N-1)P(N-2)\Psi(N-1)}. \quad (14)$$

As one can see from (14), the information matrix may be obtained independently on parameters estimation process and parallel to it. The adaptation of two parameter vectors $\theta_1^T = [\alpha_1, \dots, \alpha_m]$, $\theta_2^T = [C_1, \dots, C_m]$, is performed using the formulas [35]:

$$\widehat{\theta}_1(N) = \widehat{\theta}_1(N-1) + \gamma_1(N)[y(N) - \widehat{\theta}_1^T(N-1)\Psi_1(N)];$$

$$\widehat{\theta}_2(N) = \widehat{\theta}_2(N-1) + \gamma_2(N)[y_c(N) - \widehat{\theta}_2^T(N-1)\Psi_2(N)];$$

$$y_c(N) = |y(N) - \theta_1^T(N-1)\Psi_1(N)|,$$

where $\Psi_1^T = [z_1, \dots, z_m]$; $\Psi_2^T = [|z_1|, \dots, |z_m|]$.

APPLICATION OF GMDH FOR FORECASTING STOCK EXCHANGE PROCESSES

Consider the application of GMDH and fuzzy GMDH for forecasting at the stock exchange NYSE. As input variables, the following stock prices at NYSE were chosen: close prices of companies Hess Corporation, Repsol YPF, S.A. (ADR), Eni S.p.A. (ADR), Exxon Mobil Corporation, Chevron Corporation, and Total S.A. (ADR) [7]. As an output variable, close stock prices of British Petroleum BP plc (ADR) were chosen.

The second problem was forecasting industrial index Dow-Jones Average. As the input variables in this problem there were taken close stock prices of the following companies which form it: American Express Company, Bank of America, Coca-cola, McDonald's, Microsoft Corp., Johnson&Johnson, Intel Corp.

The training sample data were taken in the period since 20 September to 14 November 2011. For the test sample, data of Dow Jones Industrial Average were taken since 15 November 2011 year to 17 November 2011 year [7].

For the experimental investigations, classical GMDH and fuzzy GMDH were used. For these experiments, the percentage of training sample variants was chosen 50%, 70%, 90%. Freedom of choice F was taken 5 and 6.

For fuzzy GMDH, triangular, Gaussian and bell-shaped membership functions were used. For Gaussian and bell-shaped membership functions, the following level values were taken: $a = 0,3; 0,5; 0,7; 0,9$.

To construct models, the following four partial description types were used:

- a linear model of the form:

$$f(x_i, x_j) = A_0 + A_1x_i + A_2x_j;$$

- a squared model:

$$f(x_i, x_j) = A_0 + A_1x_i + A_2x_j + A_3x_ix_j + A_4x_i^2 + A_5x_j^2;$$

- Fourier polynomial of the first degree:

$$T_1 = \frac{a_0}{2} + a_1 \sin(x) + b_1 \cos(x);$$

- Chebyshev's polynomial of the second degree:

$$f(x_i, x_j) = A_0 + A_1x_i + A_2(x_j^2 - 1),$$

where A_j is a fuzzy number with triangular, Gaussian or bell-shaped membership function.

For forecasts accuracy analysis, the following criteria of the forecast quality were used: MSE for test sample, MSE for full sample, MAPE for full and test sample, Durbin-Watson criterion (DW), R-square, Akaike criterion (AIC), Bayes information criterion (BIC), and Shwartz criterion (SC). These criteria values were calculated for each forecast step using the test sample. The results of forecast for BP plc (ADR) shares are presented in the table 1. and for Dow Jones Industrial Average in the table 2.

Table 1. Forecast quality criteria at each forecast step by fuzzy GMDH for shares BP plc (ADR) closing prices

Step of forecast	Criterion	Percentage of training sample		
		50%	70%	90%
1	MSE test	1,248355	0,793523	0,317066
	MSE	0,748864	0,612827	0,485599
	MAPE test	2,041366	2,065155	1,386096
	MAPE	1,452656	1,723657	1,505965
	DW	0,686478	1,763043	1,839065
	R-square	1,064526	0,938058	1,008042
	AIC	2,456985	2,228267	2,053752
	BIC	-3,268440	-3,063	-2,892253
	SC	2,506693	2,277	2,103459
2	MSE test	1,256828	1,871883	2,440575
	MSE	0,728499	0,989650	0,795699
	MAPE test	2,072085	2,367006	2,426847
	MAPE	1,468987	1,845798	1,656084
	DW	0,686478	1,795021	1,839065
	R-square	1,064526	0,874163	1,008042
	AIC	2,456985	2,147717	2,053752
	BIC	-3,268440	-2,986448	-2,892253
	SC	2,506693	2,197424	2,103459

The flow charts of forecasts for shares BP plc (ADR) obtained by fuzzy GMDH are presented on Fig. 1 for 2 steps ahead with $F = 6$, the training sample size 70% and Gaussian MF, significance level $\alpha = 0,7$.

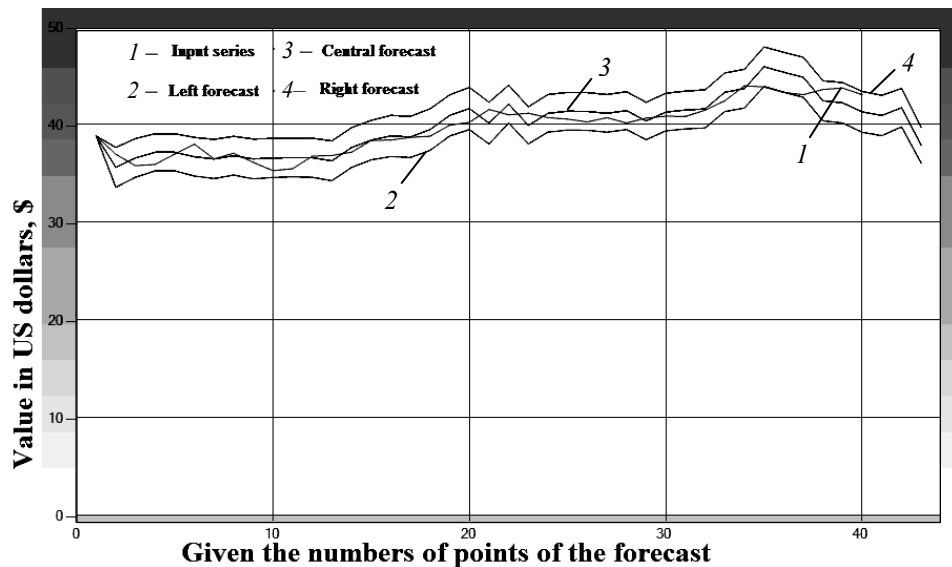


Fig. 1. Forecast results for BP plc (ADR) shares by FGMDH with quadratic partial descriptions, 3 steps ahead

Table 2. Forecast quality criteria by fuzzy GMDH for Dow Jones Industrial Average

Step of forecast	Criterion	Percentage of training sample		
		50%	70%	90%
1	MSE test	40494,427	33109,754	40286,725
	MSE	26900,763	62553,804	26432,081
	MAPE test	1,462066	1,363148	1,405372
	MAPE	1,149183	1,809130	1,191039
	DW	1,917430	1,013536	1,862203
	R-square	0,990922	0,804774	0,849329
	AIC	12,753417	13,551054	12,729001
	BIC	-7,360808	-7,482613	-7,356959
2	SC	12,796073	13,593710	12,771656
	MSE test	41546,293	31602,995	43907,693
	MSE	27793,341	61328,007	32746,387
	MAPE test	1,481603	1,374860	1,521950
	MAPE	1,167355	1,819287	1,280730
	DW	1,917020	1,013536	1,669879
	R-square	0,989976	0,804774	0,811488
	AIC	12,753849	13,551054	12,935378
	BIC	-7,360875	-7,482613	-7,389255
SC	12,796504	13,593710	12,978034	

Forecasts by fuzzy GMDH for Dow Jones I.A. shares are presented on Fig. 2, 3 steps ahead, $F = 6$, the training sample size 70% and Gaussian MF, significance level $\alpha = 0,7$.

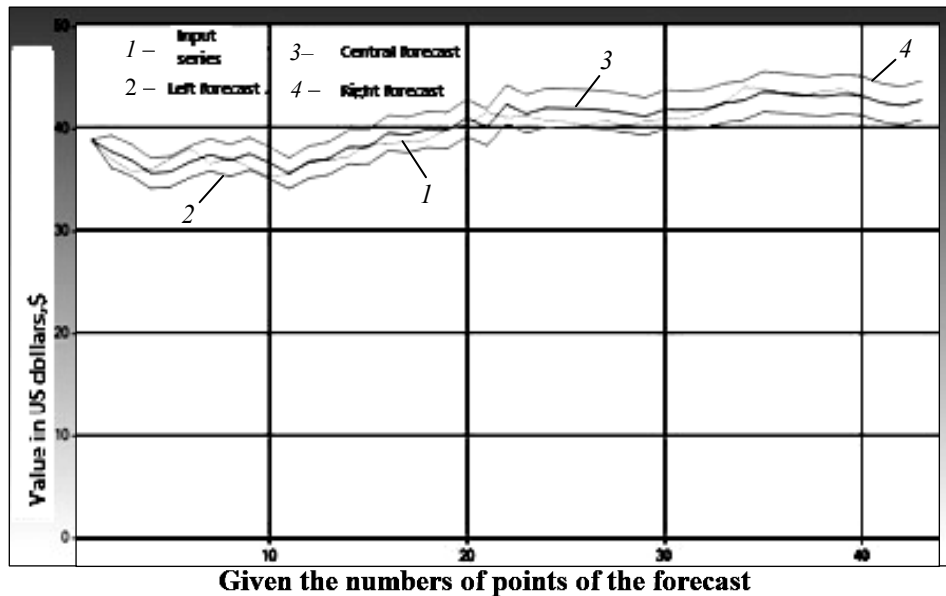


Fig. 2. Index Dow Jones I.A. forecast results at 3 steps ahead with FGMDH

Further experiments for forecasting share prices of BP plc (ADR) and Dow Jones I.A. were carried out with application of GMDH and fuzzy GMDH with different partial descriptions: linear model, squared model, Chebyshev’s polynomials and Fourier polynomials and with application of cascade neo-fuzzy neural networks as well [7].

The final experimental results of forecasts at 1, 2 and 3 steps ahead with aforesaid methods for share prices of British Petroleum BP plc (ADR) are presented in the table 3 and for index Dow Jones Industrial Average in the table 4.

Table 3. Comparative forecasting results for BP plc (ADR) share prices

Step of forecast	Criteria	Forecast results for GMDH				Forecast results for fuzzy GMDH			
		Partial description (PD)				Partial description			
		Linear	Quad-ratic	Fourier poly-nomial	Chebyshev’s polynomial	Linear	Quad-ratic	Fourier poly-nomial	Chebyshev’s polynomial
1	MSE	0,285	1,905	0,859	0,365	0,481	0,130	1,691	0,757
	MAPE	1,034	1,965	1,624	1,114	1,374	0,813	2,960	1,459
2	MSE	0,425	3,090	1,094	0,366	0,498	0,150	1,742	1,029
	MAPE	1,227	2,916	1,814	1,115	1,481	0,818	2,977	1,584
3	MSE	0,675	4,978	2,144	0,523	0,572	0,308	2,183	1,505
	MAPE	1,496	4,434	2,050	1,320	1,494	0,908	3,024	1,681

The best results were obtained by fuzzy GMDH with quadratic PD, 70% training sample and Gaussian MF. The worst results gives Fourier polynomials as PD. The both GMDH methods, classical and fuzzy, have shown the high forecast

accuracy. If to compare the accuracy of both methods with linear partial descriptions, then linear model by GMDH has shown more accurate results. But with all used PD most accurate forecasts were obtained using fuzzy GMDH with quadratic partial descriptions.

Table 4. Comparative forecasting results for index Dow Jones I.A.

Step of forecast	Criteria	Forecast results for GMDH Partial descriptions				Forecast results for fuzzy GMDH Partial descriptions			
		Linear	Quad-ratic	Fourier poly-nomial	Chebyshev's polynomial	Linear	Quad-ratic	Fourier polyno-mial	Chebyshev's polynomial
1	MSE	26900	38225	40142	23818	25176	21332	42205	24464
	MAPE	1,149	1,298	1,445	1,111	1,137	1,046	1,487	1,125
2	MSE	27793	39460	40930	23978	25793	223491	59059	24767
	MAPE	1,167	1,322	1,445	1,119	1,143	1,098	1,614	1,144
3	MSE	37306	50471	41720	27337	29782	38291	63900	24910
	MAPE	1,230	1,386	1,460	1,157	1,176	1,099	1,623	1,160

The best results were obtained by fuzzy GMDH with quadratic partial descriptions with bell-shaped membership functions and 50% training sample size. The worst results were obtained with Fourier polynomial as partial descriptions. The use of Chebyshev's polynomial as PD in classical GMDH has shown the best results. In fuzzy GMDH the most accurate estimates were obtained with linear and quadratic PD.

FGMDH MODEL WITH FUZZY INPUT DATA

FGMDH Model Construction with Fuzzy Inputs

Let us consider the generalization of fuzzy GMDH for case when input data are also fuzzy. Then a linear interval regression model takes the following form [6, 8]:

$$Y = A_0Z_0 + A_1Z_1 + \dots + A_nZ_n,$$

where A_i is a fuzzy number of triangular shape with parameters $A_i = (\underline{A}_i, \check{A}_i, \overline{A}_i)$, where \check{A}_i is a center of the interval, \overline{A}_i – its upper border, and \underline{A}_i – lower border.

Consider the case of symmetrical membership function for parameters A_i , so they can be described by the pair of parameters (\check{A}_i, c_i) , c_i – interval width, $c_i \geq 0$: $A_i = \check{A}_i - c_i, A_i = \check{A}_i + c_i$.

Let Z_i be also a fuzzy number of triangular shape defined as $(\underline{Z}_i, \check{Z}_i, \overline{Z}_i)$, \underline{Z}_i is a lower border, \check{Z}_i is a center, and \overline{Z}_i is an upper border of the fuzzy number.

Then Y is a fuzzy number which parameters are defined as follows:

- the center of the interval $\check{y} = \sum a_i \check{Z}_i$;
- the deviation in the left part of the membership function:

$$\check{y} - \underline{y} = \sum (a_i (\check{Z}_i - \underline{Z}_i) + c_i |\check{Z}_i|);$$

- the lower border of the interval

$$\underline{y} = \sum (a_i \underline{Z}_i - c_i |\check{Z}_i|);$$

- the deviation in the right part of the membership function:

$$\bar{y} - \check{y} = \sum (a_i (\bar{Z}_i - \check{Z}_i) + c_i |\check{Z}_i|) = \sum a_i \bar{Z}_i - a_i \check{Z}_i + c_i |\check{Z}_i|;$$

- the upper border of the interval

$$\bar{y} = \sum (a_i \bar{Z}_i + c_i |\check{Z}_i|).$$

For the interval model to be correct, the real value of input variable Y should lay in the interval obtained by the method FGMDH.

So, the general requirements to a linear interval model are the following: to find such values of parameters (\bar{A}_i, c_i) of fuzzy coefficients, which ensure [6, 8]:

1) observed values y_k should locate in an estimation interval for Y_k total width of the estimation interval should be minimal;

2) these requirements may be redefined as a task of linear programming [6, 8]:

$$\min_{a_i, c_i} \sum_{k=1}^M (\sum (a_i \bar{Z}_i + c_i |\check{Z}_i|) - \sum (a_i \underline{Z}_i - c_i |\check{Z}_i|)),$$

under conditions

$$\begin{cases} \sum (a_i \underline{Z}_{ik} - c_i |\check{Z}_{ik}|) \leq y_k, \\ \sum (a_i \bar{Z}_{ki} + c_i |\check{Z}_{ik}|) \geq y_k, k = \overline{1, M}. \end{cases}$$

Let us consider partial description (1). Then math model takes the form [6]:

$$\begin{aligned} \min_{a_i, c_i} & (2Mc_0 + a_1 \sum_{k=1}^M (\bar{x}_{ik} - \underline{x}_{ik}) + 2c_1 \sum_{k=1}^M |\check{x}_{ik}| + a_2 \sum_{k=1}^M (\bar{x}_{jk} - \underline{x}_{jk}) + 2c_2 \sum_{k=1}^M |\check{x}_{jk}| + \\ & + a_3 \sum_{k=1}^M (|\check{x}_{ik}| (\bar{x}_{jk} - \underline{x}_{jk}) + |\check{x}_{jk}| (\bar{x}_{ik} - \underline{x}_{ik})) + 2c_3 \sum_{k=1}^M |\check{x}_{ik} \check{x}_{jk}| + 2a_4 \sum_{k=1}^M |\check{x}_{ik}| (\bar{x}_{ik} - \underline{x}_{ik}) + \\ & + 2c_4 \sum_{k=1}^M \check{x}_{ik}^2 + 2a_5 \sum_{k=1}^M |\check{x}_{jk}| (\bar{x}_{jk} - \underline{x}_{jk}) + 2c_5 \sum_{k=1}^M \check{x}_{jk}^2), \end{aligned}$$

with the following constraints

$$\begin{aligned} & a_0 + a_1 \underline{x}_{ik} + a_2 \underline{x}_{jk} + a_3 (-|\check{x}_{ik}| (\bar{x}_{jk} - \underline{x}_{jk}) - |\check{x}_{jk}| (\bar{x}_{ik} - \underline{x}_{ik}) + \check{x}_{ik} \check{x}_{jk}) + \\ & + a_4 (-2|\check{x}_{ik}| (\bar{x}_{ik} - \underline{x}_{ik}) + \check{x}_{ik}^2) + a_5 (2|\check{x}_{jk}| (\bar{x}_{jk} - \underline{x}_{jk}) + \check{x}_{jk}^2) - \\ & - c_0 - c_1 |\check{x}_{ik}| - c_2 |\check{x}_{jk}| - c_3 |\check{x}_{ik} \check{x}_{jk}| - c_4 \check{x}_{ik}^2 - c_5 \check{x}_{jk}^2 \leq y_k; \\ & a_0 + a_1 \bar{x}_{ik} + a_2 \bar{x}_{jk} + a_3 (|\check{x}_{ik}| (\bar{x}_{jk} - \bar{x}_{jk}) + |\check{x}_{jk}| (\bar{x}_{ik} - \bar{x}_{ik}) - \check{x}_{ik} \check{x}_{jk}) + \\ & + a_4 (2|\check{x}_{ik}| (\bar{x}_{ik} - \bar{x}_{ik}) - \check{x}_{ik}^2) + a_5 (2|\check{x}_{jk}| (\bar{x}_{jk} - \bar{x}_{jk}) - \check{x}_{jk}^2) + c_0 + \\ & + c_1 |\check{x}_{ik}| + c_2 |\check{x}_{jk}| + c_3 |\check{x}_{ik} \check{x}_{jk}| + c_4 \check{x}_{ik}^2 + c_5 \check{x}_{jk}^2 \geq y_k, \quad c_l \geq 0, \quad l = \overline{0, 5}. \end{aligned}$$

As one can see, this is also the linear programming problem but there are still no constraints for non-negativity of variables a_i , so it is reasonable to pass to a dual problem introducing dual variables $\{\delta_k\}$ and $\{\delta_{k+M}\}$.

