

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ КОМПЛЕКС  
«ІНСТИТУТ ПРИКЛАДНОГО СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ» НТУУ «КПІ»  
МОН ТА НАН УКРАЇНИ

## СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

№ 2

2012

ЗАСНОВАНИЙ У ЛИПНІ 2001 р.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

**Головний редактор**

**М.З. ЗГУРОВСЬКИЙ**, акад. НАН України

**Заступник головного редактора**

**Н.Д. ПАНКРАТОВА**, проф., д. т. н.

**Члени редколегії:**

**П.І. АНДОН**, чл.-кор. НАН України

**А.В. АНІСІМОВ**, проф., д. ф.-м. н.

**В.Г. БОНДАРЕНКО**, проф., д. ф.-м. н.

**Ж. БОННІН**, проф., Франція

**Г.-В. ВЕБЕР**, проф., Турція

**Р. ВОРОНКА**, проф., США

**О.Д. ГВІШАНИ**, проф., д. ф.-м. н.,  
Росія

**В.М. КУНЦЕВИЧ**, акад. НАН України

**О.С. МАКАРЕНКО**, проф., д. ф.-м. н.

**О.А. ПАВЛОВ**, проф., д. т. н.

**Т.Л. СААТІ**, проф., д. ф.-м. н.

**Л. САКАЛАУСКАС**, проф., Литва

**І.В. СЕРГІЄНКО**, акад. НАН України

**Е.О. ФАЙНБЕРГ**, проф., США

**Я.С. ЯЦКІВ**, акад. НАН України

**АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:**

03056, м. Київ,

пр. Перемоги, 37, корп. 35,

Навчально-науковий комплекс

«Інститут прикладного системного аналізу»

НТУУ «КПІ» МОН та НАН України

Тел.: **406-81-44**; Факс: **406-81-44**

E-mail: [journal@mmsa.ntu-kpi.kiev.ua](mailto:journal@mmsa.ntu-kpi.kiev.ua)

<http://journal.iasa.kpi.ua>

### У номері:

- **Прогресивні інформаційні технології, високопродуктивні комп'ютерні системи**
- **Проблеми прийняття рішень і управління в економічних, технічних, екологічних і соціальних системах**
- **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**
- **Нові методи в системному аналізі, інформатиці та теорії прийняття рішень**

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE  
EDUCATIONAL-SCIENTIFIC COMPLEX  
«INSTITUTE FOR APPLIED SYSTEM ANALYSIS»  
AT THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF UKRAINE «KPI»  
OF MES AND NAS OF UKRAINE

## SYSTEM RESEARCH AND INFORMATION TECHNOLOGIES

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

№ 2

2012

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,** Prof., Ukraine

#### Associate editors:

**F.I. ANDON,** Correspondent  
member of NASU

**A.V. ANISIMOV,** Prof., Ukraine

**V.G. BONDARENKO,** Prof., Ukraine

**Z. BONNIN,** Prof., France

**E.A. FEINBERG,** Prof., USA

**A.D. GVISHIANI,** Prof., Russia

**V.M. KUNTHEVICH,** Academician of NASU

**A.S. MAKARENKO,** Prof., Ukraine

**A.A. PAVLOV,** Prof., Ukraine

**T.L. SAATY,** Prof., USA

**L. SAKALAUŠKAS,** Prof., Lithuania

**I.V. SERGIENKO,** Academician of NASU

**R. VORONKA,** Prof., USA

**G.-W. WEBER,** Prof., Turkey

**Ya.S. YATSKIV,** Academician of NASU

#### THE EDITION ADDRESS:

03056, Kyiv,  
av. Peremogy, 37, building 35,  
Educational-Scientific Complex  
«Institute for Applied System Analysis» at the  
National Technical University of Ukraine «KPI»  
of MES and NAS of Ukraine  
Phone: 406-81-44; Fax: 406-81-44  
E-mail: journal@mmsa.ntu-kpi.kiev.ua  
http://journal.iasa.kpi.ua

### In the issue:

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

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

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

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

• **Methods of system analysis and control in conditions of risk and uncertainty**

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

## Шановні читачі!

Навчально-науковий комплекс «Інститут прикладного системного аналізу» НТУУ «КПІ» МОН та НАН України 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 «КПІ», директор Навчально-наукового комплексу «Інститут прикладного системного аналізу» НТУУ «КПІ» МОН та НАН України, академік НАН України Михайло Захарович Згуровський.

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

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, пр. Перемоги, 37, корп. 35.

Завідуюча редакцією **С.М. Шевченко**

Редактор **А.О. Млечко**

Молодший редактор **В.М. Литвин**

Комп'ютерна верстка та набір **А.А. Патіоха**

---

Підписано до друку 27.06.2012. Формат 70x108/16.

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

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 13804–2778 ПР від 17.03.2008 р.

---

Видавництво та поліграфія ВПК «Політехніка»

ВПІ НТУУ «КПІ»

03056, Київ–56, пр. Перемоги, 37, корп. 15

## **Dear Readers!**

The Educational-scientific complex «Institute for applied system analysis» at the National technical university of Ukraine «KPI» of MES and NAS of Ukraine 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 «KPI», Director of the Educational-scientific complex «Institute for applied system analysis» at the National technical university of Ukraine «KPI» of MES and NAS of Ukraine, academician of the NASU Michael Zharovich Zgurovsky.

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

# СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

2 • 2012

## ЗМІСТ

### ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ВИСОКОПРОДУКТИВНІ КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ

<i>Згуровський М.З., Петренко А.І.</i> Оброблення наукових даних в умовах інформаційного «буму» .....	7
<i>Зайцев Д.А.</i> Ингибиторная сеть Петри, исполняющая произвольную заданную машину Тьюринга .....	26
<i>Глоба Л.С., Новогрудская Р.Л.</i> Модель представления знаний на специализированном Интернет-портале в области сопротивления материалов.....	42
<i>Абдуллаева Н.А.</i> Нечеткое моделирование для оценивания и прогнозирования индекса устойчивости социальной среды .....	49

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

<i>Морозов А.В., Панішев А.В.</i> Метод гілок та меж у гальмітоновій задачі про сільського листоношу .....	57
<i>Козуля Т.В., Шаронова Н.В.</i> Розв'язання задач управління екологічною безпекою за умови реалізації концепції корпоративної екологічної системи .....	67
<i>Данчук В.Д., Сватко В.В.</i> Оптимізації пошуку шляхів по графу в динамічній задачі комівояжера методом модифікованого мурашиного алгоритму .....	78

### МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ, ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ І ТЕОРІЯ ІГОР

<i>Зак Ю.А.</i> Разбиение на подмножества и построение допустимых и оптимальных последовательностей выполнения множества заданий на нескольких машинах .....	87
--	----

### МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ, МОДЕЛІ, ПРОБЛЕМИ І ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

<i>Алишов Н.И., Марченко В.А., Мищенко А.Н.</i> Алгоритмы замены контейнеров-ключей при потоковом шифровании информации методом косвенного шифрования .....	102
---	-----

### МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ В УМОВАХ РИЗИКУ І НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

<i>Згуровський М.З., Зайченко Ю.П.</i> Комплексный анализ риска банкротства корпораций в условиях неопределенности. Часть 2 .....	111
<i>Кологривов Я.І.</i> Побудова сценаріїв розвитку світової економіки до 2030 р. у контексті великих економічних циклів Кондратьєва .....	125

### НОВІ МЕТОДИ В СИСТЕМНОМУ АНАЛІЗІ, ІНФОРМАТИЦІ ТА ТЕОРІЇ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

<i>Бохонов Ю.Є.</i> Про один підхід до знаходження періодичних розв'язків нелінійного звичайного диференціального рівняння другого порядку .....	138
Реферати .....	144
Відомості про авторів .....	149

# SYSTEM RESEARCH AND INFORMATION TECHNOLOGIES

2 • 2012

## CONTENTS

### PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES, HIGH-EFFICIENCY COMPUTER SYSTEMS

<i>Zgurovsky M.Z., Petrenko A.I.</i> Processing of scientific data in the conditions of the information «boom» .....	7
<i>Zaitsev D.A.</i> Inhibitor Petri Net, which performs any given Turing machine .....	26
<i>Globa L.S., Novogrudsca R.L.</i> Knowledge representation model on specialized internet-portal in the field of materials strength .....	42
<i>Abdullayeva N.A.</i> Fuzzy modeling to assess and forecast the index of stability of the social environment .....	49

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

<i>Morozov A.V., Panishev A.V.</i> The branch-and-bound method in Hamiltonian rural postman problem .....	57
<i>Kozulja T.V., Sharonova N.V.</i> Problem solving of environmental safety management on basis of corporate ecological system concept realization .....	67
<i>Danchuk V.D., Svatko V.V.</i> Optimization of ways search by a graph in the dynamic task of traveling salesman by the method of the modified ant algorithm .....	78

### METHODS OF OPTIMIZATION, OPTIMUM CONTROL AND THEORY OF GAMES

<i>Zak Yu.A.</i> Partition into subsets and building admissible and optimal sequence of the tasks set performance on multiple machines .....	87
--	----

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

<i>Alishov N.I., Marchenko V.A., Mischenko A.N.</i> Algorithms for replacement of keys-containers during streaming encoding information using indirect encryptions .....	102
--	-----

### METHODS OF SYSTEM ANALYSIS AND CONTROL IN CONDITONS OF RISK AND UNCERTAINTY CONDITIONS

<i>Zgurovsky M.Z., Zaychenko Yu.P.</i> Complex rankruptcy risk analysis of the enterprises under uncertainty. Part 2. ....	11
<i>Kologrivov Ya.I.</i> Building of scenarios of the world economy development by 2030, in the context of large economic cycles by Kondratiev .....	125

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

<i>Bokhonov Ju.Ye.</i> About one approach to determination of periodic solutions of a nonlinear ordinary differential equation of the second order .....	138
References .....	144
Information about the authors .....	149

**ОБРОБЛЕННЯ НАУКОВИХ ДАНИХ  
В УМОВАХ ІНФОРМАЦІЙНОГО «БУМУ»**

**М.З. ЗГУРОВСЬКИЙ, А.І. ПЕТРЕНКО**

Сучасна наука (е-наука) базується на обробленні потенційно величезних обсягів інформації. Розглянуто тенденції та перспективи розвитку е-науки в умовах інформаційного «буму», які охоплюють питання забезпечення якості та сумісності даних, використання метаданих і семантики даних, довгострокового їх збереження, інтелектуального оброблення та пошуку даних в існуючих джерелах, впливу даних на вибір платформи й її сервісно-орієнтованої архітектури, перспективи об'єднання Грід і хмарних обчислень, а також європейські ініціативи з цієї тематики.

**ВСТУП**

На початку ХХІ ст. постало питання: «Як багато інформації є у світі?» і було запропоновано декілька методик для оцінювання обсягу інформації [1]. Із 2000 р. та 2003 р. група дослідників у Берклі, оцінюючи кількість створеної інформації, дійшла висновку, що «більшістю від загального обсягу нової інформації є голосовий телефонний трафік зі своїм унікальним контентом (97 %)». У 2007–2008 рр. IDC (International Data Corporation — Міжнародна корпорація даних) підрахувала, що в 2007 р. «обсяг усього можливого для використання простору жорстких дисків, касет, CD, DVD і пам'яті (енергозалежної та енергонезалежної) склав 264 екзабайтів (1 екзабайт =  $10^{18}$  байт), а в 2010 р. — майже 2 зетабайта (1 зетабайт =  $10^{21}$  байт)». У 2008 р. дослідження зосередились на інформації, що споживається людьми при взаємодії з медіа пристроями, при цьому комп'ютерні ігри та фільми складають 99,2 % від цієї інформації. Упровадження широкопasmового Інтернету призвело до безперервного прискорення телекомунікаційного зв'язку (середньорічний темп зростання в 6 % для 1986–1993 рр., 23 % для 1993–2000 рр. і 60 % за 2000–2010 рр.). Людина хоче отримувати інформацію скрізь — на роботі, вдома, в авто, під час прогулянки тощо.

Бачення компанії IBM на зростання обсягів інформації у світі, яке враховує можливості Інтернет і жорстких дисків, відображено на рис. 1.

До оцінки зростання технологічного потенціалу оброблення інформації можна застосувати закон Мура, згідно з яким потужність комп'ютерів для оброблення інформації подвоюється приблизно в два рази кожні 14 місяців

протягом останніх десятиліть, у той час як для суперкомп'ютерів потужність подвоюється кожні 18 місяців. Зараз людство може зберігати кілька оптимально стиснутих зетабайтів даних на різних пристроях (рис. 2) і виконувати  $7 \cdot 10^{19}$  операцій за секунду на обчислювальних пристроях різного типу (рис. 3).

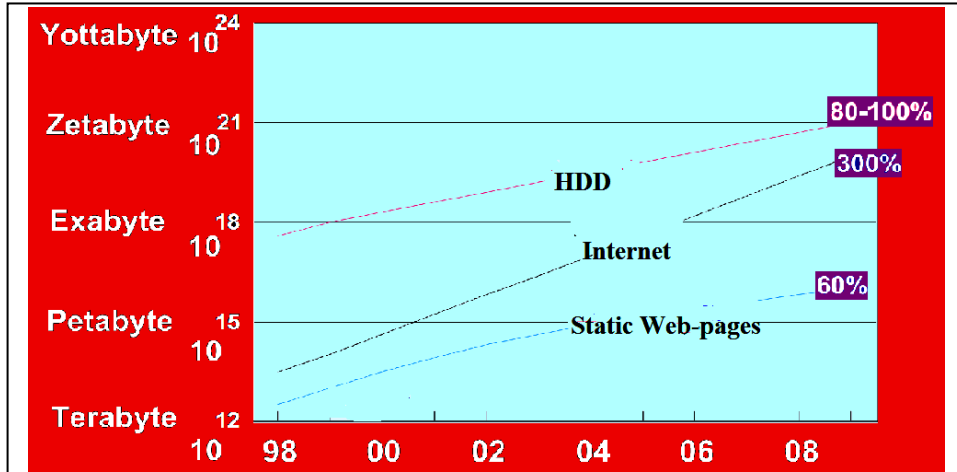


Рис. 1. Експоненційне зростання інформації у світі за даними ІВМ

Щорічно їхній обсяг зростає на 58 %, двонаправлена передача даних на 28 %, кількість збереженої інформації на 23 % [1].

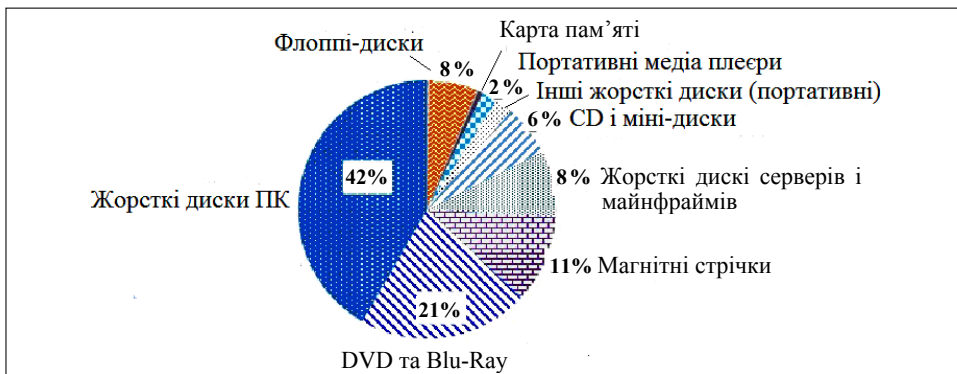


Рис. 2. Розподіл частки збереження даних різними засобами у світі

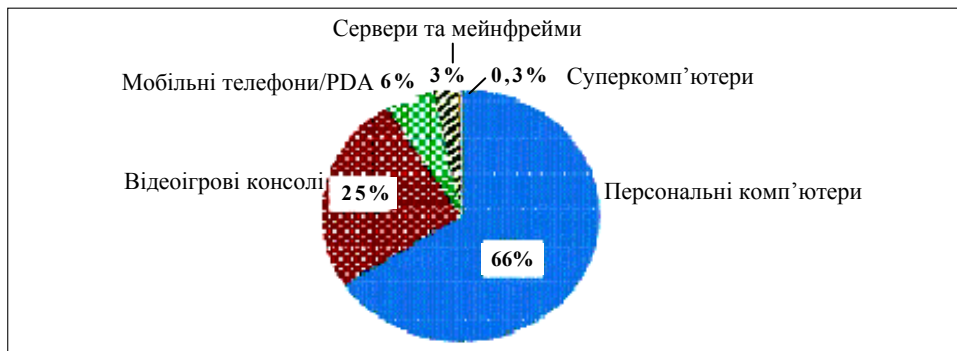


Рис. 3. Розподіл частки обчислення інформації різними засобами у світі



Варто зазначити, що ще з 2007 р. технологічні можливості людства виявилися недостатніми для збереження всієї інформації, яка генерується. Тому постає важливе питання відбору і тривалого збереження тієї частини інформації, яка забезпечує функціонування суспільства та визначає його ідентичність та перспективи подальшого розвитку. І таку ситуацію не може змінити поява таких велетенських сховищ, як Spectra T-Finity обсягом 3,6 екзабайтів даних.

Нас цікать, перш за все, стан і перспективи використання наукових даних, тому що вони визначають прогрес у розвитку земної цивілізації (табл. 1).

**Таблиця 1.** Різні категорії наукових даних

Категорії даних	Фізика/хімія	Гео-/астро-науки	Біологічні науки
Дані, які можуть бути виміряні повторно	Більшість даних	Геологічні структури, зафіксовані зірки	Більшість даних
Дані, які можуть бути виміряні лише один раз	Більшість даних	Спалахи сонця, виверження вулканів, нові зірки	Рідкісні зразки скам'янілості
Незалежні від розташування	Більшість даних	Тектоніка мінералів	Більшість даних
Залежні для розташування	Більшість даних	Скелі, метеорологічні дані, астрономічні дані, скам'янілості	Рідкісні зразки скам'янілості
Первинні отримані під час спостереження або експериментальні дані	Кристаліграфічні дані, оптичні спектри	Сейсмографічні, погодні дані та їх записи	Фізіологічні дані (наприклад, кров'яний тиск), біохімічні дані (наприклад, композиція тканин і органів)
Комбінації первинних даних за допомогою теоретичної моделі	Фундаментальні константи кристалічних структур	Розподіл температури на поверхні сонця	Генетичні коди, модель м'язів і судин
Дані, які отримано теоретичним обчисленням	Властивості молекул	Сонячні затемнення	Передбачення поведінки залежно від генотипу
Визначені (детермістичні) дані	Більшість макроскопічних даних	Елементи планетарних орбіт	Розташування гена в хромосомах
Стохастичні дані	Дані полімерів, чутливі до їх структури	Склад ґрунтів і кам'яних структур, частота сонячних спалахів за одиничний інтервал	Більшість даних
Кількісні дані	Більшість даних	Метеорологічні та сейсмічні дані	Фізіологічні та біохімічні дані
Напівкількісні дані	Масштаб твердості матеріалів	Масштаб сили вітру	Фізіологічні та біологічні дані
Якісні дані	Формули хімічних структур, властивості нуклідів	Класифікація кам'яних структур, класифікації зоряних спектрів	Таксономічна класифікація організмів, послідовності амінокислот
Дані, які подані числами	Значення параметрів і констант	Метеорологічні дані	Фізіологічні та біохімічні дані
Дані, які подані графами або моделями	Фазові діаграми, стереоскопічні молекулярні діаграми, моделі молекул	Геологічні карти, погодні карти, карти неба на специфічній радіочастоті (наприклад 21 см)	Електроенцефалограми, електрокардіограми
Символічні дані	Математичні моделі та формули	Математичні моделі	Математичні моделі

Наукові інструменти та комп'ютерне імітаційне моделювання породжують величезні обсяги даних, для аналізу й організації яких потрібні нові наукові методи. Щороку обсяги наукових даних майже подвоюються, зараз йдеться про обробку петабайтних наборів даних (1 петабайт=10<sup>15</sup> байт). За оцінками вчених у наступні п'ять років буде вироблено наукових даних більше, ніж за всю історію людства [2]. Оскільки нові наукові інструменти володіють винятковою точністю, так само швидко поліпшується якість даних. Для аналізу цих даних з метою знаходження «тонких» ефектів, які не були враховані в попередніх дослідженнях, потрібні алгоритми, які одночасно можуть працювати з величезними наборами даних і виявляти при цьому дуже «тонкі» ефекти, які залишилися невиявленими за попередніми вимірюваннями. Обсяги інформації, що створюється, величезні і вони впливають не тільки на розвиток природознавчих, але й гуманітарних та соціальних наук, а також на науки про життя та здоров'я.

Це лавиноподібне зростання обсягів даних, або інформаційний «бум» призводить до нових підходів їх оброблення, коли дослідники вживають методи та засоби, керовані даними. Великі обсяги даних сприяють можливості нових наукових відкриттів, але при цьому створюють труднощі, пов'язані зі збереженням, пошуком і доступом до даних з їх аналізом.

Переконливим прикладом джерела петабайтних наборів даних є Великий Андронний Коллайдер, який працює в CERN (European Particle Physics Laboratory — Європейський центр фізики високих енергій) і який вироблятиме приблизно 10 петабайтів необроблених даних у галузі фізики високих енергій за рік і додатково створюватиме 100 петабайт оброблених даних за рік, що записані на дисках для наступного аналізу. Потрібна величезна обчислювальна потужність для оброблення такої кількості даних, які за допомогою Грид-інфраструктури WLCG (Worldwide LHC Computing Grid — світовий обчислювальний Грид Великого Андронного Коллайдера) [3] розподіляються до комп'ютерних центрів у 34 різних країнах на шести континентах. Крім того, керівництво CERN запрошує волонтерів, які згодні надати свої персональні комп'ютери для того, щоб допомагати обробляти дані коллайдера. За інформацією Геннадія Зінов'єва (завідувача відділом фізики високої щільності енергії Інституту теоретичної фізики ім.Боголюбова НАН України, представника України в CERN) ця ініціатива отримала широку підтримку у світі і з'явилися навіть цілі сім'ї, готові обробляти інформацію.

Іншим прикладом подібного джерела даних може слугувати новітній телескоп з міжнародного проекту SDSS (Sloan Digital Sky Survey — Слоунівський цифровий огляд неба), за допомогою якого досліджується спектр зірок на хвилях за межами видимого спектра, і за допомогою якого очікується отримання вже в перший рік його експлуатації 1,28 петабайтів інформації, що більше, ніж дав будь-який інший телескоп за всю історію. Кількість даних, доступних астрономам, постійно зростає зі зростанням кількості спостережень, які зроблені наземними чи космічними телескопами у всьому електромагнітному спектрі. Петабайтні набори даних притаманні проекту GEOSS (Global Earth Observation System of Systems — система систем глобального обстеження Землі), який базується на використанні супутникових даних для багатьох галузей господарства: прогнозування погоди та можли-

вих врожаїв, спостереження змін клімату й екологічного стану, розповсюдження стихійних лих (поводів, пожарів, засухи) та багато ін. [4]. А також проекту EISCAT (European Incoherent Scatter Scientific Association — Європейська наукова Асоціація некогерентного опромінювання), який за допомогою 100000 елементів радарних антен, розташованих у Норвегії, Фінляндії та Швеції, здійснює радарне дослідження від верхньої стратосфери до магнітосфери і далі з мікросекундною щільністю. Ця система генерує декілька терабайтів даних за день, її теперішня архітектура архівації і розподілення даних не дозволяє впоратися з таким обсягом даних, тому проектом передбачається використання нових технологій в розповсюдженні даних у відкритому доступі [5]. Перелік подібних проектів можна було б значно розширити. Слід відмітити вагомий роль міжнародної організації CODATA (Committee on Data for Science and Technology — Комітет з даних для науки і техніки) й її ініціатив ADMIRE (Advanced Data Methods and Information technologies for Research and Education — передові методи даних та інформаційні технології для досліджень і освіти), SD3 (The Scientific Data across the Digital Divide — наукові дані через цифровий вододіл) та GICSI (Global Information Commons for Science Initiative — глобальні інформаційні спільноти для наукових ініціатив) з організації збору, розміщення та використання даних, що відносяться до різних предметних галузей [6].

Завдання на сьогодні полягає в забезпеченні можливості зберігання постійно зростаючих обсягів даних і їх доступності для спільного використання, у наданні вченим ефективних засобів оброблення даних.

## **ЯКІСТЬ І СУМІСНІСТЬ**

«Сирі» дані, які отримані від інструментів або в результаті моделювання, надалі оброблятимуться. За термінологією NASA, «сирі» дані рівня 0 вивіряються та виправляються до наборів даних рівня 1, які комбінуються з іншими даними, породжуючи набори даних рівня 2. При цьому велика частина аналітичної роботи проводиться саме з наборами даних рівня 2, а в разі виявлення аномалій виконується «спуск» до даних рівня 1. Величезну кількість даних доведеться задалегідь обробляти для зменшення їх обсягу перед подальшим аналізом, але кожна стадія попереднього оброблення зменшує цю гнучкість.

Більшість дослідників витрачають багато часу на створення даних і значно менше часу на їх підготовку до розповсюдження (curating). Коли розглядається стаття для публікації, дані, що лежать в основі її висновків, рідко додаються та перевіряються. Проте це ключове положення для побудови вірогідної бази знань, що використовується і може бути доступна для майбутнього дослідження. Якість наукових даних визначається:

- властивою їм науковою суттю;
- форматом, в якому запам'ятовуються дані;
- документацією щодо наукових даних, або метаданих (даних про дату створення, джерело походження, ім'я власника даних) і контекстуальною інформацією.

У той час, як дослідники, можливо, підтримують ідею формалізації оцінки якості даних, виникає сумнів про те, чи це працюватиме на практиці. Перепони, що виникають, включають труднощі пошуку рецензентів, які мають достатню кваліфікацію, щоб зрозуміти й оцінити дані, і які згодні попрацювати, а також брак часу і грошей, потрібних для здійснення формального процесу рецензування даних. Хоча відкритий доступ до даних стає більш визнаним, він ще не є дійсністю для всіх наукових галузей, тому дослідники часто не мають достатнього стимулу, щоб робити свої дані доступними для використання іншими користувачами. Наукова спільнота традиційно визнає наукову публікацію, а не дані чи програмне забезпечення, які сприяли появі публікації. Але відношення до оприлюднення даних почало змінюватися. Нещодавно в Нідерландах фірмою DANS було винайдено метод для оцінки якості наукових даних, який називається «Data Seal of Approval» (DSA — Схвалення даних) [7]. Створений для суспільних наук DSA може також бути застосований до природознавчих наук, при цьому він гарантує, що наукові дані, які досліджуються, матимуть необхідну якість і можуть бути знайдені, визнані та використані надійно.

Варто вирішити питання про єдиний формат даних замість численних стандартів, по суті, по одному для кожної наукової дисципліни. Тому обмін даними поза кожної групи науковців стає проблематичним. Вимагається новий підхід із використанням розумних індексів і методів організації даних для скорочення обсягу пошуку; паралельної обробки та доступу до даних під час виконання пошуку у величезних наборах; потужних засобів аналізу, які можна було б застосувати до піднабору аналізованих даних.

Щоб сумісність була успішною, необхідні стандарти. Наприклад, використання метаданих може сприяти сумісності баз даних, оскільки дані можуть вживатися, інтерпретуватися і тлумачитися однаково. У суспільних науках центри даних регулярно використовують стандарт Data Documentation Initiative Metadata (метадані ініціативи документації даних). Наукові дисципліни також починають розвивати стандартизовану систему метаданих таким чином, щоб набори даних для різних наукових дисциплін були сумісними. Через Virtual Observatory (віртуальна обсерваторія) астрономами демонструють хороший приклад сумісності на практиці.

Прототипами можуть стати формати HDF (Hierarchical Data Format — ієрархічний формат даних), NetCDF (Network Common Data Form — мережева загальна форма даних) та FITS (Flexible Image Transport System — гнучка система передачі зображення), які забезпечують незалежний від платформи спосіб читання масивів, а також формати XML (eXtensible Markup Language — розширювана мова розмітки) та RDF (Resource Description Framework — модель представлення даних), що використані для побудови веб-сервісів, які забезпечують доступ через Інтернет до функцій будь-якої програми.

Рішення проблем сумісності в управлінні (менеджменті) даними є ключовим, щоб гарантувати доступність і можливість використання даних в інших наукових галузях.

## ДАНИ ПРО ДАНИ (МЕТАДАНИ)

Сьогодні для аналізу наукових даних використовуються такі технічні можливості:

- метадані та стандарти метаданих, які забезпечують розуміння даних одночасно людьми і програмами та дозволяють відстежувати походження даних;
- інструментальні засоби аналізу, які полегшують ученим процедури формування запитів і розуміння відповідей на них;
- паралельний доступ до даних, який підтримується новими індексними схемами та новими алгоритмами, і який дозволяє в інтерактивному режимі досліджувати петабайтні набори даних.

Для забезпечення простого доступу до даних, їх взаємообміну й інтеграції необхідно перейти до використання метаданих, або інформації про дані, наприклад, вимірювані атрибути, їх імена, одиниці виміру, точність, формат даних тощо. Найважливішим є те, що метадані включають інформацію про походження даних — як дані вимірювалися, генерувалися або обчислювалися. Бажано, щоб більшість із цих метаданих мала б генеруватися та використовуватися автоматично, при цьому знижувати інтелектуальне навантаження на вченого. Наявність добротних метаданих стає основною умовою спільного використання даних у різних наукових дисциплінах і для різних засобів аналізу та візуалізації даних.

Майже в кожній дисципліні нині ведуться роботи зі створення *онтологій* (званою також керованим словником). Це значно полегшує побудову інструментальних засобів, оскільки загальна згода щодо базових понять допомагає під час розробки засобів аналізу. Онтології, що використовуються комп'ютерами, допомагають побудувати семантичний веб, в якому додатки є сумісними на семантичному рівні, а не тільки синтаксично сумісними, як це реалізовано сьогодні під час використання поточного покоління веб-сервісів на основі інтерфейсів, що типізуються. Для реалізації елементарної семантичної алгебри може використовуватися SQL (Structured Query Language — мова структурованих запитів). Використання XML в сучасних системах управління базами даних (СУБД) відкриває двері для існуючих стандартів RDF та OWL (Web Ontology Language — мова опису онтологій для семантичного веб) [8].

Семантичні веб-технології можуть бути використані для:

- *інтеграції* даних, за допомогою якої дані з різних сховищ і різними форматами можуть бути застосовані в одному цілісному додатку;
- *відкриття* ресурсів і їх класифікації, щоб забезпечити кращу роботу систем пошуку даних;
- *каталогізації* опису контенту та змістових зв'язків даних, доступних на веб-сайті, сторінці або цифровій бібліотеці;
- *підтримки* інтелектуальних агентів програмного забезпечення з метою полегшення спільного використання й обміну знаннями;
- *оцінки* контенту;
- *опису* колекцій сторінок, які являють єдиний логічний «документ»;

- *опису* інтелектуальних прав власності веб-сторінок.

Семантичний веб-портал призначається для користувачів і забезпечує авторизований доступ певної групи користувачів до специфічних інформаційних ресурсів: баз даних, електронних архівів, програм тощо. Важливою функцією порталу є також організація взаємодії користувачів, наприклад, з іншими користувачами в складі проектної команди або віртуальної організації. Важлива також функція візуалізації, успіх якої визначається можливістю відображення запиту, сформульованого в концептуальному середовищі онтології предметної області, в запит(и) сервера аналізу (мета) даних.

Завдання на сьогодні: створити додаткові важливі інформаційні сервіси та надати можливість користувачеві об'єднувати дані більше, ніж з одного джерела інформації, поєднувати функціональності різних програмних інтерфейсів.

## ДОВГОСТРОКОВЕ ЗБЕРЕЖЕННЯ ДАНИХ

Для того, щоб дослідники в майбутньому могли використовувати дані, створені зараз, необхідне тривале їх збереження. Потрібний не лише менеджмент нових даних, але і дані, які створені в минулому, потребують також відповідного упорядкування та збереження. Перш за все, необхідні метадані, щоб надати дослідникам можливість зрозуміти дані, використовувати їх багато разів і повторювати, якщо потрібно, роботу колег.

Наприклад, тривале збереження даних дуже важливе в галузі електронної медицини. Ніхто не знає під час формування записів, скільки разів і коли вони знадобляться, тому спеціальні пошукові системи мають бути впроваджені для забезпечення майбутньої доступності та сумісності даних, що архівуються, з новими даними. Дуже важливо забезпечити безпеку цих записів. У разі електронних медичних записів лікарі, лікарні, страхові компанії і самі пацієнти, можливо, вимагатимуть доступу до них протягом десятиліть у майбутньому. Крім того, вони, можливо, будуть використані представниками різних країн з різними правилами, які можуть змінюватися в часі.

Еволюція технологій така, що програми, які були використані для створення інформації, імовірно, не будуть доступні в майбутньому для тих, хто побажає вивчити дані, що були архівовані. Можливе рішення полягає в збереженні даних в інваріантному для часу способі, наприклад, за допомогою мови XML, яка є набором правил для шифрування документів електронним засобом.

У галузі збереження даних бібліотеки та репозитарії можуть відігравати ключову роль. Бібліотекарі мають довгу історію підтримки записів, і могли б використовувати ці навички, щоб допомагати розповсюджувати і запам'ятовувати дані. Надаючи цю відповідальність централізованому обслуговуванню, дослідники мають бути впевнені, що дані запам'ятовуються, доступні та використовуються надійним сталим засобом для багатьох різних дисциплін. В Європі, наприклад, ЕС забезпечує доступ до інформації, що зберігається європейськими бібліотеками, архівами, музеями й аудіовізуальними архівами через Digital Libraries Initiative (Ініціативу цифрових бібліотек) [9].

Відпрацьована та поширена сьогодні реляційна база даних нікуди не зникне, але скоро з'являться інші види баз даних, наприклад, потокові. Це означатиме істотний відхід від того, що ІТ відділи та ділові користувачі використовували протягом десятиліть.

Потрібне впровадження нового покоління об'єктно-реляційних систем баз даних, які сприймають будь-який тип даних (чи то звичайне число, масив, рядок символів або складений об'єкт, такий як XML або HTML-документ) як інкапсульований тип, значення якого можуть зберігатися в полі запису. Такі системи баз даних забезпечують потужний асоціативний пошук (пошук за значенням, а не за місцем розташування), а також автоматичний паралельний доступ і виконання, що істотно для аналізу петабайтних даних. Розглянуті системи приховують поняття файла (він є всього лише контейнером даних) і працюють із колекціями даних. Вони забезпечують непроцедурний і паралельний пошук даних для швидкого знаходження піднаборів даних і можуть утворювати федеральні об'єднання багатьох різних джерел даних, дозволяючи програмам бачити їх як єдину колекцію даних. Вони також дозволяють програмам спиратися на будь-які атрибути даних.

Можна розглядати *NetCDF*, *HDF*, *FITS* та *Google Map-Reduce* (Map & Reduce — модель розподілених обчислень компанії Google) як приклади таких систем баз даних, що зароджуються: у них є мова для визначення метаданих, декілька стратегій індексування та проста мова маніпулювання даними, набір непроцедурного і паралельного програмування, набір засобів для створення, доступу, пошуку та візуалізації даних.

## ЗНАННЯ З ДАНИХ

Нині наукова громадськість орієнтується на створення потужних інтелектуальних засобів оброблення даних вільного використання у вигляді веб-сервісів, що полегшують фіксацію, організацію, аналіз, візуалізацію та публікацію даних. Ці засоби мають здійснювати інтелектуальний аналіз даних (Data mining) і навчати користувачів на основі цих даних (machine learning — машинне навчання). При цьому налаштування їх на аналіз конкретних даних здійснювалося б простою зміною скриптів, що описують потоки робіт з аналізу даних. Це нова технологія інтелектуального аналізу даних з метою виявлення прихованих закономірностей у вигляді вагомих особливостей, кореляцій, тенденцій та шаблонів. Сучасні системи вилучення знань із «сирих» даних, що використовують, засновані на методах штучного інтелекту, засобів уявлення й інтерпретації, це полегшує пошук розчиненої в петабайтних сховищах цінної інформації. В основу технології Data Mining встановлена концепція шаблонів (pattern), що відображають фрагменти багатоаспектних взаємостосунків у даних. Цими шаблонами є закономірності, властиві підрозділам даних, які можуть бути компактно виражені у формі, яка зрозуміла людині. Пошук шаблонів проводиться методами, не обмеженими апріорними припущеннями про структуру вибірки і вид розподілів значень аналізованих показників.

Для автоматизації цих засобів важливо мати якісні метадані. Збереження та поповнення цих даних в процесі обробки (походження даних) складуть основну перевагу інструментальних засобів наступного покоління.

ІТ фахівцям потрібно тісніше працювати з науковцями, щоб визначити, де аналітичні дослідження можуть бути фактично посилені, і де передбачається належне поєднання послуг, щоб оптимізувати можливості аналітики в підприємстві в цілому.

## ПОШУК ДАНИХ

Виявлення необхідної інформації ускладнюється з появою петабайтних наборів даних. Для того, щоб керувати своїми розподіленими наборами даних, багато наукових організацій адаптують для своїх потреб SRB (Storage Resource Broker — брокер ресурсів збереження), розроблений у суперкомп'ютерному центрі в Сан-Дієго [10]. SRB — це проміжне програмне забезпечення, завданням якого є об'єднання наборів розподілених даних та представлення цих наборів користувачу як цільних та логічно зв'язаних. Індексация та отримання даних, що збережені під керуванням SRB, виконується за допомогою каталогу метаданих MCAT, який надає користувачеві можливість отримувати доступ до даних із використанням атрибутів логічних імен, а не посилань на конкретні місця розміщення тощо. Хоча такий підхід забезпечує гнучкість, але він стикається з труднощами функціональної сумісності у випадках виконання пошукових операцій на розподіленій множині даних, різні частини якої використовують різні користувацькі розширення метаданих. Оскільки SRB використовується багатьма організаціями різного профілю, кожна із них сформувала власний набір мета даних, властивий конкретній галузі, а поточні механізми пошуку використовують певні ключові слова. Для вирішення проблеми сумісності необхідно мати детальні відомості щодо структури всіх метаданих та словників, які використано в системі. Нещодавно зроблено спробу покращити SRB через онтологічні описи для підтримки довільних схем метаданих та посилення таким чином пошукових можливостей. Здатність робити логічний висновок, використовуючи інформацію із онтологій щодо відносин, дозволяє семантичним пошуковим системам долати багато з недоліків, які пов'язані з існуючими методами пошуку. Можливість формального опису взаємовідносин між різними схемами метаданих в онтології дозволяє використовувати її як посередника для об'єднання гетерогенних мультидисциплінарних репозиторіїв даних.

Інтеграція семантичної складової у систему зберігання даних полегшує також її застосування разом із різноманітними Грід-сервісами. Сенс запропонованого рішення полягає у створенні розширення до SRB, що реалізує семантичний шар над існуючим інструментарієм. Інтерфейс системи дозволяє завантажити додаткові користувацькі онтології і це розширення є незалежним від основного ядра SRB, тому немає необхідності в перекомпіляції існуючих інсталяцій. Створений таким чином додаток потребує більше часу на свою роботу, що пов'язано із проведенням логічного висновку та аналі-



зом завантажених онтологій, при чому швидкодія пошуку залежить від вживаних механізмів логічних висновків.

В цілому, інтеграція семантичної складової дозволила покращити якість та обсяг пошукових результатів системи.

## **МЕРЕЖА ЦЕНТРІВ НАУКОВИХ ДАНИХ**

За наявності петабайтних наборів даних необхідно впроваджувати новий стиль роботи наукових центрів даних. Сьогодні у більшості випадків учений копіює файли на локальний сервер і оперує наборами даних із використанням своїх власних ресурсів. Проте все частіше набори даних є настільки великими, а прикладні програми настільки складними, що економніше перемістити програми до даних і передавати в наукові центри тільки запити користувачів та отримувати на них відповіді, а не переміщати початкові дані і додатки в локальну систему користувача. Розподіл даних і програм є штучним: ніхто не може побачити дані без використання програм, а більшість програм, у свою чергу, керується даними.

Передбачається реплікація даних центрами даних у різних географічних місцях, що забезпечить доступність даних і запобіжить їх втраті. Пошкоджені дані автоматично відновлюватимуться на основі запасних копій без переривання доступу до бази даних. Для роботи з петабайтними наборами даних вимагаються величезні масиви пам'яті і тисячі обчислювальних вузлів, що сьогодні найефективніше забезпечується Грід або хмарними обчислювальними інфраструктурами.

Варто забезпечити дієву співпрацю та сумісність даних Наукових центрів різної підлеглості: як системи 53-ьох Світових центрів даних (World Data Centers — WDC), підлеглих ICSU (International Council of Scientific and Technical Information — Міжнародний комітет із наукової та технічної інформації), так і центрів, об'єднаних за федеральним принципом: центрів SDSS, NCBI (National Center for Biotechnology Information — Національний центр біотехнологічної інформації), NSIDC (National Snow and Ice Data Center — Національний центр снігових і льодових даних), MMPDN (Materials Properties Data Network — мережа даних про властивості матеріалів), Euro VO Data Centre Alliance (Європейський альянс центрів даних про віртуальні організації), AIMS Data Centre (Азійський центр даних), Databases of the European Institute for Environment and Sustainability (база даних Європейського інституту зовнішнього середовища і сталого розвитку), Google's Palimpsest (бібліотека наукових даних компанії Google) та ін. Це дозволить організувати одночасний пошук даних у семантично об'єднаних базах цих різних центрів за допомогою Грід-сервісів для різних галузей науки і техніки (фізики, хімії, біології, геофізики).

## **ПЛАТФОРМИ ВИЗНАЧАЮТЬСЯ ДАНИМИ**

Настав час, коли архітектура платформи оброблення буде вибратися за умови впорання з величезними обсягами даних і складністю управління, а не

з умов здатності підтримувати конкретні додатки (застосування). Тобто, ІТ і наукові лідери починають змінювати свою орієнтацію на вибір платформ даних: від монолітних систем з центральними серверами для обслуговування до розподілених сервісно-орієнтованих систем, в яких додатки складаються з композиції окремих веб-сервісів, що можуть бути повторно використовувані й за межами підприємства. Таким чином, прикладні послуги стають утилітами. При цьому передбачається еволюція також засобів, якими науковці ведуть дослідження, формулюючи нові виклики і можливості для ІТ. Стане ціннішою інформація для наукових структур, яку індивідууми розміщують у соціальних мережах, ніж традиційна й ізольована інформація, яку можна отримати від реєстрації індивідуумів на корпоративних веб-сайтах.

Центр тяжіння буде зміщуватися від звичних рішень для комп'ютерних систем до розвитку хмарних інфраструктур, які забезпечать збільшену функціональність і гнучкість, використовуючи змішування суспільних і приватних хмарних застосувань і платформи сервісів. Необхідно передбачити поступовий перехід до використання хмарних обчислювальних ресурсів, коли веб- і Грід-сервіси (а також Data Mining) перемістяться до SaaS (Software as a Service — програмне забезпечення як сервіс), засоби розподілення та підтримки наукових даних і ресурсів до PaaS (Platform as a Service — платформа як сервіс) і наукові центри безпосередньо до IaaS (Infrastructure as a Service — інфраструктура як сервіс).

## ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИЩОГО РІВНЯ У ВИГЛЯДІ СЕРВІСІВ

Завдяки програмним сервісам програмісти мають змогу зосередитись на тому, аби зробити їх функціональнішими із більшою ефективністю, гнучкістю, скоріше просувати їх до впровадження і ринку, також співпрацювати з предметними експертами. Далі ці сервіси стандартизуються і стають частиною застосування для вибраної прикладної платформи. Висока пропускна спроможність підключення до Інтернет і наявність стандартів дозволить програмним сервісам слугувати структурними блоками під час формування мережових застосувань вищого рівня.

## ТЕНДЕНЦІ РОЗВИТКУ ІТ ПЛАТФОРМ

Можна виділити декілька тенденцій, що характеризують сучасний прогрес у розвитку засобів ІТ:

1. Прогрес в інформаційних технологіях триває, збільшуючи темп порівняно з минулими роками.

Нові технології збереження даних з надзвичайно високими щільністю та швидкістю доступу, зростаюча пропускна спроможність оптичних ліній і сучасні нанотранзистори, забезпечують це зростання. Уже на сьогодні функціонують декілька суперкомп'ютерів із обчислювальною спроможністю, яка перевищує 10 петафлопс (1 Петафлопс =  $10^{15}$  операцій за секунду). Хоча в наступному десятилітті очікуються проявлення істотних бар'єрів для майбутнього прогресу в багатьох галузях, які пов'язані з фізичними основа-

ми сучасних технологій, але історія ІТ показала, що завжди знаходяться нові технології, які долають ці обмеження.

Цікаві можливості відкриваються у зв'язку з винайденням плівки (електронного паперу), на який можна виводити зображення. Це призведе до того, що монітори почнуть нестримно поширюватися і станеться розрив між пристроєм, через який надходить інформація, умовно кажучи, системним блоком, і монітором. Зараз ведуться активні дослідження безпроводного інтерфейсу між пристроєм та монітором, оскільки передбачається, що такі монітори будуть скрізь і користувачі зможуть під'єднуватися до ближчого та зручнішого у використанні. Під'єднання може виконуватися за допомогою мережі LTE (Long Term Evolution — назва 4G технології мобільної передачі даних), яка на відміну від Wi-Fi може забезпечити швидкість передачі до 300 Мбіт/с у повітрі.

2. Розподілені обчислення скрізь змінюють взаємодію людей і об'єктів із цифровим світом, роблячи персональні пристрої домінуючим засобом інформаційного доступу.

Перша хвиля такої взаємодії відбулася в 1980-ті рр. і зв'язала людей академічного та бізнесового суспільств електронною поштою. Друга хвиля (1990-ті рр.) дозволила науковим структурам і зростаючій кількості людей взаємодіяти через електронну пошту, мережеві браузері і засоби співпраці, засновані на Інтернет. Третя хвиля взаємодії (2000-і рр.) поєднувала штучне інтелектуальне окілля з різних об'єктів, щоденних речей і безлічі задавачів, які підключені до цифрового світу й інтегруючих ІТ, з особистою і діловою активністю людини. Четверта хвиля, що тільки розпочинається, передбачає використання природних засобів взаємодії, притаманних людям, не тільки через звичайну мову, але і мову жестів (положення тіла, пильний погляд, ручні рухи), щоб виказати свою емоцію, настрій, відношення й увагу (Multimodal Human computer interaction — багатомодальна взаємодія людини з комп'ютером), а також використання інтерфейсу, що керується контентом.

3. Застосування ІТ у майбутньому буде динамічним, адаптивним і таким, що постійно оптимізується, а також залежать від потужної ділової аналітики й управління знаннями для виживання.

Обсяги даних та інформації збільшилися не лише завдяки науковому інструментарію й автоматизації моделювання об'єктів і процесів, але й завдяки електронній комерції та автоматизації бізнесових процесів (наприклад, ERP (Enterprise Resource Planning — планування ресурсів підприємства), SCM (Supply Chain Management — системи управління ланцюгами поставок), CRM (Customer Relationship Management — управління взаємовідносинами з клієнтами)). В умовах високої конкурентоздатності тільки організації із адаптивною структурою, які здатні опрацювати ці дані, зможуть вижити та розвиватися. Досконале управління й аналіз даних дозволять успішним підприємствам швидко та гнучко реагувати на ринкові події (розпізнавати їх і реагувати). Наприклад, ланцюги статичного постачання сьогодні будуть замінені динамічною торгівлею на електронних бізнесових ринках.

4. Майбутнє ІТ-технологій пов'язане з персональними хмарними обчисленнями.

Хмарні обчислення — модель зручного за вимогою мережевого доступу до розподіленої конфігуруємої множини обчислювальних ресурсів (мереж, серверів VM (Virtual Machine — віртуальна машина), сховищ, додатків і сервісів), які можуть швидко обиратися та змінюватися з мінімальними менеджерськими зусиллями, або з мінімальною взаємодією з постачальниками послуг (рис. 4).

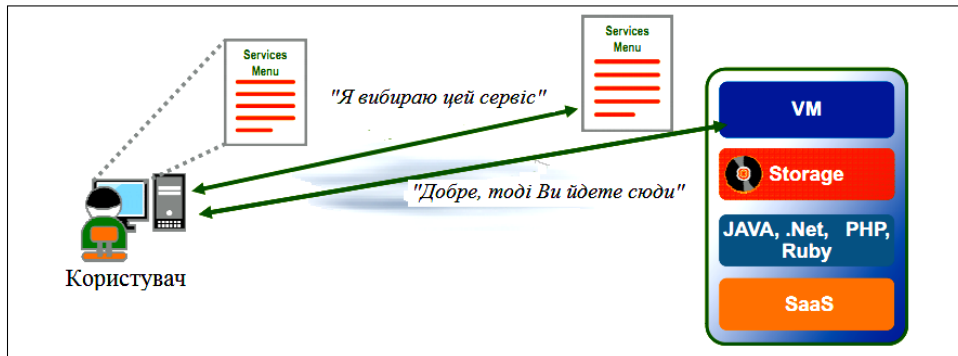


Рис. 4. Користувач у сервісно-орієнтованому середовищі

Хмарні обчислення характеризуються п'ятьма істотними властивостями (самообслуговуванням за бажанням, широкосмуговим мережевим доступом, пошуком і об'єднанням ресурсів, суттєвою гнучкістю, оцінюванням послуг); трьома згаданими вище сервісними моделями SaaS, PaaS, IaaS і чотирма моделями розгортання (приватна Хмара, громадська Хмара, соціальна Хмара, гібридна Хмара). Ключові базові технології включають: швидкі глобальні мережі, потужні, недорогі серверні комп'ютери, і високопродуктивну серверну віртуалізацію для технічного забезпечення.

Хмарна обчислювальна модель обіцяє значну економію витрат, які поєднані зі зростаючим застосуванням ІТ. Переколивим є те, що уряди та промисловість починають користуватися цією технологією в умовах нинішніх економічних труднощів. При цьому хмарні обчислення підтримують багато традиційних підходів до організації наукових центрів даних і проектуванню програмних додатків для підприємств і менеджменту. Хмарні обчислення зараз починають використовуватися, проте досі невирішені повністю питання безпеки, сумісності та гнучкості, що гальмує ширше застосування.

## ХМАРНІ ТА ГРІД ОБЧИСЛЕННЯ ДЛЯ Е-НАУКИ

Хмарні та Грід обчислення розвиваються паралельно і використовуються в сучасній е-інфраструктурі суспільства. Дослідження зв'язків між ними і тенденціями їх розвитку дозволяють краще організувати розподілені обчислення в академічних і комерційних е-інфраструктурах, об'єднуючи можливості цих двох існуючих сьогодні важливих парадигм.

Грід є об'єднанням комп'ютерів, які зазвичай належать різним власникам і географічно розподілені, але користувачі можуть розділяти доступ до

цих об'єднаних ресурсів. Прикладами можуть бути е-інфраструктури EGEE (Enabling Grids for E-sciencE — Грід-інфраструктура для наукових досліджень в Європі) в Європі та OSG (Open Science Grid — відкритий науковий Грід) у США.

Хмара є об'єднанням комп'ютерів, які належать одному власнику, але при цьому користувачі можуть орендувати доступ до цих ресурсів, що розділяються. Прикладами можуть бути Amazon's Elastic Compute Cloud (веб-сервіс, який надає обчислювальні потужності в Хмарі і належить компанії Amazon), Google's App. Engine (сервіс хостингу сайтів і web-додатків на серверах Google з безкоштовним ім'ям), IBM's Enterprise Data Centre (центр даних підприємства компанії ІБМ).

Грід і Хмари мають такі спільні ознаки: вони забезпечують доступ до відділених комп'ютерних ресурсів і забезпечують сервіси для користувачів.

Грід на сьогодні є досить поширеною формою організації розподілених обчислень, яка виникла з ініціативи наукової спільноти фізиків і стала звичною для інших галузей е-науки (концепція сформована у 1997 р., а Грід-система EGEE побудована в 2004 р.). Навпаки, Хмари знаходяться зараз на експериментальному етапі розвитку (виникли в 2007 р.) і їх послуги пропонуються лише декількома провідними ІТ-компаніями. Послуги Грід як форми співпраці науковців часто можуть бути безкоштовними, у той час, як Хмари надають лише комерційні послуги. Крім того, Грід концентрується на забезпеченні доступу до різних ресурсів *багатьох сайтів*, а Хмара розрахована на надання ресурсів із обчислень і пам'яті *на замовлення*.