Investigations of FGMDH with Fuzzy Inputs at Forecasting Problems

The list of securities used for calculation of RTS index consists of the most liquid shares of Russian companies chosen by Information Committee and based on expert judgment. The number of securities may not exceed 50.

The experiment contains 5 fuzzy input variables which are the stock prices of leading Russian energetic companies included into the list of RTS:

- index LKOH – shares of “Lukoil” joint-stock company;
- EESR – shares of “RAO UES of Russia” joint-stock company;
- YUKO – shares of “Yukos” joint-stock company;
- SNGSP – privileged shares of “Surgutneftegas” joint-stock company;
- SNGS – common shares of “Surgutneftegas” joint-stock company;
- Output variable is the value of RTS index (opening price) of the same period (03.04.2006 – 18.05.2006).

The whole sample contains 32 instances (points) and training sample size is 18 points (optimal size of the training sample for current experiment). The results presented below were obtained in [8].

Experiment 1. For normalized input when using Gaussian MF in group method of data handling with fuzzy input data the results of experiment are presented (see Fig. 3) and table 5: for GMDH, MSE = 0,1129737, for FGMDH, MSE = 0,0536556.

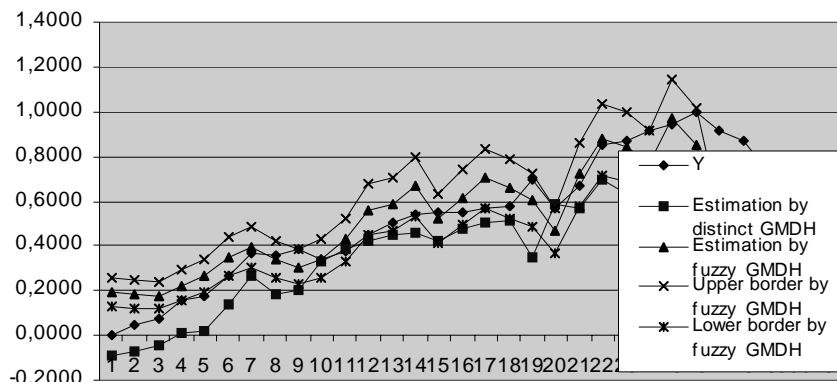


Fig. 3. Results of the Experiment1 using GMDH and FGMDH with fuzzy inputs

Table 5. MSE comparison for different methods at experiment 1

Error	GMDH	FGMDH	FGMDH with fuzzy inputs, Triangular MF	FGMDH with fuzzy inputs, Gaussian MF
MSE	0,1129737	0,0536556	0,055557	0,028013

As the results of experiment 1 show, fuzzy group method of data handling with fuzzy input data gives more accurate forecast than GMDH and FGMDH. In

case of triangular MF FGMDH with fuzzy inputs gives a little worse forecast than FGMDH with Gaussian MF.

Experiment 2. RTS-2 index forecasting (opening price). The whole sample size is 32 instances and the training sample size is 18 ones. For normalized input data using Gaussian MF in FGMDH with fuzzy input data the following experimental results were obtained presented in the table 6 [8]: MSE for GMDH = 0,051121, MSE for FGMDH = 0,063035.

As the results of the experiment 2 show (Table 6), fuzzy group method of data handling with fuzzy input data gives better result than GMDH and FGMDH in case of both Gaussian and triangular membership functions.

Table 6. Comparison of different methods at experiment 2

Error	GMDH	FGMDH	FGMDH with fuzzy inputs, Triangular MF	FGMDH with fuzzy inputs, Gaussian MF
MSE	0,051121	0,063035	0,061787	0,033097

CONCLUSION

In this paper, the review of main results dealing with fuzzy inductive modeling method FGMDH is presented. This method enables to construct models of complex processes using experimental (statistical) data. Two different FGMDH versions were presented and discussed: with crisp inputs and fuzzy inputs.

The advantage of fuzzy GMDH is that it does not use least square method for search of unknown model coefficients opposite to classical GMDH and therefore the problem of possible ill-conditioned matrix does not exist for it.

Besides, fuzzy GMDH enables to find not point-wise forecast estimates but interval estimates for forecast values which allow to determine the forecast accuracy.

The generalization of fuzzy GMDH with fuzzy inputs was also considered and analyzed. The experimental investigations of GMDH and fuzzy GMDH in problems of share prices forecast at NYSE and Russian stock market RTS were carried out. The comparative results analysis has confirmed the high accuracy of fuzzy GMDH in problems of forecasting in financial sphere.

REFERENCES

1. *Ivakhnenko A.G.* Heuristic Self-Organization in Problems of Automatic Control / A.G. Ivakhnenko // *Automatica (IFAC)*. — 1970. — **3**. — P. 207–219.
2. *Ivakhnenko A.G.* Decision-making on the basis of self-organization / A.G. Ivakhnenko, Yu.P. Zaychenko, V.D. Dimitrov // Publ. house “Soviet Radio”, Moscow, 1976.
3. *Zaychenko Yu.P.* Fuzzy group method of data handling and its application for macro-economic indicators forecasting / Yu. P. Zaychenko, A.G. Kebkal, V.F. Krachkovsky // *Scientific papers of NTUU “KPI”*. — 2000. — **2**. — P. 18–26.
4. *Zaychenko Yu.* The investigations of different membership functions in Fuzzy Group Method of Data Handling / Yu. Zaychenko, I.O. Zayets, O.V. Kamotsky, O.V. Pavlyuk // *Control Systems and machines*. — 2003. — **2**. — P. 56–67.
5. *Zaychenko Yu.P.* Synthesis and adaptation of fuzzy forecasting models on the basis of self-organization method / Yu.P. Zaychenko, I.O. Zayets // *Scientific papers of NTUU “KPI”*. — 2001. — **3**. — P. 34–41.

6. *Zgurogsky M.* The fundamentals of computational intelligence: System approach / M. Zgurogsky, Yu. Zaychenko // Springer. — Switzerland, 2016. — 308 p.
7. *Zaychenko Yu.* Fuzzy group method of data handling in forecasting problems at financial markets / Yu. Zaychenko // International Journal “Information Models and Analysis”. — 2012. — **1**(4). — P. 303–317.
8. *Zaychenko Yu.* The Investigations of Fuzzy Group Method of Data Handling with Fuzzy Inputs in the Problem of Forecasting in Financial Sphere / Yu. Zaychenko // Proceedings of the II International Conference on Inductive Modelling ICIM-2008. — Kyiv: IRTC ITS NASU, 2008. — P. 129–133.
9. *Huang W.* Fuzzy polynomial neural networks: hybrid architectures of fuzzy modeling / W. Huang, S.K. Oh, W. Pedrycz // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. — 2002. — **10**(5). — P. 607–621.
10. *Oh S.K.* Hybrid fuzzy polynomial neural networks / S.K. Oh, D.W. Kim, W. Pedrycz // International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems. — **10**(3). — <https://doi.org/10.1142/S0218488502001478>
11. *Oh S.K.* Self-Organizing Multi-layer Fuzzy Polynomial Neural Networks Based on Genetic Optimization / S.K. Oh, W. Pedrycz, B.J. Park // Fuzzy Sets and Systems. — 2004. — **145**(1). — P.165–181.
12. *Oh S.K.* Self-organizing neuro-fuzzy networks in modeling software data / S.K. Oh, B.J. Park // Neurocomputing. — 2005. — **64**. — P. 397–431.
13. *Oh S.K.* Design of Fuzzy Relation-Based Polynomial Neural Networks Using Information Granulation and Symbolic Gene Type Genetic Algorithms / S.K. Oh, W. Pedrycz, H.K. Kim // Advances in Neural Networks. Lecture Notes in Computer Science book series. — 2007. — Vol. 4492. — P. 206–215.
14. *Oh S.K.* Genetically optimized Hybrid Fuzzy Set-based Polynomial Neural Networks / S.K. Oh, W. Pedrycz, S.B. Roh // Journal of the Franklin Institute. — 2011. — **348**(2). — P. 415–425.
15. *Oh S.K.* Genetically Optimized Hybrid Fuzzy Neural Networks: Analysis and Design of Rule-based Multi-layer Perceptron Architectures / S.K. Oh, W. Pedrycz // Engineering Evolutionary Intelligent Systems. Part of the Studies in Computational Intelligence book series. — 2013. — Vol. 82. — P. 23–57.
16. *Huang W.* Hybrid fuzzy polynomial neural networks with the aid of weighted fuzzy clustering method and fuzzy polynomial neurons / W. Huang, S.K. Oh, W. Pedrycz. — Article. First Online: 15 September 2016.
17. *Bodyanskiy Ye.* Wavelet-neuro-fuzzy network structure optimization using GMDH for the solving forecasting tasks / Ye. Bodyanskiy, O. Vynokurova, A. Dolotov, O. Kharchenko // Proc. 4th Int. Conf. on Inductive Modeling. — Kyiv, 2013. — P. 61–67.
18. *Bodyanskiy Ye.* Cascade GMDH-wavelet-neuro-fuzzy network / Ye. Bodyanskiy, O. Vynokurova, N. Teslenko // Proc. 4th Int. Workshop on Inductive Modeling. — Kyiv, 2011. — P. 22–30.
19. *Bodyanskiy Ye.* The neo-fuzzy neural network structure optimization using the GMDH for the solving forecasting and classification problems / Bodyanskiy Ye., Zaychenko Yu., Pavlikovskaya E. et al. // Proc. Int. Workshop on Inductive Modeling. — Krynica, Poland, 2009. — P. 77–89.
20. *Bodyanskiy Ye.V.* Self-learning cascade spiking neural network for fuzzy clustering based on Group Method of Data Handling / Ye.V. Bodyanskiy, O.A. Vynokurova, A.I. Dolotov // Journal of Automation and Information Sciences. — 2013. — **45**(3). — P. 23–33.
21. *Zaychenko Yu.* Hybrid GMDH-neuro-fuzzy system and its training scheme / Yu. Zaychenko, Ye. Bodyanskiy, O. Tyshchenko et al. // International Journal “Information Theory and Applications”. — 2018. — **25**(1). — P. 16–33.

Received 29.01.2019

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

ОЦІНЮВАННЯ АДАПТИВНИХ РЕЗЕРВІВ ЛЮДИНИ ЗА ДАНИМИ ПУЛЬСОМЕТРІЇ

І.А. ЗАПОРОЖКО, Д.А. БОРОЗЕНЕЦЬ, В.І. ЗУБЧУК

Анотація. Розглянуто й описано архітектуру комплексу. Наведено програмно-апаратний комплекс реєстрації та оброблення даних пульсометрії. Запропоновано кількісний критерій оцінювання функціонального стану серцево-судинної системи — індекс форми пульсової хвилі з використанням прямого й оберненого перетворення Фур'є та аналізу його характеристик. Досліджено динамічні властивості пульсової хвилі у стані спокою. Надано результати досліджень індексу форми пульсової хвилі для груп добровольців різного віку і статі. Запропоновано кількісний критерій R для оцінювання адаптивних резервів обстежуваних, виведений за допомогою навчання нейронної мережі зі зворотним поширенням похибки. Наведено норми R з урахуванням віку і статі людини, а також результати статистичного оброблення вхідних даних. Виконано аналіз можливостей розробленого програмно-апаратного комплексу, висунуто пропозиції щодо вдосконалення як апаратно, так і програмно.

Ключові слова: діагностика, функціональний стан, пульсова хвиля, біологічний вік, індекс форми.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Визначення адаптивних резервів здоров'я людини є одним із завдань діагностики і має на меті отримання кількісної оцінки функціонального стану основних систем у процесі здоров'я та виникнення патологій [8]. Під адаптивними резервами або коефіцієнтом здоров'я [4] розуміють суму резервних потужностей основних функціональних систем, показники яких у спокої та під час навантаження дозволяють робити висновок про здатність організму підтримувати нормальний функціональний стан в умовах зовнішніх і внутрішніх дестабілізуювальних факторів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Однією з основних регуляторних систем людини є серцево-судинна система (ССС), функціональний стан якої зазвичай оцінюють за даними систолічного (P_s) і діастолічного (P_d) тиску, частоти серцевих скорочень (ЧСС) (HR) за допомогою індексу Кердо $I = (P_s - P_d) / HR$ або вегетативного індексу $VI = 100 \cdot (P_s - P_d / HR)$ [3]. Такі показники характеризують тонус серця, але не враховують стану та особливостей так званого периферійного серця [5], тобто роботу мікрокапілярної системи скелетних м'язів, яка виконує значний обсяг роботи у транспорті по великому колу кровообігу. Динаміка функціонування периферійного серця може бути досліджена за формою пульсо-

вих хвиль у м'язових тканинах. Дослідження пульсових хвиль з давніх часів використовувалось у тибетській медицині для діагностики стану людини [2] на якісному рівні. Кількісна оцінка функціонального стану людини, оцінка адаптивних резервів як показника здоров'я на засадах аналізу та обчислення показників функціонування ССС є актуальним завданням діагностики і вирішується засобами програмно-апаратного комплексу.

Мета дослідження — вивести кількісний критерій оцінювання функціонального стану ССС. Розробити програмно-апаратний комплекс, який має змогу визначати запропонований критерій у режимі реального часу.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Метод дослідження периферійної гемодинаміки оснований на реєстрації параметрів оптичного випромінювання, що проходить через ділянку живої тканини, тобто капілярну сітку з пульсивною кров'ю. Варіабельність форми пульсової хвилі людини має складну динаміку. Так само, як і варіабельність серцевих ритмів, вона дозволяє аналізувати перехід організму від стану здоров'я і спокою до якогось іншого функціонального стану. Актуальним завданням є розроблення методів аналізу динаміки пульсової хвилі і побудова комплексних оцінок функціональних станів людини.

Для збирання даних пульсових хвиль був розроблений та зібраний прилад, що складається з трьох основних модулів:

- 1) модуля автоматичного вимірювання і реєстрації пульсової хвилі;
- 2) модуля оброблення та класифікації сигналу на основі розбиття сигналу R-R на інтервали з їх подальшим аналізом;
- 3) модуля навчання системи за допомогою нейронної мережі.

Для реєстрації пульсової хвилі (рис. 1) був використаний датчик HLC1395-002 на відбиття, неінвертувальний підсилювач, зібраний на LM358, модулятор сигналу на основі транзистора 74НСТ14Д, керованого мультівібратором на тригері Шмідта, для зв'язку з ПК.

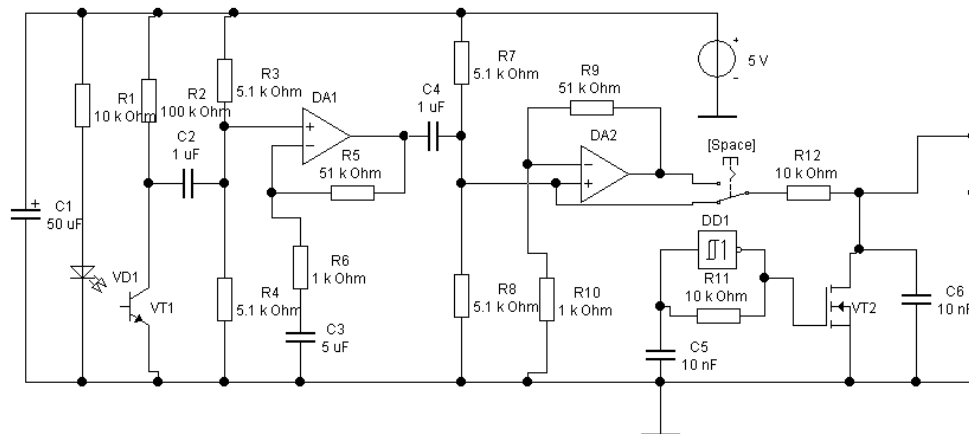


Рис. 1. Схема реєстратора пульсової хвилі

Смуговий фільтр забезпечує пропускання від нижніх ($\sim 0,2$ Гц) до верхніх (~ 26 Гц) частот.

Для реалізації модуля оброблення та класифікації вибрано сім'ю мікроконтролерів Atmega328 на базі Arduino, який може бути підключений до комп'ютера за допомогою порту USB або аудіовходу мікрофона.

Реєстрація проводилася методом інфрачервоної плетизмографії на відбиття в кінцівках.

Аналіз результатів і їх класифікація виконувалися за допомогою алгоритмів динамічного програмування (DTW) і безперервного вейвлет-перетворення (CWT) на трьох основних патернах:

- 1) пульсової хвилі норми;
- 2) високого периферичного опору;
- 3) низького периферичного опору.

Для аналізу стану ССС набирається база даних таких параметрів людського організму:

- динаміка пульсової хвилі. Пульсову хвилю отримують у вигляді дискретної функції у часі із заданою приладом частотою дискретизації. Прилад фіксує від працюючого в інфрачервоному спектрі датчика оптичні сигнали з капілярів пальця людини, промодульовані за законом проходження пульсової хвилі через капіляри у полі зору датчика;

- насичення крові киснем (SpO_2), що реєструється за допомогою пульсоксиметра і дозволяє оцінити середній показник оксигенації крові;

- артеріальний тиск людини (систолічний та діастолічний). Для вимірювання використовувався стандартний електронний вимірник тиску;

- зріст і маса людини.

Модуль реєстрації оперує даними пульсових хвиль обстежуваних, які отримуються за допомогою приладу реєстрації пульсової хвилі. Одночасно вносяться дані вимірювання артеріального тиску, антропометричні дані та дані анамнезу. Ці дані потрібні передусім для нагромадження статистики і подальшої класифікації різних станів організму. Основною функціональною складовою цього модуля є реєстрація пульсових хвиль з приладу. Хвилі потребують подальшого оброблення для виділення із сигналу корисної діагностичної інформації про форму пульсової хвилі в окремих періодах коливання, яку можна класифікувати [9].

Для перевірки наявності закономірності змін пульсових хвиль з віком у жінок та чоловіків використовувалась вибірка з 187 добровольців — 87 жінок і 100 чоловіків.

Побудована за всією вибіркою матриця коефіцієнтів кореляції Пірсона показала, що статистично на оцінку віку приблизно однаково впливають такі показники, як індекс форми F , систолічний (САТ) і діастолічний (ДАТ) артеріальний тиск та маса (табл. 1). Причому сам індекс форми має найбільшу статистичну залежність з віком і незначну із ЧСС та зростом людини. Як систолічний, так і діастолічний тиск у здорових людей мають високу кореляцію, тому слід дослідити, чи доцільно використовувати обидва ці показники для розпізнавання, чи достатньо вибрати лише один з них. Цікавим є факт статистичної кореляції маси і систолічного тиску.

Зміни в розбитті вибірки на чоловіків та жінок, а також у вилученні систолічного або діастолічного тиску є не суттєвими [8]. На підставі цього сформовано правило оцінювання біологічного віку (табл. 2) для жінок та чоловіків.

Таблиця 1. Матриця кореляції

	Вік	Стать	F	SpO ²	ЧСС	САТ	ДАТ	Зріст	Маса
Вік	1	0,06	-0,45	-0,24	-0,18	0,43	0,40	-0,17	0,42
Стать	0,06	1	0,20	-0,32	0,01	0,22	0,03	0,60	0,49
F	-0,45	0,20	1	-0,10	0,29	-0,10	-0,23	0,30	-0,02
SpO ²	-0,24	-0,32	-0,10	1	-0,07	-0,02	0,02	-0,11	-0,25
ЧСС	-0,18	0,01	0,29	-0,07	1	-0,02	0,10	-0,06	-0,03
САТ	0,43	0,22	-0,10	-0,02	-0,02	1	0,60	0,11	0,48
ДАТ	0,40	0,03	-0,23	0,02	0,10	0,60	1	-0,08	0,36
Зріст	-0,17	0,60	0,30	-0,11	-0,06	0,11	-0,08	1	0,44
Вага	0,42	0,49	-0,02	-0,25	-0,03	0,48	0,36	0,44	1

Таблиця 2. Розподіл факторів впливу на біологічний вік у міру спадання

Жінки	Маса	F	САТ	Зріст	SpO ²	ЧСС	ДАТ
Чоловіки	F	Маса	SpO ₂	Зріст	САТ	ЧСС	ДАТ

Вимірявши зміни концентрації еритроцитів під час пульсування крові за допомогою приладу, отримуємо графік, який показує періодичні коливання цієї концентрації. Сигнал розбивається на періоди, кожний з яких підлягає програмній передискретизації до заданої кількості відліків, нормалізується за амплітудою і фільтрується від шуму. Після усереднення нормалізованих пульсових хвиль отримано усереднену форму одного періоду пульсової хвилі.

За формою пульсових коливань можна з певною ймовірністю оцінювати біологічний вік людини, оскільки, як показано у праці [6], з віком характер цієї хвилі змінюється. За усередненим періодом, отриманим за деякий проміжок вимірювання пульсу для груп обстежуваних, можна з використанням штучної нейронної мережі визначити залежність форми пульсу від віку для людей обох статей з урахуванням антропометричних даних.

Для кількісної оцінки функціонального стану і біологічного віку обстежуваних запропоновано індекс форми, який дозволяє відслідковувати зміну форми усередненого періоду пульсової хвилі. Індекс форми для усередненої хвилі визначається за формулою

$$F = \sqrt{\sum_{i=2}^N a_i^2 + \sum_{i=2}^N b_i^2} / \sqrt{a_1^2 + b_1^2}, \quad (1)$$

де, якщо $T = 1$,

$$a_k = \frac{2}{T} \sum_{j=1}^N U_j \cos(k\omega_0 j \Delta t) = 2 \sum_{j=1}^N U_j \cos\left(\frac{k2\pi j}{N}\right);$$

$$b_k = \frac{2}{T} \sum_{j=1}^N U_j \sin(k\omega_0 j \Delta t) = 2 \sum_{j=1}^N U_j \sin\left(\frac{k2\pi j}{N}\right).$$

де k — номер гармоніки; U_j — значення амплітуди відліку в точці j ; N — кількість відліків усередненої пульсової хвилі.

Числове значення індексу показує складність форми хвилі, тобто її відмінність від простої синусоїди, оскільки амплітуди гармонік більш високої частоти будуть мати різні значення. У нормі значення індексу форми пульсової хвилі для кожного періоду змінюється в інтервалі деякого середнього значення. Цей процес є результатом дихання та наслідком підтримання ССС стабільного режиму функціонування. За допомогою навчання штучної нейронної мережі норми індексу резервів F подано на рис. 2.

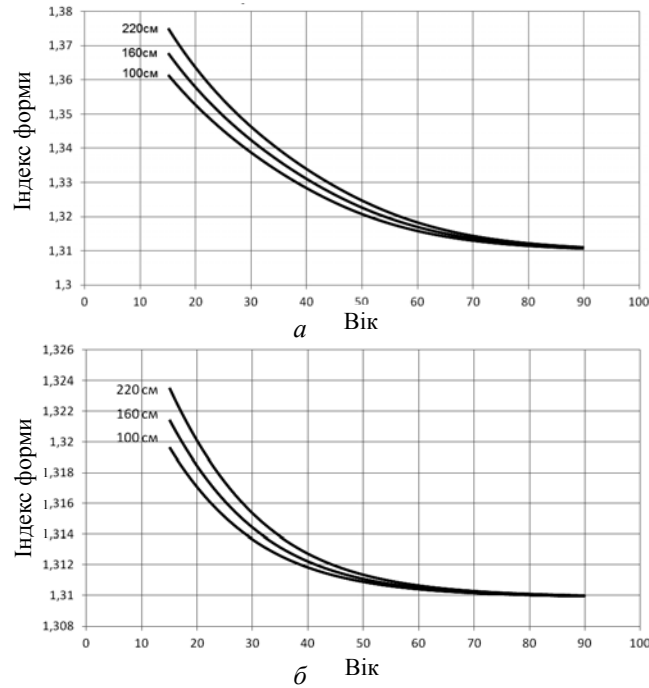


Рис. 2. Норми індексу резервів F : a — для чоловіків; b — для жінок

Завдання цієї роботи полягає у дослідженні динамічних властивостей пульсової хвилі у спокої, для побудови числових оцінок адаптивних резервів організму та для подальшого вивчення інших можливих варіантів спостереження за динамікою хвилі в разі патологій, навантаження та ін. Існують методи оцінювання адаптивних резервів людини, а також методи діагностики на основі дослідження динаміки ЧСС, але динаміка коливань форми пульсової хвилі досі потребує вивчення.

Аналіз наявності закономірності у зміні індексу форми в часі у стані спокою виконувався на основі розрахунку автокореляційної функції (рис. 3). Для підтвердження нульової гіпотези про наявність автокореляції залишків застосовувався критерій Дарбіна–Уотсона. Значення $D = 0,003$, $D_{\max} = 1,592$, $D_{\min} = 1,506$ свідчать про наявність додатної автокореляції і гіпотеза не відкидається.

У стані спокою автокореляційні функції індексу форми і ЧСС значно не змінюють свої значення відносно 0 і мають достатньо чітку періодичну форму, що свідчить про наявність деякого коливального процесу зміни форми хвилі у спокої; імовірно це пов'язано з диханням.

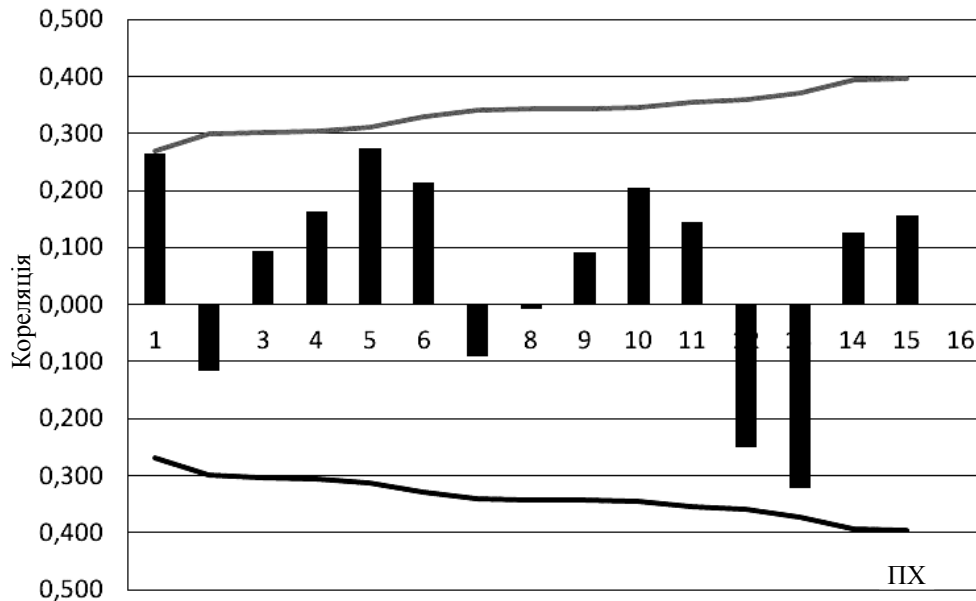


Рис. 3. Автокореляційна функція варіацій індексу форми F

Із наведеного аналізу отримуємо висновок, що за динамікою зміни індексу форми можна оцінювати наявність деяких процесів, відмінних від норми, які впливають на форму пульсової хвилі. Для аналізу цих процесів можна запропонувати кількісну оцінку, яку можна розраховувати для деякого невеликого відрізка часу, в якому відбулося декілька періодів пульсування.

Для оцінки індексу адаптивних резервів на основі аналізу динаміки зміни індексу форми пульсової хвилі запропоновано критерій:

$$R = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_{\text{mid}}};$$

$$R = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_{\text{mid}}},$$

де F_{\max} — максимальне значення індексу форми у вибраному інтервалі; F_{\min} — мінімальне значення індексу форми у вибраному інтервалі; F_{mid} — значення індексу форми для усередненого періоду для вибраного інтервалу, яке визначається за формулою (1).

На основі кількісної оцінки можна побудувати норми за допомогою нейронної мережі для чоловіків і жінок з урахуванням зросту [7], як це було зроблено для індексів форми за усередненим значенням пульсової хвилі. Норми побудовані за допомогою навчання штучної нейронної мережі, за алгоритмом зворотного поширення похибки на вибірці, яка складалася більше ніж з 200 вимірювань. Вибірку поділено на навчальну вибірку і тестову вибірку для оцінювання похибки. Так само, як і для побудови норм зміни індексу форми для усереднених хвиль, є важливим урахування статі та зросту як допоміжних параметрів. Це дає змогу побудувати сім'ю залежностей для різних параметрів. Отримані вікові залежності критерію R для різного зросту для чоловіків та жінок у нормі показано на рис. 4.

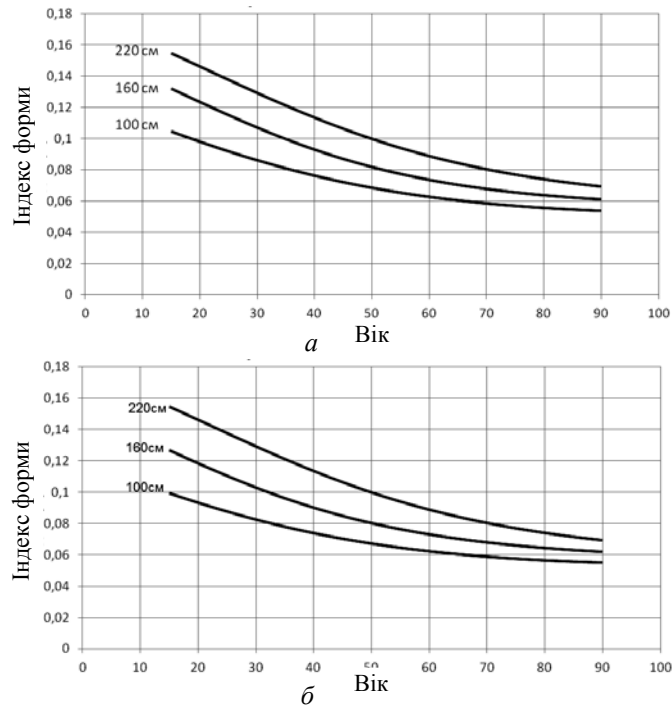


Рис. 4. Норми індексу резервів R : a — для чоловіків; b — для жінок

ВИСНОВКИ

Програмно-апаратний комплекс забезпечує можливість визначення адаптивних резервів людини на засадах вимірювання параметрів пульсу та антропометричних даних. Оцінка за допомогою коефіцієнта резерву R , у якому використовуються дані про динаміку зміни індексу форми F , дає змогу аналізувати стан організму в процесі життєдіяльності за навантажень та інших факторів, які відхиляють організм від стану норми. Дослідження показали, що варіабельність форми пульсової хвилі у стані спокою, індекс форми F , індекс адаптивних резервів R у нормі зменшуються з віком, а індивідуальні показники F і R для обстежуваних дозволяють оцінити їх функціональний стан. За допомогою штучної нейронної мережі визначено закономірності зміни запропонованого індексу резерву R з віком з урахуванням антропометричних особливостей.

Планується інтеграція розробленої методики як біологічного зворотного зв'язку для поліпшення результатів терапевтичних процедур. Апаратна частина може бути вдосконалена заміною мікроконтролера на більш потужний розширенням кількості датчиків та більш ретельним підбором статичних компонентів. Можливе перероблення моделі з додаванням нових змінних та розширенням критеріїв оцінювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Zaporozhko I.A. Pletthismography analysis according to age and genders / I.A. Zaporozhko, V.I. Zubchuk, E.A. Nastenka // Proceedings of 7th Annual Conference "Science and Art for Advancement in Medicine", March 30–April 1, 2012. — Budapest, Hungary.

2. *Пульсовая* диагностика тибетской медицины / Отв. ред. Ч.Ц. Цыдыпов. — Новосибирск: Наука, 1988. — 133 с.
3. *Kordo I.* Einaus Datender Blutzirkulation Kalkulierter Index zur Beurteilung der Vegetativen Tonuslage / I. Kordo // Actaneyrovegetativa. — 1966. — Bd. 29. — N 2. — P. 250–268.
4. *Амосов Н.М.* Моя система здоровья / Н.М. Амосов. — К.: Здоров'я, 1977. — 56 с.
5. *Аринчин Н.И.* Микронасосная деятельность скелетных мышц при их растяжении / Н.И. Аринчин, Г.Ф. Борисевич. — Мн.: Наука и техника, 1986. — 112 с.
6. *Зубчук В.И.* Информационное обеспечение пульсодиагностики / В.И. Зубчук, М. Делавар-Касмаи, В.А. Крещук // Электроника и связь. Тематический выпуск «Проблемы электроники». — 2005. — Ч. 2. — С. 120–124.
7. *Иванов С.Ю.* Точность измерения артериального давления по тонам Короткова в сравнении с осциллометрическим методом / С.Ю. Иванов, Н.И. Лившиц // Вестник аритмологии. — 2005. — № 40. — С. 55–58.
8. *Мальованик Н.Г.* Перелік функціональних проб в кардіології для ранньої діагностики та моніторингу перебігу серцево-судинних захворювань / Н.Г. Мальованик. — Ужгород, 2010.
9. *Настенко Е.А.* Анализ состояния системы кровообращения и микроциркуляторного русла на основе функциональных показателей / Е.А. Настенко, Е.К. Носовец, С.В. Зубков // Журнал «Біомедична інженерія». — 2011. — № 2. — С. 2–48.
10. *Нейронные* сети в системе пульсовой диагностики / В.И. Зубчук, В.П. Яценко, М. Делавар-Касмаи и др. // Электроника и связь. Тематический выпуск «Проблемы электроники». — 2007. — Ч. 3. — С. 58–61.