Хмарні обчислення довели свою перевагу в ефективності та спрощенні обслуговування у випадках, коли користувачу потрібен доступ до сконцентрованих однорідних ресурсів. Але специфічні ІТ вимоги наукової спільноти (перш за все, з можливості співпраці) виправдовують подальше існування Грід-інфраструктур, тому що існуючі зараз комерційні Хмари ще не в змозі підтримувати складні сценарії спільних досліджень, які потребують науковці. Схожі і відмінні ознаки Грід і Хмари подані в табл. 2.

Звичайно, слід очікувати подальший розвиток хмарних послуг. Але Грід, що розвивається колективно науковою громадою, у своїх послугах, здається, буде завжди випереджати послуги Amazon та Google та ін., тому що науковці добре розуміють, що їм потрібно, і концентрують свої зусилля на оперативному задоволенні своїх потреб в інтересах розвитку науки.

Природно постає питання про доцільність і можливість об'єднання Грід- і хмарних сервісів, і про можливі здобутки від цього для різних галузей науки, починаючи з ядерної фізики та закінчуючи генною інженерією. Очікуються, що такі здобутки будуть корисними як для користувачів (зменшення коштовності та тривалості обчислень), так і для провайдерів (зменшення операційних витрат на підтримку функціонування Грід-сайтів).

Хмари можуть успішно використовуватися як локальні ресурси, а Грід об'єднувати ці ресурси в національні е-інфраструктури. Тому доцільно дослідити наслідки використання хмарних технологій (наприклад віртуалізації) в існуючих Грід-інфраструктурах, з одного боку, і можливості побудови Грід-сервісів поверх віртуальних інфраструктур, з іншого.

Таблиця 2. Схожість і розбіжність Грід і Хмари

Ознака	Грід (наприклад EGEE)	Хмара (наприклад Amazon)
Призначення	Забезпечує доступ до обчислювальних ресурсів і пам'яті, що спільно використовуються з комп'ютера користувача	Забезпечує доступ до обчислювальних ресурсів і пам'яті, що орендуються з комп'ютера користувача
Провайдери	Спільнота дослідницьких інститутів і університетів по всьому світі	Великі індустріальні компанії
Користувачі	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Спільнота вчених</li> <li>• Віртуальні організації, складені вченими, які розміщені по всьому світу</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Малі та середні комерційні фірми</li> <li>• Учені, яким потрібні великі обчислювальні потужності</li> </ul>
Платники за послуги	Державні провайдери та наукові організації, які отримують громадські гранти	Провайдери Хмари сплачують за комп'ютерні ресурси, а користувачі — за їх оренду
Розташування	В обчислювальних центрах, розподілених за різними сайтами, країнами і континентами	У приватних центрах даних провайдерів Хмар, які часто централізовані
Функціонування	Грід є відкритою технологією. Користувач і провайдер можуть приймати участь у менеджменті Грід-системи	Хмара є приватною технологією. Тільки провайдер ресурсів знає точно, як в його Хмарі здійснюється менеджмент даних, обслуговування черг, організовано захист даних тощо
Причини використання	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Немає потреби створювати та підтримувати свій власний комп'ютерний центр.</li> <li>• Можна виконати більший обсяг робіт і вирішити складніші задачі.</li> <li>• Можна обмінюватися даними з членами вашої розподіленої команди</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Немає потреби створювати і підтримувати свій власний комп'ютерний центр.</li> <li>• Можна швидко отримати додаткові ресурси під час роботи</li> </ul>
Корисність	Грід-системи було впроваджено для вирішення безлічі задач із обмеженим часом виконання, які потребують або виробляють великі обсяги даних	Хмари краще підтримають довгострокові сервіси і задачі зі значним часом виконання
Переваги	<p><b>Співпраця:</b> Грід надає платформу для розподіленої співпраці вчених.</p> <p><b>Власність:</b> провайдери ресурсів зберігають власність на ресурси, які вони внесли в Грід.</p> <p><b>Прозорість:</b> Грід-технології є відкритими, що посилює довіру та робить процеси прозорими.</p> <p><b>Пружність:</b> Грід-систему розміщено на багатьох сайтах, що зменшує ризик у випадку відмови одного з сайтів</p>	<p><b>Гучність:</b> користувач може швидко збільшити ресурси, потрібні йому для забезпечення піку активності, без довгого погодження й очікування.</p> <p><b>Надійність:</b> провайдер ресурсів бере на себе фінансові зобов'язання із забезпечення якості послуги, що надається (наприклад, Amazon повертає користувачу частково кошти, якщо обсяг послуги знизиться на 99,9 %).</p> <p><b>Простота використання:</b> користувач може порівняно просто та швидко почати вирішувати свої задачі</p>
Недоліки	<p><b>Надійність:</b> Грід базується на множині розподілених сервісів, які підтримуються розподіленим персоналом, що може призводити до їх неузгодженості.</p> <p><b>Складність:</b> будувати й експлуатувати Грід складно, тому користувач повинен мати певний рівень досвіду</p>	<p><b>Загальність:</b> Хмари не пропонують багатьох високорівневих сервісів, які притаманні Грід.</p> <p><b>Безпека:</b> користувач з цінними даними може не довіряти їх зовнішньому провайдеру.</p> <p><b>Непрозорість:</b> технології, що використовуються в Хмарах для гарантії надійності та безпеки, не є публічними.</p> <p><b>Жорсткість:</b> Хмара зазвичай розміщується на одному сайті, що збільшує ризик виходу з ладу всієї системи</p>

## ЄВРОПЕЙСЬКІ ІНІЦІАТИВИ

Для науки про інтенсивні дані (Data Intensive Sciences — науки з інтенсивним використанням даних), на жаль, поки що немає жодних Європейських проектів, подібно тим, що мають місце в галузях мережеских технологій, високопродуктивних обчислень і Грід та хмарних технологій. Тому e-IRG (e-Infrastructure Reflection Group — група супроводження e-інфраструктур) вирішила разом з ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures — Європейський форум стратегічного розвитку наукових інфраструктур) створити групу спеціального призначення, щоб узагальнити численні Європейські ініціативи, які пов'язані з менеджментом наукових даних, і сприяти визначенню загальних принципів і практик у цій галузі. Звіти e-IRG [13] підкреслюють важливість метаданих у допомозі полегшити довгострокове збереження даних і рекомендують постійно (незмінне у часі) сприяття сховищам збережених даних. Програми PARADE (Partnership for Advanced Data in Europe — співпраця для важливих даних у Європі) та GRL2020 (Global Research Library 2020 — бібліотека глобальних досліджень 2020) також підтримують такі заклики [14]. Біла книга PARADE [15] призвала до широкої співпраці з менеджменту даними для допомоги в їх збереженні й обробленні. Програма GRL2020 прийшла до подібного висновку, запропонувавши Європейським державам працювати разом, щоб розвивати інструменти та методи для довгострокового збереження даних.

Європейська Комісія розпочала низку проектів: від METAFOR, який пов'язаний із даними зі зміни клімату, до IMPACT, що досліджує структури протеїнів, які охоплюють оброблення наукових даних в європейській e-інфраструктурі e-IRG. У кінці 2009 р. було опубліковано звіт e-IRG, що містить рекомендації щодо стану та майбутнього цієї інфраструктури, а саме:

- переконати дослідників приводити описи метаданих, їх потрібно створювати одночасно з даними і вони мають бути з доступними для постачальників ресурсів і послуг;
- поліпшити доступ до наборів даних, враховуючи зв'язки з оригінальними матеріалами дослідження та джерелами походження;
- заохочувати до створення міждисциплінарних і неспецифічних для вибраної дисципліни даних;
- підтримувати комунікацію та співпрацю між виробниками даних (для кращої сумісності і багатократного використання рішень) та інфраструктурою;
- скоординувати європейські міжнародні зусилля з отримання технічних, організаційних і політичних вимог для побудови екосистем глобальної інфраструктури наукових даних (GRDIs — Global Research Data Infrastructures), оскільки сьогодні швидко зростаюча кількість наукових даних архівуються в розподілених сховищах, при чому кожен із них має специфічний доступ і технології управління, використовує різні формати файлів та інструменти метаданих.

Європейська Комісія також приділяє велику увагу розвитку хмарних технологій в Європі, хоч поки в Європі (на відміну від США) немає постачальників хмарних обчислень [18].

## ВИСНОВКИ

Доступ до інформації взагалі та до наукових даних зокрема критичний до безперервного наукового та технологічного прогресу. Після обговорення різноманітних інформаційних вимог і тенденцій розвитку ІТ можна зробити такі висновки:

- сучасні інформаційні ресурси та механізми їх використання мають враховувати постійно наростаючий «інформаційний бум», завдяки чому щороку обсяги наукових даних майже подвоюються;
- зараз йдеться про обробку петабайтних наборів даних, що потребує розроблення інтелектуальних методів організації даних для скорочення обсягу пошуку, паралельної обробки та доступу до даних під час пошуку у величезних наборах;
- за наявності петабайтних наборів даних вимагається нова методологія роботи наукових центрів, яка передбачає переміщення прикладних програм до даних і передачу в наукові центри тільки запитів і отримання відповіді, а не переміщення початкових даних і додатків у локальну систему користувача;
- для роботи з петабайтними наборами даних вимагаються величезні масиви пам'яті та тисячі обчислювальних вузлів, що сьогодні найефективніше забезпечуються Грід- або хмарними обчислювальними інфраструктурами;
- для забезпечення простого доступу до даних, їх взаємообміну й інтеграції необхідно перейти до використання метаданих, або самоописів, а також онтологій, які забезпечують розуміння даних як інструментальними засобами, так і людьми;
- нині платформа оброблення даних визначається більше самими даними, а її архітектуру орієнтовано на сервіси, з яких процедурою композиції можна за бажанням користувача складати прикладні додатки оброблення даних. Серед головних принципів такої SOA (Service-Oriented Architecture — сервісно-орієнтована архітектура) виокремлюють такі: максимальне повторне використання, модульність, здатність до поєднання (композиції), функціональна сумісність, відповідність стандартам;
- бажано об'єднати можливості хмарних і Грід-обчислень для посилення засобів е-науки.

Важливо в наступні роки забезпечити можливість збереження постійно зростаючих обсягів даних, зробити їх ефективно керованими і доступними для спільного використання, надати вченим ефективні розподілені засоби інтелектуальної обробки даних.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Martin Hilbert, Priscila López. The World's Technological Capacity to Store, Communicate, and Compute Information*, 10 February, 2011. — [www.sciencexpress.org / 10 February 2011 / Page 5 / 10.1126/science.1200970](http://www.sciencexpress.org / 10 February 2011 / Page 5 / 10.1126/science.1200970).
2. *Accenture Technology Vision 2011. — The Technology Waves That Are Reshaping the Business Landscape.* — [www.accenture.com/us-en/technology/technology-labs/Pages/insight-accenture-technology-vision-2011.aspx](http://www.accenture.com/us-en/technology/technology-labs/Pages/insight-accenture-technology-vision-2011.aspx).



3. *WLCG*. — <http://lcg.web.cern.ch/lcg/>.
4. *GEOSS*. — [www.epa.gov/geoss/](http://www.epa.gov/geoss/).
5. *EISCAT*. — [www.eiscat.uit.no/index.html](http://www.eiscat.uit.no/index.html).
6. *CODATA*. — [www.codata.org/](http://www.codata.org/).
7. *DSA*. — [www.datasealofapproval.org/](http://www.datasealofapproval.org/).
8. *David R. Lide*. The impact of information technology on the access to science. — <http://archive.unu.edu/unupress/unupbooks/uu07ee/uu07ee05.htm>.
9. *Digital Libraries Initiative*. — [http://ec.europa.eu/information\\_society/activities/digital\\_libraries/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/information_society/activities/digital_libraries/index_en.htm).
10. *SRB* (Storage Resource Broker). — [www.sdsc.edu/srb/index.php/What\\_is\\_the\\_SRB](http://www.sdsc.edu/srb/index.php/What_is_the_SRB).
11. *Paul Horn*. The Future of Information Technology (ppt), University of Colorado, 14 September, 2000. — [www.cs.colorado.edu/events/lectures/horn/horn.pdf](http://www.cs.colorado.edu/events/lectures/horn/horn.pdf).
12. *Jason Hiner*. The future of IT jobs? It's in three types of roles, 26 July, 2011. — [www.techrepublic.com/blog/hiner/the-future-of-it-will-be-reduced-to-three-kinds-of-jobs/8717](http://www.techrepublic.com/blog/hiner/the-future-of-it-will-be-reduced-to-three-kinds-of-jobs/8717).
13. *e-IRG*. — [www.e-irg.eu](http://www.e-irg.eu).
14. *The Fourth Paradigm: Data-Intensive Scientific Discovery*. — [www.fourthparadigm.org](http://www.fourthparadigm.org).
15. *PARADE*. — [www.csc.fi/english/pages/parade](http://www.csc.fi/english/pages/parade).
16. *GRDI2020*. — [www.grdi2020.eu](http://www.grdi2020.eu).
17. *ESFRI*. — [http://ec.europa.eu/research/infrastructures/index\\_en.cfm?pg=esfri](http://ec.europa.eu/research/infrastructures/index_en.cfm?pg=esfri).
18. *European Commission*, The future of Cloud computing: opportunity for European
19. *Cloud computing beyond*. — 2010. — [www.cordis.europa.eu/fp7/ict/ssai/docs/cloud-report-final.pdf](http://www.cordis.europa.eu/fp7/ict/ssai/docs/cloud-report-final.pdf).

Надійшла 13.02.2012

## ИНГИБИТОРНАЯ СЕТЬ ПЕТРИ, ИСПОЛНЯЮЩАЯ ПРОИЗВОЛЬНУЮ ЗАДАННУЮ МАШИНУ ТЬЮРИНГА

Д.А. ЗАЙЦЕВ

Построена ингибиторная сеть Петри с фиксированной структурой, исполняющая произвольную заданную машину Тьюринга. Лента машины Тьюринга, ее программа и состояния зашифрованы маркировкой 10-ти выделенных позиций сети Петри. Правила работы машины Тьюринга закодированы одиночным потоком управления в сети Петри, скомпонованной из операторов последовательности, ветвления, цикла. Используются подсети, реализующие операции арифметики, сравнения, копирования.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что ингибиторная сеть Петри представляет собой универсальную алгоритмическую систему [1, 2]. Доказательство было получено на основе моделирования счетчиковой машины Минского ингибиторной сетью Петри [2] и предполагает индивидуальное кодирование программы каждой заданной машины Минского графом ингибиторной сети Петри.

**Цель работы** — построение ингибиторной сети с фиксированной структурой (графом), исполняющая произвольную заданную машину Тьюринга [3, 4] на основе шифрования машины Тьюринга маркировкой фиксированного числа позиций сети Петри.

Помимо указанной цели, при наличии обоих: IPNTM (Inhibitor Petri Net Turing Machine — ингибиторная сеть Петри, исполняющая машину Тьюринга) и TMIPN (Turing Machine Inhibitor Petri Net — машина Тьюринга, исполняющая ингибиторную сеть Петри) — их композиция дает новый способ построения универсальной ингибиторной сети Петри [5], а также универсальной машины Тьюринга [6]. Действительно, IPNTM (TMIPN) является универсальной ингибиторной сетью Петри: она принимает на вход шифр заданной ингибиторной сети Петри для машины Тьюринга TMIPN и затем исполняет машину Тьюринга TMIPN, зашифрованную для IPNTM. И наоборот, TMIPN (IPNTM) является универсальной машиной Тьюринга: она принимает на вход шифр заданной машины Тьюринга для ингибиторной сети Петри IPNTM и затем исполняет ингибиторную сеть Петри IPNTM, зашифрованную для TMIPN.

### ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

#### Ингибиторная сеть Петри

Граф ингибиторной сети Петри [1, 2] является взвешенным двудольным ориентированным графом, представленным четверкой  $G = (P, T, B, D)$ , где  $P = \{p_1, \dots, p_m\}$  — конечное число вершин именуемых позициями;  $T = \{t_1, \dots, t_n\}$  — конечное число вершин именуемых переходами, а отобра-

жения  $B: P \times T \rightarrow \mathbb{N} \cup \{-1\}$  и  $D: T \times P \rightarrow \mathbb{N}$  задают входные и выходные дуги переходов вместе с их кратностью;  $\mathbb{N}$  — множество целых неотрицательных чисел; нулевое значение отображений —  $B, D$  — обозначает отсутствие дуги; ненулевое — кратность дуги, специальное значение  $-1$  задает ингибиторную дугу. Отображения могут быть представлены соответствующими матрицами:  $B = \|b_{i,j}\|, b_{i,j} = B(p_j, t_i)$  и  $D = \|d_{i,j}\|, d_{i,j} = D(t_i, p_j)$ .

Состояние сети именуется маркировкой и представлено отображением  $Q: P \rightarrow \mathbb{N}$ , которое задает количество динамических элементов — фишек внутри позиций сети. Ингибиторная сеть Петри (ИСП) [1, 2] — это пара  $N = (G, Q_0)$ , где  $G$  — граф сети, а  $Q_0$  — ее начальная маркировка. Маркировка может быть представлена соответствующим вектором:  $Q = \|q_j\|, q_j = Q(p_j)$ . Таким образом, ингибиторная сеть Петри задана парой чисел, парой матриц и вектором  $N = (m, n, B, D, Q_0)$ . Динамика ингибиторной сети представляет собой пошаговый процесс изменения ее маркировки в результате срабатывания переходов и может быть описана уравнением состояний [5].

Позиции изображают окружностями с фишками в виде точек, размещенными внутри них, переходы — прямоугольниками. Для графического представления ингибиторной дуги используют полую окружность на конце дуги. Дуга с заполненной окружностью на конце обозначает пару дуг противоположного направления и равной кратности, она используется для проверки маркировки позиции (без ее изменения).

### Машина Тьюринга

Машина Тьюринга (МТ) [3] — это шестерка  $M = (X, Q, V, P, q_s, q_f)$ , где  $X$  — конечный алфавит символов ленты, содержащий пустой символ  $\lambda$ ;  $Q$  — конечный алфавит внутренних состояний;  $q_s$  — начальное состояние;  $q_f$  — конечное (заключительное) состояние;  $V = \{l, s, r\}$  — алфавит перемещений соответственно (влево, стоять, вправо);  $P$  — функция переходов (программа), представленная как:

- отображение для детерминированной машины Тьюринга

$$P: X \times Q \rightarrow X \times Q \times V;$$

- отношение для недетерминированной машины Тьюринга

$$P \subseteq (X \times Q) \times (X \times Q \times V).$$

Конструкция машины Тьюринга следующая:

1) бесконечная в обоих направлениях лента разделена на ячейки, содержащие символ алфавита  $X$ . Изначально все ячейки заполнены пустым символом  $\lambda$ ;

2) управляющая головка движется вдоль ленты, на текущем шаге обзревает одну текущую ячейку и находится во внутреннем состоянии  $q$ ;

3) программа (функция переходов)  $P$  задает переход машины Тьюринга на следующий шаг.

Правила перехода на следующий шаг:

а) останавливается, если  $q = q_j$ ,

б) управляющая головка считывает символ  $x$  из текущей ячейки,

в) находит соответствующую команду  $(q, x) \rightarrow (q', x', v)$  в  $P$ ,

г) записывает символ  $x'$  в текущую ячейку,

д) перемещается на одну ячейку влево, вправо, либо остается на месте в зависимости от значения  $v$ ,

е) переключается в следующее состояние  $q := q'$  и продолжает по правилу (а).

Выбор команды в соответствии с правилом (в) уникален для детерминированной машины Тьюринга и множественен для недетерминированной машины Тьюринга [4]. Без ограничения общности рассмотрено только одно заключительное состояние. Определение машины Тьюринга с множеством заключительных состояний может быть преобразовано путем добавления команд перехода в единственное заключительное состояние без изменения текущего символа и перемещения головки.

Минимальную часть ленты, заполненную не пустыми символами, называют рабочей зоной. Обычно предполагают, что машина начинает (и завершает) свою работу в положении головки над крайней левой ячейкой рабочей зоны. В качестве начальной рабочей зоны слово  $\alpha$  в алфавите  $X$  записано на ленте. После останова машины слово  $\beta$ , полученное в рабочей зоне, рассматривается как результат.

## ШИФРОВАНИЕ МАШИНЫ ТЬЮРИНГА

В настоящем разделе представлено шифрование машины Тьюринга, включая ленту с позицией управляющей головки, текущее и заключительное состояния, программу, в форме маркировок десяти выделенных позиций сети IPNTM:  $sL, x, sR, rX, q, qf, rQ, sP, rP, rV$ . Шесть дополнительных позиций использованы для хранения текущей команды и ее компонентов:  $sI, Iq, Ix, Jq, Jx, Iv$ . Пример шифрования машины описан далее в подразделе «Пример шифрования машины Тьюринга».

### Шифрование алфавитов и выделенных состояний МТ

Зашифруем символы алфавитов  $X, Q, V$  целыми неотрицательными числами диапазона от нуля до  $|X| - 1, |Q| - 1, |V| - 1$  соответственно. При шифровании алфавита  $X$  будем предполагать, что пустой символ зашифрован нулем. Шифрование алфавита  $V$  следующее:  $l \leftrightarrow 1, s \leftrightarrow 0, r \rightarrow 2$ . Остальное шифрование произвольное.

Для работы с шифрами алфавитов использованы три позиции TPNTM с именами  $rX$ ,  $rQ$ ,  $rV$  содержащие следующие значения:  $rX = |X|$ ,  $rQ = |Q|$ ,  $rV = |V|$ .

Определение МТ содержит два выделенных состояния  $q_s, q_f$ , и во время работы МТ рассматривается текущее состояние  $q$ , совпадающее с начальным состоянием при запуске машины  $q = q_s$ . Выделенные состояния представлены двумя позициями IPNTM с именами  $q, qf$ , которые содержат шифры текущего и заключительного состояния соответственно; предполагается, что шифр  $q_s$  изначально загружен в позицию  $q$ .

### Шифрование программы

Использовано рекуррентное шифрование и дешифрование векторов неотрицательных целых [5]:

$$s_j = s_{j-1}r + a_{m-1-j}, \quad s_0 = a_{m-1}, \quad j = \overline{1, m-1}, \quad (1)$$

$$a_j = s_{m-1-j} \bmod r, \quad s_{m-1-(j+1)} = s_{m-1-j} \operatorname{div} r, \quad s_{m-1} = s, \quad j = \overline{0, m-1}, \quad (2)$$

где шифр вектора  $A$  длины  $m$  равен  $s = s_{m-1}$ , а основание шифрования  $r = \max_j a_j + 1$ .

Для шифрования программа (функция переходов)  $P$  рассматривается как множество команд (инструкций)  $P = \{I\}$  в форме  $I = (q, x, q', x', v)$ , компонентами которых являются шифры состояний, символов текущей ячейки, движения головки. Заметим, что недетерминированная МТ может содержать несколько команд с одинаковой парой  $(q, x)$ .

Команда зашифрована как вектор (1) с переменной величиной основания  $r : (rV, rQ, rX, rQ, rX)$ . Заметим, что  $rV$  реально не используется, так как вычисляется ее нулевая степень. Выраженное в явной форме шифрование имеет вид:

$$sI = q + xrQ + q'(rQrX) + x'(rQrXrQ) + v(rQrXrQrX). \quad (3)$$

Выполненные построения дают неоднозначную интерпретацию нуля как шифра инструкции  $(q_0, x_0, q_0, x_0, v_0)$ , что может быть неудобным при неизвестной длине программы. Либо указанная фиктивная команда должна быть исключена из рассмотрения, либо некоторые шифры (например  $V$ ) должны начинаться с единицы.

Множество команд занумеровано в произвольном порядке, начиная с нуля до  $k = |P| - 1$ , для использования простого алгоритма последовательного поиска. Таким образом, программа представлена как вектор  $P = (I_0, I_1, \dots, I_{k-1})$ . Для ее шифрования как вектора (1) следует выбрать значение требуемого основания. Максимальный возможный шифр команды следующий:

$$sI_{\max} = (rQ - 1) + (rX - 1)rQ + (rQ - 1)(rQrX) + (rX - 1)(rQrXrQ) + \\ + (rV - 1)(rQrXrQrX).$$

Таким образом, основание для шифрования программы имеет значение

$$rP = sI_{\max} + 1. \quad (4)$$

Итак, программа МТ представлена двумя позициями IPNTM с именами  $sP, rP$ , которые содержат значения  $sP, rP$  соответственно. Дополнительные позиции использованы для хранения текущей команды  $I = (q, x, q', x', v)$  и ее компонентов  $sI, Iq, Ix, Jq, Jx, Iv$  соответственно (для последовательного поиска подходящей команды).

### Шифрование ленты

Шифрование рабочей зоны ленты может быть выполнено также, как и шифрование программы, но в этом случае необходима дополнительная информация о текущей позиции управляющей головки.

Заметим, что рекуррентное шифрование (1) и дешифрование (2) задают дисциплину стека (LIFO). Начнем с нулевого значения  $s = 0$ , тогда операции

$$\text{push}(x, s) = MUL\_ADD(s, r, x) :: s := s \cdot r + x,$$

$$\text{pop}(s) = MOD\_DIV(s, r, x) :: x := s \bmod r, s := s \text{ div } r$$

обеспечивают дисциплину стека, и достижение дна стека распознается как условие  $s = 0$ . Неоднозначность шифрования в случае, когда нулевой шифр представляет пустой символ  $\lambda$ , является полезной. Последовательное дешифрование нуля дает неограниченное количество символов  $\lambda$  на дне стека. «Бездонное дно» дает возможность представить две части ленты по обеим сторонам текущей ячейки как два стека.

Символы рабочей зоны ленты занумерованы следующим образом:

$$\dots, \lambda, L_{m-1}, L_{m-2}, \dots, L_0, x, R_0, R_1, \dots, R_{n-1}, \lambda, \dots,$$

где  $L_i$  — символы левой части, а  $R_j$  — символы правой части ленты относительно символа текущей ячейки  $x$ . Обе части ленты зашифрованы как векторы  $L, R$  в соответствии с (1). Полученные шифры обозначены как  $sL, sR$  соответственно.

Лента и текущая позиция управляющей головки зашифрованы как три неотрицательных целых числа  $sT = (sL, x, sR)$ , где  $sL$  — шифр левой части рабочей зоны,  $sR$  — шифр правой части рабочей зоны,  $x$  — шифр символа текущей ячейки. Основание для шифрования соответствует алфавиту ленты  $r = rX$ .

Описанное шифрование обеспечивает следующую реализацию перемещений управляющей головки:

$$\text{left}(sL, x, sR) :: \text{push}(x, sR), x := \text{pop}(sL),$$

$$\begin{aligned} \text{stay}(sL, x, sR) &:: \langle \text{без изменений} \rangle, \\ \text{right}(sL, x, sR) &:: \text{push}(x, sL), x := \text{pop}(sR). \end{aligned} \quad (5)$$

Итак, лента и позиция управляющей головки представлены тремя позициями IPNTM с именами  $sL, x, sR$ , которые содержат значения  $sL, x, sR$  соответственно.

### Пример шифрования машины Тьюринга

Построим машину Тьюринга  $MTI$ , которая переводит числа из унарной в бинарную систему счисления:  $X = \{\lambda, a, 0, 1\}$ ,  $Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5\}$ ,  $q_s = q_0$ ,  $q_f = q_5$ ; в унарной системе счисления символ  $a$  использован для представления числа.

Шифры алфавитов, программы и процесса работы  $MTI$  представлены в табл. 1, 2, 3 соответственно; программа не является полностью определенной: для краткости опущены команды для некорректных конфигураций.

**Таблица 1.** Шифрование алфавитов  $MTI$

Алфавит $X$				Алфавит $Q$						$rX$	$rQ$	$rP$
$\lambda$	$a$	0	1	$q_0$	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$			
0	1	2	3	0	1	2	3	4	5	4	6	1728

**Таблица 2.** Шифрование программы  $MTI$

№	Команда	$sI$	$sP$
0	0 1 0 1 2	1302	1302
1	0 2 0 2 2	1452	2251308
2	0 3 0 3 2	1602	3890261826
3	0 0 1 0 1	600	6722372435928
4	1 1 2 0 1	631	11616259569284215
5	1 2 4 2 1	973	20072896535723124493
6	1 3 4 3 1	1123	34685965213729559125027
7	2 1 2 1 1	776	59937347889324678168047432
8	2 2 0 3 2	1598	103571737152753043874385964094
9	2 0 0 3 2	1586	178971961799957259814938945956018
10	2 3 3 2 1	956	309263549990326144960214498612000060
11	3 3 3 2 1	957	534407414383283578491250653601536104637
12	3 2 0 3 2	1599	923456012054314023632881129423454388814335
13	3 0 0 3 2	1587	1595731988829854632837618591643729183871172467
14	4 2 4 2 1	976	2757424876697988805543404926360364029729386023952
15	4 3 4 3 1	1126	4764830186934124655979003712750709043372379049390182
16	4 0 5 0 2	1276	8233626563022167405531718415633225226947470997346235772

Таблица 3. Шифрование процесса работы МТИ

Шаг	Лента	Шифр ленты			Сост. $q$	№ ком.	Шаг	Лента	Шифр ленты			Сост. $q$	№ ком.
		$sL$	$x$	$sR$					$sL$	$x$	$sR$		
0	$\overset{\wedge}{aaaa}$	0	1	21	0	0	20	$\overset{\wedge}{10aa}$	$sL$	$x$	$sR$	0	0
1	$\overset{\wedge}{aaaa}$	1	1	5	0	0	21	$\overset{\wedge}{10aa}$	57	1	0	0	0
2	$\overset{\wedge}{aaaa}$	5	1	1	0	0	22	$\overset{\wedge}{10aa\lambda}$	229	0	0	0	3
3	$\overset{\wedge}{aaaa}$	21	1	0	0	0	23	$\overset{\wedge}{10aa}$	57	1	0	1	4
4	$\overset{\wedge}{aaaa\lambda}$	85	0	0	0	3	24	$\overset{\wedge}{10a\lambda}$	14	1	0	2	7
5	$\overset{\wedge}{aaaa}$	21	1	0	1	4	25	$\overset{\wedge}{10a}$	3	2	1	2	8
6	$\overset{\wedge}{aaa\lambda}$	5	1	0	2	7	26	$\overset{\wedge}{11a}$	15	1	0	0	0
7	$\overset{\wedge}{aaa}$	1	1	1	2	7	27	$\overset{\wedge}{11a\lambda}$	61	0	0	0	3
8	$\overset{\wedge}{aaa}$	0	1	5	2	7	28	$\overset{\wedge}{11a}$	15	1	0	1	4
9	$\overset{\wedge}{\lambda aaa}$	0	0	21	2	9	29	$\overset{\wedge}{11\lambda}$	3	3	0	2	10
10	$\overset{\wedge}{1aaa}$	3	1	5	0	0	30	$\overset{\wedge}{10}$	0	3	2	3	11
11	$\overset{\wedge}{1aaa}$	13	1	1	0	0	31	$\overset{\wedge}{\lambda 00}$	0	0	10	3	13
12	$\overset{\wedge}{1aaa}$	53	1	0	0	0	32	$\overset{\wedge}{100}$	3	2	2	0	1
13	$\overset{\wedge}{1aaa\lambda}$	213	0	0	0	3	33	$\overset{\wedge}{100}$	14	2	0	0	1
14	$\overset{\wedge}{1aaa}$	53	1	0	1	4	34	$\overset{\wedge}{100\lambda}$	58	0	0	0	3
15	$\overset{\wedge}{1aa\lambda}$	13	1	0	2	7	35	$\overset{\wedge}{100}$	14	2	0	1	5
16	$\overset{\wedge}{1aa}$	3	1	1	2	7	36	$\overset{\wedge}{100}$	3	2	2	4	14
17	$\overset{\wedge}{1aa}$	0	3	5	2	10	37	$\overset{\wedge}{100}$	0	3	10	4	15
18	$\overset{\wedge}{\lambda 0aa}$	0	0	22	3	13	38	$\overset{\wedge}{\lambda 100}$	0	0	43	4	16
19	$\overset{\wedge}{10aa}$	3	2	5	0	1	39	$\overset{\wedge}{100}$	0	3	10	5	

### КОДИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ИНГИБИТОРНОЙ СЕТЬЮ ПЕТРИ

Сети Петри известны как форма представления параллельных (concurrent) алгоритмов и вычислений, управляемых потоками данных (data flow) [2, 7, 8]. В большинстве случаев, алгоритмы моделируются сетями Петри, что означает определенный акт абстрагирования, приводящий к утрате некоторых особенностей. Такое абстрагирование обычно оправдано общей целью исследования, например, поиском взаимных блокировок (тупиков), верификацией протокола и т.п.



В настоящей работе внимание сконцентрировано на точной спецификации одного потока управления, который описывает правила работы МТ. Для этих целей конструкции, рассмотренные в [1, 2], специфицированы более строго с точным разделением элементов сети Петри на две категории: для описания переменных и для описания одного потока управления. Указанное разделение выполнено до определенных границ: выбраны подсети, которые представляют множество базисных операций, необходимых для выполнения МТ. Для этих подсетей представлено доказательство их корректности в явном виде.

Каждый оператор (операция, процедура) представлен подсетью вида, изображенного на рис. 1. Для передачи параметров использованы контактные позиции, которые разделены на входные и выходные. Две выделенные позиции  $s$  и  $f$  представляют поток управления. Для обеспечения повторного прохождения потока управления через операторы, примем следующие соглашения: все внутренние позиции имеют нулевую маркировку; перед запуском оператора все входные переменные копируются во входные позиции оператора; работа оператора запускается попаданием фишки в позицию  $s$ ; оператор завершает свою работу при попадании фишки в позицию  $f$ ; при завершении работы оператора все его позиции пусты за исключением выходных позиций, которые содержат результат.

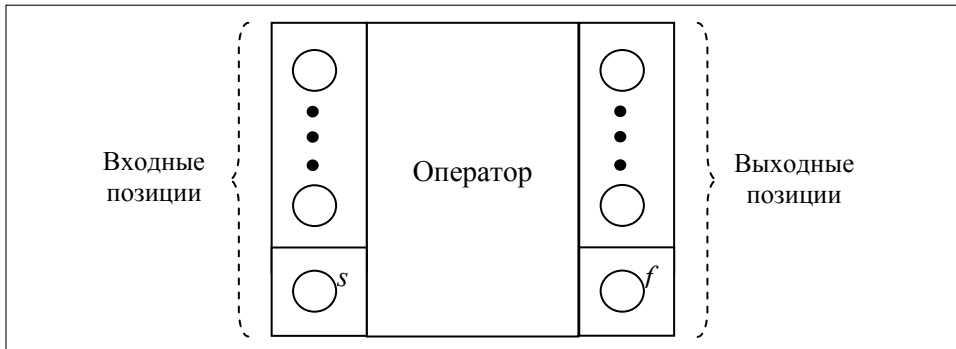


Рис. 1. Представление оператора

Рассматривается два вида переменных: глобальные статические и параметры операторов. Композиция статических переменных и параметров выполняется как совмещение (объединение) соответствующих позиций. Композиция (синхронизация [1]) потока управления и переменных обеспечивается парой выделенных позиций  $s$  и  $f$ , которые совмещаются при суперпозиции операторов —  $f$  предыдущего совмещается с  $s$  следующего.



Рис. 2. Представление алгоритма

Каждая статическая глобальная переменная представлена соответствующей позицией сети Петри (рис. 2). Поток управления моделируется

трасой прохождения одной фишки из начальной позиции  $start(s)$  в завершающую позицию  $finish(f)$ .

Введены пунктирные дуги [5], обозначающие следующие дополнительные правила формирования значений входных и выходных позиций: при запуске содержимое переменной копируется во входную переменную оператора; после завершения переменная очищается, и в нее перемещается значение выходной позиции оператора. В случае нескольких переменных строятся цепочки *COPY* для последовательного копирования входных переменных и цепочки *CLEAN, MOVE* для перемещения значений выходных переменных. Последовательность *CLEAN, MOVE* обозначена как *ASSIGN*.

**Лемма 1.** Алгоритмические управляющие структуры могут быть закодированы ингибиторной сетью Петри в форме, представленной на рис. 3.

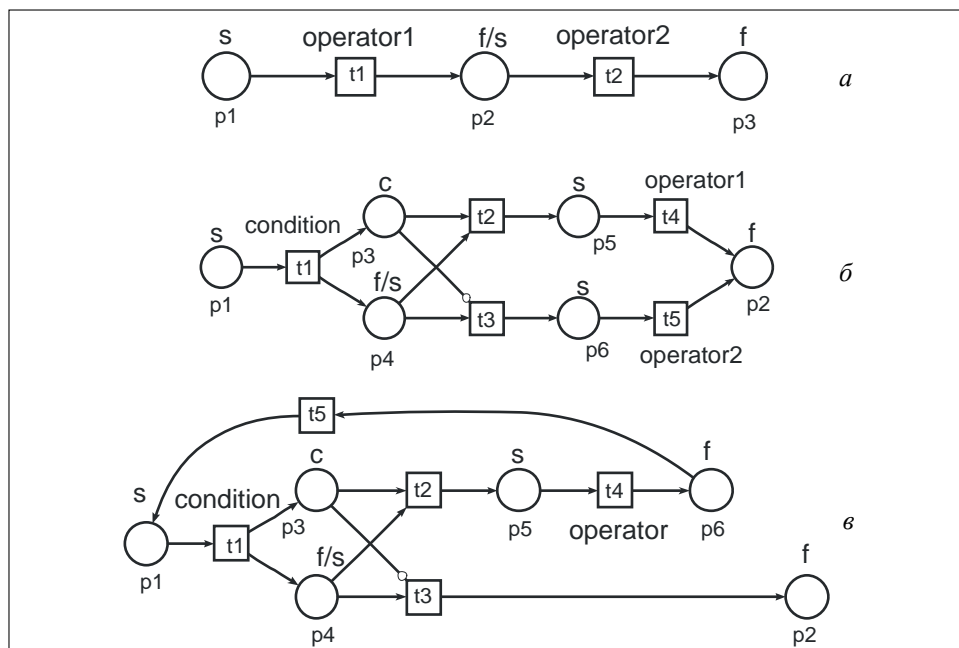


Рис. 3. Кодирование алгоритмических управляющих структур, где  $a$  — последовательность,  $b$  — ветвление,  $c$  — цикл (while)

**Доказательство.** Представим доказательство для структуры ветвления (рис. 3, б). В начальной маркировке  $p_1 = 1$  разрешен только переход  $t_1$ , который срабатывает и помещает значение условия в позицию  $p_3$  и фишку потока управления в позицию  $p_4$ . Допустим, что истинное значение представлено единичной маркировкой, а ложное — нулевой маркировкой. Поэтому только один из переходов  $t_2, t_3$  разрешен, а именно:  $t_2$  в единичной маркировке  $p_3$  и  $t_3$  в нулевой маркировке. При срабатывании  $t_2$  фишка потока управления перемещается в позицию  $p_5$ , что запускает переход  $t_4$ , а при срабатывании  $t_3$  фишка потока управления перемещается в позицию  $p_6$ , что запускает переход  $t_5$ . В итоге фишка потока управления попадает в позицию  $p_2$ , а все другие позиции пусты. Следовательно, разрешены

только две последовательности срабатывания  $t_1 t_2 t_4$  или  $t_1 t_3 t_5$ , что означает выбор операторов *operator1* или *operator2* после вычисления условия *condition*; *operator1* выбран, когда значение условия истинно, а *operator2* — когда ложно, что соответствует семантике структуры ветвления. □

Заметим, что в соответствии с рис. 3, а, суперпозиция операторов при кодировании алгоритма осуществляется совмещением выходной позиции  $f$  первого оператора с входной позицией  $s$  второго оператора.

Известны примеры представления основных алгебраических и логических операций сетями Петри [2, 9, 10]. В некоторых случаях удобно непосредственное представление наиболее часто выполняемых действий, таких как, например, *MOD\_DIV* и *MUL\_ADD* для дешифрования и шифрования МТ. В построениях IPNTM использованы вспомогательные сети, изученные в [5].

### КОМПОЗИЦИЯ IPNTM

Закодируем правила работы МТ рассмотренные в подразделе «Машина Тьюринга» ингибиторной сетью Петри в соответствии с принципами, описанными в разделе «Кодирование алгоритмов ингибиторной сетью Петри» и шифрованием МТ, описанным в разделе «Шифрование машины Тьюринга». Заметим, что леммы 1, 2 перечисляют все требуемые управляющие структуры и операции. Получена сеть IPNTM, представленная на рис. 4.

При построении IPNTM выполнено последовательное соединение подсетей, реализующих правила (а)–(е) работы МТ, и организован основной цикл повторения шага. Подсеть EQ проверяет достижение заключительного состояния (правило (а)); подсеть FIND\_I выполняет поиск подходящей команды (правила (б)–(в)); подсеть EXEC\_I реализует выполнение найденной команды (г)–(е); ветвление после FIND\_I реализует аварийный останов в случае отсутствия подходящей команды, подсеть FIND\_I представляет собой суперпозицию цикла, двух ветвлений и последовательностей; подсеть EXEC\_I представляет собой суперпозицию двух ветвлений и последовательностей для выбора одного из трех вариантов перемещения головки.

Для представления переменных использованы совмещенные позиции: все позиции с одинаковыми именами логически являются одной и той же позицией; совмещенные позиции облегчают графическое представление сети. Предполагаем, что перед запуском сети IPNTM шифр целевой (исполняемой) МТ загружен в выделенные позиции, а после останова сети IPNTM шифр полученной МТ (ее ленты) считан из соответствующих позиций.

Пунктирные линии обозначают рассмотренные в разделе «Кодирование алгоритмов ингибиторной сетью Петри» соглашения по копированию входных и выходных переменных. Двухнаправленные дуги использованы для работы с переменными, которые являются как входными, так и выходными. В этом случае копирование может быть оптимизировано двукратным применением *MOVE* без очистки. В некоторых случаях для копирования входной переменной вместе с ее очисткой целесообразно использовать *MOVE* вместо *COPY*. В качестве соответствующего обозначения использована линия с точечным пунктиром. Подстановка перехода подразумевает копиро-

вание соответствующей подсети с совмещением контактных позиций. В общем случае подстановка перехода требует указание отображения входных и выходных позиций. В приведенных сетях отображение задано неявно контекстом использованных операций и не указано дополнительно.

**Теорема 1.** Сеть IPNTM исполняет произвольную заданную детерминированную машину Тьюринга.

**Доказательство.** Докажем, что работа IPNTM полностью соответствует правилам работы МТ, описанным в подразделе «Машина Тьюринга» относительно шифрования МТ, описанного в разделе «Шифрование машины Тьюринга». Сеть IPNTM использует три подсети  $FIND\_I$ ,  $DA\_I$ ,  $EXEC\_I$  для нахождения подходящей команды, разбора (дизассемблирования) команды, исполнения команды соответственно, а также операции, представленные в [5] сетями Петри.

Во-первых, сеть IPNTM (рис. 4, а) реализует требуемую последовательность правил (а)–(е): в цикле (начинающемся с  $p_3$ ) она сравнивает ( $EQ$ ) текущее состояние  $q$  с заключительным состоянием  $qf$  и выходит из цикла ( $t_7$ ) в случае совпадения в соответствии с правилом (а); чтение текущего символа по правилу (б) не требуется, поскольку символ текущей ячейки ленты (его шифр) выделен в позиции  $x$  в соответствии с шифрованием МТ. Затем она находит подходящую команду ( $FIND\_I$ ) и исполняет ее ( $EXEC\_I$ ). Для проверки возможных ошибок добавлены дополнительные позиции, названные  $found$  и  $noi$ . В случае отсутствия подходящей команды подсеть  $FIND\_I$  не помещает фишку в позицию  $found$  и IPNTM выходит из цикла с фишкой в позиции  $noi$  (нет команды).

Требуется доказать, что сеть  $FIND\_I$  находит подходящую команду в соответствии с правилом (в), и сеть  $EXEC\_I$  исполняет найденную команду в соответствии с правилами (г)–(е).

Сеть  $FIND\_I$  копирует шифр программы во вспомогательную позицию  $sP1$  и обрабатывает  $sP1$  в цикле (начинающемся с  $p_3$ ). Имеется два возможных выхода из цикла: позитивный ( $t_{11}$ ) — найдена подходящая команда, негативный ( $t_2$ ) — все команды были проанализированы и подходящая команда не найдена ( $sP1 == 0$ ). В цикле, операция  $MOD\_DIV$  извлекает текущую команду из шифра программы  $sP1$ , разбирает текущую команду, используя подсеть  $DA\_I$ , и сравнивает последовательно текущее состояние и текущий символ команды с текущим состоянием головки  $q$  и текущим символом ленты  $x$ . В случае любого несовпадения ( $Iq \neq q$  или  $Ix \neq x$ ) она возвращается к началу цикла ( $t_9$  или  $t_{12}$ ). Когда и состояние, и символ команды совпадают с текущими значениями в соответствии с правилом (с), она выходит из цикла ( $t_{11}$ ) с размещением фишки в позиции  $found$ . Заметим, что разобранные компоненты найденной команды сохраняются в позициях  $Iq, Ix, Jq, Jx, Iv$ .

Сеть  $DA\_I$  разбирает команду в соответствии с принципами, описанными в подразделе «Шифрование ленты»: она применяет четыре последовательных операции  $MOD\_DIV$  с различными значениями основания  $r$ . Заметим, что в соответствии с (4) не требуется применять  $MOD\_DIV$  пять раз, так как четвертое деление дает  $Iv$ , а остаток —  $Jx$ .

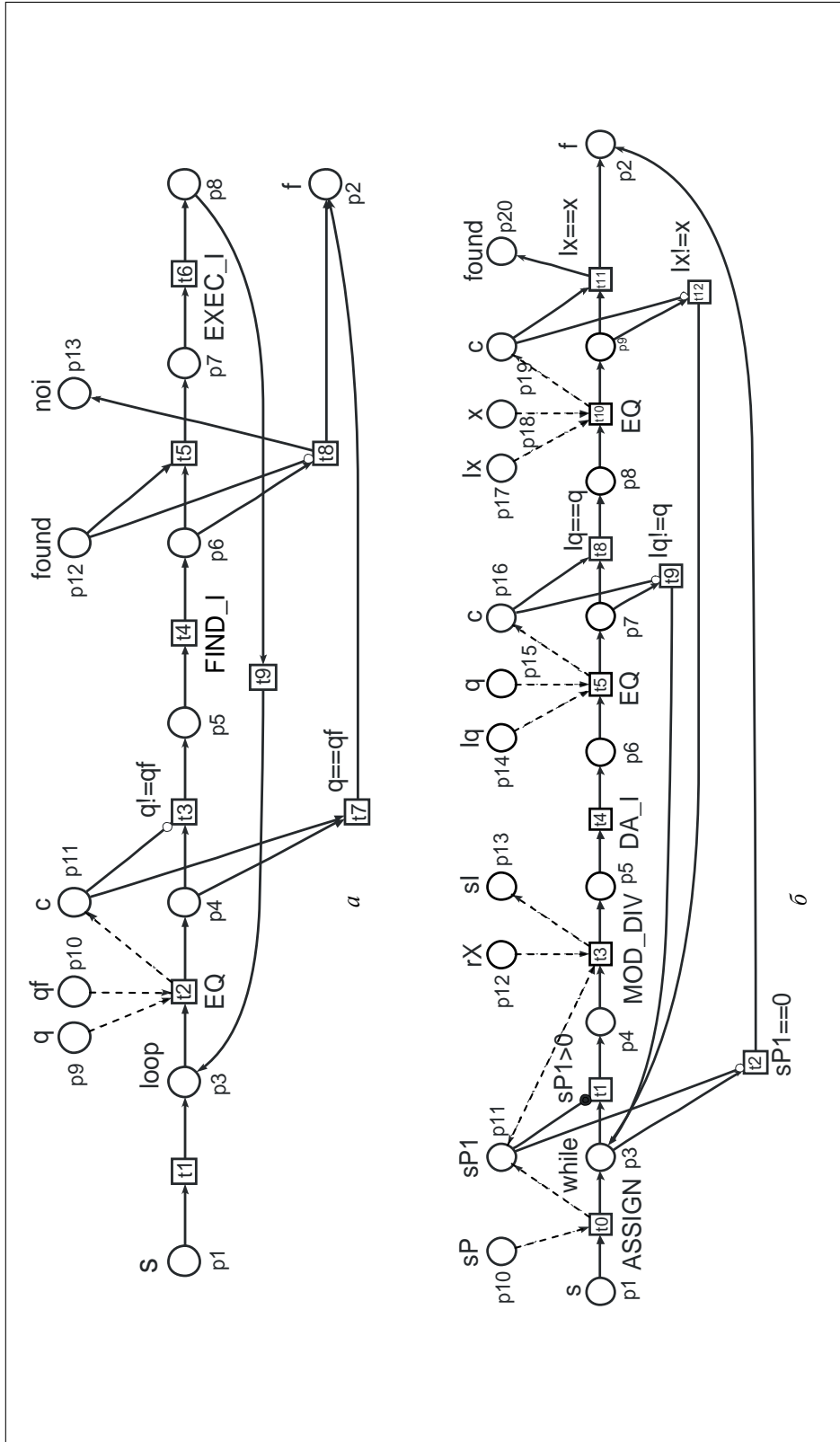


Рис. 4. Ингибиторная сеть Петри IPNTM, исполняющая машину Тьюринга, где  $a$  — IPNTM,  $b$  — FIND\_I

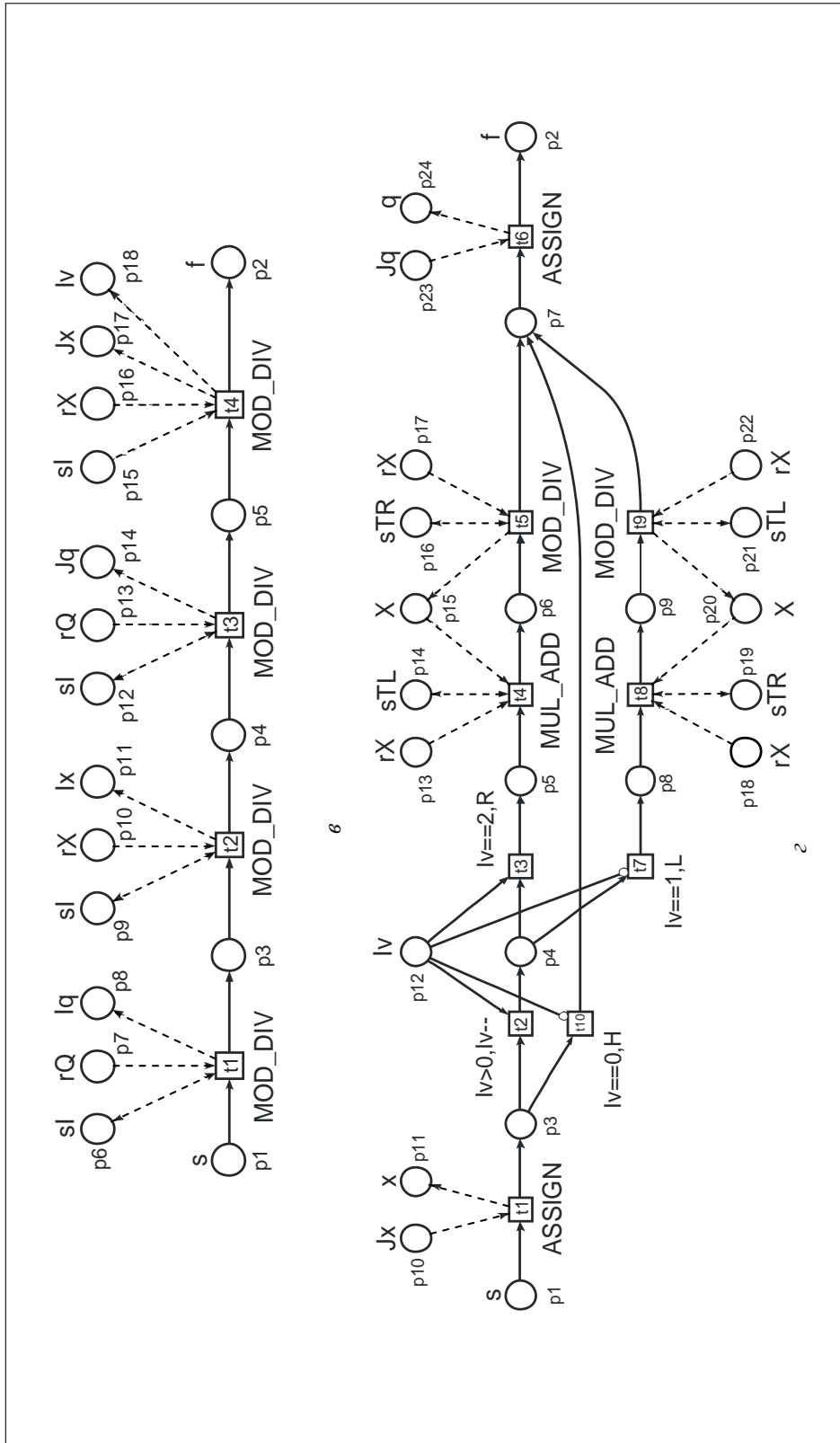


Рис. 4. Ингибиторная сеть Петри IPNTM, исполняющая машину Тьюринга, где  $\sigma$  — DA<sub>1, z</sub> — EXEC<sub>1</sub> (Продолжение рис. 4)

Сеть  $EXEC\_I$  реализует последовательно правила (г)–(е): она присваивает новое значение текущему символу ленты  $x = Jx$ ; осуществляет перемещение  $lv$  головки в соответствии с принципами шифрования ленты (5) посредством операций  $MUL\_ADD$  и  $MOD\_DIV$  в требуемой последовательности и не изменяет значения в случае  $lv = 0$ . Затем она переключается в следующее состояние  $q = Jq$ .

Итак, работа IPNTM полностью соответствует правилам работы МТ и способу кодирования МТ ингибиторной сетью Петри. Когда IPNTM останавливается корректно ( $noi = 0$ ), шифр результата (рабочей зоны ленты) содержится в позициях  $sL$ ,  $x$ ,  $sR$ . В соответствии с обычными соглашениями машина останавливается в позиции управляющей головки над крайним левым символом рабочей зоны, следовательно,  $sL = 0$  и результат считывается из позиций  $x$ ,  $sR$ . □

В описанном способе шифрования МТ имеется лишь незначительное отличие между детерминированной и недетерминированной МТ, которое состоит в том, что недетерминированная МТ может содержать несколько команд с совпадающей парой  $(q, x)$ . При нахождении подходящей команды следует применить недетерминированный выбор команды из множества команд с совпадающей парой  $(q, x)$ . Для этой цели сеть  $FIND\_I$  преобразована в сеть  $FIND\_I\_ND$ . Сеть IPNTMND получена из сети IPNTM подстановкой подсети  $FIND\_I\_ND$  вместо  $FIND\_I$  (рис. 5).

**Теорема 2.** Сеть IPNTMND исполняет произвольную заданную недетерминированную машину Тьюринга.

**Доказательство.** Так как различие между детерминированной и недетерминированной МТ состоит в выборе подходящей команды, который реализован подсетью  $FIND\_I$  и вследствие теоремы 1, следует доказать, что использование подсети  $FIND\_I\_ND$  в сети IPNTMND вместо подсети  $FIND\_I$  обеспечивает недетерминированный выбор подходящей команды.

В соответствии со способом шифрования программы (подраздел «Шифрование ленты») отношение  $P$  рассматривается как множество команд, представленное для шифрования как вектор в произвольном порядке. Таким образом, следует найти все команды, содержащие одинаковую пару  $(q, x)$  и выполнить из них недетерминированный выбор.

Дальнейший процесс доказательства аналогичен доказательству теоремы 1. □

Заметим, что сеть IPNTMND является более общей, так как она может исполнять как недетерминированную, так и детерминированную МТ, что зависит от уникальности пар  $(q, x)$  множества команд программы. Построенные сети IPNTM и IPNTMND представлены покомпонентно в соответствии с использованными операциями и принципами работы с переменными. Определенный интерес представляет компоновка этих сетей в виде единой ИСП и ее исполнение в среде некоторой моделирующей системы, которая имитирует динамику срабатывания переходов.

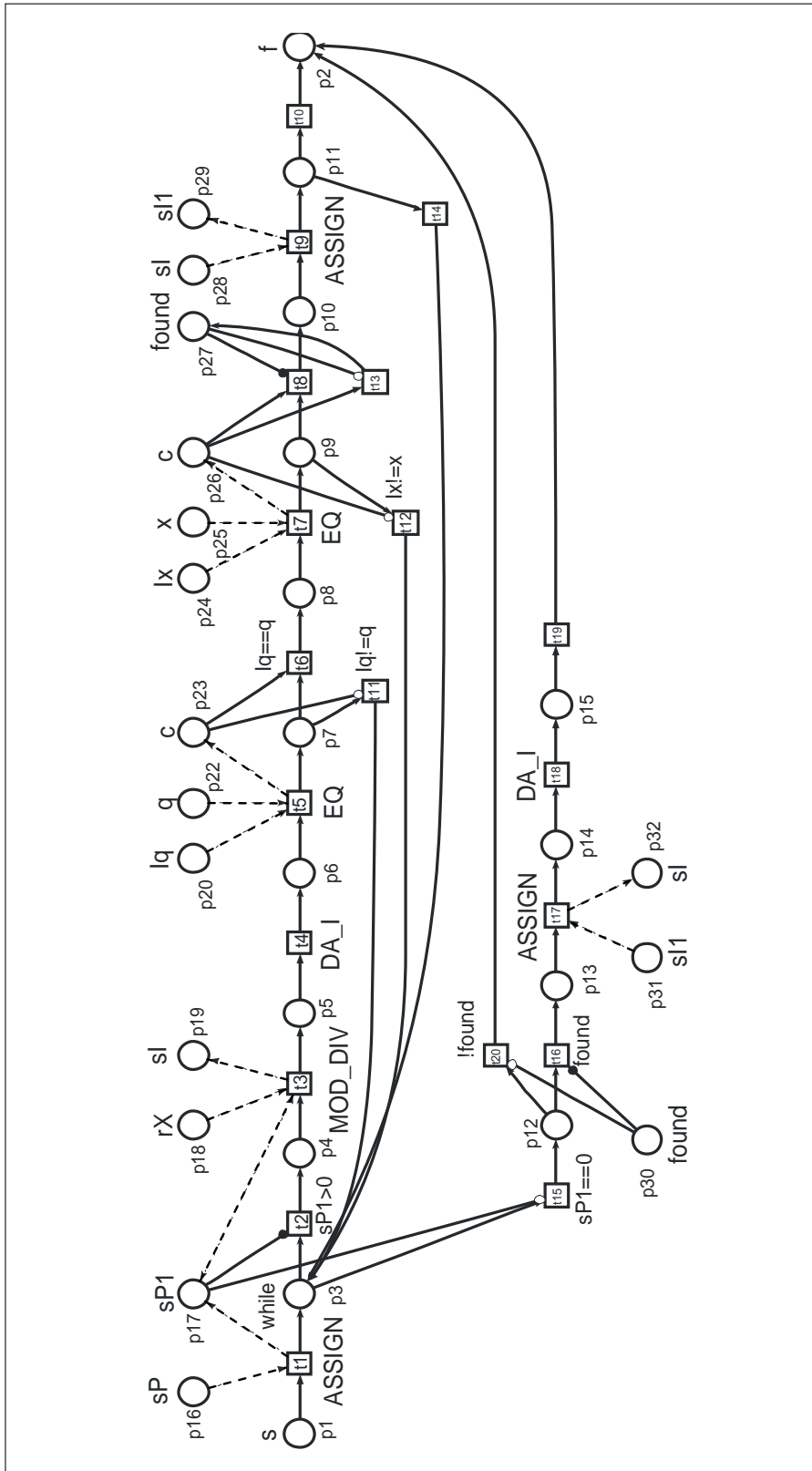


Рис. 5. Недетерминированный выбор подходящей команды FIND\_I\_ND



## **ВЫВОДЫ**

В настоящей работе построена ингибиторная сеть Петри с фиксированной структурой, которая исполняет произвольную заданную машину Тьюринга как детерминированную, так и недетерминированную.

Композиция ингибиторной сети, исполняющей машину Тьюринга, и машины Тьюринга, исполняющей ингибиторную сеть Петри, дает новый способ представления универсальной ингибиторной сети [5], которая исполняет произвольную заданную ингибиторную сеть Петри.

Возможны построения аналогичных сетей в других классах сетей Петри, которые являются универсальной алгоритмической системой [2]: приоритетных, синхронных, временных сетях Петри.

Известны примеры построения универсальной машины Тьюринга с минимальным числом использованных символов/состояний [11, 12]. В этой связи определенный интерес представляет построение сети с минимальным количеством позиций (переходов), минимальным значением маркировки.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. *Agerwala T.A.* Complete Model for Representing the Coordination of Asynchronous Processes. — Baltimore: John Hopkins University, Hopkins Computer Science Program, Res. Rep., July — № 32. — 1974. — 87 p.
2. *Котов В.Е.* Сети Петри. — М.: Наука, 1984. — 160 с.
3. *Turing A.M.* On Computable Numbers with an Application to the Entscheidungsproblem // Proceedings of the London Mathematical Society. — 1936. — 42. — P. 230–265.
4. *Hopcroft J.E., Motwani R., Ullman J.D.* Introduction to automata theory, languages, and computation, second edition. — NY: Addison-Wesley, 2001. — 498 p.
5. *Zaitsev D.A.* Universal Inhibitor Petri Net // Proceedings of the 17-th German Workshop on Algorithms and Tools for Petri Nets, 7–8 October. — Cottbus, Germany. — 2010. — P. 1–15. — <http://ceur-ws.org/Vol-643/>.
6. *The Universal Turing Machine. A Half-Century Survey* / Rolf Herken (ed.). — Springer-Verlag, Wien New York. — 1994. — 609 p.
7. *Best E., Devillers R., Koutny M.* Process Algebra and Concurrent Programming Languages // Lecture Notes in Computer Science. — **1492**: Lectures on Petri Nets II: Applications / Reisig W.; Rozenberg G. (eds.). — 1998. — P. 157–198.
8. *Goltz U.* On Representing CCS Programs by Finite Petri Nets // Lecture Notes in Computer Science: Proc. MFCS. — 1988. — **324**. — P. 339–350.
9. *Слепцов А.И.* Уравнения состояний и эквивалентные преобразования нагруженных сетей Петри (алгебраический подход) // Формальные модели параллельных вычислений: докл. и сообщ. Всесоюз. конф. — Новосибирск. — 1988. — С. 151–158.
10. *Слепцов А.И., Юрасов А.А.* Автоматизация проектирования управляющих систем гибких автоматизированных производств / Под ред. Б.Н. Малиновского. — К.: Техніка, 1986. — 160 с.
11. *Minsky M.* Size and structure of universal Turing machines using tag systems // Recursive Function Theory, Symposium in Pure Mathematics, AMS. — 1962. — **5**. — P. 229–238.
12. *Rogozhin Y.* Small universal Turing machines // Theoretical Computer Science. — 1996. — 168, № 2. — P. 215–240.

*Поступила 29.07.2010*

## **МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ НА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОМ ИНТЕРНЕТ-ПОРТАЛЕ В ОБЛАСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

**Л.С. ГЛОБА, Р.Л. НОВОГРУДСКАЯ**

Рассмотрен подход к созданию специализированного Интернет-портала знаний в области сопротивления материалов. Для построения модели представления знаний использована онтология, которая позволяет обеспечить единообразное представление знаний и данных, а также их семантическую связность. С помощью понятий онтологии построены внутренние хранилища портала, организовано его информационное наполнение, навигация и поиск.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время существует огромное количество инженерного оборудования и программного обеспечения для решения специализированных задач разного рода. Однако они являются либо дорогими, либо закрытыми. Важные результаты как теоретические, так и практические, которые получают исследователи, остаются сосредоточенными лишь в конкретной научной среде. Происходит процесс сосредоточения знаний — они становятся доступными узкому кругу ученых и специалистов. Поэтому актуальной задачей становится предоставление возможности использования этих знаний для большего количества исследователей, для которых они предназначены.

Кроме того, недостатком процесса доступа к знаниям является плохая систематизированность и слабая структурированность больших объемов информации в сети Интернет, ее распределенность по разным Интернет-сайтам, электронным библиотекам и архивам.

Из этого следует необходимость создания подхода направленного на построение специализированного Интернет-портала знаний, ориентированного на работу с большим количеством разнообразных информационных и вычислительных ресурсов определенного направления, который не только даст возможность систематизировать и осуществлять поиск информации, но и реализовывать определенные расчетные задачи.

В последнее время при построении порталов научных знаний все чаще используются онтологические модели. В качестве примера можно предложить порталы знаний в области археологии и компьютерной лингвистики [1, 2], при построении которых в качестве модели представления знаний была использована онтологическая модель. Отличительной чертой предложенного подхода является введение в общую онтологию портала дополнительной компоненты — онтологии инженерных расчетов, позволяющей не только описывать инженерные расчеты и их информационное окружение, но и давать возможность конечным пользователям решать свои конкретные задачи в области сопротивления материалов. В результате наличия данной

онтологии предоставляется возможность формально описать и установить взаимосвязь между предметной областью (элементами онтологии инженерных знаний и онтологии предметной области) и непосредственно сервисами, с помощью которых выполняются расчетные задачи.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Приведем формализованную постановку задачи.

Дано:  $D$  — данные,  $I$  — информационные ресурсы,  $Camp$  — расчетные задачи.

Получить:  $\Pi = \{M \cup Inf_{str} \cup Search(Inf_{str}, Camp) \cup Serv\}$ , где  $\Pi$  — портал знаний в области сопротивления материалов;  $M$  — модель представления знаний на портале  $M = O_{портала} = \{C \cup R \cup F \cup D \cup T \cup A\}$ ;  $Inf_{str}$  — структурированная информация, которую мы получаем с помощью функции структурирования;  $Search(Inf_{str}, Camp)$  — качественный поиск;  $Serv$  — сервисы, с помощью которых выполняются расчетные задачи.

## ОНТОЛОГИЯ ПОРТАЛА ЗНАНИЙ

Онтология портала знаний формально может быть задана как:  $O = \{C, A, R, T, F, D\}$ , где  $C$  — множество классов, описывающих понятия некоторой предметной или проблемной области;  $A$  — множество атрибутов, описывающих свойства понятий и отношений;  $R$  — множество отношений, заданных на классах;  $T$  — множество стандартных типов значений атрибутов (string, integer, real, date);  $F$  — множество ограничений на значения атрибутов понятий и отношений;  $D$  — множество экземпляров классов [3]. Таким образом, онтология портала представляет собой иерархию понятий (или классов), связанных отношениями. Различные свойства каждого понятия описываются на основе атрибутов понятий и ограничений, наложенных на область их значений. Множество отношений состоит из следующих видов отношений:  $R_{AS}$  — ассоциативное отношение,  $R_{IA}$  — отношение «часть–целое»,  $R_n$  — отношение наследования,  $R_{CD}$  — отношение «класс–данные» —  $R = \{R_{AS}, R_{IA}, R_n, R_{CD}\}$ . Множество ограничений используется не для всех атрибутов, а лишь для тех, значения которых должны лежать в некоторой области и не могут быть меньше/больше заданной величины, либо определяются каким-либо другим правилом. Так, например, на значение атрибута дата начала класса мероприятия онтологии инженерной деятельности накладывается ограничение,  $T(\text{дата}) = \text{date}$ ,  $F(T) > 0$ .

## КОМПОНЕНТЫ ОНТОЛОГИИ ПОРТАЛА «ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ»

Разработанная модель представления знаний включает такие онтологии, как онтология науки (Онтология инженерной деятельности, Онтология инженерного знания и Онтология инженерных расчетов) и Онтология предметной области. Эти онтологии и образуют онтологию портала —

$O_{\text{портала}} = \{O_1(O_2, O_3, O_4)O_5\}$  (рис. 1). Экземпляры классов понятий и отношений, определенных в онтологии портала, образуют его информационное наполнение.

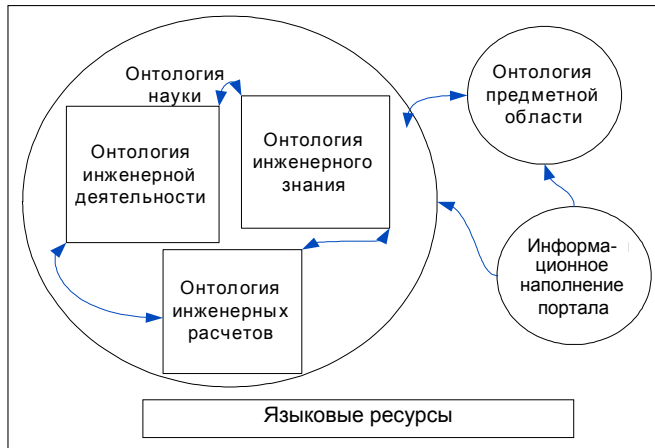


Рис. 1. Компоненты модели представления знаний на портале

Исходными данными для модели представления знаний, характеризующими предметную область, являются языковые ресурсы, представленные в виде коллекции документов.

Онтология науки —  $O_1$  — состоит из трех онтологий —  $O_1 = \{O_2, O_3, O_4\}$ .

Онтология инженерной деятельности (ОИД) —  $O_2$  — включает общие классы понятий, относящиеся к организации научной деятельности [4], такие как Персона, Организация, Мероприятие, Деятельность, Местоположение, Литература, Документация, Учебные материалы, Публикация, Информационный ресурс. Эти классы связаны отношениями различных типов. Различные свойства каждого понятия описываются на основе атрибутов понятий и ограничений, наложенных на область их значений. Исходя из этого, ОИД может быть описана следующим образом:  $O_2 = \{C_{O_2}, A_{O_2}, R_{O_2}, T_{O_2}, F_{O_2}, D_{O_2}\}$ .

Онтология инженерного знания (ОИЗ) —  $O_3$  — содержит следующие метапонятия, задающие структуры для описания рассматриваемой предметной области: Назначение исследования (позволяет типизировать проводимые исследования), Метод исследования и Объект исследования (задают типизацию методов и объектов исследования и структуры для их описания), Научный результат (служит для типизации и описания результатов научной деятельности), Исследовательское оборудование (организовывает типизацию оборудования для проведения исследований). Существуют связи между классами заданные отношениями различных типов. Исходя из этого, ОИЗ может быть описана следующим образом:  $O_3 = \{C_{O_3}, A_{O_3}, R_{O_3}, T_{O_3}, F_{O_3}, D_{O_3}\}$ .

Онтология инженерных расчетов (действий) (ОИР) —  $O_4$  — объединяет классы, которые описывают расчетные возможности, реализованные на портале: Расчет, Результат, Сервис, Параметры. Данные классы связаны отношениями различных типов. Свойства и характеристики каждого понятия описываются с помощью атрибутов понятий и ограничений, наложенных на область значений. Исходя из этого, ОИД может быть описана следующим образом:  $O_4 = \{C_{O_4}, A_{O_4}, R_{O_4}, T_{O_4}, F_{O_4}, D_{O_4}\}$ . ОИР играет важную роль при

построении общей онтологии портала. С ее помощью становится возможным описать не только доступные пользователю на портале расчетные задачи как сервисы вычислений, но и установить связи между конкретными сервисами (набором сервисов) для реализации конкретных бизнес-процессов, а также связи сервисов с информационными ресурсами, что необходимо для решения производственных задач пользователя.

Онтология предметной области (ОПО) — отражает общие знания о предметной области, такие как иерархия классов понятий и семантические отношения на этих классах. Основой ОПО для портала инженерных знаний в области сопротивления материалов послужила системная классификация, состоящая из фрагментов определенной универсальной структуры.

Экземпляры классов понятий и отношений, определенных в онтологии портала, образуют его информационное наполнение.

Исходными данными для модели представления знаний, характеризующими предметную область, являются языковые ресурсы, представленные в виде коллекции документов. Обеспечить автоматическое извлечение знаний из этих данных является главной задачей эксперта при наполнении и настройке системы знаний портала.

## **ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ПОИСКОВОГО ЗАПРОСА**

Поиск информации базируется на онтологии, благодаря чему пользователь имеет возможность задавать запрос не только и не столько по ключевым словам, сколько в знакомых ему терминах предметной области портала. Основными элементами такого поискового запроса являются основные понятия онтологии: ее классы, атрибуты и экземпляры классов, а также отношения, связывающие одни понятия с другими понятиями онтологии [5]. Сформулированный таким образом поисковый запрос представляется простым для задания пользователем, а также полным в плане найденной информации. Например, поисковый запрос: «Найти результаты исследования, проводимые со сталью и направленные на определение ее свойств под воздействием высоких температур, полученные В.А. Гайном в 2008 г. и описанные в книге „Поведение стали“, изданной институтом Материаловедения Германии», формально будет выглядеть следующим образом:

**Класс** «Результат исследования»

**Отношение** «проводится с»:

**Класс** «Объект исследования»

**Атрибут** «Объект исследования» = «сталь»

**Отношение** «направлено на»:

**Класс** «Назначение исследования»

**Атрибут** «Назначение исследования» = «воздействие высоких температур»

**Отношение** «полученные»:

**Класс** «Персона».

**Атрибут** «ФИО» = «В.А. Гайном»

&

**Класс** «Результат исследования»

**Атрибут** «год» = «2008»

**Отношение** «описанные»:

**Класс** «Литература»

**Отношение** «часть–целое»:

**Подкласс** «Учебные материалы»

**Атрибут** «книга» = «Поведение стали»

**Отношение** «выданной»:

**Класс** «Организация»

**Атрибут** «Институт» = «институтом Материаловедения Германии».

Покажем как будут выглядеть термины поискового запроса в понятиях онтологии. Приведем их формальное описание. Зададим следующие переменные:  $C_1 = \{\text{результат исследования}\}$ ,  $R_{AS_1} = \{\text{проводится с}\}$ ,  $C_2 = \{\text{объект исследования}\}$ ,  $A_{C_2} = \{\text{сталь}\}$ ,  $R_{AS_2} = \{\text{направлено на}\}$ ,  $C_3 = \{\text{назначение исследования}\}$ ,  $A_{C_3} = \{\text{воздействия высокими температурами}\}$ ,  $R_{AS_3} = \{\text{полученные}\}$ ,  $C_{4_1} = \{\text{персона}\}$ ,  $A_{C_{4_1}} = \{\text{В.А. Гайном}\}$ ,  $C_{4_2} = \{\text{результат исследования}\}$ ,  $A_{C_{4_2}} = \{2008\}$ ,  $R_{AS_4} = \{\text{описанные}\}$ ,  $C_5 = \{\text{литература}\}$ ,  $R_{IA_{56}} = \{\text{подкласс}\}$ ,  $C_6 = \{\text{учебные материалы}\}$ ,  $A_{C_6} = \{\text{поведение стали}\}$ ,  $R_{AS_5} = \{\text{выданной}\}$ ,  $C_7 = \{\text{организация}\}$ ,  $A_{C_7} = \{\text{институтом Материаловедения Германии}\}$ .

Для реализации поискового запроса актуально следующее описание классов (согласно описанной выше идеологии:  $C_2(A_{C_2}, D_{C_2}, R_{C_2})$ ,  $C_3(A_{C_3}, D_{C_3}, R_{C_3})$ ,  $C_4(A_{C_4}, D_{C_4}, R_{C_4})$ ,  $C_5(A_{C_5}, D_{C_5}, R_{C_5})$ ,  $C_6(A_{C_6}, D_{C_6}, R_{C_6})$ ,  $C_7(A_{C_7}, D_{C_7}, R_{C_7})$ ) [6]. Для реализации поискового запроса существуют следующие отношения (согласно описанной выше идеологии): отношение вида класс–данные:  $R_{IA_{56}} \leftarrow C_5 \subset C_6$ , ассоциативные отношения:  $R_{AS_1} = \{C_1 \times C_2\}$ ,  $R_{AS_2} = \{C_1 \times C_3\}$ ,  $R_{AS_3} = \{C_1 \times C_4\}$ ,  $R_{AS_4} = \{C_1 \times C_5\}$ ,  $R_{AS_5} = \{C_5 \times C_7\}$ .

С помощью заданного формального описания понятий поисковый запрос будет выглядеть следующим образом (таблица).

**Т а б л и ц а .** Формализация поискового запроса

Поисковый запрос	Описание запроса
$C_1 \vdash$	«результаты исследования»
$c \xrightarrow{R_{AS_2}} A_{C_2},$	«проводимые со сталью»
$\xrightarrow{R_{AS_3}} A_{C_3},$	«определение ее свойств при воздействии высокими температурами»
$\xrightarrow{R_{AS_4}} A_{C_{4_1}}, \& A_{C_{4_2}},$	«полученные В.А. Гайном в 2008 г.»
$\xrightarrow{R_{AS_5}} A_{C_5} \xrightarrow{R_{AS_6}} A_{C_7}.$	«описанные в книге „Поведение стали” выданной институтом Материаловедения Германии»

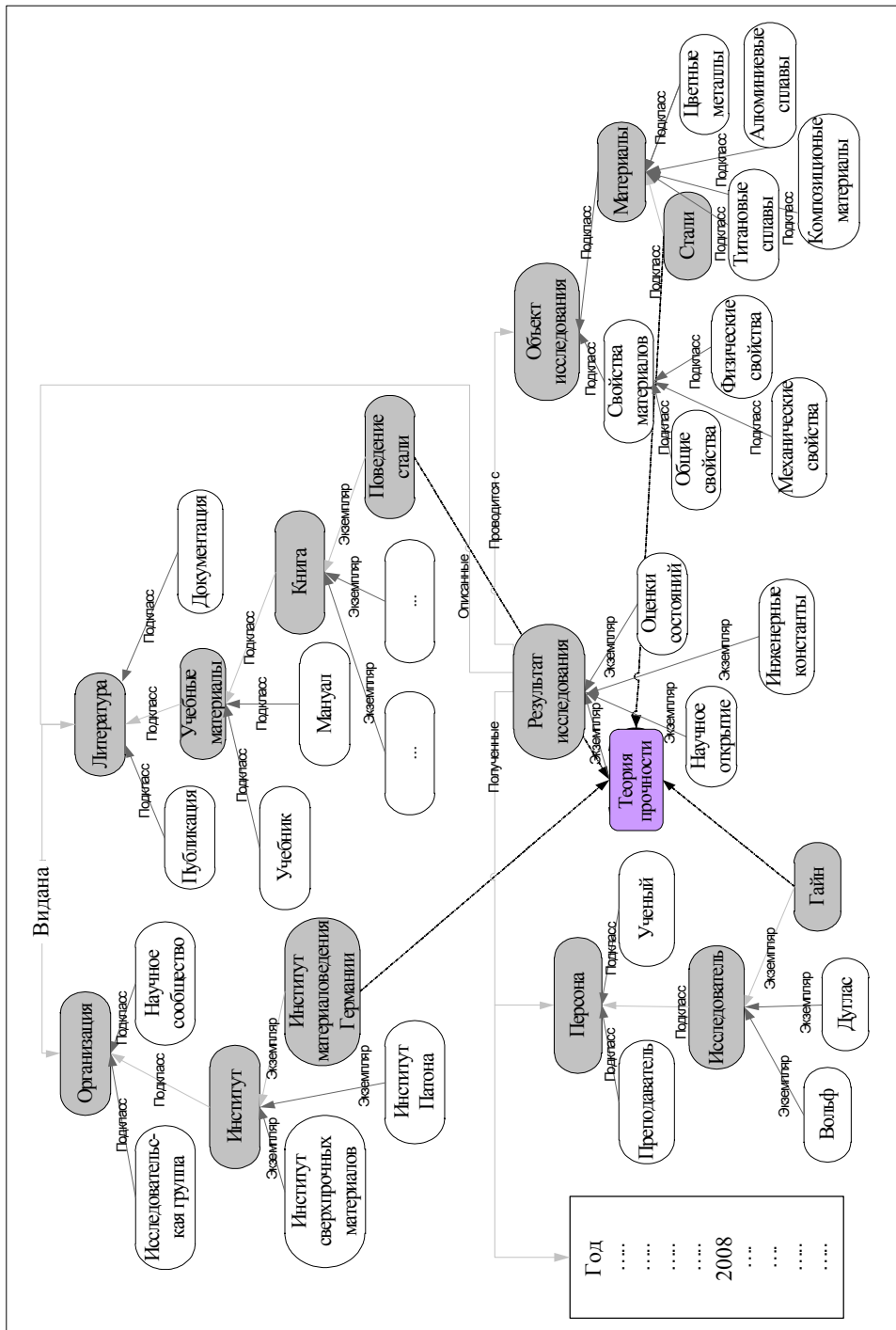


Рис. 2. Процесс поиска по элементам онтологии портала

На рис. 2 изображен процесс поиска по элементам онтологии портала. Экземпляры классов и отношения онтологии, заданные пользователем в терминах поискового запроса, выделены курсивом; элемент, который является результатом поиска, выделен жирным. Класс *Результат исследования* связан соответствующими отношениями с классами *Объект исследования*,

*Персона и Литература*. В этих классах находим экземпляры, заданные пользователем: Сталь, Гайн, книга «Поведение стали» и Институт материаловедения Германии, находим экземпляр класса *Результат исследования*, который им соответствует. Это — теория прочности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За счет структуризации и систематизации информации и вычислительных ресурсов, связей между ними, которые реализуются с помощью построения модели представления знаний на портале, осуществляется эффективный поиск и навигация по информационному пространству портала инженерных знаний.

Формализация знаний делает систему знаний портала легко расширяемой и настраиваемой — в нее могут интегрироваться как новые знания (например, о новых направлениях и методах исследования прочности материалов), так и новые виды информационных и вычислительных ресурсов.

Ближайшими целями авторов является апробация предложенного подхода. Описание онтологии портала на языке OWL. Кроме того, планируется создать метаописатели сервисов, которые будут использоваться для решения вычислительных задач. С помощью метаописателей осуществляется подключение необходимой информации, а также взаимодействие сервисов, необходимых конкретному бизнес-процессу для решения конкретной инженерной задачи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреева О.А., Боровикова О.И., Загоруйко Ю.А. и др. Археологический портал знаний: содержательный доступ к знаниям и информационным ресурсам по археологии // Тр. 10-й нац. конф. по искусственному интеллекту с междунар. участием КИИ-2006. — М.: Физматлит, 2006. — Т. 3. — С. 832–840.
2. Загоруйко Ю.А., Боровикова О.И. Технология построения онтологий для порталов знаний по гуманитарным наукам // Тр. Всероссийской конф. с междунар. участием «Знания-Онтологии-Теории» (ЗОНТ-07). — Новосибирск. — 2007. — Т. 1. — С. 191–200.
3. Боровикова О.И., Загоруйко Ю.А., Сидорова Е.А. Подход к автоматизации сбора онтологической информации для интернет-портала знаний // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: тр. междунар. конф. Диалог-2005 (Звенигород, 1–5 июня 2005 г.). — М.: Наука, 2005. — С. 65–70.
4. Глоба Л.С., Новогрудская Р.Л. Подход к построению интернет-портала инженерных знаний // Тр. X междунар. науч. конф. им. Т.А. Таран «Интеллектуальный анализ информации». — 2010. — С. 53–62.
5. Боровикова О.И., Загоруйко Ю.А. Организация порталов знаний на основе онтологий // Тр. междунар. семинара Диалог-2002 «Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии». — Протвино. — 2002. — Т. 2. — С. 76–82.
6. Глоба Л.С., Новогрудская Р.Л. Систематизация информационных ресурсов Интернет-портала «Прочность материалов» // Вісн. Харк. нац. ун-ту ім. Каразіна. Сер. Матиматичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. — 2011. — Вип. 16, № 927. — С. 27–36.

Поступила 02.06.2010



## **НЕЧЕТКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИНДЕКСА УСТОЙЧИВОСТИ СОЦИАЛЬНОЙ СРЕДЫ**

**Н.А. АБДУЛЛАЕВА**

Предложен нечеткий подход к оцениванию индекса устойчивости социальной среды и прогнозирование состояния индекса в следующем году посредством нечеткой Марковской модели. Нечеткие методы применены на основе новой базы показателей, позволяющих отражать не только статику, но и динамику развития социальной среды.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Изучение социальной среды в рамках анализа устойчивого развития стран весьма актуально в настоящее время. В различных исследованиях приводятся базы данных (БД) по показателям, отражающим оценку того или иного аспекта развития социальной среды.

Так, учеными Фонда Устойчивого Общества разработан индекс устойчивого общества (SSI–2008), рассчитываемый из 22 индикаторов, объединенных в 5 групп: индивидуальное развитие, здоровая окружающая среда, сбалансированное общество, устойчивое использование ресурсов, устойчивый мир [1].

В исследовании, проведенном Институтом прикладного системного анализа Национальной академии наук Украины и МОН Украины [2], предложена система показателей, в которой уровень устойчивого развития оценивается как сумма индексов для 3-х измерений — экономического, социального и экологического. В свою очередь, индекс социального измерения рассчитывается как усредненная сумма 3-х индексов — качества и безопасности жизни, разработанного международной организацией Economist Intelligence Unit; человеческого развития, который используется программой ООН UNDP; общества, основанного на знаниях (или К-общества), разработанного департаментом ООН по экономическому и социальному развитию — UNDESA.

Так как методы математической статистики, применяющиеся для расчета перечисленных выше индексов, не учитывают факторы неопределенности (отсутствие или недостаточность достоверной информации, наличие качественных характеристик в виде экспертных оценок, случайность рассматриваемых процессов). В данной работе для оценки и прогнозирования индекса устойчивости социальной среды предлагаются нечеткие модели. Также разработана новая БД, которая включает показатели, позволяющие отражать не только статику, но и динамику развития социальной среды.

Для того, чтобы конкретизировать предмет, характеризуемый БД, и определить основную цель научных изысканий, приведем определение социальной среды, которого будем придерживаться в данной работе.

Социальная среда представляет собой совокупность экономических, социетальных, политических, духовных и экологических условий существования, формирования и деятельности индивидов и общества.

В соответствии с основными аспектами социальной среды проводится отбор 30 показателей, которые, в свою очередь, компонуются в 5 блоков. В качестве статистической информации в таблицах применяются данные Всемирного Банка (ВБ), Организации Объединенных Наций (ООН), Международного Валютного Фонда (МВФ), Службы оценки политических рисков (PRS) и Политического атласа современности.

Процесс моделирования состоит из двух этапов:

- оценивание текущего состояния индекса устойчивости социальной среды;
- прогнозирование на один временной шаг вперед состояния индекса устойчивости социальной среды.

## **НЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ ИНДЕКСА УСТОЙЧИВОСТИ СОЦИАЛЬНОЙ СРЕДЫ**

В процессе нечеткого моделирования используются показатели и интервальные значения термов множеств лингвистических переменных, приведенные в табл. 1.

Показатели, приведенные в табл. 1 — нечисловые величины, не имеющие определенного численного значения. Другими словами, они размыты. На основании международных данных определены пороги (пределы) по каждому показателю в виде интервалов разброса значений [3], [4]. Так, падение уровня ВВП по отношению к базовому уровню до 30–40 % может привести к потере экономической безопасности и устойчивости развития. При годовом уровне инфляции в 40 % экономический рост прекращается, при инфляции свыше 100 % начинается спад промышленного производства и снижение стоимости ВВП. Нельзя допускать завоза более 30 % продуктов питания, в то время как доля высокотехнологичной продукции в экспорте должна составлять не менее 10–15 %. Уровень безработицы не должен превышать 15–20 % от общего числа трудоспособного населения. Допустимым соотношением доходов 10 % самых богатых и 10 % самых бедных групп населения считается 10:1. Превышение ущерба экологии 5 % приведет к возникновению жизнеопасной окружающей среды. В случае, если инвестиции на защиту окружающей среды составляют меньше 5 % ВВП, происходит деградация экологии и т.д.

Оценивание индекса устойчивости социальной среды осуществляется методом нечеткого логического вывода. В качестве исходной информации берутся статистические данные по Азербайджану (табл. 2).

Таблица 1. Показатели устойчивости социальной среды

Показатели	Термы множеств состояния устойчивости			
	T1 «Устойчивый»	T2 «Средне-устойчивый»	T3 «Слабо-устойчивый»	T4 «Неустойчивый»
<b>Индекс экономического развития</b>	(100, 75)	(75, 50)	(50, 25)	(25, 0)
Темпы роста ВВП, %	> 10	(10, 0)	(0, -30)	< -30
Уровень инфляции, %	(0, 5)	(5, 40)	(40, 100)	> 100
Доля импортных продуктов питания в потреблении, %	(0, 5)	(5, 10)	(10, 20)	(20, 100)
Доля высокотехнологичной продукции в экспорте, %	(15, 10)	(10, 5)	(5, 1)	(1, 0)
Национальный долг в ВВП, %	< 10	(10, 30)	(20, 60)	> 60
Доля государственных расходов в ВВП, %	> 50	(50, 25)	(30, 10)	< 15
Кредитный рейтинг страны	(100, 75)	(75, 50)	(50, 25)	(25, 0)
<b>Индекс социетального развития</b>	(100, 75)	(75, 50)	(50, 25)	(25, 0)
Средняя продолжительность жизни населения страны, лет	> 68	(68, 55)	(57, 43)	< 44
Дециль	< 5	(5, 8)	(7, 10)	> 10
Уровень безработицы, %	(0, 17)	(17, 40)	(34, 60)	> 50
Отношение числа умерших к числу родившихся	< 0,35	(0,30, 0,68)	(0,60, 1)	> 1
Уровень образованности, %	> 98	(99, 72)	(74, 47)	< 48
<b>Индекс политического развития</b>	(100, 75)	(75, 50)	(50, 25)	(25, 0)
Закон и правопорядок	> 4,3	(4,5, 2,8)	(3, 1,4)	< 1,5
Социально-экономическая политика	> 8	(8,2, 5,5)	(6, 2,75)	< 3
Этнические конфликты	> 4,3	(4,5, 2,8)	(3, 1,4)	< 1,5
Внутренние конфликты	> 8	(8,2, 5,5)	(6, 2,75)	< 3
Коррупция	> 4,3	(4,5, 2,8)	(3, 1,4)	< 1,5
Потенциал международного влияния	> 7	(7,3, 4,8)	(5, 2,4)	< 2,5
Внешние конфликты	> 8	(8,2, 5,5)	(6, 2,75)	< 3
<b>Индекс духовного развития</b>	(100, 75)	(75, 50)	(50, 25)	(25, 0)
Уровень религиозности общества	высокий	средний	ниже среднего	низкий
Уровень толерантности в обществе	высокий	средний	ниже среднего	низкий
Уровень влияния религиозных организаций на развитие общества	высокий	средний	ниже среднего	низкий
Уровень культуры граждан	высокий	средний	ниже среднего	низкий
Уровень влияния информации на развитие общества	высокий	средний	ниже среднего	низкий
<b>Индекс экологического развития</b>	(100, 75)	(75, 50)	(50, 25)	(25, 0)
Качество воздуха	> 75	(75, 50)	(50, 25)	< 25
Качество воды	> 75	(75, 50)	(50, 25)	< 25
Качество земли	> 75	(75, 50)	(50, 25)	< 25
Биоразнообразие	> 75	(75, 50)	(50, 25)	< 25
Инвестиции на защиту окружающей среды от ВВП, %	> 5	(5, 3,3)	(3,3, 1,65)	(1,65, 0)
Ущерб экологии	(0, 1,65)	(1,65, 3,3)	(3,3, 5)	> 5
<b>Индекс устойчивости социальной среды</b>	(100, 75)	(75, 50)	(50, 25)	(25, 0)

**Таблица 2.** Параметры устойчивости социальной среды в Азербайджане

Показатели	Статистическое значение	Лингвистическая переменная
Темпы роста ВВП, %	25	T 1
Уровень инфляции, %	16,7	T 2
Доля импортных продуктов питания в потреблении, %	15,9	T 3
Доля высокотехнологичной продукции в экспорте, %	7	T 2
Национальный долг в ВВП, %	8,3	T 1
Доля государственных расходов в ВВП, %	24	T 3
Кредитный рейтинг страны	41	T 3
Средняя продолжительность жизни населения страны, лет	72,4	T 1
Дециль	3	T 1
Уровень безработицы, %	6,5	T 1
Отношение числа умерших к числу родившихся	0,35	T 2
Уровень образованности, %	99,5	T 1
Закон и правопорядок	3,5	T 2
Социально-экономическая политика	8	T 1
Этнические конфликты	4,5	T 1
Внутренние конфликты	9	T 1
Коррупция	1,5	T 4
Потенциал международного влияния	0,11	T 4
Внешние конфликты	7	T 2
Уровень религиозности общества *	низкий	T 4
Уровень толерантности в обществе *	высокий	T 1
Уровень влияния религиозных организаций на развитие общества *	низкий	T 4
Уровень культуры граждан *	средний	T 2
Уровень влияния информации на развитие общества *	высокий	T 1
Качество воздуха	37,5	T 3
Качество воды	62,5	T 2
Качество земли	53,65	T 2
Биоразнообразие	62,5	T 2
Инвестиции на защиту окружающей среды от ВВП, %	3,5	T 2
Ущерб экологии	0,05	T 1

В виду отсутствия статистических данных по показателям, характеризующим духовное развитие страны, проведена экспертная оценка, и информация представлена в виде лингвистических значений, что обозначено в табл. 2 звездочкой (\*).

В отдельности по каждому из индексов экономического развития, социального развития, духовного развития, политического развития и экологического развития, данные фазифицируются и строятся Гауссовские функции принадлежности. Для этого определены 4 термина лингвистических переменных (T1 — устойчивый, T2 — среднеустойчивый, T3 — слабоустойчивый, T4 — неустойчивый). Затем экспертным путем создаются правила. Методом композиции выявляются агрегированные нечеткие множества. В процессе дефазификации выводятся значения индексов, указанные в табл. 3.

**Таблица 3.** Результаты дефаззификации

Показатель	Числовое значение	Лингвистическое значение
Индекс экономического развития	63,9	Среднеустойчивый
Индекс социетального развития	69,7	Среднеустойчивый
Индекс политического развития	34,2	Слабоустойчивый
Индекс духовного развития	33,9	Слабоустойчивый
Индекс экологического развития	64,5	Среднеустойчивый

Те же этапы проводятся для итогового индекса (построение Гауссовских функций принадлежности (рис. 1), композиция правил (рис. 2)).

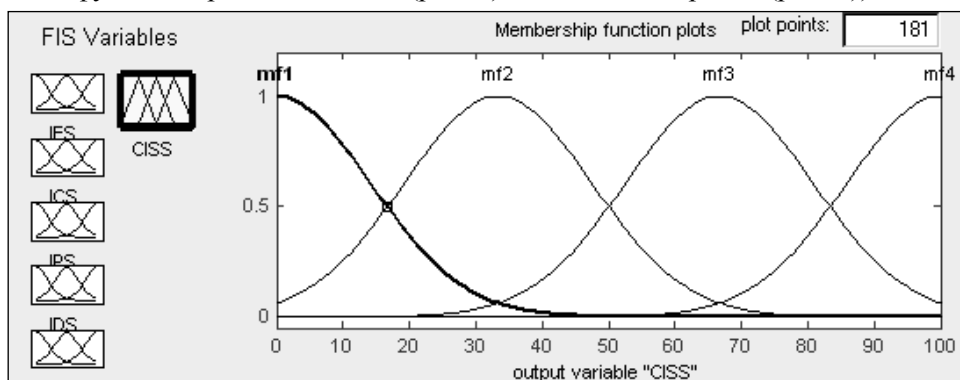


Рис. 1. Построение функций принадлежности

С помощью пакета математических программ MATLAB7.0/Fuzzy Toolbox/Fuzzy Inference System, применяя центроидный метод дефаззификации (рис. 2, 3), рассчитано значение 42,5, которое означает, что состояние индекса устойчивости социальной среды оценивается как слабоустойчивое.

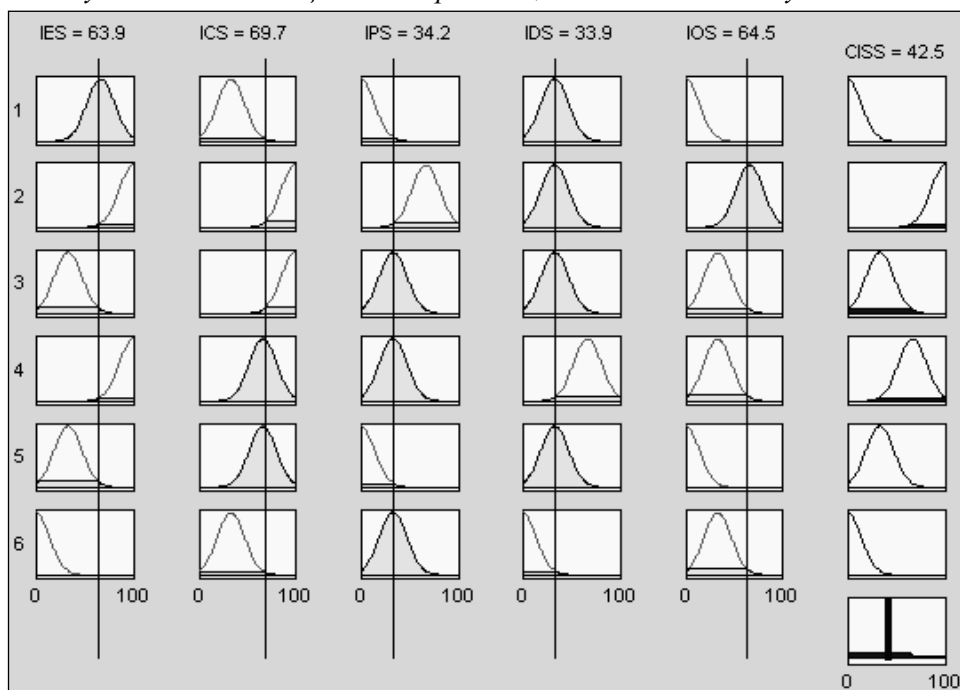


Рис. 2. Композиция правил и процедура дефаззификации

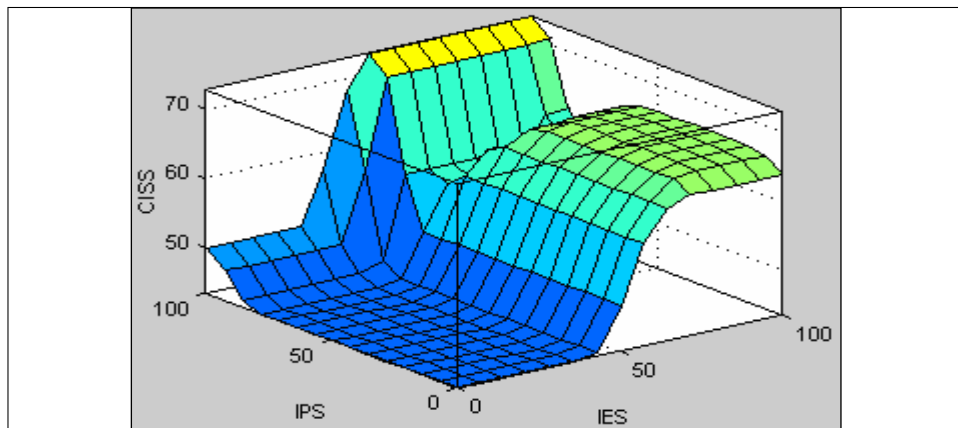


Рис. 3. Графическое представление полученных значений

### НЕЧЕТКАЯ МАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИНДЕКСА УСТОЙЧИВОСТИ СОЦИАЛЬНОЙ СРЕДЫ

Нечеткая Марковская модель используется для прогнозирования возможного значения индекса в следующем году. Степень значимости каждого из входных показателей для итогового индекса принимается эквивалентной друг другу.

Нечеткая Марковская модель выражается следующей формулой:

$$P_x^n = P_x^0 \circ M^n, \tag{1}$$

где  $M^n$  — нечеткая переходная матрица состояний,  $P_x^0$  — вектор вероятностей нечетких начальных состояний индекса,  $P_x^n$  — вектор вероятностей состояний индекса в следующем периоде.

Для решения задачи используются идеи, описанные в [3] и [4].

Как видно из табл. 2, четыре из тридцати показателей находятся в неустойчивом состоянии. Если вероятность пребывания каждого из четырех показателей в неустойчивом состоянии одинакова, то вероятность нахождения индекса устойчивости социальной среды в неустойчивом состоянии равна 0,13 (4/30). Тогда вероятность нахождения индекса в слабоустойчивом состоянии равна 0,87.

Вероятности неустойчивого состояния по показателям распределяются следующим образом.

Таблица 4. Распределения вероятности

Количество показателей	Вероятность нахождения показателя в неустойчивом состоянии
1–4	0–0,13
5–9	0,17–0,30
10–14	0,33–0,47
15–30	0,50–1

Табл. 4 дает возможность определить распределения вероятности по каждому из 4 состояний индекса: очень высокая устойчивость (VH) — 1–

0,87; высокая устойчивость ( $H$ ) — 0,87–0,70; низкая устойчивость ( $L$ ) — 0,70–0,53; очень низкая устойчивость ( $VL$ ) — 0,53–0.

Функции принадлежности для соответствующих состояний индекса  $VH, H, L, VL$  следующие:

$$\mu_{VH} = \frac{0}{0,87} + \frac{0,154}{0,88} + \frac{0,308}{0,89} + \frac{0,462}{0,90} + \frac{0,616}{0,91} + \frac{0,770}{0,92} + \frac{0,924}{0,93} + \frac{1}{0,935} + \frac{0,924}{0,94} + \frac{0,770}{0,95} + \frac{0,616}{0,96} + \frac{0,462}{0,97} + \frac{0,308}{0,98} + \frac{0,154}{0,99} + \frac{0}{1},$$

$$\mu_H = \frac{0}{0,70} + \frac{0,188}{0,71} + \frac{0,236}{0,72} + \frac{0,354}{0,73} + \frac{0,472}{0,74} + \frac{0,590}{0,75} + \frac{0,708}{0,76} + \frac{0,826}{0,77} + \frac{0,944}{0,78} + \frac{1}{0,785} + \frac{0,944}{0,79} + \frac{0,826}{0,80} + \frac{0,708}{0,81} + \frac{0,590}{0,82} + \frac{0,472}{0,83} + \frac{0,354}{0,84} + \frac{0,236}{0,85} + \frac{0,188}{0,86} + \frac{0}{0,87},$$

$$\mu_L = \frac{0}{0,53} + \frac{0,188}{0,54} + \frac{0,236}{0,55} + \frac{0,354}{0,56} + \frac{0,472}{0,57} + \frac{0,590}{0,58} + \frac{0,708}{0,59} + \frac{0,824}{0,60} + \frac{0,944}{0,61} + \frac{1}{0,615} + \frac{0,944}{0,62} + \frac{0,824}{0,63} + \frac{0,708}{0,64} + \frac{0,590}{0,65} + \frac{0,472}{0,66} + \frac{0,354}{0,67} + \frac{0,236}{0,68} + \frac{0,188}{0,69} + \frac{0}{0,70},$$

$$\mu_{VL} = \frac{0}{0,0} + \frac{0,038}{0,01} + \frac{0,076}{0,02} + \frac{0,114}{0,03} + \frac{0,152}{0,04} + \frac{0,190}{0,05} + \frac{0,228}{0,06} + \frac{0,266}{0,07} + \frac{0,304}{0,08} + \frac{0,342}{0,09} + \frac{0,380}{0,10} + \frac{0,418}{0,11} + \frac{0,456}{0,12} + \frac{0,494}{0,13} + \frac{0,532}{0,14} + \frac{0,570}{0,15} + \frac{0,608}{0,16} + \frac{0,646}{0,17} + \frac{0,684}{0,18} + \frac{0,722}{0,19} + \frac{0,760}{0,20} + \frac{0,798}{0,21} + \frac{0,836}{0,22} + \frac{0,874}{0,23} + \frac{0,912}{0,24} + \frac{0,950}{0,25} + \frac{0,988}{0,26} + \frac{1}{0,265} + \frac{0,988}{0,27} + \frac{0,950}{0,28} + \frac{0,912}{0,29} + \frac{0,874}{0,30} + \frac{0,836}{0,31} + \frac{0,798}{0,32} + \frac{0,760}{0,33} + \frac{0,722}{0,34} + \frac{0,684}{0,35} + \frac{0,646}{0,36} + \frac{0,608}{0,37} + \frac{0,570}{0,38} + \frac{0,532}{0,39} + \frac{0,494}{0,40} + \frac{0,456}{0,41} + \frac{0,418}{0,42} + \frac{0,380}{0,43} + \frac{0,342}{0,44} + \frac{0,304}{0,45} + \frac{0,266}{0,46} + \frac{0,228}{0,47} + \frac{0,190}{0,48} + \frac{0,152}{0,49} + \frac{0,114}{0,50} + \frac{0,076}{0,51} + \frac{0,038}{0,52} + \frac{0}{0,53}.$$

На основании указанного выше распределения вероятностей строится следующая нечеткая переходная матрица состояний:

$$M^1 = \begin{pmatrix} VL & H & M & L \\ M & VL & H & M \\ H & VH & L & VL \\ L & M & H & VL \end{pmatrix}.$$

Как правило, данная матрица строится экспертами в зависимости от устойчивости социальной среды государства.