Надійшла 01.10.2018



EDGE COMPUTING IN MULTI-SCOPE SERVICE-ORIENTED MOBILE HEALTHCARE SYSTEMS

IHOR PYSMENNYI, ROMAN KYSLYI, ANATOLY PETRENKO

Abstract. IoT based e-Health solutions is an upcoming trend which will revolutionize the healthcare in the near future. IoT has evolved from micro-electro-mechanical systems (MEMS), wireless technologies and Internet which together offer connectivity of systems, microelectronic devices, and medical services and allow data processing at the edge. That at the same time allows to save computational resources and avoid unnecessary point of failure, such as centralized synchronization point. Monitoring of patients' vital signs parameters (measured at home) is achieved by using modern Internet of Things technology which provides networkable connections between portable diagnostic sensors, their cell phones, cloud data storage with patients' Personal Health Records and professional health providers. This paper explores possibilities of using fog computing approach to shift data processing and computations from cloud to the edge and to build a multi-scope infrastructure for mHealth and citizen-observation system, based on SOA approach.

Keywords: wireless sensor networks; personal health systems; cloud services; IoT; fog computing; service-oriented architecture (SOA); mHealth; communication; infrastructure.

INTRODUCTION

Previous developments of medical mobile applications usually were monolithic ones, designed for a fixed HW infrastructure. The whole application must be developed and deployed in one piece and the entire tier must be retested and redeployed when something is changed. Hundreds of applications for smartphones with various operating systems have been created by different providers. We are mostly the first who start to investigate advantages of service-oriented architecture in mobile medicine. This paper is a generalization of the author's publications on the possible usage of the service-oriented computing paradigm (SOC) for building a medical services platform which allows unifying the development of applications for patients, doctors and the central server by orchestrating and composing web services from a common cloud repository. Due to this approach the created applications can be adapted to the particular patient, his disease and the plan of his treatment at home.

Many specialists in the world believe *that patient empowering* can transform medical care. Wireless internet connectivity, cloud computing, mobile devices

(smartphones and tablets), mobile applications and sensors modernized clinical trials, internet connectivity, advanced diagnostics, targeted therapies, and other science enable the individualization of medicine and force overdue radical change in how medicine is delivered, as well as regulated and reimbursed. Let's imagine that every medical sensor (or another data resource) of that ecosystem has its own URI allowing doctors and patients interact with it via the web browser, and at the same time every sensor can have the software interface – a set of web services allowing intelligent software agents to interact with it (analyze the data etc.) on behalf of doctors and patients. Certainly, the integration of that with the classical medical record is vital. Mobile devices are being used to capture data at the point of care and to keep the lines of communication open no matter where the doctor is, and they're being used at home to record and send vital health data back to the health professional and, in turn, to send important healthcare management information back to the patient. The personal data is used to track the ups and downs of patient's conditions as they go about their lives. This approach implies to the **fog and mist computing paradigms**. Fog and mist layers are abstract conceptual levels at the network edge [1]. While fog connects these edge devices, putting a lot of storage, configuration, computing and analysis tasks away from cloud to the edge, mist resides directly within network fabric with ability for end-user devices to share their available computational and communication capabilities for performing a variety of applications and networking task [2, 3].

Advantages of computations at the edge are listed below:

- Preserving user data privacy by not sending sensitive data to the cloud and processing it in the local environment.
- Maintenance costs by significantly decreasing required bandwidth and computing power on the server.
- Reducing latency.
- Heterogeneous by-design architecture.
- Self-awareness.
- Fault-tolerance by-design.

Possible Computing levels of m-Health system in hand are shown on fig. 1 and includes the following levels:

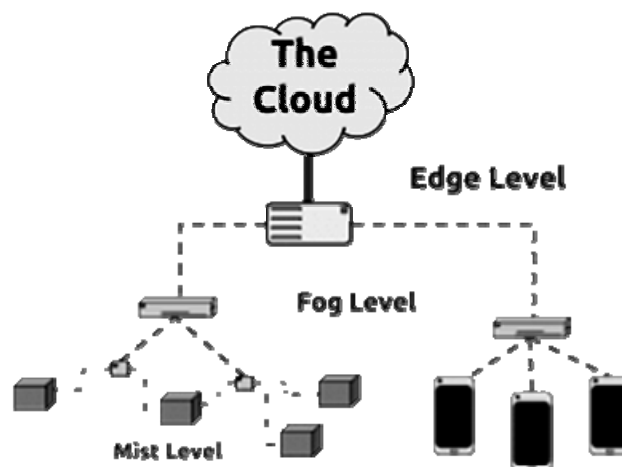


Fig. 1. Computing levels of IoT based system 3 [4]

- Sensor network and mist computing layer which consists of air quality sensors and BSN. Filtering and basic data validation is also performed on this layer.
- Fog-computing layer which is used for gathering and combining data from different sources and performing some analysis on it (described in section IV)
- Fog-gateway layer which provides communication between cloud server and other fog-networks.
- Cloud analytics layer for storing and processing of aggregated data, performing complex analysis on anonymized data for municipalities.
- PHR integration layer which allows to give user recommendations and predictions based on external eHealth information.
- Expert analytics layer which assists expert in making decisions and provides mechanism for feedback.

These levels imply to the security zone approach are proposed in [5]. There are 4 main challenges in development of such architecture:

- Preserving user privacy [6] as collecting and transferring gathered data can reveal both user's identity and sensitive health data with geolocation.
- Efficiency: both in energy consumption and computation power 1.
- Fault tolerance.
- Authentication of system nodes and security against piggybacking attacks, detection of untruthful data.

The rest of the paper is organized as follows - in section 2 we do a deep dive on the Proposed Architectural Framework (and mainly focus on fault tolerance and reducing amount of computational resources), followed by communication issue in section 3 and data storage architecture in section 4.

Novice moving average approach for data preservation during offline phases is also being introduced in section 3. Our final section Y is the summary and conclusions.

The main purpose of such system is to help user monitor and predict development of asthma and other respiratory diseases.

PROPOSED ARCHITECTURAL FRAMEWORK

The explosion of affordable sensors and wearable devices lead to growth of Personal mHealth, self-management of health conditions, and the collection of data, will radically change how health-care is delivered and information is collected. Let us consider these changes on the example of multi-scope infrastructure for mHealth and citizen-observation system (fig. 2). Air pollution in big cities and passive way of life combined with the abundant number of stress-factors caused the growing demand [7] on different health monitoring telecare systems and air-quality and user-breath monitoring systems in particular.

By gathering, combining and analyzing data collected from weather stations, Internet of Things (IoT) sensor networks, Body Sensor Networks (BSN), Personal Health Record (PHR) systems we can find patterns of disease development on early stages on signalize doctor on escalations.

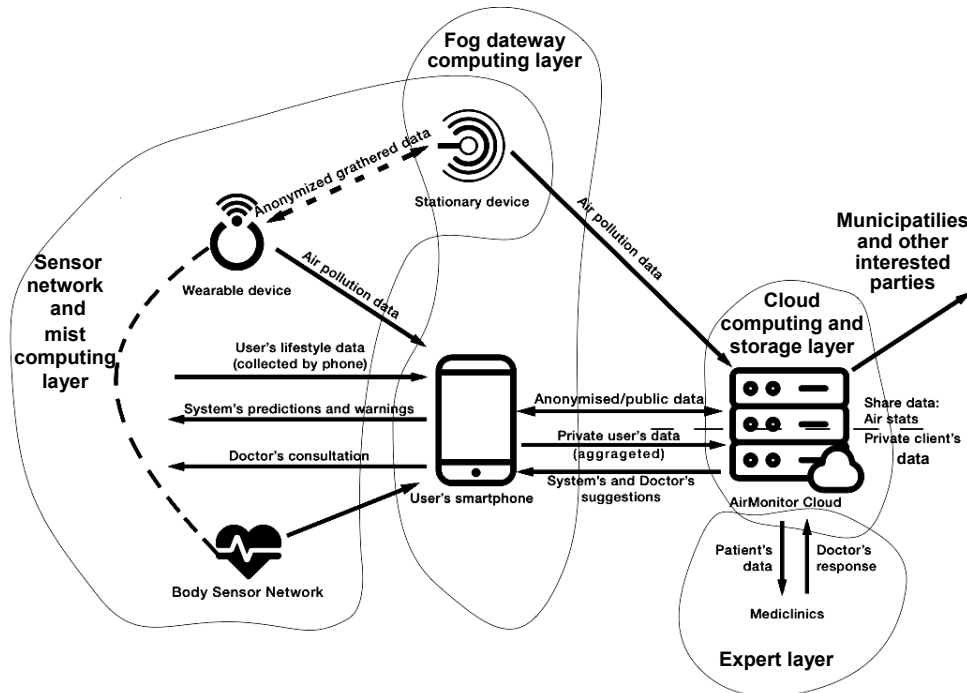


Fig. 2. Infrastructure for mHealth and citizen-observation system

The other scope of this system is citizen observation air-quality monitoring system. In addition to assistance to respiratory-sensitive people we found following usages of constant air-quality measurements for municipalities [8]:

- Commuting analyses based on CO₂ levels at different time. This can result in improving city transportation quality and designing better living environments.
- Participation in life-quality indices for different districts, forecasting their development.
- Anomaly detection which can be the subject for further investigations.

As shown on Fig. 2 communication between edge-computing level and cloud is done through *fog-computing gateway*. The IoT space of terminal endpoints in the discussed infrastructure includes the current smart phones, tablets, and laptops. While each one is quite an advanced technological piece, including sensors and cameras, we can ignore their internal complexity and regard them as simple points, providing connectivity to the person who owns them. Based on how the devices are connected to the patient, the devices can be classified into implantable, wearable, unconnected, or connected on need basis. By the end of 2023 95% of population worldwide will have the access to broadband mobile internet and smartphones [9] (Fig. 3). Respectively, user's mobile phone seems to be the perfect platform acting as gateway. This provides the following benefits:

- Available almost everywhere.
- Can aggregate data from different sources, such as internal motion sensors, GPS systems, provides API for different BSNs (Healthkit for iOS devices and Google Fit for Android correspondingly), can connect over Bluetooth or Bluetooth smart to external sensors. These provides location and situation awareness.

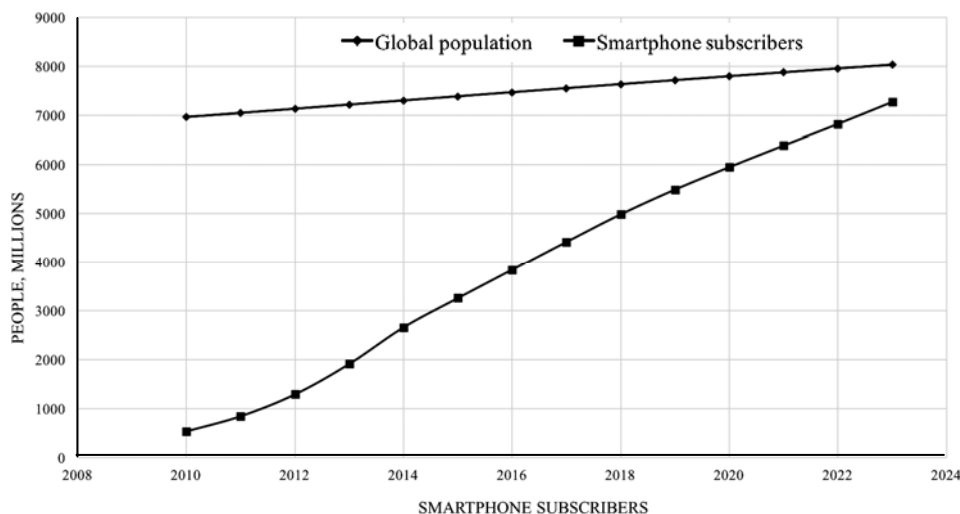


Fig. 3. Growth of smartphone usage compared to the global population [9, 10]

- Has enough computing power for basic data analyses including computing moving average and even running deep learning models.
- Can send data to cloud storage and processing and share analysis results with end-user.
- Provides instrumentation to secure user data available locally. Also, we need to admit, that this responsibility lies on user as he or she is required to lock personal device.

The key issue is the huge amount of data which is gathered by sensors. As smart sensor network (SSN) protocols like Bluetooth Low Energy, ANT and ZigBee have limited bandwidth compared to the volume of collected data it might be unfeasible to process it on fog-gateway level and store in the cloud. Also, there are latency limitations in telecare systems, where the delay in making decision can make it irrelevant and even endanger user. Following solutions are used to solve these tasks:

- Basic signal processing and feature selection are performed on smart sensor itself, significantly reducing amount of transferred data.
- Multi-party computation (MPC) approach is used for utilizing maximum resources and reducing latency (fig. 4).

In addition to mentioned above, by applying edge computing we can prevent sensitive data leakage on cloud level as large part of it is never transmitted to global network, but it is necessary to keep sensitive data anonymized during local transactions. For example, while sending air quality stats between wearable device and citizen-observation module we don't need to reveal user's identity. Another example is PHR system querying where both patient and hospital would like to preserve excessive data from each other and third parties. MPC makes possible sharing data for computation with only analysis result available, without revealing. For example, when exchanging air quality data only coordinates and features are shared without connection to the user identity, and parties receive only resulting prognosis without revealing each other's inputs.

The cloud level is designed as pluggable architecture with microservices approach and consists of:

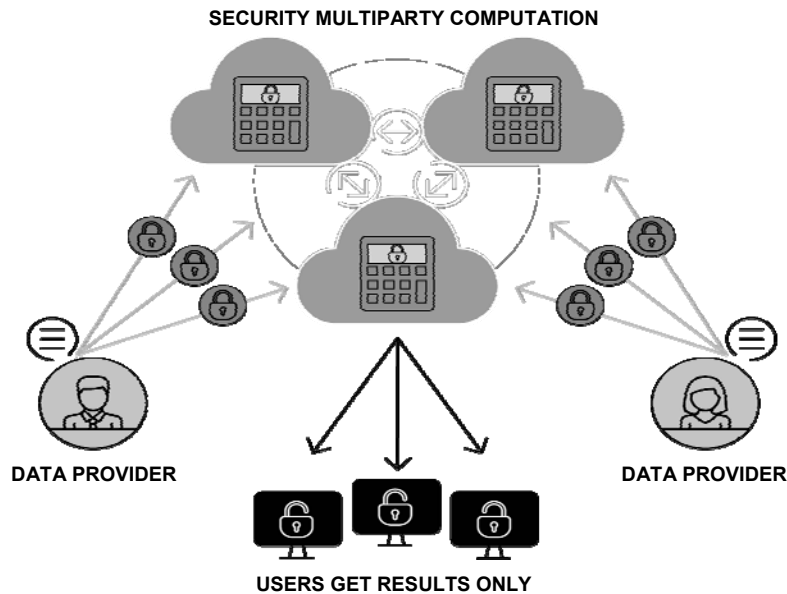


Fig. 4. Multi-party computation (MPC) approach [11]

- Cloud storage layer for storing data in different security layers with encryption solutions used for sensitive information.
- Cloud analytics layer for performing analysis on anonymized data using machine learning and deep learning models.
- PHR and telecare system integration service which is capable for integrating with external application programming interfaces (API) and providing the secure way to exchange sensitive data between physician and his patient.
- Public data service which provides the API for accessing and analyzing public data, such as air quality measurements, generalized medical statistics and analyses results.

Sensitive data in Cloud storage layer is stored in an anonymized way: set of states is bound to particular identifiers. Only state owner knows its identifier, so analysis system is unaware of extraneous data.

COMMUNICATION

As system has the layered structure we should define protocols for communication inside each layer as well as cross-layer.

As we are using smartphone as fog-gateway device the best option on fog-level is to use *Bluetooth Low Energy (BLE)* as it is much more energy-efficient than communication over Wi-Fi and provides enough bandwidth considering data preprocessing on smart sensors. BLE application profiles are based on the generic attribute profile (GATT) [14], so data clients can subscribe only to certain characteristics (features) they are interested in and these features are emitted only when changed further reducing amount of transferred data.

For exchange between client device (fog-gateway) and cloud server it is proposed to apply to Remote Procedure Call approach and *Google's gRPC* framework in particular resulting in the following benefits [15]:

- Reducing data transfer over internet by using binary serialization (by default, Protobuf is used as interface description language).

- Offers client, server and bidirectional data streaming which is useful for constantly uploading air quality sensor data or patient's state from BSN during exacerbation of the disease.
 - Deadline and timeout control allowing RPC be aborted and server resources freed when computed results are no longer valid to the client.
 - Uses SSL/TLS to authenticate the server, and to encrypt all the data exchanged between the client and the server out-of-the-box.

This approach can also be used for cross-service communication in cloud level.

One of the main issues in designing Wireless Sensor Network (WSN) protocol is preserving data integrity. While data is kept confidential, we need to protect it from corrupting and system from man in the middle attacks [16]. Adversary can use spoofing and provide false data to the system, as his identity is hidden it might be difficult to track compromised party and prevent further intrusions.