Вектор вероятностей нечетких начальных состояний  $P_x^0$  определяется на основании значения индекса устойчивости социальной среды, рассчитанного методом нечеткого логического вывода. Так как в нашем случае

в неустойчивом состоянии находятся четыре показателя из тридцати, то вероятность индекса устойчивости социальной среды остаться в слабоустойчивом состоянии равна 0,87, перейти в состояние неустойчивости — 0,02; в состояние средней устойчивости — 0,08, в состояние устойчивости — 0,03:

$$P_x^0 = (VL, VL, VH, VL) = (0,03; 0,08; 0,87; 0,02).$$

Подставив значения  $M^1$  и  $P_x^0$  в формулу (1) можно рассчитать значение вектора вероятностей состояний индекса в следующем периоде  $P_x^1$ :

$$P_x^1 = (VL, VL, VH, VL) \circ \begin{pmatrix} VL & H & M & L \\ M & VL & H & M \\ H & VH & L & VL \\ L & M & H & VL \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Согласно логическим вычислениям имеем:

$$(VL \wedge H) \vee (VL \wedge M) \vee (VH \wedge H) \vee (VL \wedge L) = VL \vee VL \vee H \vee L = H,$$

$$(VL \wedge H) \vee (VL \wedge VL) \vee (VH \wedge VH) \vee (VL \wedge M) = VL \vee VL \vee VH \vee VL = VH,$$

$$(VL \wedge M) \vee (VL \wedge H) \vee (VH \wedge L) \vee (VL \wedge H) = VL \vee VL \vee L \vee VL = L,$$

$$(VL \wedge L) \vee (VL \wedge M) \vee (VH \wedge VL) \vee (VL \wedge VL) = VL \vee VL \vee VL \vee VL = VL.$$

Соответственно по формуле (2) получен вектор вероятностей состояний индекса в следующем году:

$$P_x^1 = (H, VH, L, VL) = (0,78; 0,93; 0,61; 0,26).$$

## ВЫВОДЫ

В отличие от традиционных методов, нечеткие модели позволяют решать задачи в условиях неопределенности. В тоже время применение нечеткой Марковской модели более целесообразно в долгосрочных прогнозах. Учитывая, что результаты прогнозирования во многом зависят от переходной матрицы, в обоих случаях она должна строиться с участием высококвалифицированных экспертов. В дальнейших исследованиях необходимо также определять степень значимости значения каждого показателя для оценки выходного параметра.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Geurt van de Kerk, Arthur Manuel*. Sustainable Society Index // Sustainable Society Foundation, December. — 2008. — [http://www.eoearth.org/article/Sustainable\\_Society\\_Index](http://www.eoearth.org/article/Sustainable_Society_Index).
2. *Zgurovsky M.Z.* Sustainable development global simulation: Opportunities and treats to the planet // Russian Journal of Earth Sciences, ES-2003. — 2007. — **9**. — P. 1–16.
3. *Zadeh L.A.* Linguistic Approach and its Application in Decision Analysis, Directions in Large-Scale Systems – Book, Plenum Press. — 1975. — 357–359 p.
4. *Chin Wen Cheong, Amy Lim Hui Lan & Ramachandran V.* Web Server Workload Forecasting — Fuzzy Linguistic Approach // International journal of the Computer, the Internet and Managment, September–December. — 2001. — **9**. — № 3. — P. 36–44.

Поступила 07.06.2010



УДК 519.161

## МЕТОД ГІЛОК ТА МЕЖ У ГАМІЛЬТОНОВІЙ ЗАДАЧІ ПРО СІЛЬСЬКОГО ЛИСТОНОШУ

А.В. МОРОЗОВ, А.В. ПАНІШЕВ

Сформульовано гамільтонову задачу про сільського листоношу, яка є узагальненням гамільтонової задачі комівояжера. Запропоновано модифікацію класичного методу гілок та меж (методу Літтла), яка дозволяє знаходити точний розв'язок гамільтонової задачі про сільського листоношу або коректно встановити його відсутність.

### ВСТУП

Задача комівояжера та методи її розв'язання нині є широко відомими. Менш відомою є гамільтонова задача комівояжера, яка описана в роботах [1–2]. У цій роботі описується узагальнення гамільтонової задачі комівояжера для випадку, коли додатково задано множину ребер, через які обов'язково має пройти гамільтонів цикл. Це узагальнення називатимемо гамільтоновою задачею про сільського листоношу (ГЗСЛ) [3, 4]. Відомі на сьогодні методи розв'язання гамільтонової задачі комівояжера не можуть бути безпосередньо застосовані для такої задачі.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сформулюємо задачу про сільського листоношу в термінах теорії графів.

Задано зв'язний зважений граф  $H = (V, U)$  з множиною вершин  $V$ ,  $|V| = n$  та множиною ребер  $U$ . Кожному ребру  $\{i, j\} \in U$  приписано вагу  $d_{ij} \in Z_0^+$ ,  $i \neq j$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ ,  $Z_0^+$  — множина невід'ємних цілих чисел. Граф  $H$  повністю визначається симетричною матрицею ваг  $[d_{ij}]_n$ , де  $d_{ij} \in Z_0^+$ , якщо  $\{i, j\} \in U$  та  $d_{ij} = \infty$  інакше,  $i \neq j$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ ,  $d_{ii} = \infty$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ . На множині  $U$  задано непорожню підмножину ребер  $R$ . Необхідно знайти в графі  $H$  цикл, який містить кожне ребро з  $R$  та має мінімальну сумарну вагу всіх ребер.

Позначимо  $z(R)$  гамільтонів цикл графу  $H$ , який проходить по всім ребрам множини  $R$ . Назвемо ГЗСЛ задачу, що полягає в знаходженні гамільтонового циклу  $z^*(R)$ , який мінімізує функціонал:

$$C(z(R)) = \sum_{\{k,l\} \in z(R)} d_{kl}. \quad (1)$$

Зацікавленість у розв'язанні ГЗСЛ виникає у тому випадку, коли потрібно знайти кільцевий маршрут на транспортній мережі міста або району, що моделюється графом  $H = (V, U)$ . Кожному пункту відправлення (прибуття) мережі відповідає вершина  $i \in V$ ,  $|V| = n$ , а кожному ребру  $\{i, j\} \in U$  — відрізок дорожнього полотна між парою сусідніх пунктів  $i$  та  $j$ . Ребро  $\{i, j\}$  характеризується вагою (вартістю)  $d_{ij}$ , яка дорівнює затратам на переміщення транспортного засобу з  $i$  в  $j$  або з  $j$  в  $i$ .

На практиці пасажирські автоперевезення виконуються за маршрутами, для яких завчасно визначено порядок проходження деякої частини пунктів. Основою для вибору таких ділянок можуть бути пріоритети одних пунктів над іншими: масиву багатоповерхових будівель над котеджним селищем, заводського району над курортною зоною тощо. Наприклад, середній час поїздки пасажирів за кільцевим міським маршрутом, що охоплює сусідні, прилеглі, щільнонаселені квартали — менший, ніж у будь-якого іншого кільцевого маршруту, якщо показники якості дорожнього покриття мережі відповідають встановленим параметрам. Ділянки доріг, які априорі включено в планований кільцевий маршрут у графі  $H = (V, U)$ , подані множиною ребер  $R$ , що утворюють сукупність ланцюгів. Якщо в графі  $H$  міститься гамільтонів цикл  $z(R)$ , то у відповідній транспортній мережі він визначає найпростіший кільцевий маршрут.

ГЗСЛ є NP-повною, оскільки у випадку  $R = \emptyset$  вона є NP-повною гамільтоновою задачею комівояжера (ГЗК) [4]. У [2] запропоновано алгоритм, який коректно знаходить розв'язок ГЗК, якщо граф  $H$  гамільтонів, і встановлює її нерозв'язність у протилежному випадку. В основі запропонованого алгоритму лежить схема гілок та меж, яка виконується після перевірки достатніх умов нерозв'язності ГЗСЛ. Очевидно, що складність такої перевірки має бути обмежена поліномом від розміру задачі.

Безпосереднє застосування алгоритму гілок та меж з [1, 2] не дозволяє розв'язати ГЗСЛ. Включення в шуканий гамільтонів цикл заданої підмножини ребер  $R \neq \emptyset$  виявляється настільки сильним обмеженням, що вимагає іншого підходу до організації розгалуження та обчислення нижніх оцінок для  $C(z^*(R))$ .

## АЛГОРИТМ

За допомогою вершинно-реберного перетворення, який описаний у [5] ГЗСЛ зводиться до цієї ж задачі на графі  $H = (V, U)$ , в якому степені всіх вершин більші, ніж 2 і множина ребер  $R$ , яка міститься в шуканому гамільтоновому циклі, утворює паросполучення  $R$ . Очевидно,  $|R| \leq \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor$ ,  $n = V$ . Відмітимо, що величина  $|R|$  обмежує простір розв'язків настільки, що він може виявитися порожнім. Назвемо допустимий розв'язок ГЗСЛ  $z(R)$  обходом.

Пошук розв'язку задачі починається з перетворення матриці вартостей графу  $H$  у приведену матрицю [6]. Він полягає в тому, що в рядку  $i$  шука-

ється мінімальний елемент  $\alpha_i = \min_j d_{ij}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , який віднімається від кожного елемента цього рядка. Потім у стовпці  $j$  шукається мінімальний елемент  $\beta_j = \min_i d_{ij}$ ,  $j = \overline{1, n}$ , який віднімається від кожного елемента цього стовпця. Елементи  $\alpha_i$  та  $\beta_j$  називаються коефіцієнтами приведення. З приведеної матриці  $[d_{ij}]_n$  знаходиться нижня границя вартості шуканого розв'язку

$$\phi(R) = \sum_{\{i,j\} \in R} \min \{d_{ij}, d_{ji}\} + \gamma, \quad (2)$$

де

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \alpha_i + \sum_{j=1}^n \beta_j.$$

Приведена матриця, яка визначає множину всіх розв'язків ГЗСЛ, у загальному випадку не симетрична. Їй взаємно однозначно відповідає зважений орієнтований мультиграф  $H' = (V, U')$ , в якому вершини  $i$  та  $j$  зв'язані парою дуг  $(i, j)$  та  $(j, i)$ , якщо в графі  $H = (V, U)$  вони зв'язані ребром  $\{i, j\}$ . Таким чином, кожне ребро  $\{i, j\} \in R$  графу  $H$  подане в мультиграфі  $H'$  двома дугами  $(i, j) \in R'$ ,  $(j, i) \in R'$ ,  $|U'| = 2|U|$ ,  $|R'| = 2|R|$ .

У приведеній матриці виберемо ті елементи  $(i, j)$  та  $(j, i) \in R'$ , для яких  $\Delta_{ij} = \min \{d_{ij}, d_{ji}\} > 0$  і покладемо

$$d_{ij} = d_{ij} - \min \{d_{ij}, d_{ji}\} = d_{ij} - \Delta_{ij}, \quad d_{ji} = d_{ji} - \min \{d_{ij}, d_{ji}\} = d_{ji} - \Delta_{ij}.$$

Назвемо отриману матрицю  $[d_{ij}]_n$  повністю приведеною. Подальші дії будуть виконуватися за допомогою цієї матриці.

Перетворення матриці вартостей графу  $H$  у повністю приведену матрицю  $[d_{ij}]_n$  має аргументоване обґрунтування. ГЗСЛ для повністю приведеної матриці полягає в побудові гамільтонового контуру або обходу мінімальної вартості, який включає в точності одну дугу з кожної пари  $(i, j)$ ,  $(j, i) \in R'$ , що містить хоча б одну дугу з нульовою вагою. Таким чином, за матрицею  $[d_{ij}]_n$  визначається список дуг нульової ваги, які є претендентами на включення в оптимальний розв'язок.

Викладені міркування відкривають можливість адаптувати класичний алгоритм гілок та меж, який описаний у [6], для пошуку розв'язку ГЗСЛ. Покажемо, що спосіб розгалуження допустимих розв'язків  $z(R)$  вкладається у відому схему побудови бінарного дерева перебору [6].

Кореню дерева перебору  $\{z(R)\}$  поставимо у відповідність повністю приведену матрицю  $[d_{ij}]_n$  з оцінкою  $\phi(R)$  і визначимо дугу мультиграфу  $H'$ , яка ініціює розгалуження. Для цього, як і в [6], кожний елемент  $(p, q)$  в  $[d_{ij}]_n$  такий, що  $d_{pq} = 0$ , оцінимо величиною

$$\gamma(p, q) = \min_{i \neq q} d_{pi} + \min_{j \neq p} d_{jq} \quad (3)$$

і знайдемо елемент  $(p, q)$  з найбільшим значенням

$$\Gamma(k, l) = \max \{ \gamma(p, q) \mid d_{pq} = 0 \}. \quad (4)$$

Елементу  $(p, q)$  у мультиграфі  $H'$  відповідає дуга  $(p, q)$ , яка ініціює розбиття множини всіх обходів на дві підмножини та породжує в умовах ГЗСЛ два випадки:  $\{k, l\} \notin R$  та  $\{k, l\} \in R$ .

У випадку  $\{k, l\} \notin R$  множина всіх розв'язків задачі розбивається на підмножини  $\{\{k, l\} \notin R\}$  та  $\{\overline{(k, l)}\}$ . Перша підмножина включає всі обходи, які містять дугу  $(k, l)$ , а друга — усі обходи, які не містять цієї дуги.

Матриця, за якою обчислюється нижня границя  $\phi(\{(k, l) \in R'\})$  вартості всіх обходів множини  $\{\{k, l\} \notin R \notin R'\}$  і визначає цю множину, знаходиться так само, як і в [6], за умови, що виконується таке правило.

Якщо множина  $R$  містить ребро  $\{x, k\}$ , то в шуканий обхід разом із дугою  $(k, l)$  включається дуга  $(x, k)$ . Аналогічно, якщо множина  $R$  містить ребро  $\{y, l\}$ , то до дуги  $(k, l)$  приєднується дуга  $(l, y)$ . Включення дуги  $(x, k)$  або  $(l, y)$  у підмножину розв'язків  $\{(k, l) \notin R'\}$  означає, що матриця, яка її визначає, не містить не тільки рядок  $k$  та стовпець  $l$ , але і той рядок і стовпець, номери яких є початком і кінцем дуги, що приєднується. У випадку  $\{x, k\}, \{y, l\} \in R$  до дуги  $(k, l)$  приєднуються дуги  $(x, k)$  і  $(l, y)$ , а у матриці, яка визначає множину  $\{(k, l) \notin R'\}$ , виключаються рядки  $x, k, l$  та стовпці  $k, l, y$ .

Позначимо нижню границю вершини розгалуження  $\phi$ . Для дуги  $(k, l) \notin R'$ , яка ініціює розгалуження, покладемо

$$\mu_k = \begin{cases} d_{xk}, & \text{якщо } \{x, k\} \in R, \\ 0, & \text{інакше;} \end{cases} \quad \mu_l = \begin{cases} d_{ly}, & \text{якщо } \{l, y\} \in R, \\ 0, & \text{інакше,} \end{cases}$$

де  $d_{xk}, d_{ly}$  — елементи матриці, яка відповідає границі  $\phi$ . У випадку  $\phi = \phi(R)$  вони є елементами повністю приведеної матриці  $[d_{ij}]_n$ . Тоді вартість усіх обходів множини  $\{(k, l) \notin R'\}$  обмежена знизу величиною

$$\phi(\{(k, l) \notin R\}) = \phi + \mu_k + \mu_l + \sum \alpha'_i + \sum \beta'_j, \quad (5)$$

де  $\alpha'_i$  та  $\beta'_j$  — коефіцієнти приведення, отримані в результаті перетворення матриці, якій відповідає границя  $\phi$ , у матрицю, яка визначає множину  $\{(k, l) \notin R\}$ .

Матриця, яка визначає множину  $\overline{(k, l)}$ , і границя  $\phi(\overline{(k, l)})$  знаходиться так, як і в [6]:

$$\phi(\overline{(k, l)}) = \phi + \Gamma(k, l). \quad (6)$$

Розглянемо випадок, коли  $(k, l) \in R$ . Простір розв'язків ГЗСЛ  $\{z(R)\}$  розбивається на дві підмножини  $\{(k, l)\}$  та  $\{(l, k)\}$ . У першу підмножину включаються всі обходи, які містять дугу  $(k, l)$ , а в другу — дугу  $(l, k)$ .

Нехай вершині розгалуження відповідає границя  $\phi$  та матриця  $D$ , яка породжує дугу  $(k, l)$  або  $(l, k)$ ,  $\{k, l\} \in R$  із максимальною оцінкою. Матриця, яка визначає підмножину  $\{(k, l)\}$ , знаходиться в результаті виключення

з  $D$  рядка  $k$  та стовпця  $l$ , присвоєння елементу  $d_{lk}$  значення  $\infty$  та приведення отриманої скороченої матриці. Аналогічно, для знаходження матриці, яка визначає підмножину  $\{(l, k)\}$ , необхідно в  $D$  покласти  $d_{kl} = \infty$ , видалити рядок  $l$  та стовпець  $k$  та виконати приведення отриманої скороченої матриці. Нижні границі вартості обходів для підмножини  $\{(k, l)\}$  та  $\{(l, k)\}$  обчислюються таким чином:

$$\phi(k, l) = \phi + d_{kl} + \sum_{i \neq k} \alpha'_i + \sum_{j \neq l} \beta'_j, \quad (7)$$

$$\phi(l, k) = \phi + d_{lk} + \sum_{i \neq k} \alpha'_i + \sum_{j \neq l} \beta'_j, \quad (8)$$

де  $\alpha'_i, \beta'_j$  — коефіцієнти приведення, отримані в результаті перетворення матриці  $D$ .

Можливим є випадок, коли в  $D$  або  $d_{kl} = \infty$ , або  $d_{lk} = \infty$ . З (7) і (8) випливає, що якщо  $d_{kl} = \infty$ , то  $\{(k, l)\} = \emptyset$ , якщо  $d_{lk} = \infty$ , то  $\{(l, k)\} = \emptyset$ .

Модифікація базового алгоритму гілок та меж для розв'язання ГЗСЛ, яку отримано в результаті вершинно-реберного перетворення (ВРП), має такий вигляд.

0.  $H = (V, U)$  — неорієнтований зважений граф із степенями вершин більшими 2, поданий матрицею вартостей порядку  $n = |V|$ ;  $R$  — паросполучення графу  $H$ , яке міститься в шуканому гамільтоновому циклі  $z^*(R)$  мінімальної вартості. Покладаємо  $C^* = \infty$ .

1. Матриця вартостей графу  $H$  перетворюється в приведену матрицю, за якою обчислюється нижня границя  $\phi(R)$  вартостей для всіх розв'язків задачі. З приведеної матриці визначається повністю приведена матриця  $D = [d_{ij}]_n$ , яка відповідає орієнтованому зваженому мультиграфу  $H' = (V, U')$ ,  $|U'| = 2|U|$ ,  $|R'| = 2|R|$ . У  $H'$  потрібно знайти гамільтонів контур (обхід), який містить рівно по одній дузі з кожної пари дуг  $(i, j)$ ,  $(j, i) \in R'$ , і має мінімальну вартість.

2. У матриці  $D$  за формулами (3) і (4) знаходиться елемент  $(k, l)$ , поданий у мультиграфі дугою  $(k, l)$ , яка породжує в дереві перебору вершину розгалуження.

3. Якщо  $\{k, l\} \notin R$ , то перехід до п. 7.

4. Якщо  $d_{lk} = \infty$ , то підмножина обходів  $\{(l, k)\}, \{k, l\} \in R$ , яка містить дугу  $(l, k)$  порожня; перехід до п. 6.

5. Для визначення підмножини обходів  $\{(l, k)\}, \{k, l\} \in R$ , які містять дугу  $(l, k)$ , розглядається скорочена матриця, де  $d_{kl} = \infty$  і виключено рядок  $l$  та стовпець  $k$ . Після її приведення за формулою (8) обчислюється нижня границя  $\phi(l, k)$  вартості дуг усіх обходів підмножини  $\{(l, k)\}$ , яка породжує в дереві перебору поточну активну вершину  $\{(l, k)\}$ . Якщо  $C^* > \phi(l, k)$ , то вершина  $\{(l, k)\}$  з приведеною матрицею  $D$  та границею  $\phi(l, k)$  приєднується до вершини розгалуження, інакше вона далі не розглядається. Перехід до п. 9.

6. Для визначення підмножини обходів  $\{(k,l)\}, \{k,l\} \in R$ , які містять дугу  $(k,l)$ , розглядається скорочена матриця, в якій  $d_{lk} = \infty$  і виключені рядок  $k$  та стовпець  $l$ . Після її приведення за формулою (7) обчислюється нижня границя  $\phi(k,l)$  вартості всіх обходів підмножини  $\{(k,l)\}$ , яка викликає в дереві перебору поточну активну вершину  $\{(k,l)\}$ . Якщо  $C^* > \phi(k,l)$ , вершина  $\{(k,l)\}$  з приведеною матрицею  $D$  та границею  $\phi(k,l)$  приєднується до вершини розгалуження, в іншому випадку вершина виключається з подальшого розгляду. Перехід до п. 9.

7. Під час визначення підмножини обходів  $\{\overline{(k,l)}\}, \{k,l\} \notin R$ , які не містять дуги  $(k,l)$ , матриця у вершині розгалуження зводиться до матриці  $D$  після заміни  $d_{kl} \neq \infty$  на  $d_{kl} = \infty$ . Якщо  $C^* > \phi(\overline{(k,l)})$ , то в дереві перебору вершина  $\{\overline{(k,l)}\}$  додається до вершини розгалуження разом із приведеною матрицею  $D$  та нижньою границею  $\phi(\overline{(k,l)})$  вартості обходів  $\{\overline{(k,l)}\}$ , в іншому випадку вершина більше не розглядається. Величина  $\phi(\overline{(k,l)})$  дорівнює нижній границі вершини розгалуження, збільшеній на оцінку  $\tilde{A}(k,l)$ .

8. Для визначення підмножини обходів  $\{(k,l) \notin R'\}$ , які містять дугу  $(k,l)$ , у матриці при вершині розгалуження виключаються: рядок  $k$  та стовпець  $l$ ; рядки  $s,k$  та стовпці  $k,l$ , якщо  $\{s,k\} \in R$ ; рядки  $k,l$  та стовпці  $p,l$ , якщо  $\{l,p\} \in R$ ; рядки  $s,k,l$  та стовпці  $k,l,p$ , якщо  $\{s,k\}, \{l,p\} \in R$ . Шляхом приведення отриманої матриці шукається матриця  $D$ . Після обчислення нижньої границі  $\phi(\{(k,l) \notin R'\})$  вартостей обходів  $\{(k,l) \notin R'\}$ , яка визначається за формулою (5), вершина  $\{(k,l) \notin R'\}$  з матрицею  $D$  та оцінкою  $\phi(\{(k,l) \notin R'\})$  приєднується до вершини розгалуження, якщо виконується умова  $C^* > \phi(\{(k,l) \notin R'\})$ , інакше вершину більше не розглядаємо.

9. Якщо розмірність матриці  $D$  дорівнює одиниці, то отримано допустимий розв'язок  $z(R)$  ГЗСЛ. Виключаємо з подальшого розгляду вершини, оцінки яких більші або рівні  $C^*$ . Якщо після виключення не залишилося жодної вершини, то перехід до п. 10. Інакше, знаходимо вершину дерева з найменшою оцінкою. Якщо таких вершин кілька, то вибираємо ту, якій відповідає матриця меншої розмірності. Перехід до п. 2.

10. Якщо під час розв'язання не було знайдено жодного припустимого розв'язку, то ГЗСЛ є нерозв'язною. Інакше  $z^*(R)$  — шуканий гамільтонів контур, а  $C^*$  — його вага.

**ПРИКЛАД**

Для матриці вартостей графу  $H = (V,U)$

	1	2	3	4	5	6
1	$\infty$	10	$\infty$	5	7	18
2	10	$\infty$	23	15	$\infty$	8
3	$\infty$	23	$\infty$	25	24	$\infty$
4	5	15	25	$\infty$	$\infty$	23
5	7	$\infty$	24	$\infty$	$\infty$	11
6	18	8	$\infty$	23	11	$\infty$

і підмножини його ребер  $R = \{\{3,4\}, \{1,5\}, \{2,6\}\}$  необхідно знайти розв'язок ГЗСЛ або коректно встановити, що задача не має розв'язку.

1. Після віднімання із кожного рядка вихідної матриці вектора  $\alpha = (5, 8, 23, 5, 7, 8)$  і віднімання з кожного стовпця отриманої матриці вектора  $\beta = (0, 0, 15, 0, 1, 0)$  знайдемо приведену матрицю

	1	2	3	4	5	6
1	$\infty$	5	$\infty$	0	1	13
2	2	$\infty$	0	7	$\infty$	0
3	$\infty$	0	$\infty$	2	0	$\infty$
4	0	10	5	$\infty$	$\infty$	18
5	0	$\infty$	2	$\infty$	$\infty$	4
6	10	0	$\infty$	15	2	$\infty$

і визначимо нижню границю вартості всіх розв'язків ГЗСЛ:

$$\begin{aligned} \phi(R) &= \min \{d_{34}, d_{43}\} + \min \{d_{15}, d_{51}\} + \{d_{26}, d_{62}\} + \sum_{i=1}^6 \alpha_i + \sum_{j=1}^6 \beta_j = \\ &= \min \{2, 5\} + \min \{1, 0\} + \min (0, 0) + 56 + 16 = 74. \end{aligned}$$

Оскільки  $\Delta_{34} = \min \{d_{34}, d_{43}\} = d_{34} = 2 > 0$ , то поклавши  $d_{34} = 0$ ,  $d_{43} = 3$ , отримаємо повністю приведену матрицю

	1	2	3	4	5	6
1	$\infty$	5	$\infty$	0	1	13
2	2	$\infty$	0	7	$\infty$	0
3	$\infty$	0	$\infty$	0	0	$\infty$
4	0	10	3	$\infty$	$\infty$	18
5	0	$\infty$	2	$\infty$	$\infty$	4
6	10	0	$\infty$	15	2	$\infty$

2. Обчислимо оцінки для всіх нульових елементів повністю приведенної матриці:

$$\gamma(1,4) = 1, \gamma(2,3) = 2, \gamma(2,6) = 4, \gamma(3,2) = 0,$$

$$\gamma(3,4) = 0, \gamma(3,5) = 1, \gamma(4,1) = 3, \gamma(5,1) = 2, \gamma(6,2) = 2.$$

Дуга (2,6) мультиграфу  $H'$  ініціює розгалуження.

3.  $\{2,6\} \in R$ .

4.  $d_{26} \neq \infty$ . Множина всіх розв'язків задачі розбивається на підмножину обходів  $\{(6,2)\}$ , які містять дугу (6,2) і підмножину обходів  $\{(2,6)\}$ , які містять дугу (2,6).

5. Знаходимо матрицю, яка визначає підмножину обходів  $\{(6,2)\}$ . Для цього виключаємо дугу (2,6), поклавши  $d_{26} = \infty$ , виключаємо рядок 6 і стовпець 2 і приводимо отриману скорочену матрицю. Приведена матриця має вигляд

	1	3	4	5	6
1	$\infty$	$\infty$	0	1	9
2	2	0	7	$\infty$	$\infty$
3	$\infty$	$\infty$	0	0	$\infty$
4	0	3	$\infty$	$\infty$	14
5	0	2	$\infty$	$\infty$	0

і дає оцінку  $\phi(6,2) = \phi(R) + d_{62} + \sum_{i \neq 6} \alpha'_i + \sum_{j \neq 2} \beta'_j = 74 + 0 + 4 = 78$ .

6. Матриця, яка визначає підмножину обходів  $\{(2,6)\}$ , знаходиться шляхом присвоєння дузі (6,2) ваги  $d_{62} = \infty$ , виключенням рядка 2, стовпця 6 і приведенням отриманої матриці:

	1	2	3	4	5
1	$\infty$	5	$\infty$	0	1
3	$\infty$	0	$\infty$	0	0
4	0	10	1	$\infty$	$\infty$
5	0	$\infty$	0	$\infty$	$\infty$
6	8	$\infty$	$\infty$	13	0

Звідси випливає оцінка

$$\phi(2,6) = \phi(R) + d_{26} + \sum_{i \neq 2} \alpha'_i + \sum_{j \neq 6} \beta'_j = 74 + 0 + 2 + 2 = 78.$$

7. Розмірність приведеної матриці більша за одиницю. Будь-яка з вершин  $\{(2,6)\}$ ,  $\{(6,2)\}$  дерева розгалуження може бути обрана в якості активної. Виберемо вершину  $\{(2,6)\}$ .

8. Обчислимо оцінки для всіх нульових елементів матриці, яка визначає підмножину обходів  $\{(2,6)\}$ :

$$\gamma(1,4) = 1, \gamma(3,2) = 5, \gamma(3,4) = 0, \gamma(3,5) = 0, \gamma(4,1) = 1,$$

$$\gamma(5,1) = 0, \gamma(5,3) = 1, \gamma(6,5) = 8.$$

Дуга (6,5) ініціює розгалуження.

9.  $\{6,5\} \notin R$ ; множина обходів  $\{(2,6)\}$  розбивається на підмножину обходів  $\{(6,5) \notin R'\}$ , які включають дугу (6,5), і підмножину обходів  $\{\overline{(6,5)}\}$ , які не містять цю дугу.

10. У матриці, якій відповідає границя  $\phi(2,6)$ , покладемо  $d_{65} = \infty$  і приводимо отриману матрицю. Результатом таких дій є матриця

	1	2	3	4	5
1	$\infty$	5	$\infty$	0	1
3	$\infty$	0	$\infty$	0	0
4	0	10	1	$\infty$	$\infty$
5	0	$\infty$	0	$\infty$	$\infty$
6	0	$\infty$	$\infty$	5	$\infty$

і оцінка  $\phi(\overline{(6,5)}) = \phi(2,6) + \tilde{A}(6,5) = 78 + 8 = 86$ , яка обмежує знизу вартості всіх обходів  $\{\overline{(6,5)}\}$ , що включають дугу (2,6) і не містять дуги (6,5).

11. У матриці, яка відповідає нижній границі  $\phi(2,6)$ , виключаємо рядок 6 і стовпець 5. Оскільки ребра  $\{6,5\} \notin R$  і  $\{5,1\} \in R$  суміжні, то виключаємо рядок 5 і стовпець 1 та забороняємо дугу (1,2), покладаючи  $d_{12} = \infty$  задля уникнення виникнення підциклів. У результаті приведення отриманої матриці переходимо до матриці



	2	3	4
1	$\infty$	$\infty$	0
3	0	$\infty$	0
4	9	0	$\infty$

і оцінки  $\phi(\overline{(6,5)} \notin R') = \phi(2,6) + d_{51} + \sum \alpha'_i + \sum \beta'_j = 78 + 0 + 1 = 79$ , яка обмежує вартості всіх обходів  $\{(6,5) \notin R'\}$ . Розмірність таблиці більша за одиницю, тому вибираємо вершину розгалуження з найменшою нижньою границею  $\phi(6,2)$ .

12. Знаходимо у відповідній матриці оцінки для всіх її нульових елементів:  $\gamma(1,4) = 1$ ,  $\gamma(2,3) = 4$ ,  $\gamma(3,4) = 0$ ,  $\gamma(3,5) = 1$ ,  $\gamma(4,1) = 5$ ,  $\gamma(5,1) = 0$ ,  $\gamma(5,6) = 9$ .

Подальше розгалуження виконується за допомогою дуги  $(5,6)$ .

13. Так як  $\{5,6\} \notin R$ , множина обходів  $\{(6,2)\}$  подана розбиттям на підмножину  $\{(5,6) \notin R'\}$  і підмножину  $\{(5,6)\}$ .

14. Вершині  $\{(5,6)\}$  відповідає матриця

	1	3	4	5	6
1	$\infty$	$\infty$	0	1	0
2	2	0	7	$\infty$	$\infty$
3	$\infty$	$\infty$	0	0	$\infty$
4	0	3	$\infty$	$\infty$	14
5	0	2	$\infty$	$\infty$	$\infty$

і оцінка  $\phi(\overline{(5,6)}) = \phi(6,2) + \Gamma(5,6) = 78 + 9 = 87$ .

15. У матриці, яка визначає множину обходів  $\{(5,6) \notin R'\}$ , покладемо  $d_{21} = \infty$  для усунення підциклів:

	1	3	4
2	$\infty$	0	7
3	$\infty$	$\infty$	0
4	0	3	$\infty$

Оцінка, яка їй відповідає:  $\phi(\overline{(5,6)} \notin R') = \phi(6,2) + d_{15} = 78 + 1 = 79$ . Для розгалуження вибираємо вершину  $\{(6,5) \notin R'\}$  з найменшою нижньою границею.

16. Знаходимо оцінки для всіх нульових елементів матриці, які відповідають цій вершині:  $\gamma(1,4) = 0$ ,  $\gamma(3,2) = 9$ ,  $\gamma(3,4) = 0$ ,  $\gamma(4,3) = 9$ . Розгалуження продовжує дуга  $(3,2) \notin R'$ .

17. Матриця

	2	3	4
1	$\infty$	$\infty$	0
3	$\infty$	$\infty$	0
4	0	0	$\infty$

визначає множину обходів  $\{(3,2)\}$  з нижньою границею  $\phi(\overline{(3,2)}) = \phi(6,5) + \tilde{A}(3,2) = 79 + 9 = 88$ .

18. У матриці, яка відповідає вершині  $\{(6,5) \notin R'\}$ , покладемо  $d_{32} = \infty$ , виключаємо рядки 3, 4 і стовпці 2, 3.

19. У результаті отримаємо матрицю з єдиного елемента (1, 4) і, відповідно, обхід (2, 6), (6, 5), (5, 1), (1, 4), (4, 3), (3, 2) вартістю  $\phi((3,2) \notin R') = \phi(\overline{(6,5)} \notin R') + d_{43} = 79 + 0 = 79$ .

20. Допустимий розв'язок задачі  $z(R) = \{(2,6), (6,5), (5,1), (1,4), (4,3), (3,2)\}$  з вартістю  $C(z(R)) = 79$  є оптимальним. Дерево розв'язків задачі зображено на рисунку.

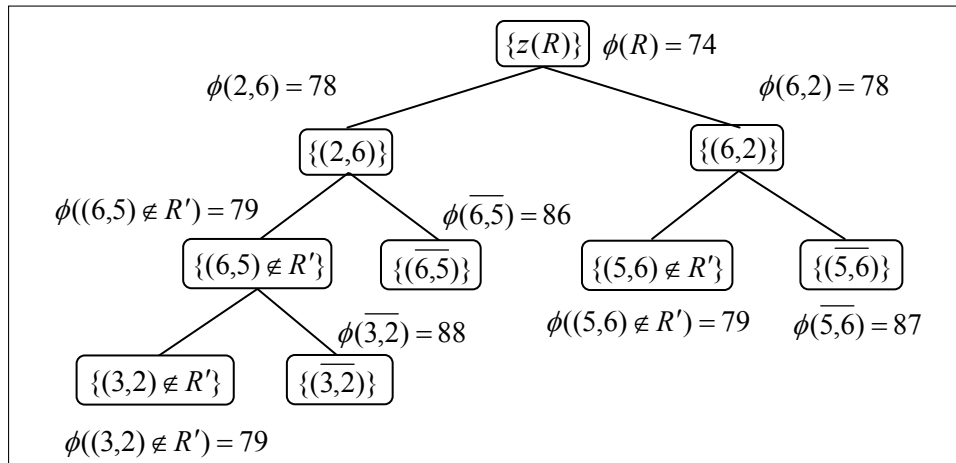


Рисунок. Дерево розв'язків

## ВИСНОВКИ

Сформульовано ГЗСЛ. На основі класичного методу Літтла побудовано модифікацію методу, яка дозволяє знаходити розв'язок задачі або встановлювати його відсутність. Перед застосуванням алгоритму пропонується використати процедуру вершинно-реберного перетворення [5], яке дає можливість перевірити необхідні умови існування розв'язку задачі, і, можливо, зменшити розмірність задачі. Проілюстровано роботу цього алгоритму на прикладі.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Garashchenko I., Panishev A.* Method of finding hamilton routes in transport network // Artificial Intelligence and Decision Making.: ITHEA, Sofia. — 2008. — № 7. — P. 43–48.
2. *Гаращенко И.В., Морозов А.В., Панишев А.В.* Метод решения гамильтоновой задачи коммивояжера // Искусственный интеллект. — 2008. — № 3. — С. 630–637.
3. *Гэри М., Джонсон Д.* Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. — М.: Мир, 1982. — 416 с.
4. *Теория расписаний и вычислительные машины:* пер. с англ. / Под. ред. Э.Г. Коффмана. — М.: Наука, 1984. — 335 с.
5. *Морозов А.В., Панишев А.В.* Вершинно-реберное преобразование в гамильтоновой задаче о сельском почтальоне // Искусственный интеллект. — 2009. — № 3. — С. 138–143
6. *Яблонский А.А.* Минимизация кольцевых маршрутов доставки продукции потребителям // Экономика и математические методы. — 2009. — № 3. — С. 124–131.

Надійшла 21.01.2010

## РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ ЗА УМОВИ РЕАЛІЗАЦІЇ КОНЦЕПЦІЇ КОРПОРАЦІЙНОЇ ЕКОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ

Т.В. КОЗУЛЯ, Н.В. ШАРОНОВА

Подано теоретико-практичні засади формування оцінки екологічного ризику щодо антропогенно-навантажених територій і стану здоров'я населення на корпоративній основі формування системи дослідження. Визначено переваги концепції корпоративної екологічної системи (КЕС). Подано розрахунки ризику на основі ймовірно-термодинамічних показників стану об'єктів дослідження.

### ВСТУП

Одним із головних питань розробки системи підтримки прийняття рішення (СППР) є вибір математичних моделей і методів прийняття рішень, що є основою її функціонування. Прийняття рішень для дослідженої системи в екологічному моніторингу пов'язано з її складністю, розподіленням підсистем, невизначеністю поточного стану, необхідністю враховувати велику кількість різних факторів і критеріїв, що характеризують варіанти рішень. Школою академіка М.З. Згуровського багато років ведуться наукові роботи з математичної формалізації та розробки апарату функціонування систем екологічної безпеки за теорією сталого розвитку [1–3]. У запропонованій концепції корпоративної екологічної системи (КЕС) вирішуються завдання щодо екологічних принципів цієї теорії завдяки впровадженню комплексу ймовірно-термодинамічної оцінки з використанням ентропії як похідного поняття від значень «стан об'єкта» або «фазовий простір об'єкта», її можливості визначати ступінь варіативності мікростану об'єкта [4–6].

Створення і впровадження СППР в інформаційні управляючі системи (ІУС) екологічного моніторингу за умови впровадження концепції КЕС вимагає поетапної розробки й розвитку сукупності всіх підсистем, які забезпечують СППР технічне, математичне, програмне, інформаційне та організаційне забезпечення екологічної управляючої дії (рис. 1).

Необхідність розвитку соціально-економічної системи та складність наслідків впливу інтенсивного її розвитку на стан живих організмів і людини визначили доцільність формування нових підходів в управлінні екологічною безпекою з реалізацією інформаційно-управляючої системи в межах КЕС. У наукових роботах вітчизняних та зарубіжних авторів (В.І. Ізмалков, А.О. Биков, В.В. Мурзін, R.V. Ricraft, J.L. Diets, K.R. Swith, А.Т. Нікітін, С.А. Степанов, І.В. Масленнікова) розглядаються різні концепції, принципи та моделі екологічної безпеки. Розроблено системно-динамічну концепцію (С.І. Дорогунцов, О.М. Ральчук), яка базується на уявленні про інтегровану безпеку. Менш вивченими є питання формування екологічної небезпеки та управління безпекою в умовах постійно присутнього техногенного навантаження, яке не носить вираженого екстремального характеру. Аналіз науко-

вих досягнень у розвитку управління екологічною безпекою з урахуванням обов'язкового зв'язку між трьома складовими (екологічною, соціальною й економічною системами) показав, що на цей час існують декілька корпоративних систем (КС) управління. Розрізняють КС з: управління виробничими запасами; управління конкретним виробництвом; роботи з клієнтом. Перші називаються Material Requirement Planning, другі — Enterprise Resource Planning, треті — Custom Relationship Management. Вони мають певні результати щодо можливостей підвищення результативності розвитку соціально-економічної системи завдяки корпоративним зв'язкам. Корпоративний екологічний менеджмент (КЕМ) зосереджений на задачах економічної діяльності (виробництво, організація) у тих напрямках, які безпосередньо або опосередковано належать до взаємовідносин підприємства з навколишнім природним середовищем [1–3, 7].

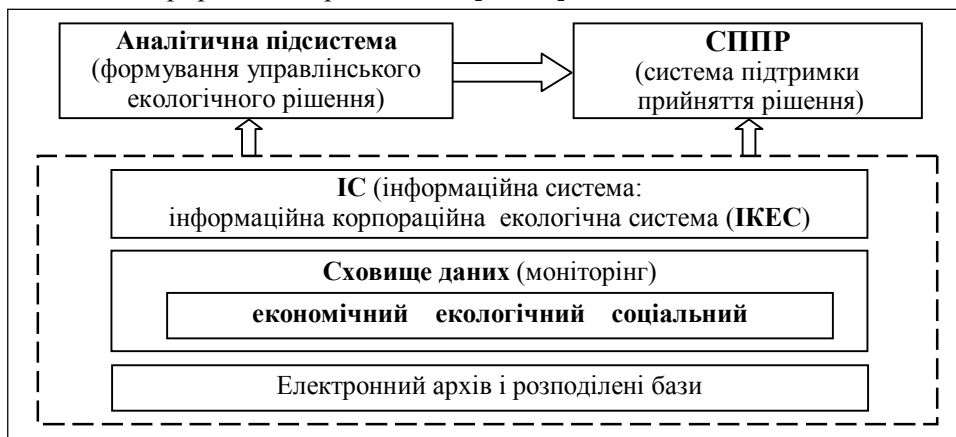


Рис. 1. Модель інформаційно-управляючої системи в межах КЕС

Суттєвим недоліком існуючих підходів щодо корпоративного управління екологічною безпекою можна вважати надання переваги антропоцентричним засадам за методологією оцінки характеристик життєвого циклу продукції та контролю дотримання науково-технічних нормативів і економічної доцільності, що не можуть бути єдино вірними за умови сталого екологічного розвитку. Така стійка тенденція з оцінки якості зумовлює другорядність питань екологічної ефективності (наприклад, виснаження ґрунтів, зміни біологічних складових регіону тощо), що суперечить сутності екологічної безпеки й управління екологічною безпекою, де першочерговими є питання забезпечення виконання природним середовищем своїх функцій.

Для уникнення зазначених вище недоліків формування КС управління екологічною безпекою для еколого-соціально-економічної системи пропонується: по-перше, корпорація економічної, соціальної та екологічної систем як єдиної системи — КЕС; по-друге, розробка для такої системи спеціальної корпоративної системи екологічного управління (КСЕУ) на засадах нової теорії корпоративного підходу з оцінки стану КЕС будь-якого рівня.

## МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

**Мета роботи** — у межах зазначеного розвитку теорії та практики екологічної безпеки є впровадження і розвиток корпоративної інформаційної систе-

ми моніторингу як інформаційної бази для КЕС і СППР у системі управління екологічною безпекою на основі однозначної кількісної оцінки складових КЕС, визначеної за комплексом термодинамічного аналізу, ризик-аналізу та теорії ймовірності.

Для досягнення цієї мети досліджень у роботі порушено такі питання:

- визначити методичні підходи загальної оцінки стану систем як основи прийняття рішення щодо дотримання функціонування КЕС відповідно до вимог екологічної безпеки;
- надати практичне використання методичних підходів для якісної та кількісної оцінки екологічного стану складових природної системи та ризику здоров'ю і прийняття рішення щодо обмеження небезпечного впливу на взаємозв'язок людина-природна система.

## СУТНІСТЬ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Зважаючи на системні ознаки в структурі КЕС, приймається, що для вирішення проблемного питання екології — збереження всього живого та захист людини, екологічна, соціальна й економічна системи мають знаходитися в оптимально-нормованому стані, а рішення з регулювання їх взаємодії за функцією  $F(U)$  буде контролюватися мінімумом функціонала  $F(X, W, E, S)$ . Самі ж системи за складом, структурою й адаптаційними можливостями як живої, так і абіотичної складової характеризуються в будь-якому проміжку часу параметрами  $X, W, E$  і  $S$ . Показники  $E$  та  $S$  є термодинамічними функціями, що доцільно для цього підходу, оскільки саме за допомогою термодинамічних показників можливо спрогнозувати стан будь-якої фізико-хімічної системи, до якої належить і КЕС. Перші складові  $X$  та  $W$  відповідають за вигляд системи:  $X$  — склад,  $W$  — структура.

Таким чином, КЕС — це складний, унікальний об'єкт, експеримент із яким неможливий у прямому розумінні цього слова. У реальних системах усі зазначені параметри розподілено за певним заданим станом системи і їх зміни визначені в часі в результаті переходу елементів із одного стану в інший. Зміни стану  $F(X, W, E, S)$  у часі називаються процесом. Оскільки цими змінами можна керувати, то такі процеси прийнято описувати шляхом показу закономірностей переходу від попереднього стану  $F(X_i, W_i, E_i, S_i)$  до наступного  $F(X_{i+1}, W_{i+1}, E_{i+1}, S_{i+1})$  на кожному кроці залежно від управляючого впливу, який характеризується функцією  $F(U)$  або деяким вектором  $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$  (набір управляючих параметрів), або в загальному випадку елементом множини  $U_0$ , що називається множиною управління.

Інформаційна або енергетична характеристика системи визначається в строгій залежності від пріоритетів аналізуючого та синтезуючого напрямів дослідження. Відповідно до отриманих результатів аналізу визначають ентропійні оцінки енергетичної ознаки, проводять синтез даних неможливий ентропійній оцінці інформаційного характеру. Функціонування такої системи в межах речовинно-енергетичної організації та негентропії зв'язків зображується запропонованою структурою (рис. 2).

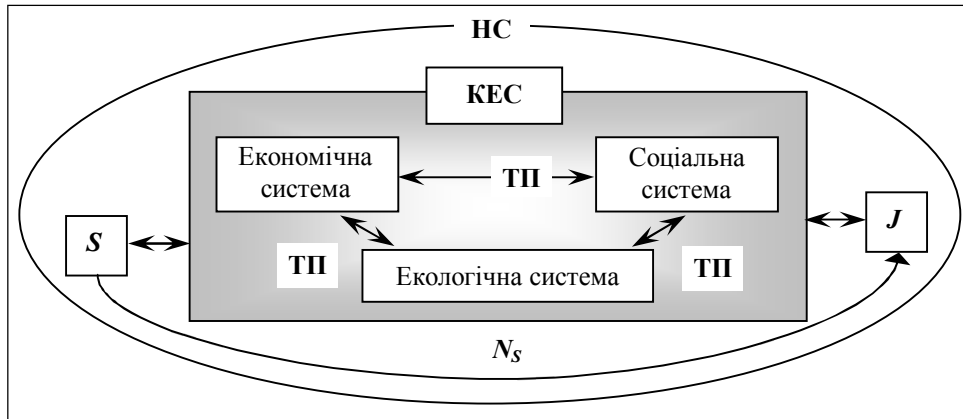


Рис. 2. Інформаційно-ентропійна структура КЕС: НС — навколишнє середовище; ТП — термодинамічний потік;  $S$  — ентропія;  $J$  — інформація;  $N_S$  — негентропія

Управління екологічною безпекою щодо економічної складової корпоративного об'єкта дослідження, яке спричиняє надходження потоку речовини в природні системи, буде визначатися наявністю саморегулювання й ендогенних трансформаційних процесів у екосистемі з метою зменшення навантаження на систему в цілому. Умови позитивних змін при самоорганізації зі стабілізації стану системи на рівноважному й екологічно безпечному

рівні відповідно до характеристик  $X$ ,  $W$ ,  $E$  та  $S$  відповідно до  $\frac{\partial F_{X,W,E,S}}{\partial t} \rightarrow 0$ .

Завдяки перебігу нестатичних процесів КЕС наблизиться до стану рівноваги за таких умов, її ентропія досягне максимально можливої величини, а стійка рівновага в КЕС встановиться відповідно до вимог:

$$(dS)_{U,V} = 0, \quad (d^2S)_{U,V} < 0.$$

Якщо виходити з основ запропонованої КС, то екологічна оцінка локальної рівноваги в природних системах має бути безпосередньо пов'язана з аналізом взаємозв'язку потоків речовини на виході з економічної системи (на мікрорівні це стосується викидів і скидів в навколишнє середовище) і змін здоров'я населення як індикатора стану соціальної складової КЕС.

Оскільки ґрунти та ґрунтові води мають властивість накопичувати шкідливі домішки, а терміни виведення, або нейтралізації цих домішок є суттєвими (на відміну від повітря, де такі процеси є порівняно швидкими), то варто приділити увагу щодо оцінки екологічної небезпеки саме цим складовим екологічної системи. Практичну реалізацію концепції щодо визначення екологічного стану дослідженого об'єкта було здійснено на прикладі моніторингу антропогенно-навантажених ґрунтів, які надано у вигляді КС мікрорівня з метою: визначення загального стану КЕС за даними окремих локальних процесів і явищ, які відбуваються в системі; формування управлінського рішення спрямованої дії відповідно до визначення точок небезпеки дослідженої території з урахуванням перерозподілу потоків речовини й енергії з екосистеми в економічну та соціальну системи. Для цього використано статистичні дані екологічного моніторингу територій, ґрунти яких знаходяться під техногенним впливом Зміївської ДРЕС (Харківська область)

і підприємств м. Харкова. Для аналізу взято середні чисельні значення вмісту важких металів у ґрунтах, проби яких відбиралися в осінній і весняний період на території Зміївського району і м. Харкова з 6 та 5 відповідно постійних точок спостереження і 16 контрольних протягом 1994–2004 рр., що становить із урахуванням паралельного аналізу близько 400 зразків і 10800 елемент-визначень [8]. Згідно з даними рентгено-фазового аналізу (РФА) у складі ґрунтів було визначено на якісному рівні такі хімічні сполуки малорозчинного та нерозчинного характеру:  $Zn_2V_2O_7$ ,  $Zn_3(VO_4)_2$ ,  $Zn(VO_3)_2$ ,  $Pb(VO_3)_2$ ,  $4PbOxV_2O_5$ ,  $Pb_3(VO_4)_2$ ,  $PbCrO_4$ ,  $PbCr_2O_7$ ,  $SrCrO_4$ ,  $SrCr_2O_7$ ,  $Sr(VO_3)_2$ ,  $Ni_2V_2O_7$ . Отже, важкі метали, потрапляючи в ґрунт у вигляді оксидів, сульфідів, елементної форми, завдяки трансформації в ґрунтовому розчині знаходяться в іонній формі:  $Zn^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Sr^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $CrO_4^{2-}$ ,  $Cr_2O_7^{2-}$ ,  $VO_3^-$ ,  $V_2O_7^{4-}$ ,  $VO_4^{3-}$ . Аніоногени, як видно із перелічених сполук за даними РФА, утворюють оксидовмісні кислотні залишки, що здатні поєднуватися з катіонами металів і утворювати нерозчинні солі. Саме ці речовини хіміко-трансформаційного потоку акумулюються в ґрунтах і зменшують міграційні здатності певних техногенних елементів. На поширення забруднювачів значно впливає макросклад ґрунтів, що сприяє затриманню катіоногенів, оскільки частинки ґрунту мають від'ємний заряд. Структура та співвідношення макроречовин створюють певну рН-середовища, що регулює міграційні можливості полютантів. Найбільшу увагу під час аналізу макроскладу ґрунту зосереджують на співвідношенні  $Al_2O_3/SiO_2$  і наявності оксидів K, Ca та Mg, що створюють основні умови, які збільшують міграційні здатності таких токсичних аніоногенів, як Cr (VI), V (V), As(V) та Mo, W. Значний вміст  $SiO_2$  і наявність у ґрунтовому розчині сульфат-, хлорид-іонів спричиняє підкислення ґрунту, що призводить до збільшення міграції катіоногенів важких металів, надходження їх у рослини та поширення по харчовому ланцюгу.

Практичні результати визначень взаємовпливу важких металів у зразках ґрунтів проаналізовано за допомогою пакету програм «STATISTICA 6.0». Математична модель залежності показника рН від вмісту основних компонентів ґрунтів та значення співвідношення головних складових ґрунтів має вигляд для ґрунтів міста:

$$pH = 7,3 + 0,92K_{Al/Si} \text{ або } pH = 0,216K_{Fe/Si} + 0,711K_{Al/Si} + 7,3,$$

$$pH = 0,85C_{SiO_2} - 0,22C_{Al_2O_3} + 0,19C_{Ti_2O_5} + 0,13C_{K_2O, CaO, MgO},$$

де  $K_{Fe/Si}$ ;  $K_{Al/Si}$  — коефіцієнти співвідношення між відповідними мікроелементами Fe/Si, Al/Si.

Для ґрунтів Зміївського району відсутня така залежність і згідно з даними статистичної обробки визначені такі параметри зв'язку між рН і складом ґрунтів (табл. 1).

Математична модель формування рН-середовища для досліджених ґрунтів має вигляд:

- для ґрунтів Зміївського району

$$pH = 0,99C_{Mo} + 0,47C_{Cr} - 49,95, \quad (1)$$

- для ґрунтів міста

$$pH = 1,1C_{Pb} + 0,07C_{Sr} - 0,16C_{Cr} + 0,22C_{Ni} - 25,8, \quad (2)$$

де  $C_{Mo}$ ,  $C_{Cr}$ ,  $C_{Pb}$ ,  $C_{Sr}$ ,  $C_{Ni}$  — концентрації молібдену, хрому, свинцю, стронцію, нікелю в ґрунтах.

**Таблиця 1.** Результати регресійного аналізу

Multiple Regression Results, Standard error of estimate: 0,52905					
Dependent: pH Multiple R = 0,999					
$F = 26860,92$ $R^2 = 0,9998$ $df = 1,4$ $adjusted\ R^2 = 0,9998$ $p = 0,000000$					
Intercept: 6,9160 Std. Error: 0,2368 $t(4) = 29,200$ $p\text{-level} = 0,000008$					
	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(4)
Intercept			6,916	0,237	29,2003
pH	0,999	0,0061	0,932	0,0057	163,8930

Отримані результати аналізу підтверджують думку щодо взаємодії між катіоногенами та аніоногенами в трансформаційному потоці й утворення умов їх акумулювання, зменшення міграції під час регулювання рН-середовища. Наявність у ґрунтах хроматів важких металів, які за термодинамічними властивостями здатні зменшити екзогенний потік, забезпечує підтримання екологічної безпеки в екосистемі та надходження речовини в соціальну складову КЕС.

Таким чином, застосування корпоративного підходу на основі надання об'єкта дослідження у вигляді інтегрованої системи, термодинамічного аналізу й урахування комплексної системи оцінювання дозволяє визначити оптимальні умови як самопідтримки системою екологічної рівноваги, так і напрям прийняття управлінського рішення з екологічної безпеки та забезпечення відсутності ризику здоров'ю населення.

Аналіз досвіду визначення оцінки ризику здоров'ю в Україні [9, 10] і за кордоном [11] показав, що без встановлення всебічного зв'язку між станом навколишнього середовища людини (економічного, соціального й екологічного природного) і рівнем його здоров'я неможливо надати кількісну оцінку впливу будь-яких факторів на організм і прийняти рішення щодо зменшення цього впливу. Для розв'язання такого роду задач потрібний міждисциплінарний підхід, який дозволить проводити самостійні науково-практичні дослідження в певних наукових напрямках, тобто потрібна кооперація наукових досліджень, що забезпечує їх самостійність і еволюційний розвиток. Кінцевий якісний і кількісний результат оцінки стану здоров'я зводиться до безрозмірної величини — ризик, який являє собою функцію залежності від факторів впливу, що викликають відповідний відгук у певній сфері навколишнього середовища людини і таким чином спричиняють негативну (позитивну) дію на організм. З урахуванням існуючих загальних наук, які вивчають людину, напрямів моніторингу «навколишнє середовище — людина» корпоративний підхід щодо визначення оцінки ризику здоров'ю матиме такі складові (рис. 3).

Безпечність середовища для людини гарантується завдяки нормуванню ризиків надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру. Запровадження корпоративного підходу в нормування дозволяє комплексно підійти до управління екологічними та соціально-медичними ризиками, сприяє спільному розвитку медицини — гігієни та санітарно-гігієнічної оцінки й екології як комплексної галузі науки (рис. 4).





Рис. 3. Схема організації корпоративного екологічного моніторингу щодо оцінки ризику здоров'ю та нормування якості навколишнього середовища

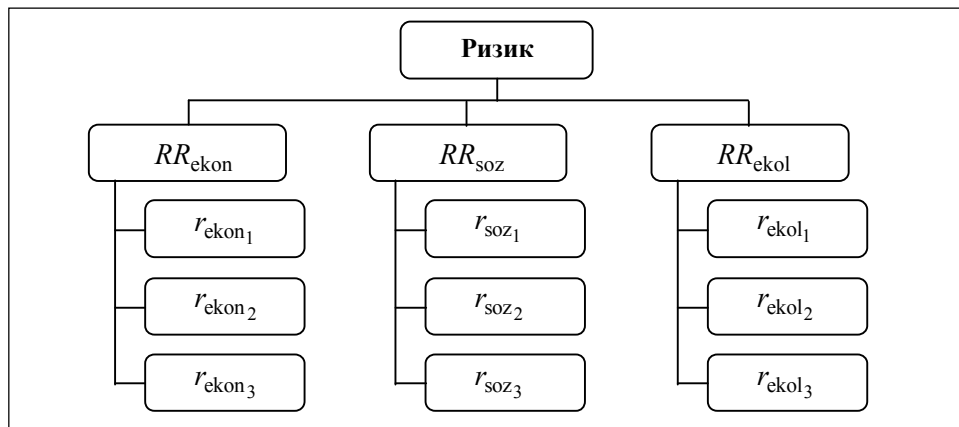


Рис. 4. Ризик-аналіз на корпоративній основі:  $RR_{ekon}$  — економічний ризик ( $r_{ekon_1}$  — виробничий,  $r_{ekon_2}$  — фінансовий,  $r_{ekon_3}$  — економічного благополуччя);  $RR_{ekol}$  — екологічний ризик ( $r_{ekol_1}$  — екосистемний,  $r_{ekol_2}$  — ресурсний,  $r_{ekol_3}$  — забезпечення життєдіяльності);  $RR_{soz}$  — соціальний ризик ( $r_{soz_1}$  — техногенної безпеки,  $r_{soz_2}$  — соціальної напруженості,  $r_{soz_3}$  — демографічний)

Кожна з підсистем КЕС як самостійна складна система включає цілий комплекс проблемних задач, розв'язання яких пов'язано з співставленням отриманих даних і прийняттям зваженого рішення на основі ризик-аналізу. В узагальненому вигляді ризик здоров'ю як індикатор впливу негативних факторів на будь-яку складову КЕС визначається ймовірністю порушення здоров'я стану людини (біологічної системи) унаслідок імовірності змін

в економічній системі ( $RR_{ekon}$ ) та екологічній ( $RR_{ekol}$ ), тобто порушення оптимальних допустимих умов функціонування організму людини і біологічних організмів, соціальної системі ( $RR_{soz}$ ). Зважаючи на взаємозв'язок «вплив (зовнішня дія) — імовірність (інтенсивність) прояву», необхідно в конкретній ситуації зважати на функціональну залежність узагальненого ризику (у роботі на ризику здоров'ю) від складових корпоративного ризику:  $Risk = f(RR_{ekon}, RR_{soz}, RR_{ecol})$ .

Отже, у межах корпоративного підходу (з врахуванням надання об'єкта дослідження у вигляді КЕС (рис. 2)) розв'язуються дві задачі в екологічному й еколого-гігієнічному сенсі (рис. 3), що стосуються оцінки ризику здоров'ю населення:

1) визначення стану об'єкта дослідження, встановлення ймовірності порушень та ризику дестабілізуючих процесів, що підтверджується значеннями ентропії;

2) формування нормативів як розрахункових величин на базі мінімізації впливу і за даними ефектів дії на живий організм дестабілізуючих факторів (рис. 5).



Рис. 5. Задачі ризик-аналізу з реалізацією концепції КЕС (→ — напрямок и послідовність розв'язання 1-ї задачі; ---► — розв'язання задачі нормування щодо об'єкта впливу)

На цьому етапі практичну реалізацію концепції КЕС і корпоративного підходу розглянуто на прикладі оцінки екологічної небезпеки під час експлуатації Дергачівського полігону відходів щодо якості водних об'єктів і виникнення ризику здоров'ю населення за такою послідовністю ймовірнісно-термодинамічного аналізу:

$$\sigma(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{\text{lenght}(X)-1} (X_i - \text{mean}(X))^2}{\text{lenght}(X) - 1}}, X = x_i / ГДК,$$

$$F(X, i) := \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(X)} \exp\left[\frac{-1}{2(\sigma(X))^2}(X_i - 1)^2\right]$$

імовірність стану, впливу:

$$\begin{aligned} sP(X, x_1, x_2) &:= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(X)} \left[ \frac{-1}{2} \operatorname{erf}\left[\frac{1}{2}\sqrt{2} \frac{(-x_2 + \min(X))}{\sigma(X)}\right] \frac{\pi^1}{2} \sqrt{2}\sigma(X) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left[\frac{1}{2}\sqrt{2} \frac{(-x_1 + \min(X))}{\sigma(X)}\right] \frac{\pi^1}{2} \sqrt{2}\sigma(X) \right], \\ P(X, x_1, x_2) &:= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(X)} \left[ \frac{-1}{2} \operatorname{erf}\left[\frac{1}{2}\sqrt{2} \frac{(-x_2 + 1)}{\sigma(X)}\right] \frac{\pi^1}{2} \sqrt{2}\sigma(X) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left[\frac{1}{2}\sqrt{2} \frac{(-x_1 + 1)}{\sigma(X)}\right] \frac{\pi^1}{2} \sqrt{2}\sigma(X) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Ризик впливу як інформаційна ентропія й ентропія впливу, якщо ІЗ не перевищує  $x_2 = 1$ :

$$Risk = S, \quad S(I) = -P(X, x_1, x_2) \ln[P(X, x_1, x_2)]; \quad S = \ln[P(X, x_1, x_2)].$$

Незалежною характеристикою  $X$  є встановлені ІЗ об'єкта впливу — полігону, і поверхневих вод, які покладено в основу розрахунку в Mathcad 2001 Profession параметрів екологічної небезпеки відповідно до системи (3).

За результатами розрахунків встановлено, що найменшу ймовірність залишатися в межах норми ( $0 < IZ < 1$ ) мають токсикологічні показники води, а під час реалізації ситуації перебільшення нормативу більш негативно впливатимуть на об'єкти навколишнього середовища органічні речовини та важкі метали, що підтверджено аналізом ситуації на звалищі відходів (індекс БГПК — еколого-санітарний показник трофосапро-біологічний; ЗМІ — загальний мікробіологічний індекс; Р — ймовірність відповідності стану мінімальних зрушень у системі; РР — ймовірність впливу при відхиленні показників від норми;  $S$  — ризик впливу як інформаційна ентропія;  $SS$  — ентропія впливу) (табл. 2).

Відповідно до великого значення ентропії хімічних факторів впливу визначені можливості порушень властивостей води. Статистична обробка показала залежність змін властивостей води за негативними факторами та подібний зв'язок між ефектом у системі впливу — рівнем якості води та ймовірністю дії інгредієнтів звалища відходів: кореляції між наявністю на полігоні перевищеної кількості органічних речовин (organic), важких металів (VM), і аніонних форм (anion) і органолептичними властивостями водних джерел (organolept) (рис. 6, а); значимі регресійні рівняння залежності токсикологічних показників джерел (toxcolog) від наявності небезпечних речовин на полігоні (organic, VM) та ймовірності впливу (PPnagusch) від порушень мікробіологічних і токсикологічних властивостей води (Ind(mikrobiol), IdZ(tocsical)) (рис. 6, б).

**Таблиця 2.** Загальна ймовірнісно-термодинамічна характеристика району дослідження

Контрольовані параметри		Ймовірнісно-термодинамічні характеристики (дані розрахунку Mathcad 2001 Profession)			
		P	S	PP	SS
Мікробіологічні	Загальні дані	$P(MK, x1, x2) = 0.144$	S=0,279	$PP(MK, x11, x2) = 0.395$	SS=0,367
	M (Індекс БГПК)	$P(M, x1, x2) = 0.264$	S=0,351	$PP(M, x11, x2) = 0.47$	SS=0,355
	K (ЗМІ)	$P(K, x1, x2) = 0.233$	S=0,33	$PP(K, x11, x2) = 0.715$	SS=0,24
Органолептичні	Загальні дані	$P(Values, x1, x2) = 0.303$	S=0,362	$PP(Values, x11, x2) = 0.366$	SS=0,368
	L1 (Запах)	$P(L1, x1, x2) = 0.225$	S=0,335	$PP(L1, x11, x2) = 0.214$	SS=0,33
	L2 (Кольоровість)	$P(L2, x1, x2) = 0.276$	S=0,355	$PP(L2, x11, x2) = 0.467$	SS=0,356
	L3 (Прозорість)	$P(L3, x1, x2) = 0.148$	S=0,28	$PP(L3, x11, x2) = 0.468$	SS=0,355
	L4 (Водневий показник)	$P(L4, x1, x2) = 0.176$	S=0,306	$PP(L4, x11, x2) = 0.852$	SS=0,136
	L5 (Жорсткість)	$P(L5, x1, x2) = 0.144$	S=0,275	$PP(L5, x11, x2) = 0.503$	SS=0,346
	L6 (Хлориди)	$P(L6, x1, x2) = 0.033$	S=0,113	$PP(L6, x11, x2) = 0.71$	SS=0,24
Токсикологічні	Загальні дані	$P(Values3, x1, x2) = 0.243$	S=0,344	$PP(Values3, x11, x2) = 0.266$	SS=0,352
	N1 (Нітрати)	$P(N1, x1, x2) = 0.123$	S=0,25	$PP(N1, x11, x2) = 0.746$	SS=0,219
	N2 (Нітриди)	$P(N2, x1, x2) = 0.093$	S=0,221	$PP(N2, x11, x2) = 0.337$	SS=0,367
Відходи	Загальні дані	$P(Values5, x1, x2) = 0.307$	S=0,363	$PP(Values5, x11, x2) = 0.309$	SS=0,363
	B1 (Аніони)	$P(B1, x1, x2) = 0.108$	S=0,241	$PP(B1, x11, x2) = 0.201$	SS=0,321
	B2 (Важкі метали)	$P(B2, x1, x2) = 0.302$	S=0,362	$PP(B2, x11, x2) = 0.442$	SS=0,36
	B3(Органічні речовини)	$P(B3, x1, x2) = 0.3$	S=0,361	$PP(B3, x11, x2) = 0.444$	SS=0,36

## ВИСНОВКИ

Застосування корпоративного підходу на основі ймовірнісно-термодинамічного аналізу стану складових і загалом дослідженої КЕС дозволило:

- визначити методичні підходи загальної оцінки стану досліджених систем — ґрунт як складової екосистеми й антропогенно-навантаженої території (табл. 1), моделі (1, 2);

- використати практично методичні підходи для якісної та кількісної оцінки екологічного стану природної системи на екологічно небезпечній території (джерело негативного впливу — полігон відходів) як основи прийняття управляючого рішення щодо зниження обмеження безпечного впливу та ризику здоров'ю населення (рис. 5, 6) і модель (3).

Таким чином, моделі КЕС мають регіональний характер (розміру промислово-житлової агломерації) у розв'язанні суто екологічних задач, і не застосовуються як частина теорії сталого розвитку.

Correlations (Spreadsheet6sta.sta)					Correlations (Spreadsheet6sta.sta)				
Variable	anion	BM	organic	microbiol	Variable	anion	BM	organic	organolept
anion	1,000000	0,611485	-0,608468	0,079973	anion	1,000000	0,611485	-0,608468	-0,409500
BM	0,611485	1,000000	-0,171451	0,485930	BM	0,611485	1,000000	-0,171451	-0,490244
organic	-0,608468	-0,171451	1,000000	-0,532610	organic	-0,608468	-0,171451	1,000000	-0,474754
microbiol	0,079973	0,485930	-0,532610	1,000000	organolept	-0,409500	-0,490244	-0,474754	1,000000

a)

Ridge Regression Summary for Dependent Variable: toxicol					Regression Summary for Dependent Variable: toxicol				
N=4					N=4				
R=,10000 R <sup>2</sup> =,50782384 R <sup>2</sup> adj =,25788505 Adjusted F(1,2)=,69500 p<,49218 Std.Error of estimate: ,65584					R=,99843848 R <sup>2</sup> =,99687940 Adjusted R <sup>2</sup> =,99063819 F(2,1)=159,73 p<,05586 Std.Error of estimate: ,65584				
Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(1)	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(1)
Intercept							13,82016	0,512073	26,9887
organic		2,101898	0,439387		-0,799504	0,056702	-0,26831	0,019029	-14,1001
organic	-0,484191	0,580797	-0,016040	0,019241	BM	-0,750641	0,056702	-0,03973	0,003001

б)

Regression Summary for Dependent Variable: PPnarusch (Spread						
N=20						
R=,61181109 R <sup>2</sup> =,37431281 Adjusted R <sup>2</sup> =,30070255 F(2,17)=5,0851 p<,01858 Std.Error of estimate: ,25121						
Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(17)	p-level	
Intercept						
Ind(mikrobiol)	-0,565826	0,193112	-0,003616	0,001234	-2,93004	0,009348
IdZ(tocsical)	-0,306203	0,193112	-0,008937	0,005636	-1,58562	0,131250

Рис. 6. Результати статистичного аналізу впливу джерела забруднення на параметри якості води

## ЛІТЕРАТУРА

1. Качинський А.Б. Екологічна безпека України: системний аналіз перспектив покращення. — К.: НІСД, 2001. — 312 с.
2. Згуровський М.З. Сталій розвиток в глобальному і регіональному вимірах. — К.: Політехніка, 2006. — 85 с.
3. Згуровський М.З., Статюха Г.А., Джигирей І.Н. Оцінювання устойчивого розвитку окр. ружаючої серед. на субнаціональному рівні в Україні // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2008. — № 4. — С. 7–20.
4. Козуля Т.В., Петрухін С.В. Корпоративна інформаційна система: концепція та структура // Радиоелектроніка и інформатика. — 2007. — № 3. — С. 87–91.
5. Козуля Т.В. Теоретичні аспекти створення корпоративної системи екологічного управління // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2005. — № 2 (10). — С. 193–197.
6. Козуля Т.В., Шаронова Н.В. Моделирование структури и идентификация состояния корпоративной экологической системы КЭС // Проблеми інформаційних технологій. — 2007. — С. 178 – 188.
7. Селін Ю.М. Системний аналіз екологічно небезпечних процесів різної природи // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2007. — № 2. — С.22–32.
8. Козуля Т.В., Глушкова Л.В., Штительман З.В. Визначення кореляцій між вмістом важких металів у ґрунтах різних екосистем при вирішенні задач математичного моделювання в екологічному моніторингу // Радиоелектроніка и інформатика. — 2004. — № 4. — С. 159–165.
9. Качинський А., Хміль Г. та ін. Екологічна безпека України: аналіз, оцінка та державна політика. — К.: НІСД, 1997. — Вип. 3. — 127 с. — (Екологічна безпека).
10. Про затвердження методичних рекомендацій «Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря»: Наказ: [прийнято Міністерством охорони здоров'я України 13 квітня 2007 р.]. — № 184. — <http://zakon.nau.ua/doc/>.
11. Guidelines for Carcinogen Risk Assessment // Risk Assessment Forum. US Environmental Protection Agency, March. — Washington. — 2005. — <http://www.epa.gov/cancerguidelines>.

Поступила 24.06.2010

Стаття прийнята до друку за редакцією автора.

## **ОПТИМІЗАЦІЇ ПОШУКУ ШЛЯХІВ ПО ГРАФУ В ДИНАМІЧНІЙ ЗАДАЧІ КОМІВОЯЖЕРА МЕТОДОМ МОДИФІКОВАНОГО МУРАШИНОГО АЛГОРИТМУ**

**В.Д. ДАНЧУК, В.В. СВАТКО**

Запропоновано метод розв'язку задачі пошуку мінімального шляху по графу на основі застосування модифікованого мурашиного алгоритму, в якому довжина ребер двонаправленого орієнтованого графу — змінна величина. З метою оптимізації параметрів імовірно-пропорційного пошуку мінімальної довжини ребер по графу використовується метод локального пошуку.

На сьогодні характерною особливістю переходу людства до інформаційного суспільства є надзвичайно швидкі трансформаційні зміни поколінь технологій, споживчих стандартів, ринків виробництва та збуту товарів. Тому в сучасних умовах підприємства, які займають те або інше місце на економічному ринку праці, являють собою динамічні, нестационарні системи.

Нині ефективність функціонування більшості підприємств визначається рівнем застосування логістики. Логістика посідає значне місце під час перебудови механізмів господарювання в сучасних ринкових умовах.

Потрібно також зазначити, що задачі маршрутизації є ключовими в галузі транспортних перевезень та логістики. Відомо [1, 2], що в більшості сегментів ринку доставка товару додає до його вартості суму, яка прирівнюється до вартості самого товару. Поряд із цим зауважимо, що використання комп'ютерних методів оптимізації такої доставки виражається економією часто не менше 5–20 % від загальної його вартості.

Проте до теперішнього часу існуючі методи розв'язання задач дискретної оптимізації процесів, що відбуваються в логістичних системах, не є доскональними і не дають однозначних рішень [3, 4].

Також останнім часом розробляються принципово нові наукові підходи розв'язку задач дискретної оптимізації, які базуються на використанні квазіінтелектуальних методів.

Так, наприклад, вважається перспективним застосування для розв'язку транспортних задач та задач складської логістики квазіінтелектуальних методів оптимізації, зокрема методу, який базується на механізмах самоорганізації поведінки мурашиної колонії [5–7].

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ**

Для перевірки коректності застосування відповідних методів, що розробляються, часто використовується задача комівояжера, як одна з найрепрезентативніших транспортних задач. За умовою цієї задачі необхідно обійти всі вузли з доставки товару та повернутися у вихідне положення. При цьому довжина шляху має бути найкоротшою. Тут довжина маршруту буде зале-

жати від порядку обходу. Кількість варіантів обходу надзвичайно велика навіть за невеликої кількості вузлів. Відомо [6, 8], що за допомогою методів, які базуються на описі поведінки мурашиних колоній, вирішують складні комбінаторні задачі, не зважаючи на те, що окремо кожна мураха веде себе досить просто, рух якої можна описати аналітично. Саме тому моделювання поведінки мурашиної колонії вважається перспективним у вирішенні транспортних проблем.

**Мета роботи** — розробка ефективного методу оптимізації пошуку шляхів по графу в динамічній задачі комівояжера методом модифікованого мурашиного алгоритму.

## ОСНОВНА ЧАСТИНА

Задача комівояжера — одна з основних задач комбінаторної оптимізації, що має широке прикладне застосування. Фактично не існує алгоритмів, що забезпечують одержання якісних її розв'язків особливо при малих часових затратах [4].

Задачу комівояжера можна представити як задачу мінімізації витрат, в якій цільовою функцією будуть транспортні витрати, що знаходяться в прямій залежності від довжини пройденого шляху (маршруту). Саме тому цільовою функцією може бути сумарна довжина пройденого шляху.

Автоматизація задачі комівояжера на сьогодні вирішена не повністю, у зв'язку з тим, що методи, які застосовуються для її розв'язку неефективні.

Результатом постійного пошуку найефективніших методів розв'язку задачі комівояжера стало використання біонічних алгоритмів, у тому числі, еволюційних та генетичних [9, 10]. Відмінністю мурашиних алгоритмів є їх робота з набором альтернативних розв'язків та часткова незалежність від конкретного виду цільової функції. Результати деяких експериментальних досліджень довели високу продуктивність цих алгоритмів, а на деяких контрольних прикладах — їх беззаперечну перевагу над існуючими методами.

Нехай локальні правила поведінки мурах при виборі маршруту описуються таким чином [11]:

- Мурахи мають власну «пам'ять». Оскільки кожне місто може бути відвідане лише один раз, то в кожній мурахи є список вже відвіданих міст — список заборон. Нехай  $J_{i,k}$  — список міст, які необхідно відвідати мурашиному агенту  $k$ , що знаходиться в місті  $i$ .
- Мурахи мають «зір» — видимість є евристичним бажанням відвідати місто  $j$ , якщо мураха знаходиться в місті  $i$ . Вважатимемо, що видимість зворотно пропорційна відстані між містами  $\eta_{ij} = 1/D_{ij}$ .
- Мурахи здатні розпізнавати запахи. Вони можуть відчувати слід феромону, що підтверджує бажання відвідати місто  $j$  з міста  $i$  на основі досвіду інших мурах. Кількість феромону на ребрі  $(i, j)$  у момент часу  $t$  позначимо через  $\tau_{ij}(t)$ .
- На основі цього можна сформулювати ймовірно-пропорційне правило, яке визначає ймовірність переходу  $k$ -ї мурахи з міста  $i$  у місто  $j$ :

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in J_{i,k}} [\tau_{il}(t)]^\alpha [\eta_{il}]^\beta}, & j \in J_{i,k}, \\ P_{ij,k}(t) = 0, & j \notin J_{i,k}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\alpha, \beta$  — параметри, що задають ваги сліду феромону; при  $\alpha = 0$  алгоритм вироджується до жадібного алгоритму (буде обране найближче місто).

Під час виконання алгоритму, який описується формулами (1–4), правило (1) не змінюється, але у двох різних мурах значення ймовірності переходу будуть відрізнятися, тому що вони мають різний список дозволених міст.

- Проїшовши ребро  $(i, j)$ , мураха відкладає на ньому деяку кількість феромону, яка має бути пов'язана з оптимальністю зробленого вибору. Нехай  $T_k(t)$  — шлях, який пройшла мураха  $k$  до моменту часу  $t$ ,  $L_k(t)$  — довжина цього шляху, а  $Q$  — параметр, що має значення порядку довжини оптимального шляху. У цьому випадку кількість відкладеного феромону може бути задано у вигляді:

$$\Delta \tau_{ij,k}(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k(t)}, & (i, j) \in T_k(t), \\ 0, & (i, j) \notin T_k(t). \end{cases} \quad (2)$$

Правила навколишнього середовища визначають, у першу чергу, випаровування феромону. Нехай  $p \in [0, 1]$  є коефіцієнтом випаровування, тоді правило випаровування матиме вигляд:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-p)\tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t); \quad \Delta \tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij,k}(t), \quad (3)$$

де  $m$  — кількість мурах у колонії.

На початку розв'язку кількість феромону на ребрах прийматиметься рівною невеликій кількості. Загальна кількість мурах залишається постійною та рівною кількості міст. Кожна мураха починає маршрут зі свого міста [11].

Додаткова модифікація алгоритму можлива у випадку введення так званих «елітних» мурах, котрі підсилюють ребра найкращого маршруту, знайденого на початку роботи алгоритму. Позначимо через  $T^*$  найкращий поточний шлях через  $L^*$  — його довжину. Тоді, якщо в колонії є  $e$  елітних мурах, то ребра маршруту отримають додаткову кількість феромону

$$\Delta \tau_e = e Q / L^*. \quad (4)$$

Багаторазовість взаємодії реалізується ітераційним пошуком маршруту комівояжера одночасно декількома мурахами згідно з [12]. З метою підвищення ефективності застосування методу мурашиного алгоритму для розв'язку задачі комівояжера запропоновано його модифікацію, пов'язану із застосуванням оптимізації управляючих параметрів  $(\alpha, \beta, \rho)$  шляхом використання методу локального пошуку.



Інтерпретуючи задачу комівояжера до реальних обставин, можна сказати, що цільовою функцією є найкоротший знайдений маршрут. Кількість місць призначення (а в реальній задачі йдеться про склади або супермаркети з доставки товарів) змінюється в залежності від потреби від 5 до 15. Таким чином кількість вершин графу визначає кількість складів, які необхідно відвідати транспортному засобу для того, щоб доставити товар. Окрім того, місце виїзду та повернення транспортного засобу може відбуватись з будь-якого складу. Тому кількість вершин графу збігається з кількістю складів, в які необхідно розвезти товар, а ребра між цими вершинами являють собою відстані між цими складами. Отже, отримуємо матрицю відстаней визначеної розмірності. У такому вигляді ми можемо говорити про класичну задачу комівояжера.

Також відомо, що під час розрахунку витрат палива для транспортних засобів враховується велика кількість параметрів, що залежать від пройденого шляху. Під час розрахунку використання палива ключову роль відіграє кілометраж. Проте для деяких видів товару головним є час його доставки. У таких випадках цільовою функцією є мінімізація відповідних витрат часу. До того ж, зменшення часу роботи транспорту зменшує витрати палива. Також важливе значення відіграє реальна ситуація на дорогах (аварії, затори тощо), яка може суттєво впливати на швидкість переміщення транспорту, а значить і на час доставки товару. Отже, ми можемо сформулювати динамічну задачу щодо оптимізації пошуку відстаней по графу, де роль довжин ребер графу відіграє час проходження від одного вузла до іншого. При цьому параметр часу є змінною величиною, який залежить від реальної швидкості руху транспорту.

В якості тестової системи використовувалась робоча станція з процесором Intel® Celeron® D CPU 3.06 ГГц та 512 МБ оперативної пам'яті. У межах запропонованого алгоритму розроблено програмний комплекс на мові Delphi 7.

Перед початком запуску роботи алгоритму приймаються такі умови:

- кількість вершин графу дорівнює кількості мурах;
- кожна мураха починає свій шлях з іншої вершини;
- інтенсивність феромону, відкладеного на кожному ребрі до початку руху мурах однакова;
- вибір першої вершини для кожної мурахи визначається за правилом «іди в найближчу»;
- кожен наступний крок переміщення мурах визначається за ймовірнісним рівнянням.

Побудова маршруту транспортного засобу здійснюється покроково шляхом вибору наступного пункту до того часу, доки не будуть пройдені всі міста. З самого початку маршрут починається з міста, а його список пройдених міст порожній. Мураха обирає наступне місто зі списку доступних, після чого оновлюється цільова функція, тобто пройдена відстань. Після чого знову здійснюється вибір наступного доступного міста. Мураха повертається у вихідне місто, у випадку проходження всіх міст. Сумарна довжина маршруту розраховується як значення цільової функції повного маршруту, пройденого мурахою. Алгоритм мурашиних колоній будує повний маршрут

для поточної мурахи, перед тим як наступна мураха почне свій рух. Це продовжується до того часу, доки раніше визначена кількість мурах не побудує свої маршрути.

Для проведення порівняльного аналізу визначеної задачі в роботі використовувались реальні дані про місця розташування складів, транспортні засоби, відстані між цими об'єктами, а також середні швидкості. Алгоритм мурашиної колонії було застосовано для пошуку найкоротшого шляху, а також для пошуку найшвидшого шляху під час доставки товарів до покупців.

Матриця відстаней між складами та підприємством ЗАТ «Птахофабрика Київська» наведені в табл. 1.

**Таблиця 1.** Матриця відстаней між складами та ЗАТ «Птахофабрика Київська» (у км)

Склади	ЗАТ «Птахофабрика Київська»	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
		ЗАТ «Птахофабрика Київська»	0	17	16	28	17	23	19	25	15	32	16	34	15
1	17	0	15	20	5	6	2	23	8	15	15	16	10	9	15
2	16	15	0	16	10	21	17	14	13	22	1	24	15	17	20
3	28	20	16	0	25	21	18	2	28	6	16	8	30	13	8
4	17	5	10	25	0	11	7	28	3	20	10	21	5	14	20
5	23	6	21	21	11	0	3	24	14	16	21	17	16	10	16
6	19	2	17	18	7	3	0	21	10	13	17	14	12	7	13
7	25	23	14	2	28	24	21	0	31	7	14	9	32	15	9
8	15	8	13	28	3	14	10	31	0	23	13	24	8	10	15
9	32	15	22	6	20	16	13	7	23	0	22	2	25	9	4
10	16	15	1	16	10	21	17	14	13	22	0	24	10	16	21
11	34	16	24	8	21	17	14	9	24	2	24	0	25	7	3
12	15	10	15	30	5	16	12	32	8	25	10	25	0	18	24
13	25	9	17	13	14	10	7	15	10	9	16	7	18	0	6
14	30	15	20	8	20	16	13	9	15	4	21	3	24	6	0

Відстані між об'єктами є постійними та не змінюються з часом. Граф середніх швидкостей містить інформацію про середню швидкість між двома пунктами призначення (рис. 1). Сам рух із однієї точки в іншу складається з декількох частин різної довжини та різної швидкості. Таким чином, на основі цих даних можна визначити середню швидкість між пунктами призначення.

Середні швидкості між двома пунктами доставки товару є змінною величиною, яка враховує реальну ситуацію на автомобільних шляхах. Тому довжина ребер двонаправленого орієнтованого графу середніх швидкостей є також змінною величиною, а сам граф, враховуючи реальну обстановку на дорогах, змінюється з часом.

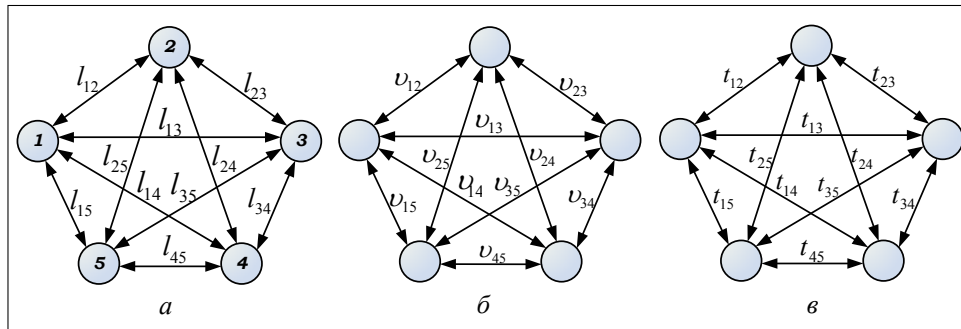


Рис. 1. Двонаправлено орієнтовані графи: а — відстані між об'єктами; б — середні швидкості між об'єктами; в — часові затрати між об'єктами

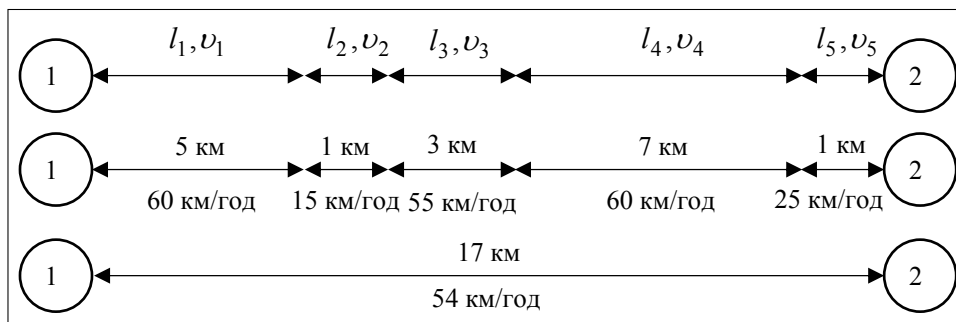


Рис. 2. Визначення середніх швидкостей між пунктами призначення: 1 — ЗАТ «Птахофабрика Київська», 2 — склад 1

Як приклад, на рис. 2 показано визначення середніх швидкостей між пунктами ЗАТ «Птахофабрика Київська» та склад 1. Тут шлях, що сполучає ці пункти, розбивається на п'ять ділянок різної довжини, на яких транспорт має різні середні швидкості. При цьому треба зауважити, що середні значення швидкостей руху транспорту вибирались реальними на основі даних, отриманих за допомогою програмного комплексу GLOBUS. Таким чином будувалась матриця середніх швидкостей між складами підприємства ЗАТ «Птахофабрика Київська», які наведено в табл. 2.

У випадку мінімізації часових витрат на доставку товару цільовою функцією буде мінімізація витрат часу під час проходження визначеного маршруту. Тому, маючи дані про довжини шляхів, що сполучають склади підприємства, а також середні швидкості руху по цих ділянках, ми можемо побудувати відповідну матрицю часових витрат (табл. 3).

Визначення часових витрат виконано за такою формулою:

$$t = \frac{l}{v} 60, \quad (5)$$

де  $t$  — час, затрачений на проходження маршруту, хв;  $l$  — довжина маршруту, км;  $v$  — середня швидкість руху транспортного засобу, км/год.

Для більшої наочності час будемо визначати у хвиликах.

**Таблиця 2.** Матриця середніх швидкостей між складами та ЗАТ «Птахофабрика Київська» (у км/год)

Склади	ЗАТ «Птахофабрика Київська»	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
		ЗАТ «Птахофабрика Київська»	0	54	49	44	47	44	45	25	15	32	45	44	36
1	54	0	38	55	51	52	53	48	46	55	58	58	51	44	40
2	49	38	0	49	56	38	45	58	38	36	39	42	45	56	45
3	44	55	49	0	52	49	53	55	43	57	46	51	55	58	48
4	47	51	56	52	0	55	58	50	41	43	43	51	47	59	58
5	44	52	38	49	55	0	42	49	47	57	45	52	56	45	51
6	45	53	45	53	58	42	0	55	59	54	54	55	55	43	51
7	25	48	58	55	50	49	55	0	44	49	45	50	40	41	45
8	15	46	38	43	41	47	59	44	0	53	54	43	51	56	57
9	32	55	36	57	43	57	54	49	53	0	45	45	47	52	53
10	45	58	39	46	43	45	54	45	54	45	0	56	54	43	45
11	44	58	42	51	51	52	55	50	43	45	56	0	56	59	60
12	36	51	45	55	47	56	55	40	51	47	54	56	0	33	45
13	25	44	56	58	59	45	43	41	56	52	43	59	33	0	57
14	30	40	45	48	58	51	51	45	57	53	45	60	45	57	0

У табл. 4 наведено результати проведених авторами тестових досліджень застосування модифікованого мурашиного алгоритму для розв'язку задачі комівояжера щодо пошуку мінімальних витрат на доставку товару за критерієм відстаней та часів руху транспорту між вузлами, залежно від загальної кількості вузлів.

При цьому зауважимо, що у випадку пошуку найкоротшого шляху (мінімізація довжини обходу вершин) не приймається до уваги час обходу зазначених вершин. Проведені тестові обчислення вказують на те, що при мінімізації відстані між об'єктами час обходу їх може бути досить великим. Тобто, час роботи транспорту суттєво збільшується, і як результат — збільшуються витрати на доставку цього товару. Тому вважаємо доцільним здійснювати також пошук шляху за критерієм мінімізації часових витрат на доставку товару. Слід відмітити, що під час мінімізації часових витрат, довжина отриманого маршруту дещо більша за довжину маршруту при мінімізації самої довжини маршруту (табл. 4).

**Таблиця 3.** Матриця часових затрат між складами та ЗАТ «Птахофабрика Київська» (у хв)

Склади	ЗАТ «Птахофабрика Київська»	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
		ЗАТ «Птахофабрика Київська»	0	19	20	38	22	31	25	60	60	60	21	46	25
1	19	0	24	22	6	7	2	29	10	16	16	17	12	12	23
2	20	24	0	20	11	33	23	14	21	37	2	34	20	18	27
3	38	22	20	0	29	26	20	2	39	6	21	9	33	13	10
4	22	6	11	29	0	12	7	34	4	28	14	25	6	14	21
5	31	7	33	26	12	0	4	29	18	17	28	20	17	13	19
6	25	2	23	20	7	4	0	23	10	14	19	15	13	10	15
7	60	29	14	2	34	29	23	0	42	9	19	11	48	22	12
8	60	10	21	39	4	18	10	42	0	26	14	33	9	11	16
9	60	16	37	6	28	17	14	9	26	0	29	3	32	10	5
10	21	16	2	21	14	28	19	19	14	29	0	26	11	22	28
11	46	17	34	9	25	20	15	11	33	3	26	0	27	7	3
12	25	12	20	33	6	17	13	48	9	32	11	27	0	33	32
13	60	12	18	13	14	13	10	22	11	10	22	7	33	0	6
14	60	23	27	10	21	19	15	12	16	5	28	3	32	6	0

**Таблиця 4.** Порівняльний аналіз пошуку мінімальних затрат під час розв'язку задачі комівояжера

Матриця часових затрат				Матриця відстаней			
Кількість вершин	Затрачений час, хв	Довжина, км	Маршрут	Довжина, км	Затрачений час, хв	Маршрут	
							5
7	99	81	6→7→4→3→1→5→2→6	80	100	7→2→5→1→3→4→6→7	
10	101	87	3→1→5→9→2→7→6→10→4→	82	135	9→5→2→7→6→10→4→8→	
			→8→3			→3→1→9	
13	118	95	6→2→5→9→13→1→11→3→8→	95	119	4→12→10→6→7→2→9→5→	
			4→10→12→7→6			→13→1→11→3→8→4	
15	133	127	1→2→7→6→13→5→9→14→15→	108	140	10→12→14→2→6→7→9→5→	
			10→12→8→4→11→3→1			13→1→11→3→4→8→15→10	

Таким чином, аналіз результатів розрахунків показав (табл. 4), що в низці випадків оптимізації пошуку довжини по графу за критерієм відстаней витрати часу на доставку товару можуть бути більшими, ніж ті, які отримано під час оптимізації пошуку довжини по графу за критерієм часу. Також час доставки товару є досить важливим параметром, оскільки в більшості випадків саме час роботи транспорту визначає відповідні витрати.

## ВИСНОВКИ

Отже, на прикладі конкретного підприємства проведено кількісний порівняльний аналіз результатів застосування зазначених методів дискретної оптимізації процесів розподіленої складської логістики, а саме, процесів доставки товарів за допомогою транспортних засобів на склади підприємства. Результати аналізу вказують на ефективність використання запропонованого підходу. Крім того, врахування змінної довжини ребер графу дозволяє розв'язувати відповідні логістичні задачі в умовах реального стану руху транспорту по автомобільним дорогам. Отримані результати також вказують на перспективність застосування мурашиного алгоритму до розв'язку задач транспортної логістики, що мають велику розмірність вхідних даних.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Ковалев В.П. Эффективность грузовых автомобильных перевозок: Состояние, проблемы, перспективы. — Мн.: Беларусь, 1984. — 112 с.
2. Гаджинский А.М. Логистика: учеб. для высш. и средних специальных учеб. заведений. — М.: ИВЦ «Маркетинг». — 2000. — 375 с.
3. Просветов Г.И. Математические методы в логистике. — М.: РДЛ, 2006. — 272 с.
4. Левитин А.В. Метод грубой силы: Задача коммивояжера // Алгоритмы: введение в разработку и анализ (Introduction to The Design and Analysis of Algorithms). — М.: Вильямс, 2006. — [Гл. 3]. — С. 159–160.
5. Dorigo M. Optimization, Learning and Natural Algorithms. PhD Thesis, Dipartimento di Elettronica, Politecnico Di Milano. — Italy. — 1992. — 140 p.
6. Чураков М., Якушев А. Муравьиные алгоритмы. — 2006. — <http://rain.ifmo.ru/cat/data/theory/unordered/ant-algo-2006/article.pdf>.
7. Dorigo M., Maniezzo V., Colnari A. The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents // IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics. Part B. — 1996. — № 1. — 26. — P. 29–41.
8. Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы // Exponenta Pro. Математика в приложениях. — 2003. — № 4. — С. 70–75.
9. Cantu-Paz E. Efficient and Accurate Parallel Genetic Algorithms. — Lawrence Livermore National Lab, 2000. — 167 p.
10. Gaber J., Bakhouya M. An Immune Inspired-based Optimization Algorithm: Application to the Traveling Salesman Problem // Advanced Modeling and Optimization. — 2007. — 9. — № 1. — P. 105–116.
11. Стороженко А.С., Береза А.А. Применение муравьиного алгоритма для решения задачи коммивояжера // Междунар. науч.-практ. интернет-конф., апрель–июнь. — 2006. — С. 56–59.
12. Goss S., Aron S., Deneubourg J.L. and Pasteels J.M. Self-organized shortcuts in the Argentine // Springer Online Journal Archives 1860-2000. — 1989. — 76. — P. 579–581.

Надійшла 10.06.2010

УДК 519.874

**РАЗБИЕНИЕ НА ПОДМНОЖЕСТВА И ПОСТРОЕНИЕ  
ДОПУСТИМЫХ И ОПТИМАЛЬНЫХ  
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ВЫПОЛНЕНИЯ МНОЖЕСТВА  
ЗАДАНИЙ НА НЕСКОЛЬКИХ МАШИНАХ**

**Ю.А. ЗАК**

Исследованы свойства задач построения допустимых и оптимальных расписаний выполнения  $N$  заданий на  $m$  машинах в условиях потерь времени на переключении. На основе установленных свойств конструируются операторы исключения из рассмотрения подмножеств расписаний, не содержащих допустимых решений. Предложены алгоритмы вычисления нижних оценок различных критериев оптимальности, а также алгоритмы решения рассматриваемых задач последовательными алгоритмами оптимизации.

**ВВЕДЕНИЕ**

Задачи распределения множества заданий подлежащих выполнению по рабочим станциям (машинам) и определения оптимальных последовательностей их выполнения на каждой машине в условиях потерь времени на переналадке имеют большое количество приложений в календарном планировании производства, маршрутизации перевозок, а также организации обслуживания и выполнения ремонтных работ, организации вычислительного процесса и т.д. Приведем только некоторые из таких постановок.

**КАЛЕНДАРНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА**

На  $K$  различных по техническим характеристикам единицах технологического оборудования (станках) необходимо произвести  $N$  различных партий деталей. Заданы времена обработки партии деталей каждого вида на каждом из станков, матрицы времен переналадок при переходе каждого станка от выпуска одной партии деталей на другую, а также временные ресурсы возможности использования оборудования и ограничения на сроки завершения обработки каждой партии деталей. Каждая партия деталей может обрабатываться только на одном станке. Необходимо определить, партии каких деталей должны обрабатываться на каждом станке, а также последовательности их обработки на каждой единице технологического оборудования, которые

обеспечивают выполнение всех ограничений на временные ресурсы работы оборудования и сроки завершения выполнения заданий, а также экстремальное значение выбранного критерия оптимальности. В качестве критерия оптимальности может быть выбрано завершение обработки всех партий деталей в кратчайшие сроки или минимизация суммарного средневзвешенного времени занятости технологического оборудования.

## ПЛАНИРОВАНИЕ РЕМОНТНО-ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

$K$  различных по своей квалификации и по уровню технического оснащения бригад должны обслужить  $N$  объектов (ремонтно-профилактические, монтажные работы, доставка, погрузка, разгрузка товаров и т.д.). Заданы времена, необходимые каждой бригаде для выполнения всего объема работ на каждом из объектов, а также потери времени при переходе каждой бригады от одного объекта на другой. Необходимо определить подмножества объектов, обслуживаемых каждой бригадой, а также последовательности выполнения этих подмножеств работ, которые обеспечили выполнение всех заданий в установленные ограничениями сроки. В качестве критериев оптимальности построенного расписания могут быть выбраны минимальные суммарные затраты рабочего времени и времени на переезды всех бригад или выполнение всего множества заданий в кратчайшие сроки.

Методам решения данного класса задач уделялось значительное место в монографиях и периодической литературе [1–3, 7, 9, 10]. Подходы, связанные с построением линейных и нелинейных целочисленных моделей и использование методов математического программирования для решения задач данного класса достаточно большой размерности, представляющих практический интерес, требуют больших объемов вычислений [6–8].

Наиболее широкое распространение получили приближенные методы решения задач данного класса с использованием генераторов случайных расписаний [6, 7, 12, 13], использующих различные правила предпочтения [7–11, 13], эвристические подходы [5, 9], а также генетические алгоритмы и эволюционные стратегии [4, 11]. Алгоритмы решения данной задачи без учета ограничений на директивные сроки выполнения заданий методами построения кратчайших допустимых путей на графах приведены в работе автора [12]. Указанные подходы позволили в ряде случаев находить эффективные расписания выполнения заданий для многих практических приложений. Однако наличие жестких ограничений на директивные сроки выполнения заданий в ряде случаев затрудняет процесс генерирования допустимых расписаний и существенно увеличивает затраты на поиск [13]. Кроме того, отсутствие нижних оценок значения критерия оптимальности построенного расписания не позволяет объективно оценить эффективность полученного решения.

В данной работе изучаются свойства задач данного класса, на основе которых конструируются операторы исключения из рассмотрения подмножеств расписаний, не содержащих допустимых решений, предлагаются алгоритмы вычисления нижних оценок различных критериев оптимальности. На основе установленных свойств предлагаются алгоритмы решения



рассматриваемых задач последовательными алгоритмами оптимизации. В качестве частного случая рассматриваются свойства и алгоритмы решения задачи определения допустимых и оптимальных последовательностей выполнения заданий на одной машине.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На  $K$ ,  $k = 1, \dots, K$  рабочих станциях (машинах) должны быть выполнены  $N$  различных работ (заданий),  $i, j = 1, \dots, N$ . Каждое из заданий должно выполняться только на одной машине и без разрывов времени в процессе его выполнения.

Пусть заданы:

- директивные сроки завершения каждого из заданий  $T_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ .
- матрица времен выполнения каждого из заданий на всех машинах  $\bar{t}^k = (t_1^k, t_2^k, \dots, t_i^k, \dots, t_N^k)$ ,  $k = 1, \dots, K$ ;
- $\theta^k$  — наиболее ранние допустимые сроки начала выполнения работ на  $k$ -й машине;
- $A^k = \|a_{ij}^k\|$ ,  $i, j = 0, 1, \dots, N$  — матрицы времен потерь времени на переналадку при переходе  $k$ -й машины от выполнения одного задания к другому. На пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца этих матриц стоят потери времени на переналадку  $k$ -й машины при переходе после выполнения  $i$ -го задания к  $j$ -му. В 0-й строке каждой матрицы  $A^k$  заданы времена настройки машины из состояния, в котором находится в момент начала выполнения расписания работ, в режим выполнения  $i$ -го задания. Элементы 0-го столбца определяют затраты времени на переход  $k$ -й машины после завершения выполнения  $j$ -го задания в режим простоя (или возвращения машины из  $j$ -го пункта на базу).

Необходимо найти распределение всего множества заданий по машинам, а также определить последовательности всех назначенных на каждой машине заданий, обеспечивающие выполнение всех ограничений на установленные сроки их выполнения  $T_i$ , и минимизировать время завершения всего комплекса работ (критерий оптимальности  $F_1$ ).

В качестве другого критерия оптимальности  $F_2$  может быть выбрано минимальное средневзвешенное время работы машин, необходимое для выполнения всего комплекса работ.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ. СВОЙСТВА ДОПУСТИМЫХ И ОПТИМАЛЬНЫХ РАСПИСАНИЙ

Построим матрицы  $B^k = \|b_{ij}^k\|$ ,  $i, j = 0, 1, \dots, N$ ;  $k = 1, \dots, K$  суммарных затрат времени на выполнение заданий на каждой машине, учитывающие времена выполнения заданий, плюс потери времени на переналадку. Элементы этой матрицы определяются по формулам

$$b_{ij}^k = t_j^k + a_{ij}^k, \quad i, j = 0, 1, \dots, N; \quad k = 1, \dots, K. \quad (1)$$

Определим также

$$\bar{b}_i^{k, \min} = \min_{0 \leq j \leq N} b_{ij}^k, \quad i = 0, 1, \dots, N, \quad k = 1, \dots, K. \quad (2)$$

Построим вспомогательную матрицу  $\mathbf{B} = |\beta_{ij}|$ ,  $i, j = 0, 1, \dots, N$ , элементы которой определяются согласно выражению

$$\beta_{ij} = \min_{1 \leq k \leq K} b_{ij}^k, \quad i, j = 0, 1, \dots, N. \quad (3)$$

С учетом времен пуска наладочных работ и (или) переналадок каждое  $i$ -е из заданий на  $k$ -й машине не может быть завершено ранее чем за время  $\bar{b}_i^{k, \min}$ , не ранее чем через промежуток времени  $b_{ij}^k$  после завершения выполнения задания, стоящего в последовательности перед ним, а на любой из всего множества машин — за время  $\beta_{ij}$ .

Найдем минимальное значение элементов каждого столбца матрицы  $\mathbf{B} = |\beta_{ij}|$

$$\beta_j^{\min} = \min_{0 \leq i \leq N} \beta_{ij}, \quad j = 0, 1, \dots, N. \quad (4)$$

Упорядочим все множество выполняемых заданий  $\tilde{I} = \{1, 2, \dots, i, \dots, N\}$  в порядке невозрастания граничных сроков их завершения

$$\tilde{U}_1 = \{i_1, i_2, \dots, i_N \mid T_{i_1} \leq T_{i_2} \leq \dots \leq T_{i_N}\}. \quad (5)$$

Введем булевы переменные  $x_i^k$ :  $x_i^k = 1$ , если  $i$ -е задание выполняется на  $k$ -й машине, и  $x_i^k = 0$  — в противном случае. Так как каждое из заданий может выполняться только на одной машине, то справедливо ограничение

$$\sum_{k=1}^K x_i^k = 1, \quad i = 1, \dots, N. \quad (6)$$

Пусть определено подмножество заданий, выполняемых на  $k$ -й машине —  $\tilde{J}^k = \{j_1^k, j_2^k, \dots, j_N^k\}$ . Рассмотрим последовательность выполнения этих заданий в порядке невозрастания граничных времен их завершения:

$$\tilde{U}_1^k = \{j_1^k, j_2^k, \dots, j_N^k \mid T_{j_1^k} \leq T_{j_2^k} \leq \dots \leq T_{j_N^k}\}. \quad (7)$$

**Утверждение 1.** Если не выполняется хотя бы одно из неравенств системы

$$\theta^k + \sum_{l=1}^r \beta_{j_l^k}^{\min} \leq T_{j_r^k}, \quad r = j_1^k, j_2^k, \dots, j_N^k, \quad (8)$$

то не существует допустимых расписаний выполнения данного комплекса на  $k$ -й машине.