As proposed system is designed in pluggable fashion we assume, that there could be possible situations that some of the devices will not be able to connect to the network for some amount of time, we have to be sure that data that was collected would not be lost. Due to insufficient amount of storage place on devices themselves, we propose to use technique of moving average to preserve valuable data. We propose implementing it as follows: part of data stream is stored on the device (depending on device capacity, but assuming that we collect measurements with frequency 5 measurements per second, optimal will be to keep couple of seconds window on the device), and constantly updating while there is a connection. As the device loses connection, it calculates cumulative moving average [21] of stored window, and next measurements it calculates with the respect of already calculated value:

$$CMA_n = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n}; \quad CMA_{n+1} = \frac{x_{n+1} + nCMA_n}{n+1}. \quad (1)$$

Using these techniques will allow not to lose all the data collected while there would be no connection but obtain mean value of measured data through that time. Also, we have to mention that when connection will appear again, and mean value would be transferred to server (or other intermediate device), we will need to put a flag that indicates that it is a mean value, and also 2 timestamps – beginning and end of the created frame. This frame has variable size, as offline time is in inverse ratio with data detailing, so sensor readings detailing is always maximum available.

Proposed temporal storage algorithm consists of following steps:

- Acquiring list of sensor readings with timestamps.
- As we enclose the storage limits of the edge device, first elements are collided using Cumulative moving average (CMA), so the most recent data is also the most detailed.
 - Above repeats after every data append until network connection is acquired again and data is being sent.
 - At the same time, this technique should be used only when connection is lost, because as it can be seen from the (1) when calculating moving average, we lose measurement accuracy (while not using this feature we obtain no data from lost period, and overall data accuracy might be lower as a result).

For example, proposed approach was used, while testing distributed IoT network in our experiment with detecting breath patterns using CNN [22]. One part of it was system capable for air quality measurements — CO₂ ppm, dust level, temperature, pressure and humidity taken second with double precision for each value and timestamp, so the resulting size of one document is 44 bytes. Second module required data gathered from 2 smart accelerometer sensors 3 times per second and was used for respiration rate measurement – 3 axis values and timestamp (28 bytes). In the case of the connection loss this makes 158,4+604,8 = =713,2 KB per hour which exceeds memory resources for most wearable SOCs (for example, arduino pro mini used in experiment has only 32Kb RAM available). While recording data from human activity (one of the activities was running), people moved also in areas with poor internet connection. This caused delays and spaces in collecting data. Proposed approach with running average saved consistency of data with few accuracy loses (up to 9% in 5 minutes range) for respiration rate measurement. This proves that proposed approach with moving average works fine, especially with more static data like weather conditions preserving the most valuable measurements for both current context and historical analyses. However, when it comes to highly dynamic data like chest moving, it has main limitation — with time gap increasing, accuracy will decrease.

Researching utilization of different moving average calculation algorithms for different data types is a subject for further research.

DATA STORAGE

Blockchain might help addressing data integrity and trust problems mentioned above [2] [19], but there are a lot of limitations that need to be solved including limited resources that are not enough to properly support mining with keeping low-latency on low-power devices, large traffic overhead, and scalability issues.

It is obvious that blockchain itself can't be kept on the edge devices themselves, due to lack of computational resources and storage place. So, it is a good solution to distribute data storing and split it into saving data itself and metainformation about data, that could be quite sensitive – like PHR history and locations coupled with user id, or other personal information that could expose user's identity.

One of the possible solutions is to use off-chain database [16] together with blockchain storing references to data, but not the data itself. These perfectly combines with MPC as we share parts of secret data between computing nodes with no-party having the full picture. By saving trail of computations in public append-only bulletin-board as proposed in SPDZ protocol we allow auditing party to compare tail-of-proofs and check computing result correctness [18].

So, we suggest splitting data in the following way:

- Personal data – user name, sensor device identifier, cached user history.
- Public anonymized data – data from environmental sensors coupled with geo location, timestamp, and other aggregated collected data.

With this approach we can benefit from exposing data collected from sensors as well as anonymized health information to external services and integrating with them for analysis, research and monetization purposes.

To match sensitive information with particular patient, secret user key is proposed as identifier.

CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

In this work, we examined the design of multi-scope service-oriented Mobile Healthcare systems. Proposed multi-layered approach offers pluggable architecture, good scalable and secures user's sensitive data by isolating their transfer on different levels. By using user's smartphone as wearable fog-gateway we achieved integration with wide range of Bluetooth-enabled smart sensors, situation and location-awareness combined with computing power sufficient for running deep-learning models [20]. At the same time we have proposed a novice solution of using moving average for storing data on IoT devices, while there is no connection to the outer world, that enables not to lose that data, but obtain mean values from that period of time with more detailing for more recent data.

The main issues of current implementation are:

- Preserving data integrity [13] and intrusion detection [17].
- Vulnerabilities to man in the middle attacks.
- Running computing consuming deep learning models on the edge level.

Planned future research includes:

- Applying blockchain for confirming transactions with preserving privacy on mist and fog computing levels.
 - Designing secure communication protocol on the top of BLE and Bluetooth 5 using recently introduced Bluetooth mesh networking protocol.
 - Optimization of deep learning models to be run on edge.
 - Usage of smart sensors as intelligent agents in mist computing.
 - Researching different moving average approaches to preserve various data types while network connection is lost with maximum result usefulness.
 - Combining data from body-worn sensors (like heart rate sensor, accelerometer) for recognition of complex human activities and their outcomes regarding current and prognosed context by building Neural Network Models for it.

Depending on particular requirements the Distributed multi-scope service-oriented Mobile Healthcare system can be scaled from the corporate (national) scale of patients care to the scale of supporting profile patients in a particular region.

REFERENCES

1. *Jones Jake*. Edge Computing - The Cloud, The Fog And The Edge / Jake Jones. — Solidrun, 2017. — Available at: <https://www.solid-run.com/edge-computing-cloud-fog-edge/>.
2. *Rahmani Amir M*. Fog Computing In The Internet Of Things / M. Rahmani Amir et al. — Cham, Springer, 2017. — 169.
3. *Maier Martin*. Context- And Self-Awareness In Fog And Mist Computing / Maier Martin, Mohammad Hossein Same. — 2017. — Available at: http://www.zeitgeistlab.ca/doc/context_and_self_awareness_in_fog_and_mist_computing.html.

4. *Solidrun*. Fog And Mist Computing Levels. — 2017. — Available at: <https://www.solid-run.com/wp-content/uploads/2017/04/edge-computing-600x450.png>.
5. *Diogenes Yuri*. Internet Of Things Security Architecture / Yuri Diogenes. — 2017. — Available at: <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/iot-suite/iot-security-architecture>.
6. *Song Tianyi*. A Privacy Preserving Communication Protocol For Iot Applications In Smart Homes / Tianyi Song // IEEE Internet Of Things Journal. — Vol 4, N. 6. — 2017. — P. 1844–1852. doi:10.1109/jiot.2017.2707489.
7. *Global Structural Health Monitoring Market Demand, Growth & Revenue Opportunity (2016-2023)*. — 2017. — Available at: <https://www.researchnester.com/reports/structural-health-monitoring-market-global-demand-analysis-opportunity-outlook-2023/173>.
8. *CITI-SENSE: Development Of Sensor-Based Citizens' Observatory Community For Improving Quality Of Life In Cities*. — 2017. — Available at: <http://www.citi-sense.eu>
9. *Ericsson Mobility Report November 2017* – Ericsson. — 2017. — Available at: <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/reports/november-2017>.
10. *World Population Prospects: The 2017 Revision, DVD Edition*. — United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2017. — Available at: <https://esa.un.org/unpd/wpp/Download/Standard/Population/>
11. *Secure Multiparty Computation*. — 2017. — Available at: <https://partisia.com/secure-simple-efficient/>
12. *Secure Multiparty Computation*. — 2017. — Available at: <https://partisia.com/secure-simple-efficient/>
13. *Prosanta Gope*. BSN-Care: A Secure IoT-Based Modern Healthcare System Using Body Sensor Network / Prosanta Gope, Tzonelih Hwang // IEEE Sensors Journal. — Vol 16, N 5. — 2016. — P. 1368–1376.
14. *Bluetooth Topology Options*. — 2017. — Available at: <https://www.bluetooth.com/bluetooth-technology/topology-options>.
15. *Grpc / Grpc Concepts*. — 2017. — Available at: <https://grpc.io/docs/guides/concepts.html>.
16. *Zyskind G*. Enigma: Decentralized Computation Platform with Guaranteed Privacy/ G. Zyskind, O. Nathan, A. Pentland. — arXiv:1506.03471v1 [cs.CR], Jun. 2015.
17. *Stojmenovic Ivan*. The Fog Computing Paradigm: Scenarios And Security Issues / Ivan Stojmenovic, Wen Sheng // Proceedings Of The 2014 Federated Conference On Computer Science And Information Systems, 2014. — P. 1–8. — IEEE, doi:10.15439/2014f503.
18. *Damgrd Ivan*. Practical covertly secure MPC for dishonest majorityor: Breaking the SPDZ limits / Ivan Damgrd et al. // Computer SecurityESORICS 2013. Springer Berlin Heidelberg, 2013. — P. 1–18.
19. *Petrenko A*. Blockchain as a service for medical records / A. Petrenko, R. Kyisliy, I. Pysmennyi // System Research & Information Technologies. — 2017. — N 1. — P. 7–11.
20. *Baidu Mobile Deep Learning*. — 2017. — Available at: <https://github.com/baidu/mobile-deep-learning>.
21. *Weisstein Eric W*. Moving Average / Eric W. Weisstein // Wolfram MathWorld. — 2017. — Available at: <http://mathworld.wolfram.com/MovingAverage.html>
22. *Petrenko A*. Human Respiration Pattern Detection Using Deep Convolutional Neural Networks / A. Petrenko, R. Kyslyi, I. Pysmennyi // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2018. — N 4. — P. 6–13.

Received 22.01.2019

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

ЗНАХОДЖЕННЯ ПЕРІОДИЧНОГО РОЗВ'ЯЗКУ РІВНЯННЯ МАТЬЄ ІЗ ЗАПІЗНЕННЯМ

Ю.Є. БОХОНОВ

Анотація. Запропоновано підхід до знаходження періодичного розв'язку нелінійного диференціального рівняння Мат'є із запізненням, що використовується в теорії коливальних процесів. Відомо застосування числово-аналітичного методу знаходження періодичного розв'язку цього рівняння шляхом зведення рівняння другого порядку до системи диференціальних рівнянь першого порядку. Використано розроблену автором методику знаходження періодичних розв'язків нелінійних звичайних диференціальних рівнянь другого порядку, яку поширено також на рівняння із запізненням без зведення до системи. Побудовано функцію Гріна для самоспряженого диференціального оператора другої похідної, визначеного на функціях, які задовольняють періодичні крайові умови. Наведено необхідні і достатні умови існування періодичного розв'язку рівняння Мат'є. Сам розв'язок знайдено методом наближених обчислень. Отримано оцінку швидкості збіжності методу.

Ключові слова: рівняння Мат'є, періодичні розв'язки, нелінійне диференціальне рівняння із запізненням, періодична крайова задача, функція Гріна, самоспряжений диференціальний оператор.

ВСТУП

У роботі знайдено періодичні розв'язки рівняння Мат'є із запізненням, що базується на використанні методики автора для звичайного нелінійного диференціального рівняння другого порядку та рівняння із запізненням ([1, 2]). Періодичний розв'язок інтерпретується як розв'язок крайової задачі з періодичними умовами. У процесі дослідження буде побудовано функцію Гріна такої задачі та послідовні наближення періодичного розв'язку.

Пропонована методика є альтернативною до відомого числово-аналітичного методу, викладеного у працях [3], [4], який також застосовується до рівняння Мат'є.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Знаходження періодичного розв'язку диференціального рівняння Мат'є із запізненням зводиться до розв'язання періодичної крайової задачі:

$$\ddot{x} = \lambda(1 + \cos vt)x(t - \delta) - \beta x^3(t) + \sin vt; \quad (1)$$

$$x(0)=x(T), \dot{x}(0)=\dot{x}(T), \quad (2)$$

де $T = \frac{2\pi}{\nu}$. Зазвичай $0 < \delta < T$.

Досліджувати рівняння будемо в області, що визначається умовами

$$t \in (-\infty, \infty), |x(t)| \leq A; |x(t - \delta)| \leq A. \quad (3)$$

Оцінимо праву частину рівняння (3), яку позначатимемо через $f(t, x(t), x(t - \tau))$:

$$\begin{aligned} |f(t, x(t), x(t - \tau))| &= |\lambda(1 + \cos \nu t)x(t - \delta) - \beta x^3(t) + \sin \nu t| \leq \\ &\leq 2A|\lambda| + A^3|\beta| + 1 = M. \end{aligned} \quad (4)$$

Очевидно, що функція у правій частині рівняння задовольняє умову Ліпшица:

$$|f(t, x_1, y_1) - f(t, x_2, y_2)| \leq 2|\lambda||x_1 - x_2| + 3A^2|\beta||y_1 - y_2|. \quad (5)$$

Увівши позначення

$$K_0 = 3A^2, \quad \tilde{K}_0 = 2|\lambda|, \quad K = K_0 + \tilde{K}_0, \quad (6)$$

перепишемо умову (5) у вигляді

$$|f(t, x_1, y_1) - f(t, x_2, y_2)| \leq K_0|x_1 - x_2| + \tilde{K}_0|y_1 - y_2|. \quad (7)$$

РОЗВ'ЯЗАННЯ ПЕРІОДИЧНОЇ КРАЙОВОЇ ЗАДАЧІ

У праці автора [2] запропоновано методику знаходження періодичних розв'язків, що еквівалентно виконанню крайових умов (2) для рівняння із запізненням більш загального вигляду:

$$\ddot{x} = f(t, x(t), x(t - \delta), \dot{x}(t), \dot{x}(t - \delta)),$$

тобто функція в правій частині рівняння може залежати також від похідних. Побудовано функцію Гріна періодичної крайової задачі:

$$G(t, \tau) = \frac{1}{2T}(2t\tau - \tau^2) + \frac{1}{2} \begin{cases} t - \tau, & 0 \leq \tau \leq t \leq T; \\ \tau - t, & 0 \leq t \leq \tau \leq T. \end{cases}$$

Періодичний розв'язок рівняння, права частина якого не залежить від похідних, знаходимо методом послідовних наближень:

$$\begin{aligned} x_{m+1}(t) &= x_0 + \frac{1}{2T} \left(\int_0^t \left(\frac{T^2}{12} - \left(\tau - t + \frac{T}{2} \right)^2 \right) f(\tau, x_m(\tau), x_m(\tau - \delta)) d\tau + \right. \\ &\left. + \int_t^T \left(\frac{T^2}{12} - \left(\tau - t - \frac{T}{2} \right)^2 \right) f(\tau, x_m(\tau), x_m(\tau - \delta)) d\tau \right). \end{aligned}$$

Для рівняння Мат'є послідовні наближення мають вигляд

$$\begin{aligned}
 & x_{m+1}(t) = \\
 & = x_0 + \frac{1}{2T} \left(\int_0^t \left(\frac{T^2}{12} - \left(\tau - t + \frac{T}{2} \right)^2 \right) (\lambda(1 + \cos v\tau) x_m(\tau - \delta) - \beta x_m^3(\tau) + \sin v\tau) d\tau + \right. \\
 & \left. + \int_t^T \left(\frac{T^2}{12} - \left(\tau - t - \frac{T}{2} \right)^2 \right) (\lambda(1 + \cos v\tau) x_m(\tau - \delta) - \beta x_m^3(\tau) + \sin v\tau) d\tau \right). \quad (8)
 \end{aligned}$$

Скориставшись оцінкою і результатами, отриманими у праці [2], матимемо

$$\begin{aligned}
 & |x_{m+1}(t) - x_m(t)| \leq \\
 & \leq \int_0^T |G(t, \tau)| |f(\tau, x_m(\tau), x_m(\tau - \delta)) - f(\tau, x_{m-1}(\tau), x_{m-1}(\tau - \delta))| d\tau \leq \\
 & \leq \frac{T^2}{18\sqrt{3}} (K_0 + \tilde{K}_0) \|x_m - x_{m-1}\| = \frac{T^2}{18\sqrt{3}} K \|x_m - x_{m-1}\|.
 \end{aligned}$$

Ітераційний процес збігається за умови

$$K < \frac{18\sqrt{3}}{T^2}. \quad (9)$$

Також повинна виконуватись умова

$$M \leq 18\sqrt{3} \frac{A}{T^2}. \quad (10)$$

Тоді для існування періодичного з періодом T розв'язку $x = \varphi(t, x_0)$ рівняння (1) необхідно і достатньо існування такого значення x_0 , яке задовольняє рівняння

$$\int_0^T (\lambda(1 + \cos v\tau) x_m(\tau - \delta) - \beta x_m^3(\tau) + \sin v\tau) d\tau = 0. \quad (11)$$

У праці [2] отримано оцінки для початкового наближення x_0 і для швидкості збіжності ітераційного процесу, які із застосуванням до рівняння Мат'є мають вигляд

$$|x_0| < \frac{2\pi^2}{9\sqrt{3}v} M; \quad (12)$$

$$|\varphi(t, x_0) - x_m(t)| \leq M \left(\frac{2\pi^2}{9\sqrt{3}v^2} \right)^{m+1} K^m. \quad (13)$$

Сформулюємо остаточний результат.

Теорема. Нехай функцію $f(t, x, u)$ у правій частині рівняння (1) визначено в області $(-\infty, \infty) \times [-A, A] \times [-A, A]$. Нехай константи Лібшица, визна-

чені формулами (6), (7), та стала M у рівнянні (4) задовольняють умови (9) і (10). Тоді для існування періодичного з періодом $T = \frac{2\pi}{\nu}$ розв'язку $x = \varphi(t, x_0)$ рівняння (1) необхідно і достатньо існування такого значення x_0 , яке задовольняє рівняння (11), де $\varphi(t, x_0)$ знаходиться методом послідовних наближень, причому ітерації визначаються формулою (8). При цьому x_0 є середнім значенням $\varphi(t, x_0)$ на $[0, T]$ і міститься на проміжку, який задовольняє умову (12). Похибка між періодичним розв'язком рівняння Мат'є (1) і її m -м наближенням визначається умовою (13).

ВИСНОВКИ

Традиційно для знаходження періодичних розв'язків звичайного нелінійного диференціального рівняння другого порядку та рівняння із запізненням його зводять до системи першого порядку. У попередніх працях автора такі рівняння розв'язуються безпосередньо. За такого підходу періодичний розв'язок інтерпретується як розв'язок періодичної крайової задачі. Отримана методика застосовується для знаходження періодичного розв'язку рівняння Мат'є із запізненням. Будується ітераційний процес, що збігається до шуканого періодичного розв'язку. Його збіжність зумовлюється оцінками правої частини рівняння. Оцінюється швидкість збіжності процесу.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Бохонов Ю.Є.* Про один підхід до знаходження періодичних розв'язків нелінійного звичайного диференціального рівняння другого порядку / Ю.Є. Бохонов // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2012. — № 2. — С. 138–143.
2. *Бохонов Ю.Є.* Знаходження періодичних розв'язків звичайного нелінійного диференціального рівняння другого порядку із запізненням / Ю.Є. Бохонов // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2016. — № 4. — С. 133–140.
3. *Митропольский Ю.А.* Периодические и квазипериодические колебания систем с запаздыванием / Ю.А. Митропольский, Д.И. Мартынюк. — К.: Вища шк., 1979. — 248 с.
4. *Митропольский Ю.А.* Системы эволюционных уравнений с периодическими и условно-периодическими коэффициентами / Ю.А. Митропольский, А.М. Самойленко, Д.И. Мартынюк. — К.: Наук. думка, 1984. — 213 с.

Надійшла 16.11.2018

ПРОБЛЕМА ПРИГНІЧЕННЯ КОРУПЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ

А.П. ЯКОВЛЕВА, В.М. КРУТЬ

Анотація. Розглянуто проблему пригнічення корупції з використанням математичного моделювання та оптимізації, зокрема за допомогою принципу максимуму Понтрягіна. Виконано огляд та побудову моделей до поставленого завдання. У ході дослідження пригнічення корупції з використанням оптимального керування встановлено правдивість припущення, що корупція не має загальної домінуючої стратегії. Доведено, що існують дві локальні стабільні рівноваги, а саме: одна, де кожен є корумпований і цілком приймає корупцію, і друга, де все населення є чесним і корупція рівномірно засуджується. Між ними є нестабільна рівновага, де очікуваний рівень корупції відповідно до уявлень громадян збігається з фактичною інтенсивністю корупції. Розглянуто дві функції нагромадження корупції: лінійну та ввігнутої. Для лінійної функції розв'язок знайдено у загальному вигляді, для ввігнутої — на кількох прикладах.

Ключові слова: оптимальне керування, корупція, принцип максимуму Понтрягіна, функція нагромадження корупції (функція корисності), локальні стабільні та нестабільні точки рівноваги.

ВСТУП

Корупція є системною загрозою і однією з найбільших перепон на шляху розвитку України. Керівництво країни приділяє цій проблемі велику увагу, але істотних змін у боротьбі з нею поки досягти не вдалось. Ряд міжнародних організацій проводить регулярні вимірювання рівня корупції у різних країнах. Їх оцінки вказують на гостроту цієї проблеми в Україні: у всесвітньому рейтингу СРІ Україна минулого року посіла 130-е місце зі 176 країн. Настільки низьку оцінку України зумовлено, частково, великим корупційним тягарем, який несе бізнес. Наслідком цього є зниження інвестиційної привабливості, а, отже, обсяг капітальних вкладень і темпів економічного росту. Крім того, гальмується розвиток малого і середнього бізнесу, якому важче боротись з чиновниками, ніж великим компаніям. Суспільний добробут перерозподіляється на користь чиновників-корупціонерів. Пов'язані з ними компанії отримують перевагу в конкуренції на ринку, оскільки звільнені від перевірок вони платять менше податків, а також користуються перевагою під час розподілу державних замовлень на відповідному рівні. У цих умовах надається сумнівна можливість інноваційного розвитку економіки, для якого необхідно, щоб конкурентна перевага досягалась упровадженням нових більш ефективних технологій, а не за рахунок корупційних зв'язків [1]. Тому подолання корупції — одне з основних завдань для розвитку України. Існує багато методів математичного моделювання та оптимізації для боротьби з корупцією, серед яких ігровий підхід, Парето опти-

мальні коаліційні стійкі стратегії, оптимальне керування, квантильні стратегії та ін.

Мета роботи — детально розглянути один з підходів до боротьби з корупцією, який ґрунтується на використанні оптимального керування; побудувати відповідну математичну модель; виконати аналіз та отримати розв’язок поставлених оптимізаційних задач.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Аналізується проблема прийняття рішення представниками чиновників у суспільстві, де корупційна поведінка принаймні частково доступна. Пропонується побудувати математичну модель пригнічення корупції з використанням принципу максимуму Понтрягіна. Через $u(t)$ позначається темп корупції чиновників. Оскільки розглядається час безперервної роботи, то темп корупції — інтенсивність, яка обмежена зверху $M > 0$. Далі припускається, що представники населення очікують певний відсоток корупції. Тому очікуваний темп корупції позначимо через μ . Оскільки розглядається проблема прийняття рішення для чиновників, фактичний темп корупції u — це керувальна змінна в розгляданій моделі, а очікуваний темп корупції — змінна стану.

Динаміка змінної стану регулюється за допомогою припущення, що очікуваний темп корупції завжди пристосовується до фактичного темпу корупції з деякою константою швидкості $\beta > 0$. Наступне рівняння стану — це стандартне подання адаптації очікуваного темпу корупції до фактичного темпу:

$$\dot{x}(t) = \beta(u - x). \quad (1)$$

Тут і надалі часові аргументи випущені і без обмежень загальності припускається $M = 1$. Початковий стан суспільства вважається заданим:

$$x(0) = x_0 \in [0, 1], \quad (2)$$

де 1 — повністю корумповане суспільство; 0 — зовсім некорумповане.

Чиновники стикаються з проблемою максимізації свого прибутку та своєї корисності. Корисність у кожен період — це різниця між прибутком від залучення в корупцію з інтенсивністю u , $U(u)$ і вартістю корупційної угоди. Корупційний агент втрачає репутацію: чим більше він корумпований, тим менший очікуваний темп корупції. Це припущення мотивоване тим фактом, що високий рівень очікуваної корупції в цілому приводить до високого рівня сприйнятої корупції. Якщо громадянин країни з малою корупцією подорожує до країни, відомої корумпованими чиновниками, оцінка деякого чиновника, який є корумпований, буде значно меншою порівняно із ситуацією у власній країні. Шкідливість унаслідок втрати репутації позначається через $x(1-u)C$, де C — додатна константа. Динаміку розвитку проблеми прийняття рішень можна записати у вигляді

$$\max J = \int_0^{\infty} e^{-rt} [U(u) - Cu(1-x)] dt$$

з урахуванням виразів (1), (2) і контрольним обмеженням:

$$0 \leq u(t) \leq 1 \quad \forall t \in [0, \infty).$$

Тут припускається, що нескінченність часового горизонту і додатна константа знецінюють темп r . Функція корисності підпорядковується звичайному припущенню: $U(0) = 0$, $U'(u) > 0$, $U''(u) \leq 0$. Завдання полягає у розв'язанні цієї автономної альтернативної проблеми керування з нескінченим часом, де u — керувальна змінна і x — змінна стану. У роботі розглядається набір кусково-неперервних функцій $u(t)$ як допустима множина керування.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Спочатку розглядаємо випадок, коли функція нагромадження корупції лінійна, тобто $U(u) = \alpha u$. Тоді функція Гамільтона набуде вигляду

$$H(x, \lambda, u) = \alpha u - u(1-x)C + \lambda\beta(u-x),$$

де λ — спряжена змінна [2]. З умови максимуму принципу максимуму Понтрягіна максимум функції Гамільтона за $u \in U$ досягається лише за такого оптимального керування u^* , яке задовольняє умову

$$u^*(x, \lambda) = \begin{cases} 0, & \alpha < (1-x)C - \lambda\beta, \\ [0, 1], & \alpha = (1-x)C - \lambda\beta, \\ 1, & \alpha > (1-x)C - \lambda\beta. \end{cases}$$

Оптимальна траєкторія (x, λ) повинна задовольняти канонічну систему:

$$\begin{cases} \dot{\lambda} = r\lambda - H_x(x, \lambda, u^*(x, \lambda)), \\ \dot{x} = \beta(u^*(x, \lambda) - x). \end{cases}$$

Michel P. [3] установив такий факт: будь-який оптимальний шлях (x, λ) з $x_0 \in (0, 1)$ має задовольняти трансверсальну систему

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-rt} \lambda(t) = 0.$$

В аналізі розглянуто три різні ситуації: 1) маржинальна корисність корупції більша ніж затрати на її виконання в умовах повного соціального визнання корупції (тобто $\alpha > C$); 2) $\alpha = C$; 3) $\alpha < C$.

Канонічна система має вигляд:

$$\begin{cases} \dot{\lambda} = (r + \beta)\lambda, & \alpha < (1-x)C - \lambda\beta, \\ \dot{x} = -\beta x; \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \dot{\lambda} = (r + \beta)\lambda - C, & \alpha > (1-x)C - \lambda\beta. \\ \dot{x} = \beta(1-x). \end{cases} \quad (4)$$

На лінії перетину для $\alpha = (1-x)C - \lambda\beta$ будь-яке керування $u \in [0,1]$ — оптимальне і канонічна система є більш диференціальним включенням, ніж диференціальним рівнянням. Ці дві системи можуть бути розв’язані точно:

$$\begin{cases} \dot{\lambda} = (r + \beta)\lambda, \\ \dot{x} = -\beta x; \end{cases} \quad \begin{cases} \frac{d\lambda}{\lambda} = (r + \beta)dt, \\ \frac{dx}{x} = -\beta dt; \end{cases} \quad \begin{cases} \ln \lambda = (r + \beta)t + \ln \lambda_0, \\ \ln x = -\beta t + \ln x_0. \end{cases}$$

Точний розв’язок для системи (3) має вигляд $x = x_0 e^{-\beta t}$, $\lambda = \lambda_0 e^{(r+\beta)t}$.

$$\begin{cases} \dot{\lambda} = (r + \beta)\lambda - C, \\ \dot{x} = \beta(1-x); \end{cases} \quad \begin{cases} \frac{d\lambda}{\lambda - \frac{C}{r+\beta}} = (r + \beta)dt, \\ \frac{dx}{x-1} = -\beta dt; \end{cases} \quad \begin{cases} \ln\left(\lambda - \frac{C}{r+\beta}\right) = (r + \beta)t + \ln \lambda_0, \\ \ln(x-1) = -\beta t + \ln(x_0 - 1). \end{cases}$$

Точний розв’язок для системи (4) має вигляд $x = 1 - (1-x_0)e^{-\beta t}$, $\lambda = \lambda_0 e^{(r+\beta)t} + \frac{C}{r+\beta}$. Шукаючи єдиний розв’язок для розв’язків, що лежать на прямій перетину, встановлено, що розв’язки повинні задовольняти:

$$0 = -C\dot{x} - \beta\dot{\lambda} = -C\beta(u-x) - \beta(\beta+r)\lambda + \beta Cu = \beta(Cx - (\beta+r)\lambda),$$

де x, λ задовольняють $\alpha = (1-x)C - \lambda\beta$.

Існує теорема, яка узагальнює результати за трьома ситуаціями.

Нехай функція корисності $U(u)$ лінійна. Якщо $\alpha \geq \frac{rC}{r+\beta}$, то оптимальний шлях збігається з корупційною рівновагою незалежно від початкового значення x . Якщо $\alpha < \frac{rC}{r+\beta}$, то існує єдина точка $\hat{x} = 1 - \frac{(r+\beta)\alpha}{rC} > 0$ така, що для $x_0 \leq \hat{x}$ оптимальна траєкторія збігається з чесною рівновагою, у той час як для $x_0 > \hat{x}$ оптимальний шлях збігається з корупційною рівновагою [4].

Математичні результати розглянемо за різними параметрами. Основний результат: чим більше \hat{x} , тим менша нижня межа x , що зумовлює збіжність з корупційною рівновагою. Числове значення буде великим, якщо значення α і β теж великі, тобто є велика гранична корисність корупційної активності і населення адаптує свої переконання досить швидко до наявних фактів, які означають, що шкідливість від втрати репутації швидко зменшуватиметься. Якщо шкідливість від втрати репутації є великою порівняно з граничною корисністю корупції і адаптація відбувається повільно, то лише високий спочатку очікуваний рівень приведе до збіжності між корупційною рівновагою. Таким чином, мале значення r корупційної активності окупиться в довгостроковій перспективі, навіть якщо вона дає безпосередню шкідливість. Це означає, що чим менше r , тим більша множина початкових значень x , що зумовлює збіжність з корупційною рівновагою, яка відповідає математично отриманим результатам.

Аргументи, наведені вище, є також доречними, якщо порівняємо результати динамічного аналізу з результатами відповідної статичної моделі. Очевидним під час розгляду статистичної оптимізаційної задачі максимізації $\alpha u - C(1-x)u$ є те, що чиновник має обрати найбільш корупційний рівень $u = 1$, якщо $x > 1 - \frac{\alpha}{C}$, і $u = 0$ у протилежному випадку. Нерівність $1 - \frac{\alpha}{C} < \hat{x}$ означає, що для початкових значень x статичної і динамічної задачі прибутковості маємо абсолютно протилежні результати. Це пояснюється тим, що статична модель ігнорує інвестиційний ефект на високий рівень корупції чиновників. Однак \hat{x} наближається до статичного значення $x = 1 - \frac{\alpha}{C}$, якщо β прямує до нуля або r прямує до нескінченності. Таким чином, для дуже малого регулювання швидкості β або дуже високої дисконтної ставки r динамічна модель працює здебільшого як статична.

Той факт, що відсутність перемикання функції керування може виникнути на оптимальній траєкторії, інтуїтивно цілком зрозумілий. Якщо оптимальною для чиновника є повна корупція ($u = 1$), для $x = x_0$ значення x буде збільшуватись через його корупцію. Найвище значення x буде тоді, коли найбільший обсяг корупції окупується; це означає, що чиновник немає жодних стимулів для переходу до чесної поведінки. Навпаки виконується також, про що згадує Feichtinger G. [5].

Нехай $U(u)$ — увігнута зростаюча функція, тобто $U' \geq 0, U'' < 0$. У цьому випадку маємо таке оптимальне керування:

$$u^*(x, \alpha) = \begin{cases} 0, & (1-x)C - \lambda\beta \geq U'(0), \\ (U')^{-1}((1-x)C - \lambda\beta), & U'(1) < (1-x)C - \lambda\beta < U'(0), \\ 1, & (1-x)C - \lambda\beta \leq U'(1). \end{cases}$$

Тоді корупційна рівновага, де кожен є корумпований і цілком сприймає корупцію, матиме такий вигляд: $u = x = 1, \lambda = \tilde{\lambda} = \frac{C}{r + \beta}$. Якщо $U'(0) \leq C$, то існує також чесна рівновага, де все населення є чесним і корупція рівномірно засуджується, $u = x = \lambda = 0$. Знову дві рівноваги — це сідлові точки. Може існувати декілька рівноваг між ними, але кількість і властивості рівноваг залежать від форми $U(u)$ [6]. Як приклад розглянемо випадок, коли функція корисності має вигляд

$$U(u) = \alpha \ln(1 + u).$$

У цьому разі функція Гамільтона набуде вигляду

$$H(x, \alpha, u) = \alpha \ln(1 + u) - Cu(1 - x) + \alpha\beta(u - x).$$

З умови максимуму принципу максимуму Понтрягіна максимум функції Гамільтона за $u \in U$ досягається лише за такого оптимального керування u^* , яке задовольняє умову:

$$u^*(x, \alpha) = \begin{cases} 0, & x \leq 1 - \frac{\alpha + \lambda\beta}{C}, \\ \frac{\alpha}{C(1-x) - \lambda\beta} - 1, & 1 - \frac{\alpha + \lambda\beta}{C} < x < 1 - \frac{\alpha + 2\lambda\beta}{2C}, \\ 1, & x \geq 1 - \frac{\alpha + 2\lambda\beta}{2C}. \end{cases}$$