Доказательство аналогичного утверждения приведено в [1, 13].

Если определены подмножества  $\tilde{J}^k$  и построены последовательности  $\tilde{U}_1^k$  для всех машин,  $k = 1, \dots, K$ , то справедливо утверждение 2.

**Утверждение 2.** Если хотя бы для одного из индексов  $k = 1, \dots, K$  не выполняется хотя бы одно из неравенств системы (8), то для данного распределения заданий по рабочим станциям  $\tilde{J}^k$ ,  $k = 1, \dots, K$  не существует допустимых расписаний выполнения всех заданий в установленные ограничениями сроки.

Сформулируем задачу распределения заданий по рабочим станциям (машинам) и выполнения их на каждой из машин в последовательности невозрастания граничных сроков их завершения (последовательности (5)) в виде следующей задачи булевого линейного программирования

$$x_{i_l}^k = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}, \quad l = 1, \dots, N, \quad k = 1, \dots, K, \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{i_l}^k = 1, \quad l = 1, \dots, N, \quad (10)$$

$$\theta^k + \sum_{l=1}^r \beta_{i_l}^{\min} x_{i_l}^k \leq T_{i_l}, \quad r = 1, \dots, N, \quad k = 1, \dots, K, \quad (11)$$

$$\theta^k + \sum_{l=1}^r \bar{b}_{i_l}^{k, \min} x_{i_l}^k \leq T_{i_l}, \quad r = 1, \dots, N, \quad k = 1, \dots, K. \quad (12)$$

**Утверждение 3.** Если не выполняется система неравенств (9)–(11) или (9), (10), (12), то система ограничений задачи является несовместной.

**Утверждение 4.** Время завершения выполнения всех заданий на рабочих станциях не может быть меньше значения  $\eta$ , которое определяется в результате решения следующей задачи булевого линейного программирования

$$\min \left\{ \eta \mid \theta^k + \sum_{l=1}^N \beta_{i_l}^{\min} x_{i_l}^k - \eta_1 \leq 0, \quad k = 1, \dots, K \right\} \quad (13)$$

в условиях ограничений (9)–(11) или задачи

$$\min \{ \eta_1 \mid \theta^k + \sum_{l=1}^N \bar{b}_{i_l}^{k, \min} x_{i_l}^k - \eta_1 \leq 0, \quad k = 1, \dots, K \} \quad (14)$$

в условиях ограничений (9), (10), (12).

Так как  $\beta_{i_l}^{\min} \leq \bar{b}_{i_l}^{k, \min}$  для всех  $l = 1, \dots, N$ ,  $k = 1, \dots, K$ , то система ограничений (9), (10), (12) является более жесткой, чем система ограничений (9)–(11), и не все значения переменных, удовлетворяющие системе ограничений (9)–(11), обеспечат выполнение условий (9), (10), (12). Поэтому для значений  $\eta$ , определяемым в результате решения задачи (9)–(11), (13) и значения  $\eta_1$ , определяемого из условий (9), (10), (12), (14), справедливо соотношение  $\eta_1 \geq \eta$ .

Пусть на некотором шаге решения задачи определены подмножества  $\tilde{I}^{k,+}$  и частичные последовательности выполнения заданий на каждой машине  $\tilde{V}^k = \{j_1^k, j_2^k, \dots, j_{m_k}^k\}$ , каждая из которых включает  $m_k, k = 1, \dots, K$  заданий. Здесь  $\sum_{k=1}^K m_k = m < N$ , где  $j_{m_1}^k$  — последнее задание, выполняемое на  $k$ -й машине в построенной подпоследовательности  $\tilde{V}^k$ .

Пусть  $P = N - m, \tilde{I}^+ = \bigcup_{k=1}^K \tilde{I}^{k,+}$  — подмножество всех включенных во все подпоследовательности заданий. Вычислим для каждой из машин времени завершения, выполняемых в этих частичных последовательностях заданий:

$$\bar{\theta}^k = \theta^k + \sum_{l=1}^{m_k} (a_{i_{l-1}i_l}^k + t_{i_l}^k), \quad k = 1, \dots, K. \quad (15)$$

Обозначим  $\hat{J} = \{j_1, j_2, \dots, j_P\}$  — подмножество не включенных в частичные последовательности и подлежащих выполнению заданий. Упорядочим эти задания в последовательность по невозрастанию граничных значений времен их завершения

$$\hat{V}^- = \{v_1, v_2, \dots, v_P \mid T_{v_1} \leq T_{v_2} \leq \dots \leq T_{v_P}\}. \quad (16)$$

Преобразуем матрицы  $B^k$  следующим образом:

- вычтем 0-й столбец, а также строки, соответствующие индексам заданий, входящих в подмножество заданий  $\tilde{I}^+$ ;
- удалим в каждой из матриц  $B^k$  строки, соответствующие индексам заданий, принадлежащим подмножеству  $\tilde{I}^+(k) = \tilde{I}^+ \setminus j_{m_1}^k$ .

Назовем такое преобразование матриц  $B^k$  преобразованием 1.

Вновь образованные прямоугольные матрицы меньших размеров обозначим  $D^k = |d_{ij}^k|, k = 1, \dots, K$ . Найдем

$$\bar{d}_i^{k,\min} = \min_{j \in \hat{V}^-} d_{ij}^k, \quad i \in \hat{V}^-, \quad k = 1, \dots, K. \quad (17)$$

На основе этих вновь образованных матриц построим матрицу  $D = |d_{ij}|$ , элементы которой определяются по формулам:

$$d_{ij} = \min_{1 \leq k \leq K} d_{ij}^k, \quad i \in \hat{V}^- \cup \{0\}, \quad j \in \hat{V}^-. \quad (18)$$

Определим

$$\bar{\beta}_i^{\min} = \min_{j \in \hat{J}} d_{ij}, \quad i \in \hat{V}^- \cup \{0\}. \quad (19)$$

Следствием утверждений 3 и 4 является утверждение 5.

**Утверждение 5.** Если не выполняется система неравенств

$$x_{v_l}^k = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}, v_l \in \hat{V}^-, k = 1, \dots, K, \quad (20)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{v_l}^k = 1, v_l \in \hat{V}^-, \quad (21)$$

$$\bar{\theta}^k + \sum_{l=1}^P \bar{\beta}_{v_l}^{\min} x_{v_l}^k \leq T_{v_l}, v_l \in \hat{V}^-, p = 1, \dots, P, k = 1, \dots, K, \quad (22)$$

где значения  $\bar{\theta}^k$  определяются по формулам (15), а величины  $\bar{\beta}_{v_l}^{\min}$  — в соответствии с выражениями (19), или система неравенств (20), (21), (23):

$$\bar{\theta}^k + \sum_{l=1}^P \bar{d}_{v_l}^{k, \min} x_{v_l}^k \leq T_{v_l}, v_l \in \hat{V}^-, p = 1, \dots, P, k = 1, \dots, K, \quad (23)$$

где значения  $\bar{d}_{v_l}^{k, \min}$  вычисляются по формулам (17), то при выбранном распределении заданий по рабочим станциям и выполнении их на каждой машине в последовательности  $\tilde{V}^k, k = 1, \dots, K$  не существует допустимых расписаний, обеспечивающих выполнение всего оставшегося подмножества заданий  $\hat{J}$  в установленные ограничениями задачи сроки.

**Утверждение 6.** Если построены частичные последовательности выполнения некоторого подмножества заданий  $\tilde{V}^k$  на машинах  $k = 1, \dots, K$ , определены сроки завершения выполнения этих заданий на каждой из машин  $\bar{\theta}^k$ , и необходимо распределить по машинам и построить на них расписание выполнения оставшегося подмножества заданий  $\hat{V}^-$ , то время завершения расписания выполнения всех заданий на этих машинах не может быть меньше величины  $\varsigma_1 \geq \varsigma$ , определяемых соответственно в результате решения следующих задач линейного булевого программирования:

$$\left\{ \min \varsigma \mid \bar{\theta}^k + \sum_{l=1}^P \bar{\beta}_{v_l}^{\min} x_{v_l}^k - \varsigma \leq T_{v_l}, v_l \in \hat{V}^-, k = 1, \dots, K \right\} \quad (24)$$

в условиях ограничений (20)–(22) или

$$\left\{ \min \varsigma_1 \mid \bar{\theta}^k + \sum_{l=1}^P \bar{d}_{v_l}^{k, \min} x_{v_l}^k - \varsigma_1 \leq T_{v_l}, v_l \in \hat{V}^-, k = 1, \dots, K \right\} \quad (25)$$

в условиях ограничений (20), (21), (23).

Следовательно, результаты решения задач (9)–(11) (или (9), (10), (12)) и (20)–(22) (или (20), (21), (23)) являются соответственно необходимыми, но не достаточными условиями возможности выполнения всей системы ограничений как на начальном этапе решения, так и этапе решения, когда сформированы некоторые частичные подпоследовательности выполнения непесекающихся подмножеств заданий на каждой машине.

Результаты решения задач (9)–(11), (13) (или (9), (10), (12), (14)) и (20)–(22), (24) (или (20), (21), (23), (25)) позволяют вычислить нижнюю границу длины оптимального расписания в решении.

Решение сформулированных оценочных задач булевого линейного программирования при больших размерностях  $K$  и  $N$  может потребовать значительных объемов вычислений. Поэтому в качестве грубой оценки возможности выполнения всей системы ограничений на различных этапах решения могут рассматриваться результаты решения задач (9)–(11) (или (9), (10), (12)) и (20)–(22) (или (20), (21), (23)) не для всего множества переменных ( $N$  — на начальном этапе или  $P = N - m$  — в процессе решения), а для некоторой части подлежащих выполнению заданий, стоящих в левой части соответственно последовательностей  $\tilde{I}$  и  $\hat{J}$ , т.е. для количества заданий  $M < N$  или  $P_1 < P$ ).

Для вычисления более грубой, но требующей существенно меньшего объема вычислений оценки, нижней границы функции цели  $F_1$  можно воспользоваться алгоритмом.

Вычислим

$$E = \sum_{l=1}^P \beta_{v_l}^{\min}, \quad \bar{\theta}_{\max}^k = \max_{1 \leq k \leq K} \bar{\theta}^k,$$

$$\Delta_k = \bar{\theta}_{\max}^k - \bar{\theta}^k, \quad k = 1, \dots, K; \quad E_1 = E - \sum_{k=1}^K \Delta^k. \quad (26)$$

Тогда

$$\xi(F_1) = \bar{\theta}_{\max}^k + \left\lfloor \frac{E_1}{K} \right\rfloor. \quad (27)$$

Здесь  $\lfloor \cdot \rfloor$  — целая часть частного от деления.

Пусть  $0 \leq \lambda^k \leq 1$ ,  $k = 1, \dots, K$ ,  $\sum_{k=1}^K \lambda^k = 1$  — весовые коэффициенты, оп-

ределяющие степень важности резерва свободного времени машин.

**Утверждение 6.** Минимальное средневзвешенное время работы машин, необходимое для выполнения всего комплекса работ, как на начальном этапе решения, так и этапе решения, когда сформированы некоторые частичные подпоследовательности выполнения непересекающихся подмножеств заданий на каждой машине, не может быть меньше значения

$$\xi(F_2) = \sum_{k=1}^K \lambda^k \left[ \bar{\theta}^k + \sum_{l=1}^N \bar{b}_{i_l}^{k, \min} x_{i_l}^{k, \min} \right] \rightarrow \min \quad (28)$$

в условиях ограничений (9)–(11) или (9), (10), (12), либо определяется в результате решения задачи

$$\xi(F_2) = \sum_{k=1}^K \left[ \bar{\theta}^k + \sum_{l=1}^P \bar{d}_{v_l}^{k, \min} x_{v_l}^k \right] \rightarrow \min \quad (29)$$

в условиях ограничений (20)–(22) или (20), (21), (23).

Следовательно, значение  $\xi(F_2)$  является нижней границей второго критерия оптимальности на различных этапах решения.

Для вычисления грубой оценки нижней границы функции цели  $\xi_1(F_2)$  можно воспользоваться выражениями

$$\xi_1(F_2) = \sum_{i=1}^N \beta_i^{\min} \quad \text{или} \quad \xi_1(F_2) = \sum_{k=1}^K \bar{\theta}^k + \sum_{\substack{l=1, \\ v_l \in J}}^P \bar{\beta}_{v_l}^{\min}. \quad (30)$$

Пусть

$$(j^*, k) = \arg \min_{j \in V^-} d_{ij}^k, \quad (31)$$

т.е.  $(j^*, k^*)$  — пара индексов  $j \in \hat{J}$ ,  $k = 1, \dots, K$ , на которых достигается  $\bar{\beta}_i^{\min} = \min_{j \in \hat{J}} d_{ij}$ .

Обозначим  $i^s(k)$ ,  $k = 1, \dots, K$  — номера заданий, выполняемых в строящихся последовательностях на каждой машине последними.

Вычислим

$$(\hat{j}, \hat{k}) = \arg \delta_i^{\min} = \arg \{ \min_{j \in \hat{J}} \min_{1 \leq k \leq K} \min_{j \in \hat{V}^-} d_{ij}^k \mid (\hat{j}, \hat{k}) \neq (j^*, k^*) \}. \quad (32)$$

Ясно, что если в строящемся расписании выполнения заданий будет выбрана не пара индексов  $(j^*, k^*)$ , а некоторая другая пара, то суммарное время выполнения всех оставшихся невыполненных заданий на всех машинах будет увеличено не менее чем на величину  $\Delta_{i^s(k)} = \delta_{i^s(k)}^{\min} - \bar{\beta}_{i^s(k)}^{\min}$ . Следовательно, значение  $\xi_1(F_2)$  увеличится не менее чем на величину  $\Delta_{i^s(k)}$ ,

а значение  $\xi_1(F_1)$  — не менее чем на величину  $\left\lfloor \frac{\Delta_{i^s(k)}}{K} \right\rfloor$ , где  $\lfloor \cdot \rfloor$  — целая

часть частного от деления этих величин. Найдем

$$\begin{aligned} (i^*, j^*, k^*) &= \arg \delta_{i^s(k)}^{\min} = \arg \min_{i \in \hat{V}^-} (\delta_{i^s(k)}^{\min} - \bar{\beta}_{i^s(k)}^{\min}) = \\ &= \min_{i \in \hat{V}^-} [ \{ \min_{i^s(k) \in \hat{J}} \min_{1 \leq k \leq K} \min_{j \in \hat{V}^-} d_{ij}^k \mid (\hat{j}, \hat{k}) \} - \min_{i^s(k) \in \hat{J}} \min_{1 \leq k \leq K} \min_{j \in \hat{V}^-} d_{ij}^k ]. \quad (33) \end{aligned}$$

Выбор на данном шаге алгоритма для включения в строящиеся последовательности выполнения заданий соответствующего элемента  $(i^*, j^*, k^*)$  (т.е. выполнение задания  $j^*$  на машине  $k^*$ ) обеспечит уменьшение границы функции цели задачи на минимальную величину.

## АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Сформулированные оптимизационные задачи относятся к классу NP-полных задач.

Ниже рассматриваются алгоритмы решения задачи последовательными алгоритмами оптимизации: методом «ветвей и границ» [1, 12] и методом последовательного анализа и отсева неперспективных вариантов [2].

Рассматриваемые ниже методы строят на каждой машине альтернативные допустимые подпоследовательности заданий в порядке их выполнения. Каждое из заданий может и должно входить только в одну из строящихся последовательностей, выполняемых на одной какой-либо машине. На каждом этапе решения задачи эти подпоследовательности расширяются путем включения для какой-то одной из машин нового задания. При этом рассчитываются времена начала и завершения выполнения этого задания и на основании утверждения 3 проверяется допустимость выполнения всех ограничений для этих построенных подпоследовательностей. Если установка выбираемого задания на данной машине на соответствующее место в последовательности является недопустимым, то выбирается следующее альтернативное задание для этой или другой машины. В противном случае на основании утверждений 4, 5 вычисляется нижняя оценка времени выполнения расписания. В методе ветвей и границ на каждом шаге алгоритма выбирается для развития множество подпоследовательностей с наименьшей нижней границей (оценкой), а в методе последовательного анализа вариантов — конструируются и рассматриваются все допустимые множества построенных подпоследовательностей с заданным количеством заданий. Если соответствующее множество подпоследовательностей выполняемых заданий на всех машинах является недопустимым, то значение нижней оценки полагается равным  $\infty$ . В методе ветвей и границ факт несовместимости системы ограничений задачи устанавливается в случае, если для всех вершин дерева значение нижней границы равно  $\infty$ , а факт получения оптимального решения (если построены последовательности выполнения всех заданий на всех машинах с временем завершения) не большим чем значения оценок всех множеств не построенных до конца подпоследовательностей.

Ниже приводится формальное описание алгоритмов решения задачи.

Упорядочим множество подлежащих выполнению заданий  $\tilde{I}$  в последовательность  $\tilde{U}_1$ , т.е. в порядке возрастания граничных времен их завершения в соответствии с выражением (5). Вычислим значения величин  $b_{ij}^k$ ,  $\bar{b}_i^{k,\min}$  и  $\beta_{ij}$  по формулам (1)–(2). Сформулируем и решим систему неравенств (9), (10), (12) относительно булевых переменных  $x_{ij}^k$ . Если данная система неравенств несовместима, то не существует расписаний, обеспечивающих выполнение всей системы ограничений задачи, и алгоритм с этим сообщением заканчивает свою работу. Заметим, что, если сформулированная задача большого размера и требует значительных объемов вычислений, то она может быть решена для части последовательности, содержащей  $N_1 < N$  членов. Решение этой задачи даст более грубую оценку совместности ограничений, так как учитывает только первые  $N_1$  членов последовательности  $\tilde{U}_1$ . Если получено решение системы линейных неравенств, то может быть вычислена либо грубая оценка минимальной длины расписания выполнения заданий по формулам (26), (27), либо более точная как резуль-



тат решения задачи (9), (10), (12), (14). Менее точное значение нижней границы средневзвешенного времени работы машин вычисляется по формуле (30), а более точная оценка определяется в результате решения задачи (9), (10), (12), (28).

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СХЕМА МЕТОДА ВЕТВЕЙ И ГРАНИЦ

Каждая метка  $s$ -й вершины дерева состоит из следующих компонент:  $q_1^s$  — номер вершины дерева;  $q_2^s$  — признак того, целесообразно ли дальнейшее развитие данной вершины дерева ( $q_2^s = 1$ ) или нет ( $q_2^s = 0$ );  $q_3^s = F^s$  — значение нижней границы функции цели для данной вершины дерева;  $q_4^s$  — признак того, получено допустимое решение задачи ( $q_4^s = 1$ ) или нет ( $q_4^s = 0$ );  $q_5^s = i^s(1)$ ,  $q_6^s = i^s(2), \dots, q_{4+k}^s = i^s(k), \dots, q_{4+K}^s = i^s(K)$  — номера заданий, выполняемых в строящихся последовательностях на каждой машине последними;  $G^s = \|g_i^{sk}\|$  — матрица размерностью  $K$  строк и  $N$  столбцов, элементами которой является место, которое занимает задание  $i$  в последовательности выполнения его на машине  $k$ . Если для вершины  $s$  еще не установлены, что задание  $i$  выполняется на  $k$ -й машине то  $g_i^{sk} = 0$ . Если назначено, что это задание выполняется на какой-то другой машине, то соответствующий элемент матрицы равен «-1»;  $\bar{\theta}^{sk}$ ,  $k = 1, \dots, K$  — вектор допустимых времен начала выполнения на  $k$ -й машине следующего задания.

Пусть  $S$  — количество вершин дерева на данном этапе решения. Если выполнены все описанные в начале данного раздела вычисления и не установлен факт несовместности исходной системы ограничений, то выполняем начальный предварительный шаг.

**Шаг 0.** Формируем метку корневой вершины дерева  $s = 1$  следующим образом:

$$q_1^s = 1; \quad q_2^s = 1; \quad q_4^s = 0; \quad q_{4+k}^s = 0, \quad k = 1, \dots, K; \quad g_{ki}^s = 0, \quad k = 1, \dots, K, \\ i = 1, \dots, N.$$

Значения  $\bar{\theta}^{sk}$  полагаем равными  $\bar{\theta}^{sk} = \theta^k$ ,  $k = 1, \dots, K$ .

Значение  $q_3^s = F^s$  определяем в виде грубой или точной оценки (по результатам решения задачи булевого линейного программирования) и в зависимости от выбранного критерия оптимальности ( $F_1^s$  или  $F_2^s$ ).

Алгоритм решения задачи состоит из некоторого количества итераций, на каждой из которых в определенной логической последовательности выполняются следующие шаги.

**Шаг 1.** Среди меток вершин дерева, для которых  $q_2^s = 1$ ,  $q_4^s = 0$ , выбираем метку с наименьшим значением  $q_3^s$ , т.е. метку с номером  $\gamma$ , для которой  $g_3^\gamma = \{\min_{1 \leq s \leq S} q_3^s \mid q_2^s = 1, q_4^s = 0\}$ .

Если таких не существует, то переходим к шагу 2. В противном случае переходим к шагу 3.

**Шаг 2.** Находим среди меток дерева, для которых  $q_4^s = 1$ , метку с номером  $\rho$ , для которой  $g_3^\rho = \{\min_{1 \leq s \leq S} q_3^s \mid q_2^s = 0, q_4^s = 1\}$ . Если таких меток не существует, то переходим к шагу 5. В противном случае метка дерева с номером  $\rho$  является оптимальным решением и переходим к шагу 5.

**Шаг 3.**

- Определим из матрицы  $G^\gamma$  подмножества заданий  $\hat{I}^{\gamma,k,+}$ , выбранных в  $\gamma$ -м частичном плане для выполнения на каждой машине (т.е. номера столбцов в каждой  $k$ -й строке матрицы  $G^\gamma$  метки с номером  $\gamma$ , элемент которых  $g_i^{\gamma k} > 0$ ). Пусть количество таких элементов в каждой строке соответственно равно  $h^{\gamma k}$ . Найдем номера заданий, стоящих в подпоследовательностях и выполняемых последними (т.е.  $\{\bar{i}(\gamma, k) \mid g_i^{\gamma k} = h^{\gamma k}\}$ ). Определим также множество всех выполненных на различных машинах заданий  $\hat{I}^{\gamma,+} = \bigcup_{k=1}^K \hat{I}^{\gamma,k,+}$ .

- В каждой матрице  $B^k = |b_{ij}^k|$ ,  $k = 1, \dots, K$  вычеркиваем все столбцы подмножества  $j \in \hat{I}^{\gamma,+}$ , а также все строки  $i \in \hat{I}^{\gamma,+} / \bar{i}(\gamma, k)$  (т.е. все строки, соответствующие индексам выполненных на всех машинах заданий, кроме задания, выполненного на данной машине последним).

- Выполним преобразование 1 вновь полученных матриц  $B^k$  и построение матриц  $D^k$ .

- Определяем значения  $\bar{d}_{v_l}^{k,\min}$ ,  $d_{ij}$  и  $\bar{\beta}_{v_l}^{\min}$  по формулам (17)–(19).

4) Определяем грубую или точную оценку возможности выполнения системы ограничений задачи в результате решения системы линейных неравенств с булевыми переменными (20), (21), (23) размерностью  $P$  или  $P_1 < P$ . Если система неравенств несовместна, то подмножество не содержит допустимых планов. Полагаем  $q_2^\gamma = 0$ ,  $F^\gamma = \infty$  и переходим к шагу 1. Если получено решение системы неравенств, то вычисляем грубую (по формулам (30)) или точную оценку функции цели задачи (в результате решения задачи булевого линейного программирования (20), (21), (23) с критерием оптимальности (28) или (29)).

По результатам решения одной из оптимизационных задач корректируем для  $\gamma$ -й метки вершины дерева значение оценки функции цели (признак  $q_3^\gamma = F^\gamma$ ) и переходим к шагу 4.

**Шаг 4** (разбиение на подмножества). Для метки с номером  $\gamma$ , выполнив вычисления (31)–(33), находим элемент  $(i^*, j^*, k^*)$ , т.е. номер машины  $k^*$  и номер задания  $j^*$ , которое должно быть выбрано на этой машине

и установлено на следующее место последовательности после выполненного на этой же машине задания  $i^* = i^\gamma(k^*) = q_{4+k^*}^\gamma$ .

Формируем  $(S + 1)$ -ю вершину дерева, признаки которой определяются следующим образом:

$$q_1^{S+1} = S + 1, \quad q_2^{S+1} = 1, \quad q_3^{S+1} = F^\gamma, \quad q_{4+k}^{S+1} = q_{4+k}^\gamma, \quad k = 1, \dots, K, \quad k \neq k^*;$$

$$q_{4+k}^{S+1} = j^*; \quad q_i^{S+1,k} = q_i^{\gamma,k}, \quad i = 1, \dots, N, \quad k = 1, \dots, K, \quad k \neq k^*;$$

$$g_i^{S+1,k^*} = g_i^{\gamma,k^*}, \quad i = 1, \dots, N, \quad i \neq j^*;$$

$$g_i^{S+1,k^*} = (g_i^{\gamma,k^*} + 1);$$

$$\bar{\theta}^{S+1,k} = \bar{\theta}^{\gamma,k}, \quad k = 1, \dots, K, \quad k \neq k^*; \quad \bar{\theta}^{S+1,k^*} = \bar{\theta}^{\gamma,k^*} + b_{i(k^*),j^*}^{k^*}.$$

Формируем  $(S + 2)$ -ю вершину дерева, признаки которой определяются следующим образом:

$$q_1^{S+2} = S + 2, \quad q_2^{S+2} = 1, \quad q_3^{S+2} = F_1^\gamma + \left| \frac{\Delta_{i(k^*)}}{K} \right| \quad (\text{или } q_3^{S+2} = F_2^\gamma + \Delta_{i(k^*)});$$

$$q_{4+k}^{S+2} = q_{4+k}^\gamma, \quad k = 1, \dots, K;$$

$$g_i^{S+2,k} = g_i^{\gamma,k}, \quad i = 1, \dots, N, \quad k = 1, \dots, K, \quad k \neq k^*;$$

$$g_i^{S+1,k^*} = g_i^{\gamma,k^*}, \quad i = 1, \dots, N, \quad i \neq j^*; \quad g_i^{S+1,k^*} = -1;$$

$$\bar{\theta}^{S+2,k} = \bar{\theta}^{\gamma,k}, \quad k = 1, \dots, K.$$

В метке вершины  $\gamma$  изменяем только один признак, полагая  $q_2^\gamma = 0$ .

Полагаем  $(S + 2) := S$  и переходим к шагу 1.

**Шаг 5.** Восстанавливаем оптимальные расписания выполнения заданий на каждой машине и рассчитываем времена начала и завершения выполнения каждого из этих заданий, а также соответствующие потери времени на переналадки. Формируем матрицу последовательностей выполнения заданий  $\tilde{W}$  на каждой машине, включающую  $K$  строк и  $N$  столбцов, а также трехмерный массив времен выполнения заданий  $T = \left| \tau_{lj}^k \right|$ , размерностью  $k = 1, \dots, K, \quad l = 1, \dots, 4, \quad j = 1, \dots, N$ . В первой строке каждой двумерной матрицы  $T^k$  указываются:  $\tau_{1j}^k$  — время начала настройки  $k$ -й машины для выполнения задания  $j$ ;  $\tau_{2j}^k, \tau_{3j}^k$  — соответственно времена начала и завершения на  $k$ -й машине выполнения задания  $j$ .

В начале процесса полагаем, что все члены этой матрицы последовательностей равными 0 —  $w_i^k = 0$ ,  $k = 1, \dots, K$ ,  $i = 1, \dots, N$ . Все элементы трехмерной матрицы  $T$  положим также равными 0. Введем также некоторое вспомогательный вектор  $H^k$ , компоненты которого в начале процесса положим равными  $H^k = \theta^k$ .

Введем также вектор  $\pi = (\pi^k)$ . В начале процесса положим  $\pi^k = 0$ ,  $k = 1, \dots, K$ .

Для каждой  $k$ -й строки матрицы  $G^y$  выполняем следующий объем вычислений.

Для  $i = 1, \dots, N$  выполним: если  $g_i^{yk} > \pi^k$ , полагаем  $\pi^k = g_i^{yk}$ . После завершения этой процедуры значения  $\pi^k$  определяют количество заданий, выполняемых в оптимальном расписании на каждой машине.

Полагаем  $\lambda^k = 1$ . Пусть  $K$  — текущий номер задания, соответствующего предыдущему члену последовательности. Значение  $\omega^k$  в начале процесса полагаем равным нулю. Переходим к пункту (а).

а) Среди элементов вектора  $G^{yk}$  находим элемент  $g_\mu^{yk} = \lambda^k$  ( $\mu$ -й элемент вектора). Полагаем  $\omega_i^k = \lambda^k$ . Полагаем  $\tau_{1\mu}^k = H^k$ ,  $\tau_{2\mu}^k = \tau_{1\mu}^k + a_{\omega\mu}^k$ ,  $\tau_{3\mu}^k = \tau_{2\mu}^k + t_\mu^k$ . Полагаем  $\omega^k = \mu^k$ ,  $H^k = \tau_{3\mu}^k + 1$ . Переходим к пункту (б).

б) Полагаем  $\lambda^k = \lambda^k + 1$ . Если  $\lambda^k = \pi^k + 1$ , то определены все характеристики оптимального расписания выполнения заданий, и алгоритм заканчивает работу. В противном случае переходим к пункту (а).

Заметим, что если поставлена задача построения допустимого расписания выполнения заданий, то 2-й шаг алгоритма выглядит таким же образом.

В качестве частных случаев рассматриваемой задачи в работе автора [14] предложены математические модели и более простые алгоритмы построения допустимых и оптимальных расписаний выполнения заданий на одной машине, требующие существенно меньшего объема вычислений.

## ВЫВОД

В работе предложены математические модели оптимального разбиения на непересекающиеся подмножества всего комплекса заданий, подлежащих выполнению на нескольких машинах, и построения оптимальных последовательностей их выполнения на каждой из машин. Сформулированная задача решается в условиях учета потерь времени на переналадку или потери времени при переходе от выполнения одного задания к другому, а также с учетом заданных ограничений на начальные и конечные сроки выполнения каждого из заданий и относится к классу NP-сложных задач. На основе установленных в работе свойств допустимых и оптимальных решений предложены эффективные точные и приближенные (в случае использования левосторонней схемы ветвления) алгоритмы решения последовательными ме-

тодами оптимизации, которые уже на ранних этапах решения позволяют установить факт несовместности исходной системы ограничений и при небольшом объеме вычислений получить эффективное приближенное решение. Полученные в работе результаты могут найти широкое применение в календарном планировании производства, организации технического обслуживания объектов, планировании параллельных вычислений и в маршрутизации перевозок.

#### ЛИТЕРАТУРА.

1. Танаев В.С., Шкурба В.С. Введение в теорию расписаний. — М.: Наука, 1975. — 256 с.
2. Танаев В.С., Ковалев М.Я., Шафранский Я.М. Теория расписаний. Групповые технологии. — Минск: ИТК НАН Беларуси, 1998. — 289 с.
3. Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Миллер Л.В. Теория расписаний. — М.: Наука, 1975. — 360 с.
4. Курейчик В.М. Генетические алгоритмы: монография. — Таганрог: Изд. ТРТУ, 1998. — 242 с.
5. Батищев Д.И., Гудман Э.Д., Норенков И.П., Прилуцкий М.Х. Метод комбинирования эвристик для решения комбинаторных задач упорядочения и распределения ресурсов // Информационные технологии. — № 2. — 1997. — С. 29–32.
6. Pinedo M. Scheduling: Theory, Algorithms and Systems. — Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1999. — 671 p.
7. Brucker P. Scheduling algorithms. — Berlin: Springer-Verlag, 2007. — 371 p.
8. Blazewicz J., Domschke W., Pesch E. The job shop scheduling problem: Conventional and new solution techniques // European Journal of Operational Research. — 1996. — Vol. 93. — P. 1–33.
9. Herrmann J. Supply Chain Scheduling. Transaktionskostentheorie; Parallele Maschinen; Heuristik; Optimierungsmodelle. — Berlin-Heidelberg: Gabler Verlag, 2010. — 162 p.
10. Blazewicz J., Ecker K.H., Pesch E., Schmidt G., Weglarz J. Scheduling Computer and Manufacturing Processes. — Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. — 485 p.
11. Szelke E., Kerr R.M. Artificial Intelligence in Reactive Scheduling. — Chapman & Hall, London, 1995. — 164 p.
12. Зак Ю.А. Определение порядка выполнения независимых операций на параллельных машинах // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. — 1969. — № 2. — С. 15–20.
13. Зак Ю.А. Решение обобщенной задачи Джонсона с ограничениями на сроки выполнения заданий и времена работы машин. Ч.1. Точные методы решения // Проблемы управления. — 2010. — № 3. — С. 17–25; Ч.2. Приближенные методы решения // Проблемы управления. — 2010. — № 4. — С. 12–19.
14. Зак Ю.А. Оптимизация планирования производства и раскроя бумажной продукции // Управляющие системы и машины. — 2010. — № 5. — С. 82–93.

Поступила 07.10.2010

**АЛГОРИТМЫ ЗАМЕНЫ КОНТЕЙНЕРОВ-КЛЮЧЕЙ ПРИ  
ПОТОКОВОМ ШИФРОВАНИИ ИНФОРМАЦИИ МЕТОДОМ  
КОСВЕННОГО ШИФРОВАНИЯ**

**Н.И. АЛИШОВ, В.А. МАРЧЕНКО, А.Н. МИЩЕНКО**

Описан новый подход построения систем потокового шифрования с использованием метода косвенной стенографии. Приведены алгоритмы различных реализаций предложенного подхода.

**ВСТУПЛЕНИЕ**

Основной задачей всякого криптоалгоритма является обеспечение необходимой защищенности шифруемой информации. Согласно требованиям Керкгоффа [1], надежность криптографической системы должна определяться сокрытием секретных ключей, но не сокрытием используемых алгоритмов или их особенностей. Поэтому вопросам управления ключами шифрования, их генерации и удобства использования уделяется особое внимание при создании современных систем защиты, работающих с криптографическими алгоритмами. Именно ключ шифрования является базовым секретным компонентом при шифровании/расшифровке сообщений, создании и проверке цифровой подписи, вычислении кодов аутентичности. В общем случае при использовании одного и того же алгоритма результат шифрования должен зависеть только от используемого ключа и не зависеть от реализации криптоалгоритма.

В современных информационных системах широкое распространение получили поточные криптографические алгоритмы. Райнер Рюппель [2] выделил четыре основных подхода к проектированию поточных шифров:

- Теоретико-системный подход, ориентированный на создание для криптоаналитика сложной, ранее не исследованной проблемы.
- Теоретико-сложностный подход, базирующийся на сложной, но ранее уже исследованной проблеме (например, факторизация чисел, дискретное логарифмирование и т.д.).
- Теоретико-информационный подход, в соответствии с которым делается попытка скрыть сам исходный текст от криптоаналитика так, что вне зависимости от того, сколько времени потрачено на расшифрование сообщения, криптоаналитик не сможет однозначно указать соответствие криптограммы и исходного сообщения.

- Эмперический подход, предусматривающий создание задачи большого объема, решение которой будет физически неосуществимым для криптоаналитика.

Соответственно этим подходам были указаны и теоретические критерии для проектирования поточных криптоалгоритмов:

- длинные периоды выходных последовательностей;
- большая линейная сложность;
- диффузия — рассеивание избыточности в подструктурах, «размазывание» статистики по всему тексту;
- каждый бит потока ключей должен быть результатом сложных преобразований большинства битов ключа;
- нелинейность применяемых логических функций.

На данный момент не существует теоретического доказательства [3] необходимости и достаточности этих критериев для создания криптостойкой системы поточного шифрования.

## **МЕТОД КОСВЕННОГО ШИФРОВАНИЯ**

Клод Шеннон в 1949 г. в работе «Теория связи в секретных системах» [4] доказал существование абсолютно секретных систем и криптостойких шифров и определил необходимые для этого условия. Он также сформулировал основные требования, предъявляемые к надежным шифрам. Этим требованиям отвечает схема одноразовых блокнотов, реализованная ранее Гильбертом Вернамом [5]. В этой схеме используемый ключ должен обладать тремя критически важными свойствами:

- быть истинно случайным — содержать истинно случайные последовательности;
- совпадать по размеру с заданным открытым текстом — быть не меньше открытого текста;
- применяться только один раз — не допускается повторное применение ключа.

При этом условия, которым должен удовлетворять ключ, настолько сложны, что практическая реализация криптоалгоритма, отвечающего трем требованиям абсолютной криптоустойчивости, является трудно осуществимой. Современные реализации одноразовых блокнотов используются только для передачи сообщений наивысшей секретности.

Большинство известных современных алгоритмов компьютерного шифрования не отвечают условиям абсолютной безопасности [6]. Это определяет изначальную уязвимость используемых криптосистем, так как они построены на основе алгоритмов, для которых не доказана теоретическая криптостойкость.

Использование в качестве поточного криптоалгоритма метод одноразовых блокнотов гарантирует абсолютную надежность и криптостойкость всей системы.

В предложенном методе косвенного шифрования [7, 8] у отправителя и получателя имеются одинаковые массивы данных, которые являются секретными ключами. Байты информации, подлежащие защите, заменяются

(по определенному алгоритму) байтами секретного массива. Полученный новый массив байтов размером исходного сообщения передается адресату. Полученный по каналу массив данных, подвергается обратному преобразованию: байты заменяются байтами секретного файла (зеркальный алгоритм). Этот метод способен обеспечить абсолютную безопасность по Шеннону, поскольку объединяет принцип одноразовых блокнотов и небольшое количество алгебраических преобразований, к тому же он легко реализуется на большинстве существующих программно-аппаратных средствах, и при его использовании можно:

- создать средства для заполнения ключа истинно случайными числами;
- вне зависимости от количества передаваемых данных, размер ключа будет равен объему передаваемой информации;
- обеспечить однократность применения ключа.

Особенностью метода косвенного шифрования является то, что при шифровании одного и того же байта открытого текста всегда получаются различные байты шифротекста. Таким образом, отпадает необходимость «нормализации» шифруемых сообщений для противодействия атакам с использованием статистических методов. С точки зрения криптостойкости в передаваемых криптограммах не содержится исходная информация, а только ее образ в памяти. Исходя из этого, даже зная характер передаваемых данных (формат данных, различные заголовки и т.п.), невозможно восстановить часть ключевой информации или передаваемых данных.

В методе косвенного шифрования, ключ представляет собой массив байтов достаточно большого размера, называемый контейнером-ключом.

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОНТЕЙНЕРОВ-КЛЮЧЕЙ

Основной проблемой криптографии является способ распространения и передачи ключей. В предложенном методе косвенного шифрования могут использоваться несколько схем работы с ключами. В данной работе рассматривается только схема работы криптоалгоритма, которая максимально близка к одноразовым блокнотам. Следует отметить, что в качестве используемых протоколов обмена ключами могут применяться различные известные схемы, но подробный анализ конкретных схем выходит за рамки темы рассматриваемой в работе. Таким образом, длина контейнеров-ключей должна быть не меньше длины передаваемых сообщений.

В рассматриваемой реализации метода косвенного шифрования возможны следующие варианты работы с контейнером-ключом:

- системы реального времени — без разрыва связи для замены контейнера-ключа;
- системы периодической связи — не требуют постоянного обмена потоками данных, однако обеспечивают максимальную криптозащиту в процессе связи.

Вариант для систем реального времени не отвечает критериям абсолютной безопасности по Шеннону, так как даже при реализации максимальной безопасности в этом случае контейнер-ключ (КК) будет приме-



няться дважды: первый раз — для шифрования полезной информации, а второй — для шифрования нового КК. Для передачи нового КК предлагается использовать следующий алгоритм: адресату передается один байт зашифрованной полезной информации, затем один байт зашифрованного нового КК и т.д. по очереди. Это вдвое увеличивает нагрузку на используемый канал связи, но при этом гарантирует отсутствие задержек при шифровании следующей порции передаваемых данных.

Чтобы создать условия, близкие к абсолютной безопасности по Шеннону, в варианте для систем периодической связи замену контейнеров-ключей можно организовать следующими способами:

- физически передавать всякий раз новый КК (это выходит за рамки объективной информационной безопасности, т.к. безопасность передачи и конфиденциальности информации зависит только от субъектов, осуществляющих доставку контейнера-ключа);
- применять гибридную схему — для шифрования нового КК использовать известный алгоритм блочного шифрования (например AES), а для шифрования потоков полезной информации — рассматриваемый метод косвенного шифрования.

Целесообразность применения гибридной схемы обусловлена тем, что:

- блочный шифр обеспечивает высокий уровень криптоустойчивости шифруемого КК, для которого малоэффективны атаки с помощью методов линейной алгебры, а также другие методы криптоанализа, применяемые для поточных шифров. Однако криптостойкий блочный шифр в силу своей архитектуры не может быть использован для шифрования потоковой информации без потерь исходных свойств;
- метод косвенного шифрования позволяет реализовать шифрование потоковой информации с криптостойкостью, не уступающей криптостойкости применяемого алгоритма блочного шифрования. Так как он сам обладает теоретически доказанной криптостойкостью.

Используемый при этом контейнер-ключ имеет большой размер, его шифрование целиком с помощью выбранного блочного шифра теряет какой-либо практический смысл, — так как это займет время, соизмеримое со временем работы самого блочного шифра. Поэтому, чтобы избежать задержек, вызванных необходимостью ожидания окончания шифрования и передачи всего КК, предлагается условно делить новый КК на сегменты небольшого размера —  $n$  (где  $n$  — сегмент контейнера-ключа (схема предполагает условное деление контейнера-ключа на небольшие части для ускорения шифрования/дешифрования новых сегментов КК симметричным блочным алгоритмом)), которые, в свою очередь, шифруются и передаются как часть нового КК. При этом параметры ключа, используемые в блочном алгоритме шифрования (длина ключа, его криптостойкость и т.д.), напрямую зависят от:

- объема шифруемых данных в потоковом режиме;
- максимально допустимых задержек;
- необходимой скорости передачи зашифрованных данных.

Применение такой гибридной схемы обуславливает создание двух виртуальных каналов (потоков) передачи информации между взаимодействующими

щами криптосистемами (рис. 1), которые будут работать в параллельном режиме.

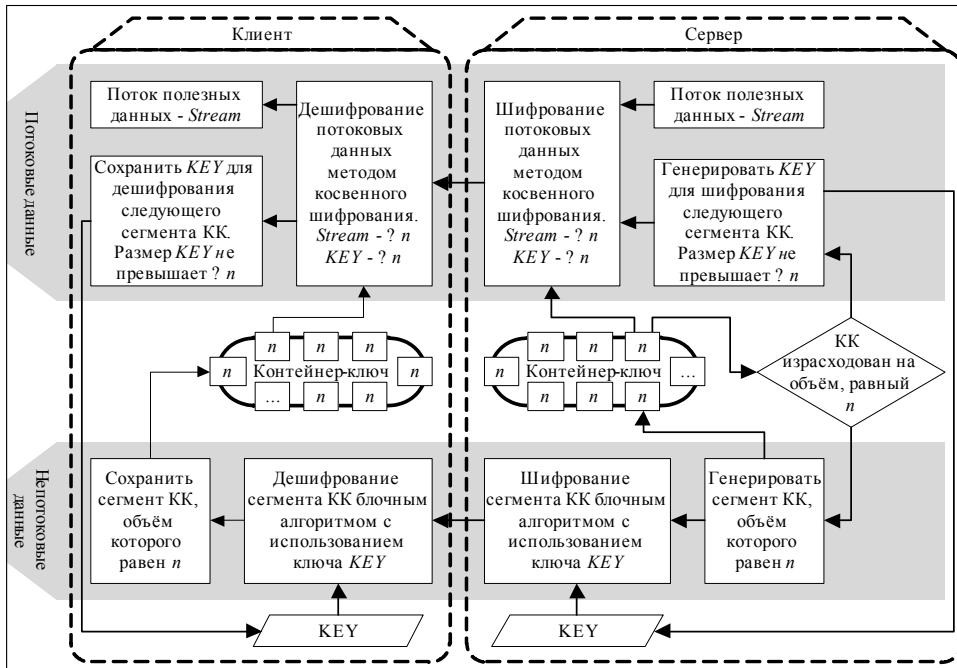


Рис. 1. Взаимодействие потоковых и непотоковых данных в гибридном методе, где  $KEY$  — ключ, используемый для симметричного блочного шифрования сегмента  $n$

Один канал (поток) предполагается использовать для обмена шифруемой методом косвенного шифрования полезной информацией. Этот канал является основным, т.к. по нему идет обмен в потоковом режиме. Перебои в его работе мгновенно скажутся на работе всей системы обмена информацией в целом, поэтому исходные параметры функционирования этого канала должны полностью удовлетворять требованиям системы. Второй канал будет использоваться для передачи зашифрованных блочным шифром новых сегментов КК ( $n$ ) с сервера клиенту.

В данной схеме в качестве сервера может выступать любая из двух взаимодействующих систем. Сервер выбирается при организации каналов для генерирования и передачи контейнера-ключа. Перебои в работе этого канала не сказываются мгновенно на работе всей системы обмена информацией в целом, так как динамическое изменение параметров используемой симметричной криптосистемы позволит компенсировать такие отклонения, как перебои в связи и временные ухудшения параметров канала (время задержки, потеря пакетов и т.п.)<sup>6</sup>. Следует учесть, что компенсация ухудшения некоторых параметров канала связи приводит к уменьшению криптостойкости передаваемых шифрограмм.

Криптостойкость рассматриваемого гибридного метода зависит от криптостойкости блочного шифра, используемого для шифрования сегментов  $n$  нового КК. Повысить криптозащиту поможет использование нового ключа  $KEY$  для шифрования каждого нового сегмента  $n$  нового КК. Нужно отметить, что при таком подходе быстрее расходуются ресурсы КК, а также увеличивается вычислительная нагрузка на серверную систему.

Уязвимым местом предлагаемого способа является гипотетическая возможность вскрыть зашифрованный новый сегмент КК с помощью различных методов криптоанализа для блочных шифров, так как используемый в данной схеме алгоритм компьютерной криптографии не отвечает требованиям абсолютной безопасности по Шеннону. Однако на выполнение такого анализа понадобится значительно больше времени, нежели шифруемая с помощью нового КК полезная информация будет оставаться актуальной.

Вообще процесс криптоанализа зашифрованного нового КК является нетривиальной задачей, так как для того, чтобы определить правильно ли выполнено расшифрование, субъект, выполняющий криптоанализ (ПО, использующее аппаратно-вычислительные мощности суперкомпьютера), должен сопоставить расшифрованный результат с чем-то и прийти к выводу, что полученная (расшифрованная) информация имеет какой-либо смысл или является частью исходного текста. Если же зашифрованная информация представляет собой истинно случайную последовательность, то прийти к выводу, что полученный результат (расшифрованная информация) имеет какой-либо смысл, крайне проблематично. В этом случае должны применяться методы криптоанализа, пригодные для взлома шифров, которые используют информационно-технический подход по Рюппелю [9].

## **ОСОБЕННОСТИ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ**

Для реализации метода косвенного шифрования могут использоваться как программные, так и аппаратные подсистемы, выполняющие шифрование/расшифрование потоков полезной информации и способные генерировать истинно случайные числа, а также содержащие средства для хранения контейнера-ключа с возможностью его перезаписи (замены).

Как правило, аппаратные устройства инициализируются (заполняются контейнеры-ключи) по месту изготовления, затем передаются конечным пользователям, где их устанавливают (инсталлируют).

В случае использования программных реализаций метода косвенного шифрования после установки соответствующего ПО на конечную систему необходимо дополнительно обеспечить организационную защиту помещений, где размещены эти средства.

В настоящее время все большую популярность обретают различного рода приложения для организации видео и аудио трансляций по распределенным телекоммуникационным сетям, системы конференцсвязи и телеприсутствия которые используют высокоскоростные сетевые каналы с малыми задержками для эффективной работы. Для защиты информации, которая обрабатывается в подобных системах, используются криптосистемы потокового шифрования.

Такая криптосистема призвана обеспечить:

- необходимую криптографическую стойкость шифруемой информации;
- шифрование в реальном времени больших объемов информации;
- максимальную гибкость в применении для обеспечения безопасности различных сетевых приложений.

Авторами, для построения системы защиты, предлагается использовать промежуточные «прослойки» между защищаемым приложением и самой

криптосистемой потокового шифрования, которые реализованы в виде прокси-сервера. Таким образом, это вариант реализации обеспечивает гибкую интеграцию системы защиты с конечным защищаемым приложением без необходимости вносить дополнительные изменения в ПО конечного приложения.

К примеру, на двух ЭВМ установлены VoIP приложения и предлагаемая криптосистема (рис. 2), в таком случае реализуется следующая схема:

1. Криптосистема постоянно следит за сетевой активностью VoIP-приложения.
2. VoIP-приложение инициализирует сетевое подключение к удаленной ЭВМ.
3. Криптосистема блокирует передачу информации от приложения в сеть, перенаправляет исходящий поток данных от VoIP-приложения на себя и выполняет подключение от своего имени к запрашиваемой удаленной системе.

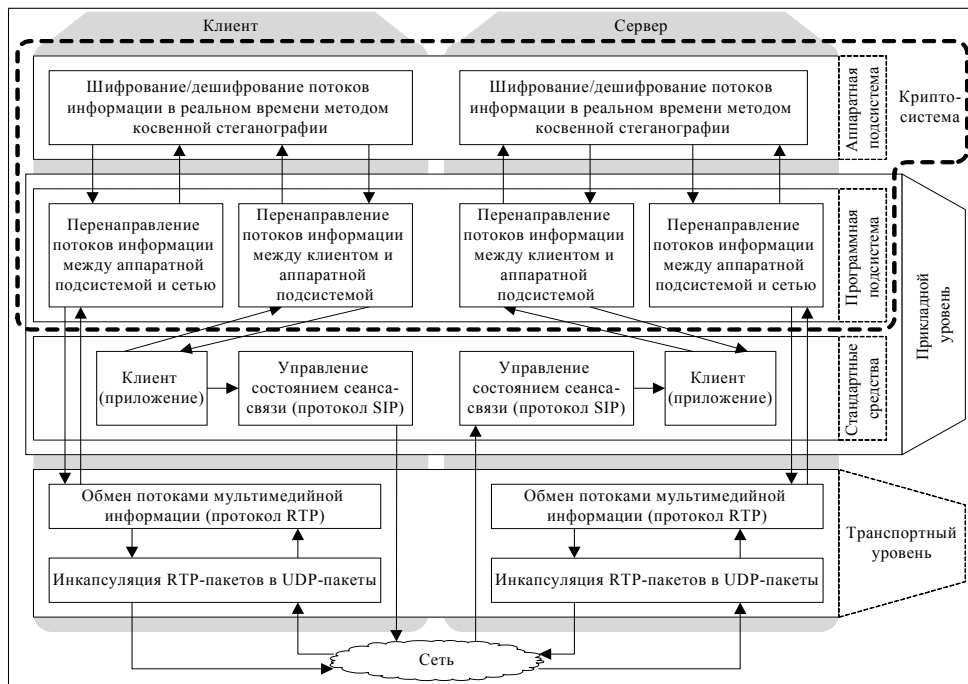


Рис. 2. Концептуальная схема функционирования криптосистемы

Если на удаленной системе используется такая же система защиты, то происходит процесс согласования и обмена ключами и другими параметрами шифрования. В противном случае, если данная система защиты не используется, то в зависимости от настройки или отключается шифрование или сеанс связи разрывается.

После установления соединения с удаленной криптосистемой начинается обмен потоками зашифрованной полезной информации (рис. 3).

Таким образом, в такой реализации криптосистема прозрачно для защищаемого приложения обеспечивает передачу данных по сети. При этом есть возможность использовать различное клиентское ПО достаточно, что бы оно использовало стандартный стек протоколов для потокового вещания.

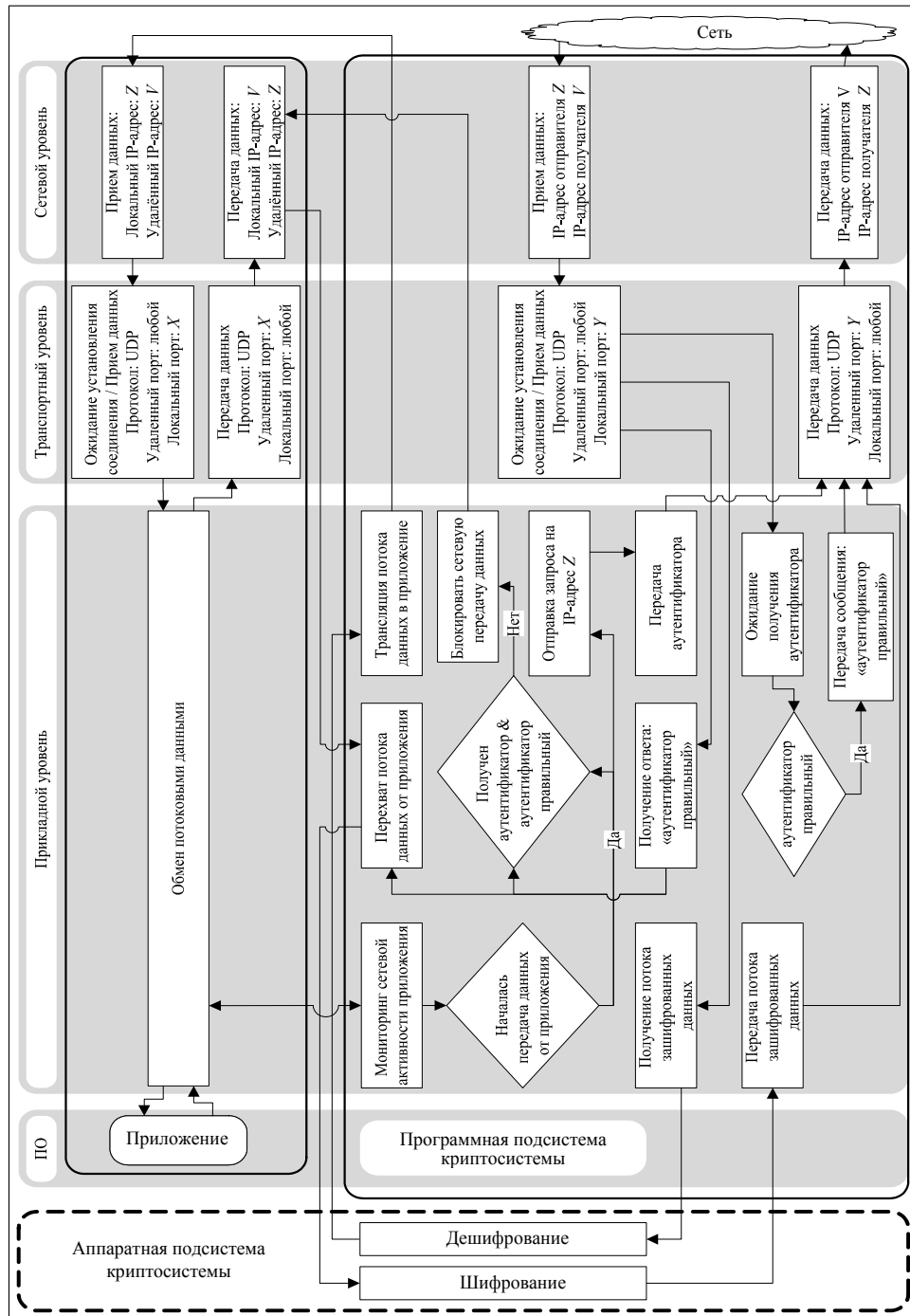


Рис. 3. Алгоритм работы тандема VoIP-приложения и криптосистемы

## ВЫВОДЫ

Применение предлагаемой криптосистемы, использующей для шифрования метод косвенного шифрования, позволяет реализовать повышенный уровень безопасности, по сравнению с существующими потоковыми алгоритмами.

Сама система потокового шифрования может работать на каналах, обладающих различными свойствами и качеством, при этом криптостойкость передаваемой информации остается на достаточно высоком уровне.

Слабым местом этой реализации, как и любой другой криптосистемы, является передача ключа, однако представленные в данной работе алгоритмы способны обеспечить высокий уровень безопасности и гибкости при передаче контейнера-ключа. Следует отметить, что система для своей работы в штатном режиме не требует дополнительных схем и протоколов обмена ключами и при этом обеспечивает криптостойкость, не уступающую криптостойкости используемого симметричного алгоритма. Достичь более высокого уровня криптостойкости можно было бы применением асимметричных криптоалгоритмов, но это резко ограничит круг задач, решаемых системой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Kerckhoffs A.* La cryptographie militaire // Journal des sciences militaires. — IX. — 1883. — P. 5–38. — Feb. 1883. — P. 161–191.
2. *Rueppel R.A.* Analysis and Design of Stream Ciphers // Springer communications and control engineering series. — 1986. — 244 p.
3. *Асосков А.В., Иванов М.А., Мирский А.А., Рузин А.В., Сланин А.В., Тютвин А.Н.* Поточные шифры. — М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2003. — 336 с.
4. *Шеннон К.* Работы по теории информации и кибернетике. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1963. — 830 с.
5. *Vernam G.S.* Cipher Printing Telegraph Systems For Secret Wire and Radio Telegraphic Communications // Journal of the IEEE. — 1926. — 55. — P. 109–115.
6. Сборка и перевод зарубежных исследований. Поточные шифры. Результаты зарубежной открытой криптологии. — [http://www.ssl.stu.neva.ru/psw/crypto/potok/str\\_ciph.htm](http://www.ssl.stu.neva.ru/psw/crypto/potok/str_ciph.htm).
7. *Алишов Н.И.* Косвенная стеганография // Intern. Book Series «Information and science & computing» (Sofia: ITNEA). — 2009. — № 11. — P. 53–58.
8. *Алишов Н.И., Марченко В.А., Оруджева С.Г.* Косвенная стеганография как новый способ передачи секретной информации // Комп'ютерні засоби, мережі та системи: зб. наук. пр. — К.: НАНУ, Ін-т кібернетики, 2009. — № 8. — С. 105–112.
9. *Simmons G.L.* (ed.). Contemporary Cryptology: The Science of Information Integrity. — NY: IEEE, 1992. — 592 p.

Поступила 04.06.2010

УДК 518.9

**КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ РИСКА БАНКРОТСТВА  
КОРПОРАЦІЙ В УМОВИХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТІ.  
ЧАСТЬ 2**

**М.З. ЗГУРОВСКИЙ, Ю.П. ЗАЙЧЕНКО**

Изложены различные модели и методы анализа риска банкротства предприятий с использованием нечетких нейронных сетей (ННС) с алгоритмами вывода Мамдани и Цукамото. Проведены экспериментальные исследования рассмотренных четкого метода Альтмана, нечетко-множественного метода Недосекина и ННС в задачах анализа риска банкротства на примере предприятий Украины. Оценена их эффективность и определен наиболее адекватный метод.

**ВВЕДЕНИЕ**

В первой части статьи были изложены и проанализированы классический метод дискриминантного анализа Альтмана и нечетко-множественный метод О. Недосекина в задаче анализа риска банкротства корпораций [1–4], а также приведены результаты экспериментальных исследований этих методов применительно к предприятиям Украины.

**Цель работы** — рассмотрение и анализ систем нечеткого логического вывода с алгоритмами Мамдани и Цукамото в данной задаче и сравнительный анализ с ранее изложенными методами.

**ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА**

Рассмотрим кратко принципы работы и алгоритмы нечеткого логического вывода [1, 2].

Используемый в разных экспертных системах механизм нечеткого вывода в своей основе имеет базу знаний, формируемую специалистами предметной области в виде совокупности нечетких предикатных правил вида [5, 6]:

$\Pi_1$  : если  $x_1$  есть  $A_{11}$ ,  $x_2$  есть  $A_{12}$ , ...,  $x_n$  есть  $A_{1n}$ , то  $y$  есть  $B_1$ ;

$\Pi_2$  : если  $x_1$  есть  $A_{21}$ ,  $x_2$  есть  $A_{22}$ , ...,  $x_n$  есть  $A_{2n}$ , то  $y$  есть  $B_2$ ;

...

$\Pi_K$  : если  $x_1$  есть  $A_{K1}$ ,  $x_2$  есть  $A_{K2}$ , ...,  $x_n$  есть  $A_{Kn}$ , то  $y$  есть  $B_K$ ,

где  $x_i, x_j \in X$  — входные переменные;  $y, y \in Y$  — переменная вывода (имя для значения данных, которое будет вычислено);  $A_{ij}$  и  $B_i$  — функции принадлежности, заданные соответственно на множествах  $X$  и  $Y$ .

Знание эксперта  $A \rightarrow B$  отражает нечеткое причинное отношение предпосылки и заключения, поэтому его можно назвать нечетким отношением и обозначить через  $R$ :

$R: A \rightarrow B$ , где « $\rightarrow$ » называют нечеткой импликацией.

Как операцию композиции, так и операцию импликации в алгебре нечетких множеств можно реализовывать по-разному (при этом будет отличаться и получаемый результат), но в любом случае общий логический вывод осуществляется за следующие четыре этапа [1, 2].

1. *Введение нечеткости (фаззификация, fuzzification)*. Функции принадлежности, определенные на входных переменных, применяются к их фактическим значениям для определения степени истинности каждой предпосылки каждого правила.

2. *Логический вывод*. Вычисленное значение истинности для предпосылок каждого правила применяется к заключениям каждого правила. Это приводит к одному нечеткому подмножеству, которое будет назначено каждой переменной вывода для каждого правила. В качестве правил логического вывода обычно используются только операции *min* или *prod* (умножение).

3. *Композиция*. Все нечеткие подмножества, назначенные к каждой переменной вывода (во всех правилах), объединяются вместе, чтобы сформировать одно нечеткое подмножество для всех переменных вывода. При подобном объединении обычно используются операции *max* или *sum* (сумма). При композиции в форме *max* комбинированный вывод нечеткого подмножества конструируется как поточечный максимум по всем нечетким подмножествам (нечеткая логика ИЛИ). При композиции в форме *sum* комбинированный вывод нечеткого подмножества формируется как поточечная сумма по всем нечетким подмножествам, назначенным переменной вывода правилами логического вывода.

4. *Приведение к четкости (дефаззификация, defuzzification)*. Используется, если нужно преобразовать нечеткий набор выводов в четкое число. Существует значительное количество методов приведения к четкости, некоторые из которых рассмотрены ниже.

В настоящее время существует несколько алгоритмов нечеткого логического вывода, наиболее известными и используемыми из которых являются алгоритмы Мамдани, Цукамото, Сугено и Ларсена.

## АЛГОРИТМ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА МАМДАНИ

Рассмотрим реализацию алгоритма нечеткого вывода Мамдани, считая, для простоты, что базу знаний организуют два нечетких правила вида:

$P_1$ : если  $x_1$  есть  $A_1$  и  $x_2$  есть  $B_1$ , то  $y$  есть  $C_1$ ,

$P_2$ : если  $x_1$  есть  $A_2$  и  $x_2$  есть  $B_2$ , то  $y$  есть  $C_2$ ,



где  $x_1$  и  $x_2$  — имена входных переменных,  $y$  — имя переменной вывода,  $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2$  — некоторые заданные функции принадлежности. При этом четкое значение  $y_0$  необходимо определить на основе приведенной информации и четких значений  $x_{10}$  и  $x_{20}$ . Нечеткий логический вывод включает следующие этапы:

1) *Введение нечеткости*. Находятся степени истинности для предпосылок каждого правила:  $A_1(x_{10}), A_2(x_{10}), B_1(x_{20}), B_2(x_{20})$ .

2) *Логический вывод*. Находятся уровни «отсечения» для предпосылок каждого из правил (с использованием операции *min*):

$$\alpha_1 = A_1(x_{10}) \wedge B_1(x_{20}),$$

$$\alpha_2 = A_2(x_{10}) \wedge B_2(x_{20}),$$

где через « $\wedge$ » обозначена операция логического и *min*. Затем находятся «усеченные» функции принадлежности:

$$C'_1 = (\alpha_1 \wedge C_1(y)),$$

$$C'_2 = (\alpha_2 \wedge C_2(y)).$$

3) *Композиция*. Производится объединение найденных усеченных функций с использованием операции *max* (обозначенная далее как « $\vee$ »), что приводит к получению итогового нечеткого подмножества для переменной выхода с функцией принадлежности:

$$\mu_{\Sigma}(y) = C_{\Sigma}(y) = C'_1(y) \vee C'_2(y) = (\alpha_1 \wedge C_1(y)) \vee (\alpha_2 \wedge C_2(y)). \quad (1)$$

4) *Приведение к четкости*. Проводится для нахождения четкого значения  $y_0$ , например, центроидным методом.

### НЕЧЕТКИЙ АЛГОРИТМ ЦУКАМОТО

Исходные посылки — как у предыдущего алгоритма, но в данном случае предполагается, что функции  $C_1(y), C_2(y)$  являются монотонными (рис. 1) [1, 2]:

1) *Введение нечеткости* (как в алгоритме Мамдани).

2) *Нечеткий вывод*. Сначала находятся уровни «отсечения»  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (как в алгоритме Мамдани), а затем решаются уравнения:  $\alpha_1 = C_1(y_1)$  и  $\alpha_2 = C_2(y_2)$  и определяются четкие значения  $y_1$  и  $y_2$  для каждого исходного правила.

3) Определяется четкое значение переменной вывода (как взвешенное среднее  $y_1$  и  $y_2$ ):

$$y_0 = \frac{\alpha_1 y_1 + \alpha_2 y_2}{\alpha_1 + \alpha_2}. \quad (2)$$

В общем случае четкое значение выхода находится с помощью дискретного варианта центроидного метода:

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}. \quad (3)$$

Отметим основные достоинства систем с нечеткой логикой. Они позволяют:

- работать с нечеткой неполной и качественной информацией, заданной в виде лингвистических переменных;
- использовать экспертную информацию в виде нечетких правил вывода.

В целом, системы с нечеткой логикой целесообразно применять в следующих случаях [1]:

- для сложных процессов, когда нет простой математической модели;
- если экспертные знания об объекте или о процессе можно сформулировать только в лингвистической форме.

Отметим основные недостатки систем с нечеткой логикой:

- исходный набор нечетких правил формулируется экспертом-человеком и может оказаться неполным или противоречивым;
- вид и параметры функций принадлежности, которые описывают входные и исходные переменные системы, выбираются субъективно и могут оказаться такими, что не полностью отражают реальность.

Для устранения указанных недостатков необходимо использовать *обучение систем нечеткой логики*, т.е. сделать их адаптивными. С этой целью систему нечеткого логического вывода представляют в виде нечеткой нейронной сети, в которой нечеткими оказываются веса связей между нейронами. Это позволяет использовать для ее обучения накопленный широкий арсенал методов обычных нейронных сетей.

## АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ ПОДХОДА МАМДАНИ

Определим уровень банкротства энергоснабжающей компании, которая реально существует и функционирует в Украине, с помощью нечеткого вывода Мамдани.

**Этап 1.** Лингвистические переменные и нечеткие подмножества.

Аналогично нечетко-множественному подходу определяем множества E, G, B.

**Этап 2.** Показатели.

Строим набор отдельных показателей  $X = \{X_i\}$  общим количеством  $N$ , которые по усмотрению эксперта-аналитика влияют на оценку риска банкротства предприятий и оценивают различные по природе аспекты делового и финансового жизни предприятия. Выберем систему из шести показателей тех самых, что и для нечетко-множественного подхода.

**Этап 3.** Формирование базы правил системы нечеткого вывода.

Базу правил формирует специалист по предметной области в виде совокупности нечетких предикатных правил вида:

$\Pi_1$ : если  $x_1$  есть  $A_1$  и  $x_2$  есть  $B_1$ , то  $y$  есть  $C_1$ ,

$\Pi_i$ : если  $x_1$  есть  $A_i$  и  $x_2$  есть  $B_i$ , то  $y$  есть  $C_i$ ,  $i = 1, k$ ,

где  $x_i$  — входные переменные,  $y$  — выходная переменная,  $A_i, B_i, C_i$  — значения лингвистических переменных (термы).

Введем следующие лингвистические переменные для реализации алгоритмов нечеткого вывода Мамдани и Цукамото.

$X_1$ : («очень низкий», «низкий», «средний», «высокий», «очень высокий»);

$X_2$ : («очень низкий», «низкий», «средний», «высокий», «очень высокий»);

$X_3$ : («очень низкий», «низкий», «средний», «высокий», «очень высокий»);

$X_4$ : («очень низкий», «низкий», «средний», «высокий», «очень высокий»);

$X_5$ : («очень низкий», «низкий», «средний», «высокий», «очень высокий»);

$X_6$ : («очень низкий», «низкий», «средний», «высокий», «очень высокий»).

**Определим уровни банкротства:** «очень низкий», «низкий», «средний», «высокий», «очень высокий».

Для упрощения записи введем следующие сокращения: «очень низкий» — ОН, «низкий» — Н, «средний» — Ср, «высокий» — В, «очень высокий» — ОВ.

Тогда мы можем записать следующие правила, с учетом всех возможных комбинаций:

• если  $X_1$  ОН и  $X_2$  ОН и  $X_3$  ОН и  $X_4$  ОН и  $X_5$  ОН и  $X_6$  ОН, то риск банкротства ОВ;

• если  $X_1$  Н и  $X_2$  ОН и  $X_3$  ОН и  $X_4$  ОН и  $X_5$  ОН и  $X_6$  ОН, то риск банкротства ОВ;

• если  $X_1$  Ср и  $X_2$  Н и  $X_3$  ОН и  $X_4$  ОН и  $X_5$  ОН и  $X_6$  ОН, то риск банкротства ОВ;

• если  $X_1$  Ср и  $X_2$  Ср и  $X_3$  Н и  $X_4$  ОН и  $X_5$  ОН и  $X_6$  ОН, то риск банкротства ОВ;

• если  $X_1$  Ср и  $X_2$  Ср и  $X_3$  Ср и  $X_4$  «Н» и  $X_5$  ОН и  $X_6$  ОН, то риск банкротства В;

• если  $X_1$  В и  $X_2$  Ср и  $X_3$  Н и  $X_4$  ОН и  $X_5$  Н и  $X_6$  ОН, то риск банкротства Н;

...

• если  $X_1$  В и  $X_2$  В и  $X_3$  В и  $X_4$  Ср и  $X_5$  Ср и  $X_6$  В, то риск банкротства Ср;

• если  $X_1$  ОВ и  $X_2$  ОВ и  $X_3$  В и  $X_4$  ОВ и  $X_5$  В и  $X_6$  ОВ, то риск банкротства Н;

• если  $X_1$  ОВ и  $X_2$  ОВ и  $X_3$  ОВ и  $X_4$  ОВ и  $X_5$  ОВ и  $X_6$  ОВ, то риск банкротства ОН.

Общее число правил очень велико, если учитывать все возможные варианты перестановок значений. Для облегчения восприятия и сокращения записи правил введем баллы для лингвистических значений: ОН = 5; Н = 4; Ср = 3; В = 2; ОВ = 1.

Вычислим предельные показатели уровня банкротства, воспользовавшись следующими граничными правилами:

- если  $X_1$  ОН и  $X_2$  ОН и  $X_3$  ОН и  $X_4$  ОН и  $X_5$  ОН и  $X_6$  ОН, то БАЛЛ=30;
- если  $X_1$  Н и  $X_2$  Н и  $X_3$  Н и  $X_4$  Н и  $X_5$  Н и  $X_6$  Н, то БАЛЛ=24;
- если  $X_1$  Ср и  $X_2$  Ср и  $X_3$  Ср и  $X_4$  Ср и  $X_5$  Ср и  $X_6$  Ср, то БАЛЛ=18;
- если  $X_1$  В и  $X_2$  В и  $X_3$  В и  $X_4$  В и  $X_5$  В и  $X_6$  В, то БАЛЛ=12;
- если  $X_1$  ОВ и  $X_2$  ОВ и  $X_3$  ОВ и  $X_4$  ОВ и  $X_5$  ОВ и  $X_6$  ОВ, то БАЛ=6.

Тогда новые правила для оценки риска банкротства запишутся таким образом:

- если БАЛЛ > 24, то уровень банкротства ОВ;
- если БАЛЛ ≤ 24 и БАЛЛ > 18, то уровень банкротства В;
- если БАЛЛ ≤ 18 и БАЛЛ > 12, то уровень банкротства Ср;
- если БАЛЛ ≤ 12 и БАЛЛ > 6, то уровень банкротства Н;
- если БАЛЛ = 6, то уровень банкротства ОН.

Такой подход позволяет охватить все множество правил.

**Этап 4. Фаззификация входных параметров.**

Проводим фаззификацию входных параметров, или описание каждого из терм-множеств (лингвистических переменных) с помощью функций принадлежности. И находим степени истинности для каждого значения в правилах:  $A_1(x_{10}), A_2(x_{10}), B_1(x_{20}), B_2(x_{20})$ .

В качестве функций принадлежности будем использовать треугольные функции. Для большей наглядности функций принадлежности представим их графически (рис. 1–7) и укажем на них соответствующие фактические значения показателей.

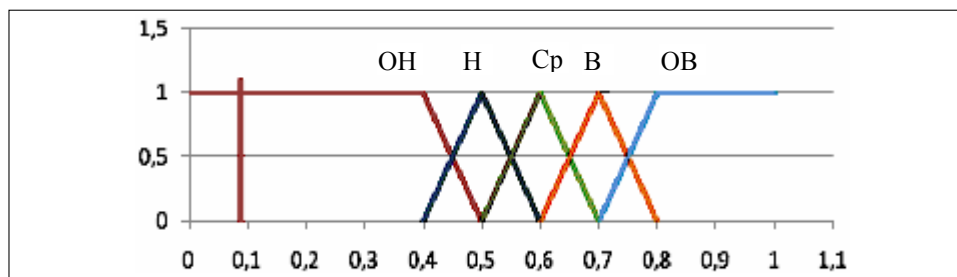


Рис. 1. Функция принадлежности  $\mu_1$  параметра  $X_1$

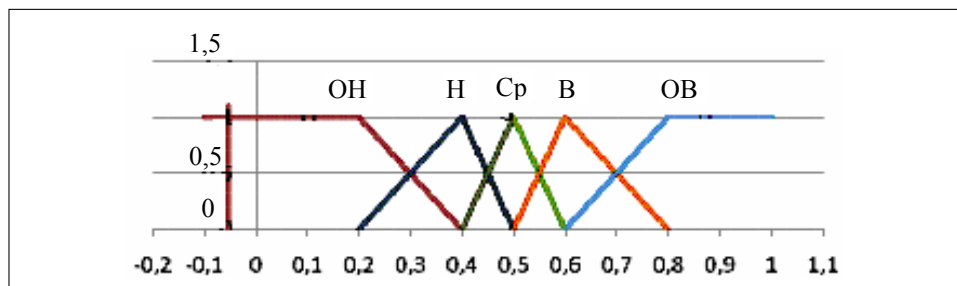


Рис. 2. Функция принадлежности  $\mu_2$  параметра  $X_2$

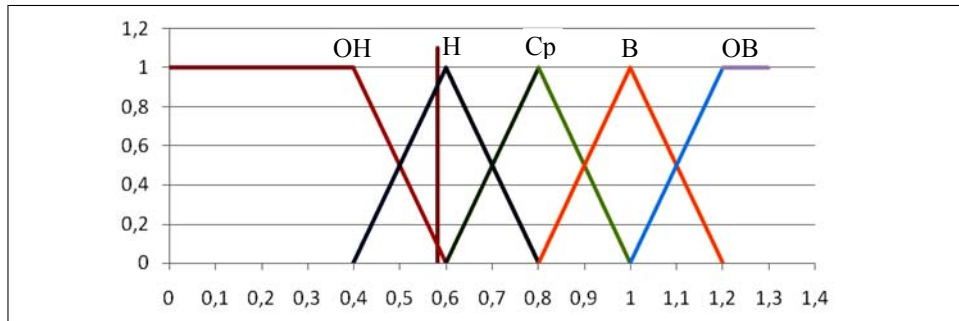


Рис. 3. Функция принадлежности  $\mu_3$  параметра  $X_3$

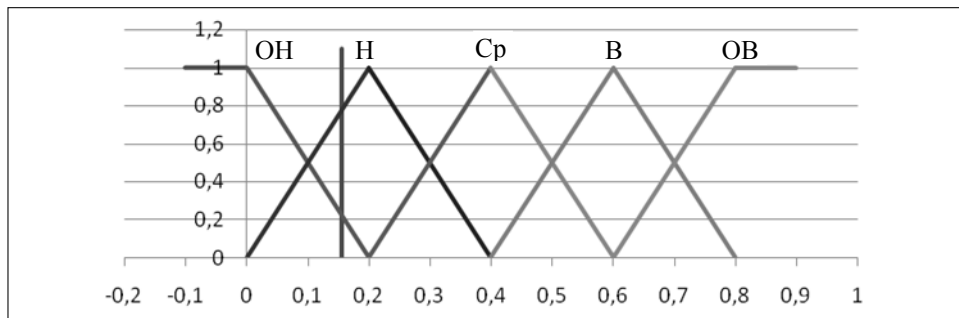


Рис. 4. Функция принадлежности  $\mu_4$  параметра  $X_4$

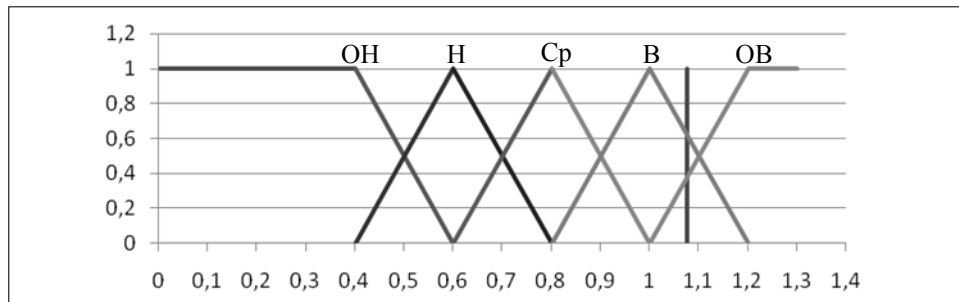


Рис. 5. Функция принадлежности  $\mu_5$  параметра  $X_5$

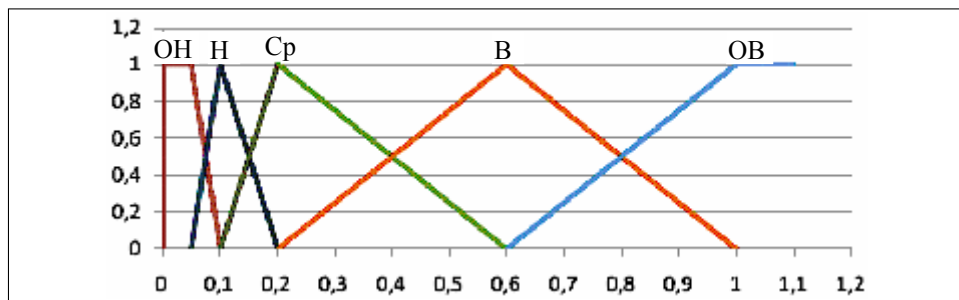


Рис. 6. Функция принадлежности  $\mu_6$  параметра  $X_6$

**Этап 5.** Логический вывод. Находим уровни «отсечения» для предпосылки каждого из правил с использованием операции *min*:

$$\alpha_1 = A_{11}(x_{10}) \wedge A_{21}(x_{20}) \wedge A_{31}(x_{30}) \wedge A_{41}(x_{40}) \wedge A_{51}(x_{50}) \wedge A_{61}(x_{60}),$$

$$\alpha_i = A_{1i}(x_{10}) \wedge A_{2i}(x_{20}) \wedge A_{3i}(x_{30}) \wedge A_{4i}(x_{40}) \wedge A_{5i}(x_{50}) \wedge A_{6i}(x_{60}).$$

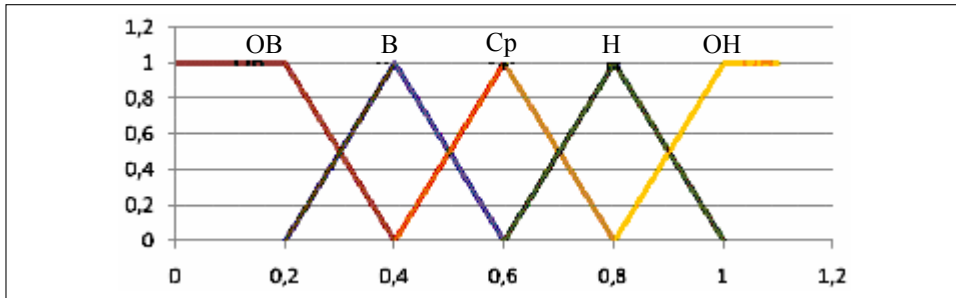


Рис. 7. Функция принадлежности уровней банкротства

А также находим «усеченные» функции принадлежности:

$$C'_i = (\alpha_i \wedge C_i(y)); \quad C'_i = (\alpha_i \wedge C_i(y)).$$

Для большей наглядности покажем это на рис. 8–10.

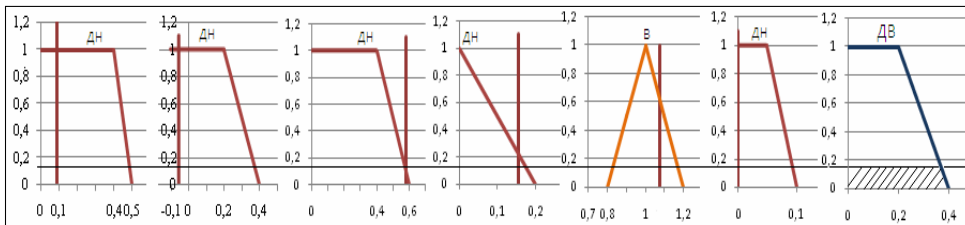


Рис. 8. Первое правило

Согласно нашим правилам мы проводим ранжирование для каждого входного значения таким образом:  $X_i : 5 + 5 + 5 + 5 + 2 + 5 = 27$  — **OB**.

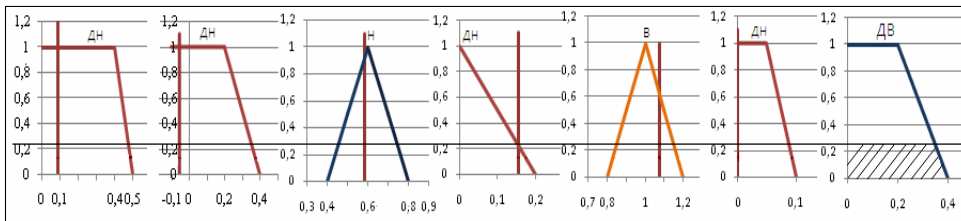


Рис. 9. Второе правило

Второе правило (рис. 9) выглядит так:  $5 + 5 + 4 + 5 + 2 + 5 = 26$  — **OB**.  
Остальные 6 правил строим аналогичным образом.

Восьмое правило (рис. 10) выглядит так:  $5 + 5 + 4 + 4 + 1 + 5 = 24$  — **B**.

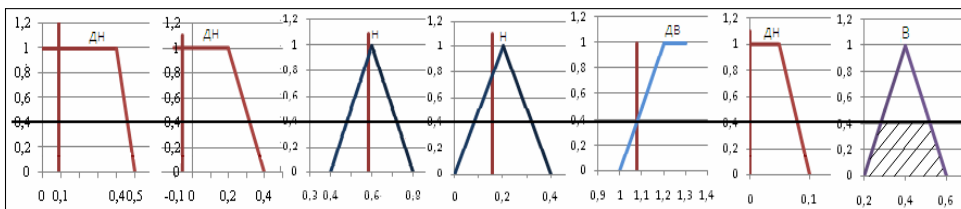


Рис. 10. Восьмое правило

**Этап 6. Композиция.** Проводится объединение найденных усеченных функций с использованием операции *max*, что приводит к получению ко-

нечеткого нечеткого подмножества для выходной переменной с функцией принадлежности  $\mu(z)$ . Для наглядности покажем это на рис. 11.

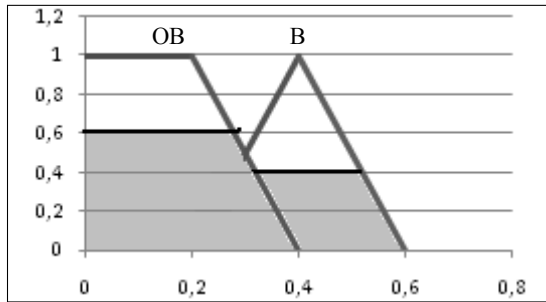


Рис. 11. Вывод правил за 2009 г.

**Этап 7.** Приведение к четкости (дефаззификация).

Приведение к четкости осуществляется центроидным методом [1, 2]:

$$y_0 = \frac{\int y \mu_{\Sigma}(y) dy}{\int \mu_{\Sigma}(y) dy}.$$

Для энергоснабжающей компании, которая реально существует и функционирует в Украине, значения  $Z_0$  за 2009 г. равно  $Z_{0(2009)} = 0,347$ ,

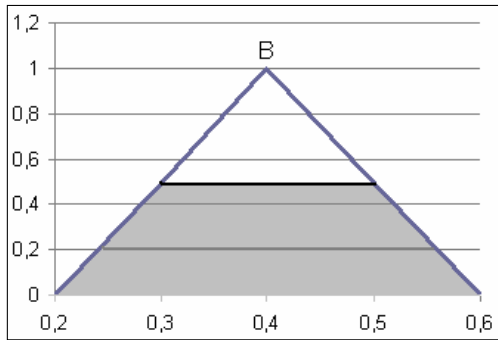


Рис. 12. Вывод правил за 2010 г.

что соответствует «очень высокому» или «высокому» уровню банкротства.

Определим уровень банкротства для энергоснабжающей компании, которая реально существует и функционирует в Украине за 2010 г. Выполняя аналогичные этапы, мы получим следующий итоговый выход правил после композиции приведенной на рис. 12.

Итак, мы получили  $Z_{0(2010)} = 0,4$ , что отвечает «высокому» уровню банкротства.

Далее осуществляем анализ риска банкротства предприятий, используя алгоритм нечеткого вывода Цукamoto. Алгоритм во многом похож на метод Мамдани, отличия заключаются лишь на этапе определения выходов правил: здесь выход каждого правила определяется путем решения уравнения [2]:

$$\alpha_i = C_i(y_i).$$

Также определяем четкие значения ( $y_i$ ) для каждого исходного правила.

Композицию выходов правил осуществляем центроидным методом согласно формулы (3).

Для предприятия энергоснабжающей компании, которая реально существует и функционирует в Украине, значения  $Z_0$  за 2009 г. равен:

$$Z_{0(2009)} = 0,374,$$

что соответствует «очень высокому» или «высокому» уровню банкротства.

Определим уровень банкротства для рассматриваемой компании за 2010 г. Выполним все этапы нечеткого логического вывода по алгоритму

Цукамото, получим  $Z_{0(2010)} \approx 0,2896$ , что соответствует «очень высокому» или «высокому» уровню банкротства.

Итак, с помощью подходов Мамдани и Цукамото было определено, что предприятие находится на грани неопределенности между «очень высоким» и «высоким» уровнями риска банкротства. С помощью подхода Мамдани также можно анализировать изменения в состоянии предприятия.

### СРАВНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ АНАЛИЗЕ ФИНАНСОВОГО СОСТОЯНИЯ ДЕЙСТВУЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ ПОДХОДОВ АЛЬТМАНА, НЕДОСЕКИНА, МАМДАНИ, ЦУКАМОТО

Проведем оценку и анализ состояния предприятий на основе финансовых показателей за два года и за год до банкротства с помощью подходов Мамдани и Цукамото. Анализ предприятия будем проводить с помощью разработанной программы, которая реализует все четыре метода диагностики состояний предприятий.

Всего было исследовано те же 52 предприятия, что и в предыдущих экспериментах с использованием классического метода Альтмана и нечетко-множественного метода Недосекина, результаты которых изложены в части 1 данной работы [7]. Среди этих предприятий 26 были признаны банкротами официально и обращение их акций было аннулировано на рынке ценных бумаг. Остальные 26 предприятий официально считаются работоспособными на сегодняшний день.

Проведем анализ финансового состояния этих же двух групп предприятий [7] помощью подхода Мамдани. В результате анализа предприятий-банкротов за два года до дефолта среди 26 исследуемых предприятий было выявлено 22 предприятия с «очень высоким», «высоким» или «средним» уровнями риска банкротства, 4 предприятия имеют статус предприятий с «низким» и «очень низким» уровнем риска банкротства. За год до дефолта было определено 25 предприятий с «очень высоким», «высоким» или «средним» уровнями риска банкротства и одно предприятие с «низким» или «очень низким» уровнем риска банкротства (табл. 1).

**Таблица 1.** Результаты прогноза по модели Мамдани предприятий-банкротов

Группа	Количество компаний	Прогноз, %	
		Банкроты	Не банкроты
За два года до банкротства	26	85 (22)	15 (4)
За год до банкротства	26	96 (25)	4 (1)
Среднее значение за два года	26	90	10

Для второй группы предприятий — «работоспособные», были получены следующие результаты, проанализированные с помощью метода Мамдани. За 2009 отчетный год, 23 предприятия признаны как предприятия



с «очень низким», «низким» или «средним» уровнями риска банкротства, 3 предприятия получили статус «высокий» или «очень высокий» уровень риска банкротства. За 2010 г. состояние некоторых предприятий ухудшилось, они перешли на ступень ниже, но общая картина осталась той же: 23 предприятия — «очень низкий», «низкий» или «средний» уровень риска банкротства, 3 предприятия — «высокий» или «очень высокий» уровень риска банкротства (табл. 2).

**Таблица 2.** Результаты прогноза по модели Мамдани предприятий-небанкротов

Группа	Количество компаний	Прогноз, %	
		Банкроты	Не банкроты
За два года до банкротства	26	12 (3)	88 (23)
За год до банкротства	26	12 (3)	88 (23)
Среднее значение за два года	26	12	88

Проведя анализ финансового состояния тех же предприятий методом Цукамото, были получены следующие результаты (табл. 3–5).

**Таблица 3.** Результаты прогноза по модели Цукамото предприятий-банкротов

Группа	Количество компаний	Прогноз, %	
		Банкроты	Не банкроты
За два года до банкротства	26	22 (85)	4 (15)
За год до банкротства	26	24 (92)	2 (8)
Среднее значение за два года	26	88	12

**Таблица 4.** Результаты прогноза по модели Цукамото предприятий-небанкротов

Группа	Количество компаний	Прогноз, %	
		Банкроты	Не банкроты
За два года до банкротства	26	12 (3)	88 (23)
За год до банкротства	26	15 (4)	85 (22)
Среднее значение за два года	26	13	87

**Таблица 5.** Усредненные показатели точности прогноза о состоянии предприятий по модели Цукамото

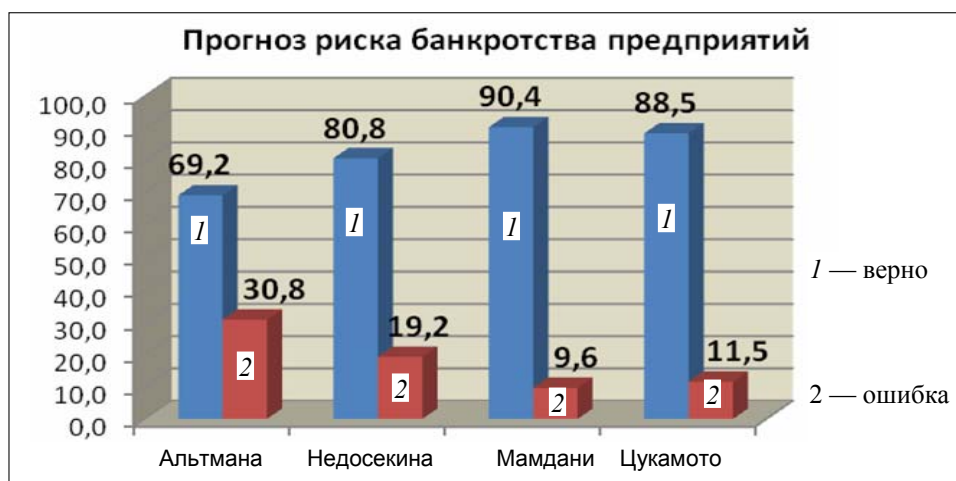
Группа	Количество компаний	Прогноз, %	
		Верно	Ошибка
За два года до банкротства	52	87	13
За один год до банкротства	52	88	12
Среднее значение за два года	52	87	13

Как видно из приведенных выше таблиц, подход Цукамото также дает возможность проанализировать состояние предприятия на любой стадии и с достаточно высоким процентом вероятности выявить критическое состояние предприятия на начальной стадии.

Обобщим полученные результаты для предприятий-банкротов, с помощью подходов Альтмана, Недосекина, Мамдани, Цукамото (табл. 6 и рис. 13).

**Таблица 6.** Результаты прогнозов по Альтману, Недосекину, Мамдани, Цукамото о состоянии предприятий-банкротов

Подход	Количество компаний	Прогноз, %	
		Правильный	Не правильный
Альтмана	26	69,2	30,8
Недосекина		80,8	19,2
Мамдани		90,4	9,6
Цукамото		88,5	11,5



**Рис. 13.** Результаты прогнозирования риска банкротства предприятий-банкротов различными методами

Обобщим полученные результаты для всех исследуемых предприятий, с помощью подходов Альтмана, Недосекина, Мамдани, Цукамото (табл. 7 и рис. 14).

**Таблица 7.** Результаты прогнозов по Альтману, Недосекину, Мамдани, Цукамото о состоянии исследуемых предприятий

Подход	Количество компаний	Прогноз, %	
		Правильный	Не правильный
Альтмана	52	73	27
Недосекина		80	20
Мамдани		89,4	10,6
Цукамото		88	13

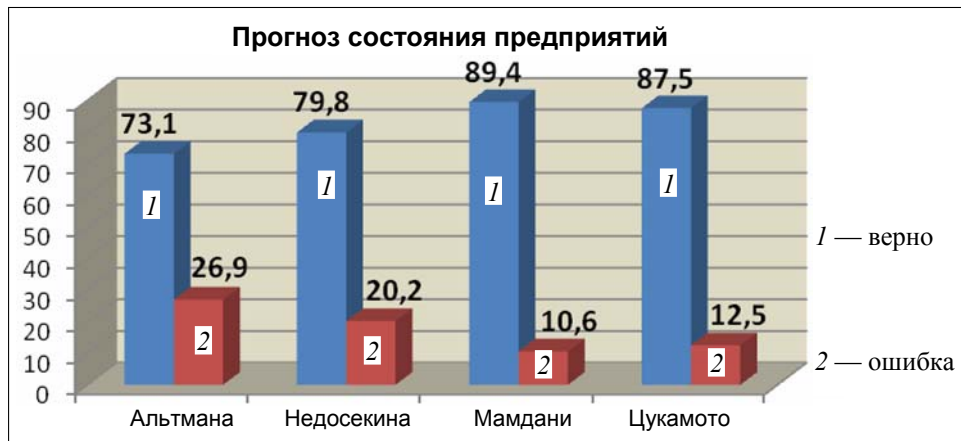


Рис. 14. Анализ прогнозирования состояния предприятий различными методами

Как видим, в нашем исследовании метод Альтмана правильно спрогнозировал состояние предприятий в среднем на 69 %, метод Недосекина этот прогноз совершил верно в среднем на 81 %, подходы Мамдани и Цукамото дали примерно одинаковые результаты — прогноз был осуществлен на 90 % правильно. Ошибки в прогнозировании состояния предприятий были связаны с тем, что прогноз основан на рассматриваемых подходах и не всегда соответствует официальным данным в силу нескольких причин. Во-первых, мы не учитываем еще определенные социальные заинтересованности общества или определенных лиц в ликвидации трудоспособного предприятия (ложное банкротство). Во-вторых, не учитываем заинтересованность в поддержании существования обанкротившихся предприятий. Но можно уверенно сказать, что нечетко-множественный метод Недосекина, а также нечеткие нейронные сети Мамдани и Цукамото позволяют изучить тенденции развития предприятий, и выявить угрозу банкротства предприятия уже на ранней стадии.

## ВЫВОДЫ

В работе были изложены методы анализа и прогнозирования риска банкротства: классический метод Альтмана, нечетко-множественный метод Недосекина и разработанные авторами методы на основе применения ННС с выводом Мамдани и Цукамото.

Сравнительный анализ различных методов оценки риска банкротства был проведен с помощью разработанного программного продукта, на языке программирования C++. Используя разработанный программный комплекс, было проведено прогнозирование банкротства для 52 предприятий Украины. Среди них 26 предприятий были потенциальными банкротами, а 26 предприятий — платежеспособными, т.е. уровень банкротства является «низким», «очень низким», «средним». Среди 26 предприятий потенциальных банкротов 24 предприятия на 1 февраля 2011 г. были признаны банкротами по решению суда или согласно решению о прекращении эмитента путем ликвидации по решению высшего органа. Среди 26 платежеспособных

предприятий со «средним» уровнем риска банкротства было признано банкротами четыре, а шесть предприятий были реорганизованы в общества с дополнительной ответственностью или общества с ограниченной ответственностью.

Заметим, что по результатам сравнительного анализа наиболее высокую точность прогноза банкротства предприятий показали ННС с выводом Мамдани (90 %) и Цукамото (88 %), далее следует нечетко-множественный метод Недосекина (80 %) и наконец, наихудшие показатели точности прогноза имеет классический метод дискриминантного анализа Альтмана (73 %).

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Altman E.I.* Corporate Financial Distress. — NY: John Wiley, 1983. — 205 p.
2. *Altman E.I.* Financial Ratios, Discriminant Analysis and the prediction of Corporate Bankruptcy // *Journal of Finance*, September. — 1968. — P. 589–609.
3. *Давыдова Г.В., Беликов А.Ю.* Методика количественной оценки риска банкротства предприятий // *Управление риском*. — 1999. — № 3. — С. 13–20.
4. *Недосекин А.О., Максимов О.Б., Павлов Г.С.* Анализ риска банкротства предприятия. Метод. указания по курсу «Антикризисное управление». — [http://sedok.narod.ru/sc\\_group.htm](http://sedok.narod.ru/sc_group.htm).
5. *Згуровский М.З., Зайченко Ю.П.* Модели и методы принятия решений в нечетких условиях. — К.: Наук. думка, 2011. — 275 с.
6. *Зайченко Ю.П.* Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах. — К.: Издат. дом «Слово», 2008. — 344 с.
7. *Згуровский М.З., Зайченко Ю.П.* Комплексный анализ риска банкротства корпораций в условиях неопределенности. Часть 1 // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2012. — № 1. — С. 113–128.

Поступила 29.06.2011

## ПОБУДОВА СЦЕНАРІЇВ РОЗВИТКУ СВІТОВОЇ ЕКОНОМІКИ ДО 2030 р. У КОНТЕКСТІ ВЕЛИКИХ ЕКОНОМІЧНИХ ЦИКЛІВ КОНДРАТЬЄВА

**Я.І. КОЛОГРИВОВ**

Для пошуку та виявлення науково-технологічних напрямів, що складуть основу 6-го технологічного укладу, застосовано методологію передбачення (foresight) та її інструментарій. Досліджується потенціал розвитку світової економіки в мінливих економічних, соціальних, політичних та екологічних умовах. Виявлено пріоритетні науково-технологічні (S&T) напрями та побудовано декілька варіантів сценаріїв розвитку світової економіки на період до 2030 р.

### ВСТУП

Видатний російський вчений М.Д. Кондратьєв у 20-х рр. ХХ ст. висунув припущення про існування «великих економічних циклів» у ринкових економіках капіталістичних країн. Працюючи на кафедрі політичної економії та статистики, він спочатку помітив, а потім довів існування «великих циклів кон'юнктури» (саме таку назву використовував учений). М.Д. Кондратьєв проаналізував динаміку розвитку економік капіталістичних країн Західної Європи, починаючи з кінця ХVІІІ ст., і помітив, що цей розвиток є циклічним, і що кожні 40–60 р. цикл змінюється наступним, супроводжуючись зміною технологічного укладу [1].

У результаті дослідження Кондратьєв виокремив такі великі цикли (виділено напівжирним шрифтом) (таблиця):

**Таблиця.** Великі економічні цикли, виявлені М.Д. Кондратьєвим та наступні, що йшли за ними

№	Позначення	Тривалість К-циклу	Тривалість висхідної хвилі	Тривалість спадної хвилі
1	<b>К1</b>	1779–1844/51	1779–1810/17	1810/17–1844/51
2	<b>К2</b>	1844/51–1890/96	1844/51–1870/75	1870/75–1890/96
3	<b>К3</b>	1890/96–1936/40	1890/96–1914/20	1914/20–1936/40
4	К4	1936/40–1980/85	1936/40–1966/71	1966/71–1980/85
5	К5	1980/85–2020/25	1980/85–2003/09	2003/09–2020/25*

У таблиці зірочкою (\*) позначено прогноз.

Наступним кроком ученого був прогноз щодо спадної хвилі 3-го К-циклу. І, висловлюючи ще в 1922 р. думку про існування «великих циклів кон'юнктури», М.Д. Кондратьєв статистичними дослідженнями виявив, що перехід від висхідної до низхідної фази великого циклу буде мати місце на межі 20–30-х рр., передбачивши тим самим Велику світову депресію 1929–1933 рр., що вразила економіку США, країни Західної Європи та Північної Америки, від якої постраждали всі капіталістичні країни світу [2].

Наступна криза 70-х р. на спадній хвилі четвертого К-циклу характеризувалася девальвацією долара США 1971 р. і нафтовою кризою 1973–1975 рр. Цей період отримав назву стагфляції [3].

Сьогодні ми є свідками нової кризи на спадній хвилі п'ятого К-циклу, і знову збіг із прогнозами М.Д. Кондратьєва є незаперечним.

Для того, щоб зрозуміти, як вийти з кризи з найменшими втратами, необхідно виявити причини кризи, а також проаналізувати, використовуючи досвід попередніх циклів, причини підйомів економік після надзвичайно глибоких криз.

За Кондратьєвим, виникнення великих, середніх та коротких циклів економічної динаміки є внутрішньою закономірністю економічної динаміки, іманентно властивою економіці як системі. Причиною існування великих циклів є довгий цикл часу будівництва та дієздатності засобів виробництва, довгого використання та віддачі вкладених інвестицій — фабрики, заводи, порти, канали, тунелі, гідроелектростанції, залізниці, дороги тощо. Їхнє будівництво та функціонування мають життєвий цикл тривалістю в 40–60 р. Саме ця обставина і є причиною виникнення великих циклів економічної кон'юнктури. Границею цих циклів слугують межі вичерпання дієздатності старих капітальних благ та початок будівництва та функціонування нових засобів виробництва, які здатні діяти на принципово новій техніко-технологічній та організаційно-структурній основі, створюючи принципово нові блага довгого використання [4]. Тобто, у період кризи суспільство, розуміючи завершення життєвого циклу певного технологічного укладу, починає шукати нові перспективні науково-технологічні (S&T) напрями, нові рішення (solutions), і саме впровадження останніх виводить економіку з кризи, створюючи основу нового технологічного укладу.

Так, велике машинобудування, високотехнологічне будівництво, промислова енергетика, а також цивільна та військова авіація були причиною виходу економік країн із великої депресії. Наступна системна криза 1971–1975 рр. підштовхнула до розвитку п'ятого технологічного укладу — мікроелектроніку, комп'ютерну техніку, Інтернет, мобільний зв'язок [5]. Вже остаточно зрозуміло, що технологічний уклад п'ятого К-циклу вичерпано і жоден вплив величезних потоків грошей, що використовують сьогодні уряди країн, не в змозі вирішити проблему. Ці дії лише відстрочать і поглиблюють неминучий крах застарілого технологічного укладу [3].

## МЕТОДОЛОГІЯ ПЕРЕДБАЧЕННЯ ТА ЇЇ ІНСТРУМЕНТАРІЇ

Для пошуку та виявлення науково-технологічних напрямів, що складуть основу 6-го технологічного укладу, пропонується звернутися до методології передбачення (foresight) та її інструментаріїв.

Мета передбачення полягає в тому, щоб дослідити потенціал розвитку світової економіки в мінливих економічних, соціальних, політичних та екологічних умовах, виявити пріоритетні науково-технологічні напрями, що складуть основу 6-го технологічного укладу та побудувати декілька варіантів сценаріїв розвитку світової економіки на період до 2030 р. [6].

За визначенням Міжнародної ради наукових спілок (ICSU), передбачення — це інструмент стратегічного планування, який все частіше використовується урядами, організаціями, компаніями, щоб побачити й усвідомити

своє місце, свою роль у невизначеному майбутньому [7]. Визначення критичних науково-технологічних напрямів нового технологічного укладу є надзвичайно важливим процесом, оскільки результати такої діяльності призводять до розуміння, в якому напрямку необхідно рухатись. Уряд або бізнес, спираючись на результати передбачення, зосереджують свої ресурси на найперспективніших наукових течіях, що, у свою чергу, призводить до технологічного стрибка відносно інших країн або компаній [8]. Виходячи з цього, є очевидним, що важливість виявлення критичних науково-технологічних напрямів важко переоцінити.