Легко бачити, що як і в лінійному випадку, завжди маємо повну корупційну рівновагу з $u = x = 1$, $\lambda = \tilde{\lambda}$. Для $\alpha \leq C$ також маємо чесну рівновагу з $u = x = \lambda = 0$. Знову маємо внутрішню рівновагу, де оптимальне керування лежить у проміжку $(0,1)$. Для обчислення цієї рівноваги запишемо канонічну систему:

$$\begin{cases} \dot{x} = \beta \left(\frac{\alpha}{C(1-x) - \lambda\beta} - 1 - x \right), \\ \dot{\lambda} = (r + \beta)\lambda - \frac{C\alpha}{C(1-x) - \lambda\beta} + C; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x} = \beta \left(\frac{\alpha}{C(1-x) - \lambda\beta} - 1 - x \right) = 0, \\ \dot{\lambda} = (r + \beta)\lambda - \frac{C\alpha}{C(1-x) - \lambda\beta} + C = 0; \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \frac{\alpha}{C(1-x) - \lambda\beta} - 1 - x = 0, \\ (r + \beta)\lambda - \frac{C\alpha}{C(1-x) - \lambda\beta} + C = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Домножимо перше рівняння системи (6) на C і додамо рівняння:

$$(r + \beta)\lambda + C - 1 - x = 0,$$

$$\lambda = \frac{C}{r + \beta} x.$$

Підставимо знайдене значення в перше рівняння системи (6):

$$\frac{\alpha}{C(1-x) - \frac{C\beta}{r+\beta}x} - 1 - x = 0,$$

$$\alpha - C - Cx + \frac{C\beta}{r+\beta}x - Cx + Cx^2 + \frac{C\beta}{r+\beta}x^2 = 0,$$

$$C \left(1 + \frac{\beta}{r+\beta} \right) x^2 + \frac{C\beta}{r+\beta}x + \alpha - C = 0,$$

$$C(r + \beta + \beta)x^2 + C\beta x + (\alpha - C)(r + \beta) = 0,$$

$$C(r + 2\beta)x^2 + C\beta x + (\alpha - C)(r + \beta) = 0.$$

Отже, прості обчислення показують, що рівновага системи (5) існує тоді і тільки тоді, якщо $\alpha \leq C$, і це виконується за умови $u^* = x^*$, $\lambda^* = \frac{C}{r+\beta} x^*$ і

$$x^* = \frac{-C\beta + \sqrt{C^2\beta^2 - 4C(\alpha - C)(r + \beta)(r + 2\beta)}}{2C(r + 2\beta)}.$$

Покажемо, що розв'язок задовольняє $x < \frac{r + \beta}{r + 2\beta} < 1$:

$$\begin{aligned} \sqrt{C^2\beta^2 - 4C(\alpha - C)(r + \beta)(r + 2\beta)} &< \sqrt{C^2\beta^2 + 4C^2(r + \beta)(r + 2\beta)} = \\ &= C\sqrt{\beta^2 + 4r^2 + 12r\beta + 8\beta^2} = C\sqrt{9\beta^2 + 4r^2 + 12r\beta} = C(3\beta + 2r), \end{aligned}$$

$$x^* = \frac{-C\beta + \sqrt{C^2\beta^2 - 4C(\alpha - C)(r + \beta)(r + 2\beta)}}{2C(r + 2\beta)} < \frac{-C\beta + C(3\beta + 2r)}{2C(r + 2\beta)} = \frac{\beta + r}{r + 2\beta} < 1.$$

Знову маємо три схожих сценарії. Для $\alpha > C$ є лише одна корупційна рівновага, для $\alpha = C$ — корупційна і чесна рівноваги, які збігаються з внутрішньою рівновагою і для $\alpha < C$ маємо три рівноваги: корупційну, чесну і внутрішню, де очікуваний рівень корупції — це x^* і $u^*(x^*, \lambda^*) = x^*$. З аналізу лінійного випадку випливає, що дві рівноваги на межі завжди є сідловими точками і прості обчислення показують, що внутрішня рівновага завжди відхиляється.

Тепер розглянемо випадок, коли функція корисності має вигляд $U(u) = -\alpha e^{-u+1}$.

У цьому разі функція Гамільтона матиме вигляд

$$H(x, \alpha, u) = -\alpha e^{-u+1} - Cu(1-x) + \lambda\beta(u-x).$$

З умови максимуму принципу максимуму Понтрягіна максимум функції Гамільтона за $u \in U$ досягається лише за такого оптимального керування u^* , яке задовольняє умову:

$$u^*(x, \alpha) = \begin{cases} 0, & x \leq 1 - \frac{\alpha + \lambda\beta}{C}, \\ 1 - \ln \frac{C(1-x) + \lambda\beta}{\alpha}, & 1 - \frac{\alpha + \lambda\beta}{C} < x < 1 - \frac{\alpha + 2\lambda\beta}{2C}, \\ 1, & x \geq 1 - \frac{\alpha + 2\lambda\beta}{2C}. \end{cases}$$

Легко бачити, що, як і в лінійному випадку, завжди існує повна корупційна рівновага з $u = x = 1$, $\lambda = \tilde{\lambda}$. Для $\alpha \leq C$ також є чесна рівновага з $u = x = \lambda = 0$. Існує також внутрішня рівновага, де оптимальне керування лежить у проміжку $(0, 1)$. Для обчислення цієї рівноваги запишемо канонічну систему:

$$\begin{cases} \dot{x} = \beta \left(1 - \ln \frac{C(1-x) + \lambda\beta}{\alpha} - x \right), \\ \dot{\lambda} = (r + \beta)\lambda + C \ln \frac{C(1-x) + \lambda\beta}{\alpha} - C. \end{cases} \quad (7)$$

Дорівнюємо до нуля, домножимо перше рівняння системи (7) на C і додамо рівняння $(r + \beta)\lambda - C + C - Cx = 0$.

Прості обчислення показують, що рівновага цієї системи існує тоді і тільки тоді, якщо $\alpha \leq C$, і це виконується за умови $u^* = x^*$, $\lambda^* = \frac{C}{r + \beta} x^*$ і

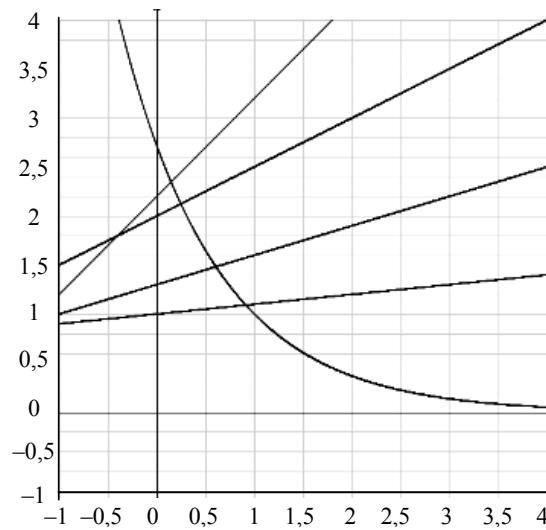
$$\ln \left(\frac{C - \frac{Cr}{r + \beta} x}{\alpha} \right) = 1 - x, \quad (8)$$

$$x = \frac{\beta + rW \left(-\frac{e^{-\frac{\beta}{r} + 1}}{Cr} \alpha(r + \beta) \right) + r}{r},$$

де W — функція Ламберта.

Оскільки всі коефіцієнти додатні і $\frac{C}{\alpha} \geq 1$ і $\frac{r}{r + \beta} \leq 1$, то завжди існує розв'язок (8) і він лежить у проміжку $[0,1]$. Переписавши (8) у вигляді

$\frac{C - \frac{Cr}{r + \beta} x}{\alpha} = e^{1-x}$, розв'яжемо рівняння графічно (див. рисунок), розглядаючи різні коефіцієнти.



Графічний розв'язок рівняння за різних коефіцієнтів

Знову розглядаємо три схожих сценарії. Для $\alpha \geq C$ будь-який оптимальний шлях збігається з корупційною рівновагою. Для $\alpha < C$ канонічна система має три рівноваги, де чесна і корупційна рівноваги — це сідлові точки і внутрішня рівновага між ними — вироджений вузол. Будь-який з оптимальних шляхів зрештою наближається до межі однієї з двох рівноваг.

ВИСНОВКИ

У ході дослідження на базі теорії оптимального керування з використанням принципу максимуму Понтрягіна проаналізовано проблему пригнічення корупції. Розглянуто дві функції нагромадження корупції: лінійну та ввігнуту. Для лінійної функції розв'язок знайдено у загальному вигляді, для ввігнутої — на прикладі функції $-\alpha e^{-u+1}$. У результаті розв'язання системи, що описує динаміку змінної стану, надано рекомендації щодо застосування розробленої моделі до розглянутої проблеми. Зазначимо, що випадок з лінійною функцією можна розглядати як межу збіжності моделей зі зменшенням ступеня ввігнутості. Якщо ввігнутість зменшується, то дві паралельні прямі, що обмежують області з внутрішнім оптимальним керуванням, наближують одна одну і стикаються на межі (лінійна функція). Отримані результати можуть бути корисними і знайдуть застосування в подальших дослідженнях проблеми виникнення, моделювання та пригнічення корупції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сорокіна Н.Г. Напрями запобігання корупції в органах публічної влади на сучасному етапі державотворення / Н.Г. Сорокіна // Державне управління та місцеве самоврядування. — 2015. — Вип. 2. — С. 259–267.
2. Feichtinger G. Optimale Kontrolle ökonomischer Prozesse. Anwendungen des Maximumprinzips in den Wirtschaftswissenschaften / G. Feichtinger, R.F. Hartl. — Berlin: de Gruyter, 1986.
3. Michel P. On the transversality condition in infinite horizon optimal control problems / P. Michel // Econometrica 50. — 1982. — P. 975–985.
4. Dawid H. On the Persistence of Corruption / H. Dawid, G. Feichtinger // Journal of economics. — 1996. — Vol. 64, N 2. — P. 177–193.
5. Feichtinger G. On the Stability and Potential Cyclicity of Corruption within Governments subject to Popularity Constraints / G. Feichtinger, F. Wirl // Mathematical Social Sciences. — 1994. — N 28. — P. 113–131.
6. Wrzaczek S. The reproductive value in distributed optimal control models. Theoretical Population Biology / S. Wrzaczek, M. Kuhn, A. Prskawetz. — Krakov: Wydawnictwo, 2010. — 670 p.

Надійшла 23.01.2019

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ І
МЕТОДИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

THEORETICAL AND APPLIED PROBLEMS AND
METHODS OF SYSTEM ANALYSIS

УДК 51-7(08)

Моделирование линий разломов цивилизаций в начале XXI столетия в контексте их фундаментальных отличий / Згуровский М.З., Перестюк М.Н. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 1. — С. 7–19.

Продолжен цикл моделирования линий разломов цивилизаций на основе теории Самюэля Хантингтона, начатого в 2008 г., в контексте фундаментальных культурных отличий цивилизаций с временным интервалом 10 лет. Моделирование основывается на применении количественного и качественного анализа отличий между мировыми культурами на основании модификации подхода Самюэля Хантингтона. С использованием результатов кластеризации расстояний, численных значений общих разломов между цивилизациями и совокупных отличий цивилизаций сформировано виденье на ближайшее и далёкое будущее касательно возможных объединений и конфликтов между мировыми культурами. С помощью сравнительного анализа по результатам исследований, проведенных в 2008 г., получены данные, которые могут стать научно-обоснованной основой для предсказания создания ряда объединений и альянсов стран мира, а также для моделирования поведения и развития отдельных стран мира. Рис.: 7. Табл.: 5. Библиогр.: 11 назв.

UDC 51-7(08)

Modeling the lines of the breakdown of civilizations at the beginning of the 21st century in the context of their fundamental differences / Zgurovsky M.Z., Perestyuk M.M. // System Research and Information Technologies. — 2019. — № 1. — P. 7–19.

The cycle of modeling of the lines of the civilization breakdown by S. Huntington, begun in 2008, continues in the context of the fundamental cultural differences of these civilizations with a time interval of 10 years. The simulation is based on the application of the quantitative and qualitative analysis of the differences between world cultures based on the modification of S. Huntington's approach. Using the data of distances clustering, quantitative figures of the existing break lines between the civilizations as well as their cumulative differences, we obtain the possibility to forecast the potential mergers and conflicts between the world cultures. The obtained data of the comparative analysis of the present study with the research results of the year 2008 can serve as a scientifically grounded basis for further studying the issues of predicting the creation of unions and alliances in the world, as well as while modeling the behavior and development of individual countries in the world. Figs.: 7. Tables: 5. Refs: 11 titles.

УДК 519-866

Система поддержки принятия решений для прогнозирования финансовых процессов на основе принципов системного анализа / Данилов В.Я., Гуськова В.Г., Бидюк П.И., Жиров А.Л. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 1. — С. 20–36.

Предложена концепция решения задач адаптивного прогнозирования на основе методологии системного анализа. Методология базируется на комплексном использовании методов предварительной обработки данных, математического и статистического моделирования, прогнозирования и оптимального оценивания состояний исследуемых процессов. Циклическая адаптация структуры и параметров модели на основе множества статистических характеристик процесса обеспечивает получение высококачественных коротко- и среднесрочных оценок прогнозов при условии выполнения условия информативности данных. Для идентификации и уче-

та возможных неопределенностей предложено использовать оптимальную и цифровую фильтрацию, а также методы интеллектуального анализа данных: байесовские сети, адаптивные байесовские сети, гранулярные фильтры и другие инструменты. Возможные параметрические неопределенности минимизируются путем применения нескольких методов оценивания параметров моделей: МНК, РМНК, ММП и Монте-Карло для марковских цепей. Выполненные исследования предложенной методики свидетельствуют о возможности ее применения к исследованию широкого класса процессов произвольной природы включая нелинейные нестационарные процессы у финансах, экономике, экологии и демографии. Рис.: 3. Библиогр.: 15 назв.

UDC 519-866

Decision support system for forecasting financial processes on the basis of system analysis principles / Danylov V.Y., Huskova V.H., Bidiyuk P.I., Jirov O.L. // System Research and Information Technologies. — 2019. — № 1. — P. 20–36.

A concept is proposed for solving the problem of adaptive forecasting that is based on the system analysis methodology and combined use of preliminary data processing techniques, mathematical and statistical modeling, forecasting and optimal state estimation of the processes under study. The cyclical adaptation of a structure and model parameters on the basis of a set of statistical characteristics of a process under study provides a possibility for reaching high quality estimates of forecasts under condition that data is informative. To identify and take into consideration possible stochastic, structural and parametric uncertainties it is proposed to use optimal and digital filtering and data mining methods such as Bayesian networks, adaptive BN, particle filter and other instruments. Possible parametric uncertainties are minimized with application of several alternative parameter estimation techniques such as LS, RLS, ML and Markov chains Monte Carlo sampling. The conducted study suggests that the proposed methodology can be applied to the analysis of a wide class of real life processes including nonlinear nonstationary processes in finances, economy, ecology and demography. Figs.: 3. Refs: 15 titles.

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ,
ВИСОКОПРОДУКТИВНІ КОМП'ЮТЕРНІ
СИСТЕМИ

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES,
HIGH-EFFICIENCY COMPUTER SYSTEMS

УДК 518.9: 004.45

Гра «життя» з нерегулярним простором з межами: випадок глайдерів / Бражон Дж., Макаренко О.С. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 1. — С. 37–49.

Подано виконані дослідження з реалізації правил для планерів у грі «життя» з нерегулярною областю з межами. Описано основні принципи гри «життя» зі згадуванням деяких структур, які з'являються регулярно у ході еволюції і дуже важливі як рухомі структури (планери). Уточнено правила зіткнення між планерами. Уведено нерегулярний простір моделі шляхом додавання нового стану для комірок на межах, а також нові правила, що стосуються цього нового клітинного автомата. Розглянуто правила і геометрію простору моделі, які дають змогу емулювати логічні операції в змінній грі «життя». Рис.: 22. Библиогр.: 19 назв.

УДК 518.9: 004.45

Игра «жизнь» с нерегулярным пространством и границами: случай глайдеров / Бражон Дж., Макаренко А.С. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 1. — С. 37–49.

Представлены проделанные исследования по реализации правил для планеров в игре «жизнь» с нерегулярной областью с границами. Описаны основные принципы игры «жизнь» с упоминанием некоторых структур, которые появляются регулярно при эволюции и очень важны в качестве движущихся структур (планеров). Уточнены правила столкновения между планерами. Введены нерегулярное про-

странство модели с добавлением нового состояния для ячеек на границах, а также новые правила, касающиеся этого нового клеточного автомата. Рассмотрены правила и геометрия пространства модели, позволяющие эмулировать логические операции в измененной игре «жизнь». Рис.: 22. Библиогр.: 19 назв.

УДК 004.942:537.525

Система конструктивных геометрических параметров модели электронных пушек высоковольтного тлеющего разряда, формирующих профильные электронные пучки / Мельник И.В., Починок А.В. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 1. — С. 50–65.

Рассмотрена система конструктивных геометрических параметров модели электродных систем электронных пушек высоковольтного тлеющего разряда, формирующих профильные электронные пучки с кольцевым фокусом. Отличительной чертой предложенной модели является то, что в качестве ключевого параметра выбран угол наклона образующей поверхности конического анода к оси симметрии электродной системы. Сформирована система неравенств, определяющих геометрические, физические и вычислительные ограничения на конструктивные параметры моделируемой электродной системы, а также технологические допуски на них. В результате проведенных исследований создана полная, замкнутая и непротиворечивая система геометрических параметров модели электродных систем электронных пушек высоковольтного тлеющего разряда, формирующих профильные электронные пучки с кольцевым фокусом. Сформированы ограничения на конструктивные параметры модели, представленные в виде системы неравенств, использованы в программном комплексе, предназначенном для моделирования электродных систем электронных пушек высоковольтного тлеющего разряда, с целью контроля входных параметров модели на начальном этапе компьютерного моделирования. Рис.: 6. Библиогр.: 22 назв.

UDC 004.942:537.525

The system of constructive geometrical parameters of model of high voltage glow discharge electron guns, producing profile electron beams / Melnyk I.V., Pochynok A.V. // System Research and Information Technologies. — 2019. — № 1. — P. 50–65.

The system of constructive geometrical parameters of the model of electrodes' systems of high voltage glow discharge electron guns, producing the profile electron beams with the ring-like focus, is considered in the article. The distinguishing feature of a proposed model is taking the slope angle of generating line of the conic anode surface relatively to the electrodes' system symmetry axis as the basic parameter. The set of inequalities has been constructed which defines the geometrical, physical and computing limitations on the constructive parameters of a simulated system, as well as its technological tolerable limits. The complete, closed and consistent system of geometrical parameters of a model of electrodes' systems of high voltage glow discharge electron guns, producing profile electron beams with the ring-like focus, have been created as a result of conducted research. Formed limitations to the constructive model's parameters, written as the set of inequalities, have been used in the software application, intended for simulation of high voltage glow discharge electron guns electrodes' systems, for the purpose of control of input model parameters at the first step of a computer simulation. Figs.: 6. Refs: 22 titles.

УДК 621.313

Математическая модель двухмашинного асинхронного двигателя с вращающимся индуктором / Луцьо В.В., Сильвестров А.Н. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 1. — С. 66–74.

Предложен метод моделирования двухмашинного асинхронного агрегата, который основан на разделении моделей первичной и вторичной асинхронных машин

на две отдельные структурные единицы. Моделирование первичной машины с самого начала производится в неподвижной относительно статора системе координат, в то время как моделирование вторичной машины обеспечивается переходом из вращающейся в неподвижную систему координат с помощью обратного превращения Парка. В процессе разработки математической модели составлены структурные схемы отдельных блоков модели и установлены взаимосвязи между ними. Данная математическая модель соответственно результатам предыдущих исследований в области моделирования асинхронных машин дает возможность увидеть особенности работы исследованного класса электрических машин. Может быть использована для разработки и исследований электропривода на их основе. Рис.: 8. Библиогр.: 4 назв.

UDC 621.313

Mathematical model of a two-machine induction motor with rotating inductor / Lutso V.V., Silvestrov A.M. // System Research and Information Technologies. — 2019. — № 1. — P. 66–74.

The method of the two-machine induction motor based on separation of models of primary and secondary machines as isolated entities is described in the article. Modelling of the primary machine is carried out in the coordinate system, that is stationary relatively to a stator, while modelling of a secondary machine is provided by a transition from the stationary coordinate system to rotating one with help of the inverse Park transformation. The structure diagrams of separate model blocks were built and interrelation between them was defined during the process of model development. This mathematical model, based on results of previous studies in the area of induction motor modelling, allows to see special aspects of the considered class of electric machines, as well as it can be used for development of an electric drive based on it. Figs.: 8. Refs: 4 titles.

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

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

УДК 519

Побудова моделі динаміки виробничо-ринкових процесів у двосекторній макроекономіці / Панкратова Н.Д., Хорошун Л.П., Яхін С.Л. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 1. — С. 75–90.

Запропоновано математичну модель динаміки виробничо-ринкових процесів у макроекономіці, в основу якої покладено зв'язані диференціальні рівняння балансу виробництва з урахуванням продуктивності, зношування, виробничого нагромадження і участі людей, а також балансу грошово-товарних потоків у двосекторній моделі макроекономіки при розширеному відтворенні. Узагальнено модель виробництва на випадок існування видів капіталу з різними продуктивністю, виробничим нагромадженням, амортизацією і участю людей. Розглянуто конкретні завдання, що описують зростання, спад і циклічний характер виробництва, а також інфляцію. Бібліогр.: 10 назв.

UDC 519

Construction of a model of dynamics of production market processes in two-sector macroeconomics / Pankratova N.D., Khoroshun L.P., Yakhin S.L. // System Research and Information Technologies. — 2019. — № 1. — P. 75–90.

A mathematical model of the dynamics of production-market processes in macroeconomics is proposed, which is based on the associated differential equations of the production balance taking into account productivity, depreciation of production accumulation and human participation, and the balance of monetary flows in a two-sector macroeconomy model with extended reproduction. A generalization of the production model in the case of the existence of types of capital with different productivity, production accumulation, depreciation and participation of people has been carried out. The specific tasks de-

scribing the growth, decline and cyclical nature of production, as well as inflation, are considered. Refs.: 10 titles.

УДК 681.513.

Нечіткий МГУА та його застосування для прогнозування фінансових процесів / Зайченко Ю.П., Зайченко О.Ю. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 1. — С. 91–109.

Присвячено дослідженням та застосуванню нечіткого методу індуктивного моделювання, відомого як нечіткий метод групового урахування аргументів (НМГУА) у проблемах інтелектуального аналізу даних, зокрема прогнозування у фінансовій сфері. Перевагою індуктивного методу моделювання МГУА є можливість конструювання адекватної моделі процесу безпосередньо в процесі роботи алгоритму. Описано узагальнення МГУА на випадок невизначеності — нечіткий МГУА, який дозволяє конструювати нечіткі моделі майже автоматично. Розглянуто алгоритми нечіткого МГУА для гаусівських та дзвіноподібних функцій належності і показано їх подібність до моделей з трикутними функціями належності. Наведено варіанти НМГУА для ортогональних поліномів Чебишова та Фур'є. Розглянуто проблему адаптації нечітких моделей, отриманих за допомогою НМГУА, та описано відповідний алгоритм адаптації. Наведено узагальнення нечіткого МГУА на випадок нечітких вхідних змінних. Проведено експериментальні дослідження НМГУА та наведено їх результати. Рис.: 3. Табл.: 6. Бібліогр: 21 назв.

УДК 681.513.

Нечеткий МГУА и его применение для прогнозирования финансовых процессов / Зайченко Ю.П., Зайченко Е.Ю. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 1. — С. 91–109.

Посвящено исследованиям и применению нечеткого метода индуктивного моделирования известного как нечеткий метод группового учета аргументов (МГУА) в проблемах интеллектуального анализа данных, в частности прогнозирования в финансовой сфере. Преимуществом индуктивного метода моделирования МГУА является возможность конструирования адекватной модели непосредственно в процессе работы алгоритма. Описано обобщение МГУА на случай неопределенности — нечеткий МГУА, позволяющий конструировать нечеткие модели почти автоматически. Рассмотрены алгоритмы нечеткого МГУА для гауссовских и колоколообразных функций принадлежности и показано их сходство с моделью для треугольных функций принадлежности. Приведены варианты НМГУА для ортогональных полиномов Чебышева и Фурье. Рассмотрена проблема адаптации нечетких моделей, полученных по НМГУА, и описан соответствующий алгоритм адаптации. Приведено обобщение нечеткого МГУА на случай нечетких входных переменных. Выполнены экспериментальные исследования НМГУА и приведены их результаты. Рис.: 3. Табл.: 6. Библиогр: 21 назв.

УДК 611.814.1:615.84

Оценивание адаптивных резервов человека по данным пульсометрии / Запорожко И.А., Борозенец Д.А., Зубчук В.И. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 1. — С. 110–117.

Рассмотрена и описана архитектура комплекса. Приведен программно-аппаратный комплекс регистрации и обработки данных пульсометрии. Предложен количественный критерий оценки функционального состояния сердечно-сосудистой системы — индекс формы пульсовой волны с использованием прямого и обратного преобразования Фурье и анализа его характеристик. Исследованы динамические свойства пульсовой волны в состоянии покоя. Представлены результаты исследований индекса формы пульсовой волны для групп добровольцев разного

возраста и пола. Предложен количественный критерий R для оценки адаптивных резервов обследуемых, выведенный посредством обучения нейронной сети с обратным распространением ошибки. Приведены нормы R с учетом возраста и пола человека, а также результаты статистической обработки входных данных. Выполнен анализ возможностей разработанного программно-аппаратного комплекса, выдвинуты предложения по его усовершенствованию как аппаратно, так и программно. Рис.: 4. Табл.: 2. Библиогр.: 10 назв.

UDC 611.814.1:615.84

Assessment of human adaptive reserves by pulse wave / Zaporozhko I.O., Boroznets D.A., Zubchuk V.I. // System Research and Information Technologies. — 2019. — № 1. — P. 110–117.

The definition of adaptive reserves of human health is one of the diagnostic tasks and is aimed at obtaining a quantitative assessment of the functional state of the main systems in the process of health and the appearance of pathologies. The article studies and describes the architecture of the system. A software-hardware system for recording and processing pulse wave data is shown. The proposed quantitative criterion for assessing the functional state of the cardiovascular system is the pulse waveform index (PWI), while using the forward and inverse Fourier transform and analyzing its characteristics. Dynamic properties of a pulse wave in a state of rest are investigated. The results of the study by calculating PWI for groups of volunteers of different age and sex are presented. The proposed quantitative criterion R for estimating the adaptive reserves of the subjects is derived by training the neural network with back propagation of the error. The norms for R are presented that take into account person's age and sex. The estimation of this method, as well as the results of statistical processing of input data are carried out. The capabilities of the developed software and hardware system were analyzed, the proposals for improving both hardware and software were made. Figs.: 4. Tables: 2. Refs: 10 titles.

ПРОБЛЕМНО І ФУНКЦІОНАЛЬНО ОРІЄНТОВАНІ
КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ

PROBLEM- AND FUNCTION-ORIENTED
COMPUTER SYSTEMS AND NETWORKS

УДК 004.72

Туманні обчислення в багатоцільових сервіс-орієнтованих мобільних медичних системах / Письменний І.О., Кислий Р.В., Петренко А.І. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 1. — С. 118–127.

Електронні медичні системи, побудовані на технологіях інтернету речей (IoT), — це тенденція, яка найближчим часом зробить революцію у сфері охорони здоров'я, виникла з розвитком мікроелектромеханічних систем (MEMS), бездротових технологій та інтернету, які уможливають інтеграцію систем, мікроелектронних пристроїв та медичних послуг і дозволяють обробляти дані на межі мережі (в максимальному наближенні до пристрою). Такий підхід дає змогу економити обчислювальні ресурси і уникати непотрібних точок відмови. Моніторинг параметрів життєво важливих функцій пацієнтів (вимірюваних у домашніх умовах) досягається за допомогою сучасної технології IoT, яка передбачає інтеграцію між портативними діагностичними датчиками, стільниковими телефонами, хмарним сховищем даних з електронними картами пацієнтів і професійними постачальниками медичних послуг. У роботі розглянуто можливості використання підходу туманних обчислень для перенесення оброблень даних і обчислень з хмари до меж мережі для створення багатоцільової інфраструктури для мобільної охорони здоров'я та системи спостереження за громадянами на основі сервіс-орієнтованого підходу. Рис.: 4. Бібліогр.: 22 назв.

УДК 004.72

Туманные вычисления в многоцелевых сервис-ориентированных мобильных медицинских системах / Письменний И.А., Кислый Р.В., Петренко А.И. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 1. — С. 118–127.

Электронные медицинские системы, основанные на технологиях интернета вещей (IoT), — это тенденция, которая в ближайшем будущем произведет революцию в сфере здравоохранения, возникла с развитием микроэлектромеханических систем (MEMS), беспроводных технологий и интернета, которые обеспечивают возможность интеграции систем, микроэлектронных устройств и медицинских услуг, позволяя обрабатывать данные на границе сети (максимально близко к устройству). Данный подход позволяет экономить вычислительные ресурсы и избегать ненужных точек отказа. Мониторинг параметров жизненно важных функций пациентов (измеряемых в домашних условиях) достигается с помощью современной технологии IoT, которая предполагает интеграцию между портативными диагностическими датчиками, сотовыми телефонами, облачным хранилищем данных с электронными картами пациентов и профессиональными поставщиками медицинских услуг. В работе рассматриваются возможности использования подхода туманных вычислений для переноса обработки данных и вычислений из облака к границе сети для создания многоцелевой инфраструктуры для мобильного здравоохранения и системы наблюдения за гражданами на основе сервис-ориентированного подхода. Рис.: 4. Библиогр.: 22 назв.

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ, ОПТИМАЛЬНЕ
УПРАВЛІННЯ І ТЕОРІЯ ІГОР

METHODS OF OPTIMIZATION, OPTIMUM
CONTROL AND THEORY OF GAMES

УДК 517.94

Нахождение периодического решения уравнения Маттье с запаздыванием / Бохонов Ю.Е. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 1. — С. 128–131.

Предложен подход к нахождению периодического решения нелинейного дифференциального уравнения Маттье с запаздыванием, используемого в теории колебательных процессов. Известно применение численно-аналитического метода нахождения периодического решения этого уравнения путем сведения уравнения второго порядка к системе дифференциальных уравнений первого порядка. Использована разработанная автором методика нахождения периодических решений нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, распространенная также на уравнения с запаздыванием без сведения к системе. Построена функция Грина для самосопряженного дифференциального оператора второй производной, определенного на функциях, удовлетворяющих периодическим краевым условиям. Приведены необходимые и достаточные условия существования периодического решения уравнения Маттье. Само решение найдено методом последовательных приближений. Получена оценка скорости сходимости метода. Библиогр.: 4 назв.

UDC 517.94

Finding of periodic solution of the Mathieu equation with the delay / Bokhonov Yu. Ye. // System Research and Information Technologies. — 2019. — № 1. — P. 128–131.

The work suggests an approach for finding periodic solution of the nonlinear delayed differential Mathieu equations applied in the theory of oscillatory processes. The application of the numerical-analytical method to finding periodic solutions of this equation is known. This idea includes reducing the equation to the system of the first order. The article proposes the use of the previously developed method for finding periodic solutions of nonlinear second-order ordinary differential equations, also used for equations with delay, without being reduced to a system. In this case, the Green's function is constructed for a self-adjoint differential operator of the second derivative, defined on functions that satisfy periodic boundary conditions. The necessary and sufficient conditions for the existence of a periodic solution of the Mathieu equation are given. The solution itself

is found by the method of successive approximations. The estimates for the method's rate of convergence were obtained. Refs.: 4 titles.

УДК 517.9

Проблема угнетения коррупции с использованием оптимального управления / Яковлева А.П., Круть В.Н. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2019. — № 1. — С. 132–140.

Рассмотрена проблема угнетения коррупции с использованием математического моделирования и оптимизации, в частности с помощью принципа максимума Понтрягина. Проведен обзор и построение моделей к поставленной задаче. В процессе исследования установлена справедливость предположения о том, что коррупция не имеет общей доминирующей стратегии. Доказано, что существуют два локальные стабильные равновесия, а именно: одно, где каждый является коррумпированным и вполне принимает коррупцию, и другое, где все население является честным и коррупция равномерно осуждается. Между ними есть неустойчивое равновесие, где ожидаемый уровень коррупции в соответствии с представлениями граждан совпадает с фактической интенсивностью коррупции. Рассмотрены две функции накопления коррупции: линейная и вогнутая. Для линейной функции решение найдено в общем виде, для вогнутой — на нескольких примерах. Рис.: 1. Библиогр.: 6 назв.

UDC 517.9

The problem of corruption suppression using optimal control / Yakovleva A.P., Krut V.M. // System Research and Information Technologies. — 2019. — № 1. — P. 132–140.

The problem of corruption suppression using mathematical modeling and optimization, i.e using the Pontryagin maximum principle, was considered. The reviewing and building models for this problem was conducted. The study of corruption suppression using optimal control confirmed the assumption that corruption did not have a dominant overall strategy. It is proved that there are two local stable equilibriums, namely one where everyone is corrupt and it takes corruption and another where all people are honest and corruption is uniformly condemned. Between them there is an unstable equilibrium where the level of corruption expected in accordance with the representations of citizens coincides with the actual intensity of corruption. Two cases of the corruption accumulation function were considered: linear and concave. For the linear function, the solution is found in general terms, for the concave — on several examples. Figs.: 1. Refs: 6 titles.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Бідюк Петро Іванович,

професор, доктор технічних наук, професор кафедри математичних методів системного аналізу ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Борозенець Данило Андрійович,

магістр комп'ютерних наук, Україна, Київ

Бохонов Юрій Євгенович,

доцент, кандидат фізико-математичних наук, доцент ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Бражон Джордан,

студент-магістр Центральної вищої школи міста Ліон, Франція, Ліон

Гуськова Віра Геннадіївна,

аспірантка ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Данилов Валерій Якович,

професор, доктор технічних наук, професор кафедри математичних методів системного аналізу ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського Україна, Київ

Жиров Олександр Леонідович,

доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри математичних методів системного аналізу ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Зайченко Олена Юрївна,

доцент, доктор технічних наук, професор кафедри математичних методів системного аналізу ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Зайченко Юрій Петрович,

професор, доктор технічних наук, професор кафедри математичних методів системного аналізу ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Запорожко Інна Олександрівна,

аспірантка кафедри біомедичної інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Згуровський Михайло Захарович,

академік НАН України, професор, доктор технічних наук, ректор КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Зубчук Віктор Іванович,

доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри біомедичної інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Кислий Роман Володимирович,

асистент кафедри системного проектування ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Круть Валерія Миколаївна,

студентка магістратури наукового спрямування ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Луцьо Валерій Валерійович,

методист ТОВ «Робот Скул», Україна, Київ

Макаренко Олександр Сергійович,

професор, доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу прикладного нелінійного аналізу ННК «ІПСА» 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

Панкратова Наталія Дмитрівна,

член-кореспондент НАН України, професор, доктор технічних наук, в.о. заступника директора ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Перестюк Марія Миколаївна,

кандидат фізико-математичних наук, директор Інституту моніторингу якості освіти КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Петренко Анатолій Іванович,

професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри системного проектування ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Письменний Ігор Олександрович,

асистент кафедри системного проектування ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

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

Сільвестров Антон Миколайович,

професор, доктор технічних наук, професор кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Хорошун Леонід Петрович,

член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу механіки стохастично-неоднорідних середовищ Інституту механіки імені С.П. Тимошенка НАН України, Київ

Яковлева Алла Петрівна,

старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри математичний методів системного аналізу ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Яхін Сергій Леонідович,

студент факультету прикладної математики КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