Передбачення звичайно більш далекоюсяжне, ніж звичайне планування, але його результати не мають бути абстрактними, тому період, який необхідно обрати, не має бути занадто відтермінованим, ідеальним є 20-річний період, який також можна розбити на декілька циклів планування.

У більшості передбачень 90-х рр. основною метою було виявлення пріоритетів. Сполучені Штати Америки були піонерами в цьому, так у 1990 р. Конгрес США виділив перелік критичних технологій на 10-річний період. Подібні дослідження проводилися і в інших країнах, таких як Франція, Нідерланди, Чехія, Росія та ін., хоча іноді назва цих досліджень відрізнялася (наприклад, виявлення ключових технологій).

Найбільших результатів у передбаченні, на той час, досягли спеціалісти з Німеччини та Великої Британії, які перебували під сильним впливом серії п'ятирічних S&T-передбачень, реалізованих японським урядом починаючи з початку 70-х рр. [10]. Ці роботи були об'ємнішими і ґрунтовнішими за своїм масштабом та обсягом у порівнянні з роботами щодо виявлення критичних технологій і, варто зазначити, часто менш конкретними у визначенні списків науково-технологічних напрямів як пріоритетних областей. Дійсно, те що відрізняє перші роботи від наступних, які далі проводилися — це зацікавленість, що існувала в «процесі» передбачення, тобто, у його здатності до активізації процесу створення мереж, формування бачення для прийняття рішень урядами тощо, так само як і в «продукті» передбачення, а саме — у переліку пріоритетних галузей науково-технологічних напрямів [11]. Це, звичайно, призвело до зміщення акценту від визначення жорстких списків критичних технологій на зосередження уваги на гнучкіших аспектах передбачення.

Зміщення акценту було зумовлено все більшим усвідомленням того, що причиною «збоїв» була відсутність контакту між важливими суб'єктами в слабкорозвинених каналах потоків інформації, а також відсутність керівного бачення, яке могло зменшити невизначеність і заохотити більш тісне співробітництво. Крім того, вплив списків пріоритетів на процес прийняття рішень був вельми неоднозначним і уряди швидко виявили розрив між проектами та можливістю їх реалізації. Очевидно, що ця обставина потребувала вирішення. Причини цих розривів були різноманітними, сюди належить слабкий або навіть зовсім відсутній зв'язок у процесі розвитку пріоритетних напрямів. Можливо, короткий перелік національних пріоритетів, що охоплював надзвичайно широку площину різносторонніх питань, не підпадав під програми, що фінансувалися, оскільки останні були деталізовані та відповідали конкретним стратегічним напрямам. Природним наслідком цього стало усвідомлення того, що роботи з впровадження науково-технічних напрямів часто краще здійснювати на більш низьких рівнях і переважно в конкретних їх галузях, де вони можуть дійсно впроваджуватись, а не на національному цілісному рівні, де вони можуть лише декларуватись і не виконуватись [7].

Таким чином, починаючи з 2000 р., багато національних планів із передбачення (foresight plans) відійшли від зосередження уваги на визначенні конкретних пріоритетів у бік розробки спільного бачення, створення коаліцій з суб'єктів для здійснення прогресивних змін і відображення декількох сценаріїв майбутнього, які підкреслюють невизначеність подальшого розвитку подій і підтверджують необхідність стратегічної гнучкості [13]. Це зрушення у фокусі передбачення супроводжувалося зміною методологічних підходів, що використовувались, раніше вони були тісно пов'язані з методами прогнозування та науками про прийняття рішення, наприклад із методом Делфі. Більшість із цих підходів полягала в отриманні консенсусного бачення майбутнього [14]. Але, починаючи з 2000 р., популярнішими стають інші підходи, особливо в сценаріях, які роблять більший акцент на кратності можливих варіантів розвитку подій і необхідності суб'єктам (акторам) та системам розвивати навички для управління майбутньою невизначеністю [7].

Наступним кроком передбачення є побудова сценаріїв на основі науково-технологічних напрямів.

Сценарії є правдоподібними образами майбутнього, які, як правило, супроводжуються «історією майбутнього», яка відображає шлях із сьогодення в майбутнє (такі сценарії часто називають «дослідницькими» або «екстраполяційними»), або у зворотному напрямку, тобто від майбутнього до сьогодення (часто згадуються як «нормативні» сценарії) [15]. У будь-якому передбаченні розробляється кілька контрастних сценаріїв, як правило, з певним простором для можливих видозмін. Кількість сценаріїв, що розробляється в різних передбаченнях, є різною, але типовою є кількість від 3-ьох до 5-ти. Сценарії, як правило, помітно відрізняються один від одного, іноді пропонуючи досить радикальні (хоча й правдоподібні) погляди на майбутнє. Хороші сценарії часто містять кількісні та якісні елементи [7].

Є багато способів розробки сценаріїв, але, можливо, найпопулярнішим є «архетипний» і «матричний» підходи. У першому, різні світогляди (або системи цінностей) можуть бути використані для розробки нормативних контрастних сценаріїв, наприклад, «Зелене майбутнє». Або теперішнє може бути по-різному екстрапольовано в майбутнє, на основі різних припущень про форму та/або напрямок рушійної сили (драйвера), що продукує зміни [16]. На відміну від цього, у матричному підході зазвичай обираються дві важливі, але невизначені рушійні сили, що продукують зміни. Наступним кроком є визначення екстремальних значень для кожної з цих рушійних сил. Наприклад, візьмемо невизначену рушійну силу «економічне зростання», одним екстремумом якої можуть бути «низькі темпи зростання», іншим — «високі темпи зростання». Осі цих рушійних сил наносяться на графік один навпроти одного, щоб створити простори сценаріїв (для двох рушійних сил створюється матриця розмірністю 2 на 2, тобто чотири сценарні простори) [17].

Важко виділити, який з підходів є кращим, вони обидва є досить популярними. Структурований характер матричного підходу зрозуміліший для користувача. У ньому чітко зрозуміло, як були отримані сценарні простори. Однак, ця матриця може бути також надто обмеженою з погляду масштабу і може не найкращим чином підходити для відображення майбутнього «можливого простору». Архетипний підхід, навпаки, надає сценаристам більшої свободи.



Для кращих результатів важливо, щоб у розробці сценаріїв брали участь зацікавлені сторони/особи. І не тільки як консультанти, а завдяки залучення їх безпосередньо до участі в підготовці сценаріїв, часто шляхом проведення семінарів. Важливого значення необхідно приділити якості даних, у протилежному випадку, до сценаріїв, що розроблені без належної підтримки якості даних, може бути відсутня довіра через неточності, нерозуміння тощо [18]. Це вимагає перегляду відповідної літератури, у тому числі наявних досліджень з передбачення і, можливо, використання опитувань та інтерв'ю для того, щоб заповнити прогалини. Сценарії також мають бути заохочувальними, якщо вони хочуть бути корисними. Цього можна досягнути як через зміст (наприклад, аналіз і синтез), так і через уявлення (розповідь, графічне представлення тощо).

Важливим є бачення і розуміння, як сценарії будуть використовуватись. У великій кількості робіт із передбачення не приділено достатньої уваги цьому питанню, а приділено непропорційно більше часу та зусиль підготовки. Ергономічність сценаріїв є надзвичайно важливою, оскільки зручний у практичному користуванні сценарій буде зрозумілий користувачам, що збільшить кількість його використання. Деякі розробники сценаріїв стверджують, що розуміння, як використовуватиметься розроблений сценарій не є їх прерогативою, і кінцевий користувач самостійно має визначити як його використовувати. Інші ж дотримуються конструктивнішої точки зору, розробляючи основні принципи щодо того, як сценарії можуть бути використані. Очевидно, що найкращим підходом є включення в розробку передбачення фази його практичного використання. Хоча, звичайно, різні групи користувачів будуть використовувати сценарії в той спосіб, який вважатимуть за потрібний. Чим більше сценаріїв буде використано, тим краще (за умови, що вони придатні для використання). Необхідно розробити процес стратегічного планування таким чином, щоб бути впевненими, що використання цих сценаріїв буде зрозумілим, конкретним та ефективним. Для цього розіб'ємо процес планування на декілька кроків, про які йтиметься далі.

Хоча існує багато різних методологічних варіантів розробки сценаріїв, є кілька спільних кроків, які, у цілому, необхідні більшості з них. Перший з них передбачає узгодження цілей, необхідність визначення меж сценаріїв, а також важливим є доступ до всіх ресурсів, що можуть бути використаними в роботі [19].

Загалом, процес має бути ефективним і творчим, із наявністю всіх необхідних ресурсів. Він включає в себе максимальне використання можливостей для проведення консультацій, маючи чітке розуміння, яка інформація потрібна і від кого, а також наявність чіткої стратегії комунікацій. Широка участь експертів має вирішальне значення [7].

Цей процес, за визначенням Міжнародної ради наукових спілок (ICSU), складається з чотирьох консультативних етапів.

## **РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕДБАЧЕННЯ РОЗВИТКУ СВІТОВОЇ ЕКОНОМІКИ «СТРАТЕГІЧНИЙ ПЛАН 2011–2030 рр.»**

На першому етапі відбувається збір від провідних авторитетних національних та міжнародних організацій, учених та інших зацікавлених сторін інформації щодо ключових рушійних сил, які впливатимуть на розвиток світової економіки наступні 20 р.

На другому етапі будуються «пробні» сценарії з використанням ключових рушійних сил і проводяться консультації з тим же колом учасників, що брали участь у попередньому етапі. Після чого початкові ідеї з перших двох етапів стануть основою для формування проекту «Стратегічний план 2011–2030 рр.».

На третьому етапі відбувається розробка «бажаних» сценаріїв довгострокового бачення. Завершення розробки проекту стратегічного плану.

На четвертому етапі проводяться широкі консультації щодо проекту «бажаного» сценарію відповідно до його наслідків, включаючи думки щодо регіональних відмінностей.

Тепер детальніше розглянемо наведені вище етапи передбачення.

#### **Перший етап.**

*Основні дії.* Під час першого етапу необхідно зібрати від провідних авторитетних національних та міжнародних організацій, учених та інших зацікавлених сторін інформацію щодо ключових рушійних сил, які впливатимуть на світову економіку наступні 20 р.

*Деталі.* Цей початковий етап буде розбитий на такі кроки:

**Крок 1.** Етап планування. Визначення цілей, масштабів та ресурсів.

Ключові зацікавлені сторони мають узгодити та обґрунтувати проведення передбачення і внести ідеї, а також принципи зворотного зв'язку, що сформує підхід, який буде застосовуватись під час проведення передбачення. Також необхідно визначити, які ресурси будуть виділятися для проведення передбачення, зокрема час, фінансування та безпосередня участь. У результаті отримуємо гнучкий план для проведення роботи.

**Крок 2.** Збір інформації про ймовірні майбутні події в галузях, що досліджуються.

З урахуванням фокусу сценаріїв, а саме, майбутнього світової економіки, підготовча (вхідна) інформація має бути зібрана про динаміку розвитку науки, технологій та динаміки міжнародного співробітництва. Крім того, оскільки ці галузі певною мірою залежать від загальніших подій (які можна назвати «соціальними мега-трендами»), деяке уявлення про них також буде потрібне [20]. Оскільки для проведення передбачення є необхідним збір підготовчої інформації надзвичайно широкого спектру, важливо встановити певні обмеження на початкових стадіях, оскільки цей процес дуже швидко може стати некерованим. Найефективнішим способом забезпечення керуваності, є обмежена кількість джерел інформації про соціальні мега-тренди, на відміну від підготовчої інформації про динаміку розвитку науки, технологій та динаміку міжнародного співробітництва. Інформацію про мега-тренди можна легко отримати з декількох джерел. Крім того, інші перспективні роботи щодо динаміки розвитку науки, технологій та динаміки міжнародного співробітництва будуть спрямовані на доповнення наявних знань у цих галузях.

Для підтримки цієї роботи використовуються різні методологічні підходи, включаючи поєднання кабінетних досліджень та експертних консультацій.

**Крок 3.** Формулювання ключових рушійних сил, а також виявлення важливих суб'єктів (акторів) та факторів.

На основі зібраної інформації може бути підготовлено проект переліку основних рушійних сил, які впливатимуть на розвиток світової економіки наступні 20 р. Спочатку така підготовка проводиться на робочих місцях. Проект переліку драйверів після цього поширюється серед експертів та інших зацікавлених осіб для коментарів та пропозицій [21]. У межах цього підходу кожен проект рушійної сили необхідно коротко описати (лише декілька рядків), щоб експерти могли прокоментувати своє бачення про кожен з рушійних сил або додати до списку нову рушійну силу. Одночасно, експертам необхідно запропонувати внести пропозиції щодо нових джерел інформації, щоб підтримати аналіз рушійних сил (таким чином разом складаються елементи другого та третього кроків).

Кількість рушійних сил потенційно дуже велика, тому проводиться певна кластеризація та ліквідація для отримання керованої кількості рушійних сил. На основі визначених основних рушійних сил необхідно визначити відповідні суб'єкти та фактори, які впливають на їх поведінку, оскільки деякі з них необхідно буде використовувати в сценаріях, які створюватимуться на наступних етапах. Ці суб'єкти і фактори можуть відрізнитися в різних регіонах, тому регіональний аспект може бути введеним тут вперше. Результатом цього кроку буде низка рушійних сил, які будуть використані як будівельні блоки на наступних кроках, разом з картою відповідних суб'єктів і факторів.

**Крок 4.** Аналіз (наприклад, шляхом прогнозування та моделювання) ключових рушійних сил із метою оцінки їх можливих напрямків та наслідків, а також виявлення їх взаємозалежності.

Після узгодження переліку зібраних ключових рушійних сил, необхідно, для кращого розуміння, проаналізувати їх динаміку та наслідки. На цьому кроці необхідно виділити найкраще припущення: в якому напрямку кожна рушійна сила може рухатись, які наслідки це спричинить для інших рушійних сил і, врешті-решт, як це вплине на фактори та суб'єкти, які формують світову економіку. На цьому етапі можна використати складні інструменти прогнозування та моделювання, хоча, в основному через брак часу та ресурсів, таке використання буде скоріше винятком, ніж правилом. Крім того, багато аспектів ключових рушійних сил важко піддаються кількісній оцінці, що ускладнює включення цих даних до кількісного прогнозування та моделювання. Реалістичніший підхід полягає у використанні, наскільки це можливо, інтуїції в інтерпретації даних наявних прогнозів і моделей. Це завдання краще виконувати в кабінетних умовах чи в невеликих групах, із можливістю перевірки, затвердження та зворотного зв'язку.

Навколо будь-якої кращої здогадки має бути певна невизначеність щодо ключових рушійних сил стосовно їх спрямованості, характеру розвитку та наслідків. Наведені вище невизначеності забезпечують нас точками, з яких можуть бути отримані альтернативні прогнози. Ці альтернативні прогнози мають важливе значення для процесу, оскільки метою розробки сценаріїв є надання уявлення про множинність можливих варіантів майбутнього. Знову ж таки, це завдання краще виконувати в кабінетних умовах чи в невеликих групах.

Слід зазначити, що багато прогнозів страждають від двох серйозних помилок, а саме, від переоцінки швидкості змін і нездатності визначити джерела основного розриву. Перед тим як робити прогнози на 20-річний період, корисним був би аналіз того, як змінився світ за останні 20 р., тобто

починаючи з 1990 р. Для цього необхідно відповісти на питання: що за цей період не зазнало змін і чому? І що докорінно змінилося, і в якій мірі ці зміни були передбачені в 1990 р.? Звичайно, картина останніх 20-ти рр. не може забезпечити нас прийнятними індикаторами для планування наступних 20 р. [22]. Проте такі вправи можуть бути досить показовими.

Головним результатом цього кроку буде розвиненіша дискусія щодо рушійних сил, а також декілька прогнозів (навколо кожної рушійної сили).

**Крок 5.** Створення віньєток (коротких сюжетних ліній), які з'єднують разом різні можливі події.

Аналіз, який проводиться на 4-му кроці, визначає деякі сильні взаємозалежності між кількома рушійними силами і виявляє, де є ймовірність сильних позитивних чи негативних реакцій (ця інформація може бути включена в мікрофішу опису драйверів). Суб'єкти та фактори також будуть пов'язані з рушійними силами та їхніми прогнозами. Завдання п'ятого кроку полягає в глибшій та ширшій розробці цих взаємозалежностей та зв'язків. Знову ж таки це краще зробити в кабінетних умовах, але також можна зробити в малих групах. Насправді взаємодія й обговорення є корисними стимуляторами для таких завдань, хоча, імовірно, слід обмежитися групою експертів, які мають глибоке розуміння того, що треба досягти. Це може бути дуже трудомістка задача, яка може генерувати багато тупикових припущень. Основною відчутною віддачею буде внутрішня доповідь, яка складатиметься з низки коротких історій (як правило 1–2 абзаци), яка об'єднає різні прогнози навколо різних рушійних сил.

**Крок 6.** Визначення контурів сценаріїв.

Розпочати створення сценаріїв можна з використання матричного підходу. Якщо виявиться, що цей підхід занадто обмежує розробників сценарію, необхідно перейти до використання архетипного (archetypal) підходу. У разі використання матричного підходу, необхідно обрати дві рушійні сили разом із двома (протилежними) прогнозами для кожної з них. Виконання цього завдання неминуче буде супроводжуватися великою кількістю спроб та помилок, тому краще за все виконувати його в кабінетних умовах або невеликою групою. Обрані рушійні сили не обов'язково мають бути найважливішими, але їх необхідно обрати таким чином, щоб були створені найцікавіші простори для майбутніх сценаріїв. Ці простори можуть бути заповнені віньєтками (адаптованими належним чином), що утворюються на 5-му кроці, для забезпечення будівельних блоків для сценаріїв.

Необхідно звернути увагу, що цей крок може передувати створенню віньєток (крок 5), якщо вибір двох відповідних рушійних сил для осей вже очевидний. Головним результатом цього кроку є з'єднання чотирьох сценарних просторів, які забезпечать можливість розробки правдоподібних, але контрастних зображень можливого розвитку світової економіки.

*Консультації.* Проведення консультацій із експертами є важливим етапом проведення передбачення. Для цього необхідно надіслати запити провідним авторитетним національним та міжнародним організаціям, ученим та іншим зацікавленим сторонам. Запити мають бути спрямовані на виявлення двох моментів: отримання пропозицій щодо ключових рушійних сил, а також джерел інформації про майбутні тенденції, які можуть стосуватися проекту. Кожному експерту необхідно надати резюме передбачення на 2–3 сторінках,

а також шаблон для подання пропозицій щодо рушійних сил. Шаблон має містити поля для введення опису рушійної сили, опису, чому вона є важливою, поля для оцінювання часової мінливості рушійної сили, а також її невизначеності [23]. Заповнений для прикладу шаблон виконуватиме роль орієнтира.

На першому етапі було б доречним використати підхід мозкового штурму для аналізу основних рушійних сил, що були виділені експертами [24].

Приклад можливих рушійних сил, що впливатимуть на міжнародну науку в найближчі 20 р.:

1. Соціальні мегатренди: демографічні зміни; обмеження ресурсів; соціальні потреби; технологічні досягнення; зрушення осі світової економіки; зміна переконань і систем цінностей; реакція людини на зміни клімату.

2. Динаміка науки: проблема орієнтації науки; зниження наукової автономії; комодитизація (взаємозамінність) науки; доступ до гарантовано якісних даних; зрушення в науці; складність наукових проблем; соціальне схвалення/етика.

3. Динаміка міжнародного співробітництва: баланс влади / гегемонії / багатосторонності тощо; важливість недержавних суб'єктів (акторів); взаємозалежність і глобалізація; тривалість і функціонування міжнародних організацій.

4. Прориви та збої: найбільші прориви (наприклад, у біомедицині, комунікації).

#### **Другий етап.**

*Основні дії.* Побудова «пробних» сценаріїв із використанням ключових рушійних сил у взаємозв'язку з невеликою групою експертів. Наступним кроком має бути проведення консультацій з тим же колом учасників, що брали участь у першому етапі щодо перспективності таких сценаріїв. Після чого початкові ідеї з перших двох етапів стануть основою для формування проекту «Стратегічний план 2011–2030 рр.».

#### *Деталі.*

**Крок 7.** Використання віньєток як будівельних блоків, пов'язаних між собою та чітко описаних для кожного з просторів сценаріїв.

Кожен «пробний» простір сценарію буде містити будівельні блоки для будовання історій, але майстерність (у тому числі, у використанні методу спроб та помилок) сценаристів у перетворенні сировини в привабливі історії буде мати вагоме значення [7]. По суті, історії мають бути наповненими персонажами, реквізитами, мати початок і кінець тощо. Очевидно, що це досить творчий процес, але за допомогою інструкцій та практики (існує декілька доступних путівників, які відкривають завісу створення історій) будь-хто може досягти прийнятної якості сценаріїв. Цей крок можливо виконати тільки в межах невеликих груп. Необхідним буде час для розроблення початкового проекту, для внутрішнього обговорення та роздумів, а також для підготовки остаточного проекту перед ширшою перевіркою. Головним результатом цього кроку буде безліч описових сценаріїв, які аналогічно побудовані для зручності порівняння.

**Крок 8.** Розробка придатних презентаційних форматів для сценаріїв, з урахуванням їх можливого використання.

Ключовою умовою успішного використання сценаріїв є приділення особливої уваги їх презентації. Для цього можуть бути використані різні

презентаційні формати — від звичайного текстового (короткі оповідання, перші сторінки газет та ін.) до графічного (комікси, фільми та ін.). Вибір презентації багато в чому залежить від очікувань груп користувачів, оскільки практично вони будуть використовувати сценарії. Сценарії мають бути помітними (важливим є використання відповідних назв для позначення сценаріїв), а також простими для порівняння між собою [25]. Останнє може бути досягнуто зведенням основних елементів сценаріїв до таблиць, забезпечуючи тим самим швидке виявлення їх розбіжностей.

#### **Крок 9.** Налаштування сценаріїв.

Велика кількість внутрішніх налаштувань матимуть місце в попередніх кроках (7 і 8), але важливо, що остаточну перевірку робить ширша група. Хоча цей крок може бути проведеним до того, як було витрачено занадто багато зусиль на презентацію, оскільки сприйняття потенційними користувачами формується в тій мірі за формою, як і за змістом. З цієї причини цей крок було зроблено після розробки відповідних презентаційних форматів (крок 8).

#### **Крок 10.** Тестування та використання сценаріїв.

Якщо сценарії готові на самому початку процесу, вони можуть бути використані для перевірки існуючих стратегій країни/галузі/організації. Це спричинило б проведення аналізу адекватності існуючої стратегії країни/галузі/організації. Ці оцінки можуть бути використані як відправна точка для роздумів про те, як існуючі стратегії можуть бути покращені [10]. Крім того, може бути вирішено, що один сценарій репрезентує більш бажане майбутнє і такі стратегії мають бути спрямовані на збільшення ймовірності їх реалізації. Через ретроспективні вправи визначається число кроків, які будуть виконувати роль орієнтирів на шляху до досягнення бажаного результату.

Увага має бути приділена, наскільки це можливо, демонстрації зовнішнього використання сценаріїв. Такі приклади можуть бути корисними для ширшого розповсюдження та застосування сценаріїв.

*Консультації.* Для початку необхідно побудувати «пробні» сценарії з будівельних блоків, що були сформовані на першому етапі. Після цього необхідно, щоб група з 6-ти експертів (приблизно) провела консультації з метою поліпшення сценаріїв. Імовірно, що ця група буде повторно проводити консультації після врахування своїх первинних коментарів.

На цьому етапі проект сценарію буде достатньо зрілим, щоб запросити експертів для висвітлення думок щодо його ясності та переконливості. Після того, як усі думки та побажання будуть врахованими, необхідно буде розповсюдити сценарії для тестування серед експертів та інших зацікавлених сторін [19]. Основна увага в межах консультацій щодо результатів тестування буде приділена інституційним реакціям.

Крім того, щоб допомогти доопрацювати та затвердити «пробні» сценарії, необхідно в цій фазі обговорити потенційний вплив результатів, які досягнуті в процесі розвитку сценарію на зміст «Стратегічного плану 2011–2030 рр.».

**Третій етап. Основні дії.** Розробка проекту «бажаного» сценарію на довгострокову перспективу. Завершення розробки проекту стратегічного плану.

*Деталі.* Беручи до уваги той досвід і знання, які були отримані під час створення «пробних» сценаріїв на попередньому етапі, особливо щодо взає-

мозалежності рушійних сил та невизначеностей, цільова група буде досліджувати: зміст переваг; можливості, що будуть вилучені; питання, яких слід уникати. З них цільовою групою будується проект «бажаного» сценарію (більш формально «нормативний сценарій»), щоб уявити, в якому напрямку необхідно рухатись, які дії необхідно виконувати, щоб досягти поставленої мети [6].

*Консультації.* Консультації в цій фазі відбуваються, у першу чергу, серед членів цільової групи.

Проводиться обговорення проекту «бажаного» сценарію і його наслідків серед широкого загалу. Враховуються коментарі.

**Четвертий етап. Основні дії.** Консультації на рівні широкого загалу щодо проекту «бажаного» сценарію та його наслідків. Акцентування уваги на регіональних відмінностях.

*Деталі.* Порівняння експертами «пробного» та «бажаного» сценаріїв, а також вивчення проекту потенційних дій для досягнення «бажаного» результату.

*Консультації.* Необхідно провести обговорення результатів проекту передбачення. Після обговорення необхідно підготувати остаточний проект для подальших дій.

Крім розгляду остаточного проекту, необхідно забезпечити зрозумілість та передачу результатів передбачення широкому загалу. Під час реалізації «Стратегічного плану 2011–2030 рр.» необхідно приділяти першочергову увагу заходам, запропонованим у плані, і передбачення має допомогти в цьому.

Велика кількість експертів буде брати участь у роботі і надавати свої думки (коментарі) під час проведення передбачення:

- у висуненні та перевірці ключових рушійних сил;
- у перевірці «пробних» сценаріїв;
- в обговоренні наслідків, що впливатимуть із «бажаного» сценарію [7].

Чітке виконання наведених вище кроків, на нашу думку, дозволить максимально якісно підготувати передбачення щодо розвитку світової економіки на період до 2030 р. [26]. Такій підхід відповідає останнім тенденціям проведення передбачення, що підкреслює невизначеність майбутнього та наголошує на необхідності стратегічної гнучкості.

## ВИСНОВКИ

- Великі економічні цикли є закономірним і циклічним явищем, хоча і не з чіткими, але відомими межами (довжина хвиль коливається в межах від 60 до 47 р.).

- На підставі першого пункту висновку стає очевидним, що стає можливим прогнозування майбутніх циклів та їхніх елементів (економічних злетів, криз, депресій).

- Відомі причини циклів. Причиною існування великих циклів є довгий цикл часу будівництва та дієздатності засобів виробництва, довгого використання та віддачі вкладених інвестицій — фабрики, заводи, порти, канали, тунелі, гідроелектростанції, залізниці дороги тощо. Їхнє будівництво та функціонування мають життєвий цикл тривалістю 40–60 р. Саме ця обставина і породжує появу великих циклів економічної кон'юнктури. Границею цих циклів є стики вичерпання дієздатності старих капітальних благ та

початок будівництва та функціонування нових засобів виробництва, здатних діяти на принципово новій техніко-технологічній та організаційно-структурній основі, створюючи принципово нові блага довгого використання.

Зважаючи на попередні висновки, стає очевидною можливість застосування методології передбачення для виявлення науково-технологічних напрямів, що складуть основу шостого технологічного укладу та створення сценаріїв можливого розвитку подій. Обираючи позитивний сценарій, в урядів країн або керівників установ/підприємств з'являється можливість робити кроки задля досягнення поставленої мети — реалізації «бажаного» сценарію. Передбачення є надзвичайно важливим інструментом для розвитку як окремої країни/установи/підприємства, так і для їх сукупності. Результатом цього процесу є план розвитку країн/установ/підприємства, що встановлює цілі, описує кроки до цієї цілі та показує вразливі місця, що потребують доопрацювання. А також виявляє технології, які вже вичерпали свій потенціал і подальше інвестування в них призведе до збитків. Адже існує багато прикладів, коли банкрутували величезні компанії, а інколи в надзвичайно важких умовах опинялись навіть окремі країни, які своєчасно не змогли передбачити появу нових технологій або відвернути реалізацію негативного сценарію. Таким чином, використовуючи методологію передбачення, розвиток стає контрольованим, а не хаотичним. Враховуючи зазначене вище, значення передбачення важко переоцінити.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Кологривов Я.І. Дослідження періодичних закономірностей сталого розвитку в контексті великих економічних циклів Кондратьєва // Системний аналіз та інформаційні технології: матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конф. (26–30 трав.). — К.: ННК «ПСА» НТУУ «КПІ», 2009. — 616 с.
2. Згуровський М.З. Хто бачить майбутнє, той перемагає // Дзеркало тижня. — 2001 — № 25 (349). — [http://dt.ua/SCIENCE/hto\\_bachit\\_maybutne\\_toy\\_pereмагаe-24963.html](http://dt.ua/SCIENCE/hto_bachit_maybutne_toy_pereмагаe-24963.html).
3. Згуровський М.З. Болісне одужання через кризу // Дзеркало тижня. — 2008. — № 47 (726). — [http://dt.ua/ECONOMICS/bolisne\\_oduzhannya\\_cherez\\_krizu-55684.html](http://dt.ua/ECONOMICS/bolisne_oduzhannya_cherez_krizu-55684.html).
4. Кондратьев Н.Д. Проблема экономической динамики. — <http://www.ozon.ru/context/detail/id/4002513/>.
5. Згуровський М.З., Панкратова Н.Д. Системная стратегия технологического предвидения в инновационной деятельности // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2003. — № 3. — С. 7–24.
6. Згуровський М.З. Сценарний аналіз як системна методологія передбачення // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2002. — № 1. — С. 7–38.
7. ICSU Foresight Analysis. — [http://www.icsu.org/1\\_icsuinscience/PDF/ICSU\\_Foresight\\_summary.pdf](http://www.icsu.org/1_icsuinscience/PDF/ICSU_Foresight_summary.pdf).
8. Bourgeois P. Technology Foresight for Strategic Decision-Making // The proceeding of the UNIDO Technology Foresight Conference for Central and Eastern Europe and the Newly Independent States. — Vienna, 4–5 April. — 2001. — P. 24. — [http://www.unido.org/fileadmin/import/12231\\_03Bourgeoislide.pdf](http://www.unido.org/fileadmin/import/12231_03Bourgeoislide.pdf).
9. Згуровський М.З. Технологічне передбачення як інструмент прийняття стратегічних рішень // Дзеркало тижня. — 2001. — № 39 (363). — [http://dt.ua/SCIENCE/tehnologichne\\_peredbachennya\\_yak\\_instrument\\_priynyatt\\_ya\\_strategichnih\\_rishen-25975.html](http://dt.ua/SCIENCE/tehnologichne_peredbachennya_yak_instrument_priynyatt_ya_strategichnih_rishen-25975.html).
10. Loveridge D. Technology forecasting and foresight: pedantry or disciplined vision // Ideas in Progress. — 1997. — № 2. — [http://www.php.portals.mbs.ac.uk/Portals/49/docs/dloveridge/pedantry\\_wp2.PDF](http://www.php.portals.mbs.ac.uk/Portals/49/docs/dloveridge/pedantry_wp2.PDF).



11. Згуровський М.З. Стан та перспективи розвитку методології системного аналізу в Україні // Кибернетика і системний аналіз. — 2000. — № 1. — С. 101–109.
12. Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика и прогнозы будущего (Синергетика: от прошлого к будущему). — 3-е изд. — М.: Едиторнал УССР, 2003. — 288 с.
13. Martin B. Technology Foresight in Rapidly Globalizing Economy // The proceeding of the UNIDO Technology Foresight Conference for Central and Eastern Europe and the Newly Independent States. — Vienna, 4–5 April. — 2001. — P. 1–17. — [http://www.unido.org/fileadmin/import/12608\\_AideMemoire.pdf](http://www.unido.org/fileadmin/import/12608_AideMemoire.pdf).
14. Brockhaus W.L., Mickelsen J.F. An analysis of prior Delphi applications and some observations on its future applicability // Technol. Forecast. and Soc. Change. — 1977. — № 1. — P. 103–110. — [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleListURL&\\_method=list&\\_ArticleLitID=1254518970&view=c&\\_acct=C000050221&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=10&md5=001f976e5bdafa031a547c911725d4d61](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleLitID=1254518970&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=001f976e5bdafa031a547c911725d4d61).
15. Scenarios for future scientific and technological developments in developing countries 2005–2015 // European Commission Community Research. Report, March. — 2006. — [http://ftp.cordis.europa.eu/pub/foresight/docs/ntw\\_scenarios2\\_report\\_en.pdf](http://ftp.cordis.europa.eu/pub/foresight/docs/ntw_scenarios2_report_en.pdf).
16. 20 forecasts for 2010–2025 // World Future Society Report. — <http://www.wfs.org/forecasts/index.html>.
17. Science and Technology Foresight Survey // National Institute of Science and Technology Policy Report, May. — 2005. — <http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/eng/rep097e/idx097e.html>.
18. Morales Jesus E.A. The Most Commonly Applied Methodologies in Technology Foresight // The proceeding of the UNIDO Technology Foresight Conference for Central and Eastern Europe and the Newly Independent States. — Vienna, 4–5 April. — 2001. — P. 170–178. — [http://www.unido.org/fileadmin/import/12608\\_AideMemoire.pdf](http://www.unido.org/fileadmin/import/12608_AideMemoire.pdf).
19. Згуровський М.З., Панкратова Н.Д. Информационная платформа сценарного анализа задач технологического предвидения // Кибернетика и системный анализ. — 2003. — № 4. — С. 112–125.
20. Згуровський М.З. Системна методологія передбачення. — К.: Політехніка, 2001. — 50 с.
21. Згуровський М.З., Панкратова Н.Д. Технологическое предвидение: монография. — К.: Политехника, 2005. — 154 с.
22. Kovats F. Enlargement Seen From the Other Side (Foresight in a precession country) // The Proceeding of the UNIDO Technology Foresight Conference for Central and Eastern Europe and the Newly Independent States. — Vienna, 4–5 April. — 2001. — P. 48–59. — [http://www.unido.org/fileadmin/import/12608\\_AideMemoire.pdf](http://www.unido.org/fileadmin/import/12608_AideMemoire.pdf).
23. The Delphi method: Techniques and applications. Adelson-Wesley, Reading, Mass., 1975. — 280 p. — <http://is.njit.edu/pubs/delphibook/delphibook.pdf>.
24. Lighting the way. Technology Fast 500 EMEA 2008 Ranking and CEO Survey // Deloitte. Technology, Media & Telecommunications Report. — [http://www.deloitte.com/assets/Dcom-Greece/Local%20Assets/Documents/GR\\_EN\\_Deloitte\\_2008\\_Technoogy\\_Fast\\_500\\_EMEA\\_Ranking\\_and\\_CEO\\_Survey.pdf](http://www.deloitte.com/assets/Dcom-Greece/Local%20Assets/Documents/GR_EN_Deloitte_2008_Technoogy_Fast_500_EMEA_Ranking_and_CEO_Survey.pdf).
25. Digital Delivery of Business Services. Working Party on the Information Economy // OECD Report. — 22 April. — 2004. — 83 p. — <http://www.oecd.org/dataoecd/40/5/31818723.pdf>.
26. The Global Technology Revolution 2020. In-Depth Analyses. RAND Corporation Report. — 2006. — [http://www.rand.org/pubs/technical\\_reports/TR303/](http://www.rand.org/pubs/technical_reports/TR303/).

Надійшла 07.03.2012

УДК 517.94

**ПРО ОДИН ПІДХІД ДО ЗНАХОДЖЕННЯ ПЕРІОДИЧНИХ  
РОЗВ'ЯЗКІВ НЕЛІНІЙНОГО ЗВИЧАЙНОГО  
ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО РІВНЯННЯ ДРУГОГО ПОРЯДКУ**

**Ю.Є. БОХОНОВ**

Запропоновано підхід до знаходження періодичних розв'язків нелінійного диференціального рівняння другого порядку, який базується на побудові функції Гріна для диференціального оператора, що визначений на функціях, які задовольняють періодичним крайовим умовам. Наведено необхідні та достатні умови існування періодичних розв'язків рівняння.

**ВСТУП**

У роботі використовується підхід автора для знаходження періодичних розв'язків звичайного нелінійного диференціального рівняння другого порядку, який викладено в [1]. При цьому уточнюються оцінки швидкості збіжності послідовних наближень, які отримані в зазначеній роботі. Нехай функція  $f(t, x, y)$  неперервна на  $D = (-\infty, \infty) \times [a, b] \times [c, d]$ , періодична по  $t$  із періодом  $T$ . Позначимо

$$M = \max_D |f(t, x, y)|. \quad (1)$$

Від функції  $f(t, x, y)$  будемо вимагати, щоб вона по  $x, y$  задовольняла умові Ліпшиця

$$|f(t, x_1, y_1) - f(t, x_2, y_2)| \leq K_0 |x_1 - x_2| + K_1 |y_1 - y_2|. \quad (2)$$

Знаходження періодичних розв'язків диференціального рівняння

$$\ddot{x} = f(t, x, \dot{x}) \quad (3)$$

еквівалентне розв'язанню крайової задачі

$$x(0) = x(T), \quad \dot{x}(0) = \dot{x}(T) \quad (4)$$

для рівняння (3). Пропонується розглянути диференціальний оператор  $(Lx)(t) = \frac{d^2 x(t)}{dt^2}$  у гільбертовому просторі  $H = L_2(0, T)$ , область визначення якого — це функції, що мають абсолютно неперервну першу похідну, та задовольняють крайовим умовам (4). Як відомо, такий оператор є самоспря-

женим. Задача знаходження періодичних розв'язків зводиться до задачі обернення оператора  $L$ . Однак, варто зауважити, що цей оператор не має оберненого, оскільки, як легко бачити,  $\lambda = 0$  є його власним числом із одновимірним власним підпростором  $H_1$ , натягнутим на функцію  $x(t) \equiv 1$ . Із самоспряженості оператора випливає, що підпростір  $\mathcal{H}$ , ортогональний до одиниці є інваріантним відносно  $L$ . При цьому  $H = H_1 \oplus \mathcal{H}$ .  $\mathcal{H}$ , очевидно, складається з функцій, середнє яких по  $[0, T]$  дорівнює нулю (позначатимемо це так:  $\bar{h} = \frac{1}{T} \int_0^T h(t) dt = 0 \quad \forall h \in \mathcal{H}$ ). Побудуємо оператор, обернений до  $L$  у підпросторі  $\mathcal{H}$ . Слід зауважити, що функція в правій частині (3), взагалі кажучи, не належить до  $\mathcal{H}$ , тому в подальшому розглядатимемо допоміжне рівняння

$$\ddot{x} = f(t, x, \dot{x}) - \bar{f}. \quad (5)$$

Для побудови вказаного оберненого оператора використовуватимемо модифікацію методики з [2].

Візьмемо фундаментальну систему  $x_1(t) \equiv 1, x_2(t) \equiv t$  розв'язків рівняння  $\ddot{x} = 0$ , які задовольняють умові  $x_i^{(j-1)}(0) = \delta_{i,j}$  ( $i=1,2; j=1,2$ ), де  $\delta_{i,j}$  — функція Кронекера. Нехай  $h \in \mathcal{H}$ , тобто  $\bar{h} = 0$ . Розглянувши рівняння  $(Lx)(t) = h(t)$ , знайдемо обернений оператор  $L^{-1}$ . Тоді функція  $x(t) = (L^{-1}h)(t)$  буде задовольняти цьому рівнянню і крайовим умовам (4).  $L^{-1}$  інтегральний та знайдемо його ядро  $G(t, \tau)$ , функцію Гріна крайової задачі. Для побудови оберненого оператора розв'язуватимемо рівняння методом варіації довільних сталих. Для цього шукатимемо розв'язок у вигляді  $x(t) = \tilde{C}_1(t)x_1(t) + \tilde{C}_2(t)x_2(t)$ . Після стандартних дій знаходимо:  $x(t) = \frac{1}{2} \int_0^T (t-\tau)(\chi(t-\tau) - \chi(\tau-t))h(\tau) d\tau + C_1 + C_2 t$ , де  $\chi$  — функція Хевісайда ( $\chi(s) = 1, s \geq 0, \chi(s) = 0, s < 0$ ),  $C_1, C_2 = \text{const}$ . Використовуючи першу з умов (4), можна знайти коефіцієнт  $C_2$ :  $C_2 = \frac{1}{T} \int_0^T \tau h(\tau) d\tau$ . Друга умова (4) на відміну від стандартної ситуації не дозволяє знайти  $C_1$ , вона лише підтверджує, що  $\bar{h} = 0$ . Цей невідомий коефіцієнт можна знайти з умови  $\bar{x} = 0$ , причому він знаходиться неоднозначно, оскільки з умови  $\bar{h} = 0$  випливає, що  $x(t) = \int_0^T G(t, \tau) h(\tau) d\tau = \int_0^T (G(t, \tau) + \alpha(t)) h(\tau) d\tau$ , де  $\alpha \in C^2[0, T]$  — довільна двічі неперервно диференційовна функція (вона не залежить від  $\tau$ , тому  $\int_0^T \alpha(t) h(\tau) d\tau = 0$ ). Отже,  $C_1 = -\frac{1}{2} \int_0^T \frac{\tau^2}{T} h(\tau) d\tau$ , і остаточно знаходимо функцію Гріна:

$$G(t, \tau) = \frac{1}{2T} (2t\tau - \tau^2) + \frac{1}{2} \begin{cases} t - \tau, & 0 \leq \tau \leq t \leq T; \\ \tau - t, & 0 \leq t \leq \tau \leq T. \end{cases} \quad (6)$$

Тоді  $x(t) = \int_0^T G(t, \tau) h(\tau) d\tau$ . Звідси знаходимо:  $x'(t) = \int_0^T G'_t(t, \tau) h(\tau) d\tau$ , де

$$G'(t, \tau) = \begin{cases} \frac{\tau}{T} + \frac{1}{2}; & 0 \leq \tau \leq t \leq T; \\ \frac{\tau}{T} - \frac{1}{2}; & 0 \leq t \leq \tau \leq T. \end{cases} \quad (7)$$

Завдяки розкладу в ортогональну суму  $H = H_1 \oplus \bar{H}$  кожен розв'язок крайової задачі для рівняння (3) можна подати у вигляді  $x(t) = x_0 + x_1(t)$ , де  $x_0 = \bar{x}$ ,  $x_1 = 0$ , тобто

$$x(t) = x_0 + \int_0^T G(t, \tau) (f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) - \bar{f}) d\tau. \quad (8)$$

Разом із рівнянням (8) розглядається рівняння для похідної:

$$\dot{x}(t) = \int_0^T G'_t(t, \tau) (f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) - \bar{f}) d\tau. \quad (9)$$

Рівняння (8) розв'язується методом послідовних наближень. Якщо процес збігається, одержуємо розв'язок  $x = \varphi(t, x_0)$ , який під час підстановки в (8) перетворює його в тотожність. Для того, щоб цей розв'язок був також розв'язком (3), очевидно, необхідно і разом із виконанням умов (4) достатньо, щоб виконувалась умова

$$\int_0^T f(\xi, \varphi(\xi, x_0), \dot{\varphi}(\xi, x_0)) d\xi = 0, \quad (10)$$

тобто, щоб число  $x_0$  (яке є середнім від  $x(t)$ , розв'язку задачі) було коренем цього рівняння.

Подамо рівняння (8)–(9) в іншому вигляді. Для цього запишемо інтеграл у правій частині (8) у такій формі:

$$\begin{aligned} \int_0^T G(t, \tau) (f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) - \bar{f}) d\tau &= \int_0^T G(t, \tau) f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) d\tau - \\ &- \int_0^T f(\xi, x(\xi), \dot{x}(\xi)) d\xi \left( \frac{1}{T} \int_0^T G(t, \tau) d\tau \right) = \int_0^T (G(t, \tau) - \bar{G}(t)) f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) d\tau = \\ &= \frac{1}{2T} \int_0^T \left( -(t-\tau)^2 - \frac{T^2}{6} + T(t-\tau)(\chi(t-\tau) - \chi(\tau-t)) \right) f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) d\tau = \\ &= \frac{1}{2T} \left( \int_0^t \left( \frac{T^2}{12} - \left( \tau - t + \frac{T}{2} \right)^2 \right) f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) d\tau + \right. \\ &\quad \left. + \int_t^T \left( \frac{T^2}{12} - \left( \tau - t - \frac{T}{2} \right)^2 \right) f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) d\tau \right). \end{aligned}$$

Аналогічно перетворимо праву частину (9):

$$\begin{aligned} & \int_0^T G'_t(t, \tau) (f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) - \bar{f}) d\tau = \int_0^t G'_t(t, \tau) f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) d\tau - \\ & - \frac{1}{T} \int_0^T G'_t(t, \tau) d\tau \int_0^T f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) d\tau = \\ & = \int_0^T (G'_t(t, \tau) - \bar{G}'(t)) f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) d\tau = \\ & = \frac{1}{T} \left( \int_0^t \left( t - \tau + \frac{T}{2} \right) f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) d\tau + \int_t^T \left( t - \tau - \frac{T}{2} \right) f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) d\tau \right). \end{aligned}$$

Знайдемо умову збіжності ітераційного процесу під час розв'язання системи

$$\begin{aligned} x(t) = x_0 + \frac{1}{2T} \left( \int_0^t \left( \frac{T^2}{12} - \left( \tau - t + \frac{T}{2} \right)^2 \right) f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) d\tau + \right. \\ \left. + \int_t^T \left( \frac{T^2}{12} - \left( \tau - t - \frac{T}{2} \right)^2 \right) f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) d\tau \right); \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = \frac{1}{T} \left( \int_0^t \left( t - \tau + \frac{T}{2} \right) f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) d\tau + \right. \\ \left. + \int_t^T \left( t - \tau - \frac{T}{2} \right) f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) d\tau \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Введемо в просторі  $\mathbf{R}^2$  «псевдонорму»:  $\|(x_1, x_2)\| = (|x_1|, |x_2|)$ , а також для вектор-функції  $(x_1(t), x_2(t))$ :  $\| \|(x_1, x_2)\| \| = (\|x_1\|, \|x_2\|) = (\max_{t \in [0, T]} |x_1(t)|, \max_{t \in [0, T]} |x_2(t)|)$ . Простір із такою «псевдонормою» буде частково

впорядкованим, і для векторів  $(x, y), (\xi, \eta)$  під час виконання умов  $x \leq \xi, y \leq \eta$  використовуватимемо позначення  $(x, y) \leq (\xi, \eta)$ .

Розглянемо оператор  $S$ , що діє в просторі вектор-функцій зі значеннями в  $\mathbf{R}^2$  за формулою (нас буде цікавити його дія на вектори вигляду  $\text{col}(x(t), \dot{x}(t))$ ):

$$S \begin{pmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 + \frac{1}{2T} \int_0^T \left( \frac{T^2}{12} - \left( t - \tau - \frac{T}{2} \right)^2 \right) f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) d\tau + \int_0^t (t - \tau) f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) d\tau \\ \frac{1}{T} \int_0^T \left( \tau - t - \frac{T}{2} \right) f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) d\tau + \int_0^T f(\tau, x(\tau), \dot{x}(\tau)) d\tau \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Враховуючи (2), (3), дослідимо, за яких умов цей оператор буде стискаючим. Введемо заміну  $y = \frac{t}{T}$ ,  $\xi = \frac{\tau}{T}$ . Тоді для двох вектор-функцій  $\text{col}(x^{(1)}, \dot{x}^{(1)}(t))$ ,  $\text{col}(x^{(2)}(t), \dot{x}^{(2)}(t))$  маємо:

$$\begin{aligned} & |(S(x^1(t) - x^2(t)))_1| \leq \\ & \leq \frac{T^2}{2} \left( \int_0^y \left| -(y - \xi)^2 + (y - \xi) - \frac{1}{6} \right| d\xi + \int_y^1 \left| -(y - \xi)^2 - (y - \xi) - \frac{1}{6} \right| d\xi \right) \times \\ & \quad \times (K_0 \|x^1 - x^2\| + K_1 \|\dot{x}^1 - \dot{x}^2\|) = \\ & = \frac{T^2}{2} \left( \int_0^y \left| \left(y - \xi - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{1}{12} \right| d\xi + \int_y^1 \left| \left(y - \xi + \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{1}{12} \right| d\xi \right) \times \\ & \quad \times (K_0 \|x^1 - x^2\| + K_1 \|\dot{x}^1 - \dot{x}^2\|) = \frac{T^2}{18\sqrt{3}} (K_0 \|x^1 - x^2\| + K_1 \|\dot{x}^1 - \dot{x}^2\|). \end{aligned}$$

Тут ми скористались тим, що, як виявляється, площа фігури, що обчислюється сумою цих інтегралів, не залежить від  $y \in [0, 1]$ . Аналогічно

$$\begin{aligned} & |(S(x^1(t) - x^2(t)))_2| \leq \\ & \leq T \left( \int_0^y \left| \xi - y + \frac{1}{2} \right| d\xi + \int_y^1 \left| \xi - y - \frac{1}{2} \right| d\xi \right) (K_0 \|x^1 - x^2\| + K_1 \|\dot{x}^1 - \dot{x}^2\|) = \\ & = \frac{T}{4} (K_0 \|x^1 - x^2\| + K_1 \|\dot{x}^1 - \dot{x}^2\|). \end{aligned}$$

Отже,

$$\left\| S \begin{pmatrix} \|x^{(1)} - x^{(2)}\| \\ \|\dot{x}^{(1)} - \dot{x}^{(2)}\| \end{pmatrix} \right\| \leq \frac{T}{2} \begin{pmatrix} \frac{T}{9\sqrt{3}} K_0 & \frac{T}{9\sqrt{3}} K_1 \\ \frac{1}{4} K_0 & \frac{1}{4} K_1 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Позначимо через  $K$  матрицю в правій частині нерівності (14). Її норма дорівнює квадратному кореню з найбільшого власного числа матриці  $K * K$  (менше дорівнює нулю). Після нескладних підрахунків одержимо:

$$\|K\| = \sqrt{\left(\frac{T^2}{243} + \frac{1}{16}\right)(K_0^2 + K_1^2)}. \text{ Введемо позначення } q = \frac{T}{2} \|K\|. \text{ Звідси випли-$$

ває, що  $S$  буде стискаючим оператором за умови

$$q = \frac{T}{2} \sqrt{\left(\frac{T^2}{243} + \frac{1}{16}\right)(K_0^2 + K_1^2)} < 1. \quad (15)$$

Аналогічно доводиться, що константа  $M$  із умови (1) має задовольняти вимозі

$$M \leq \min \left( \frac{18\sqrt{3}}{T^2} (b-a), \frac{4}{T} (c-d) \right). \quad (16)$$

Стандартні міркування приводять до оцінки можливих значень величини  $x_0$ :

$$x_0 \in \left[ a + \frac{T^2}{18\sqrt{3}} M, b - \frac{T^2}{18\sqrt{3}} \right]. \quad (17)$$

Сформулюємо остаточний результат.

**Теорема 1.** Нехай функція  $f(t, x, y)$  неперервна на  $[0, T] \times [a, b] \times [c, d]$ , періодична по  $t$  із періодом  $T$ , задовольняє умові (2), причому константи Ліпшиця та стала  $M$  із (1) задовольняють умовам (15)–(16). Тоді для існування періодичного з періодом  $T$  розв'язку  $x = \varphi(t, x_0)$  рівняння (3) необхідно та достатньо існування такого значення  $x_0$ , яке задовольняє рівнянню (10), де  $\varphi(t, x_0)$  знаходиться методом послідовних наближень. При цьому  $x_0$  є середнім значенням  $\varphi(t, x_0)$  на  $[0, T]$  і знаходиться на проміжку, який задовольняє умові (17).

Використовуючи техніку доведення теореми Банаха про стискаючі відображення, одержимо оцінку похибки між розв'язком задачі (3)–(4) і її наближенням. Для цього треба тільки помітити, що  $\|x_1(t, x_0) - x_0\| \leq M \frac{T^2}{18\sqrt{3}}$ .

**Теорема 2.** Похибка між розв'язком задачі (3)–(4) і її  $n$ -им наближенням визначається з умови

$$\|\varphi(t, x_0) - x_n(t, x_0)\| \leq \frac{MT^2}{18\sqrt{3}(1-q)} q^n. \quad (18)$$

## ВИСНОВКИ

Зведення задачі про періодичні розв'язки нелінійного диференціального рівняння до крайової задачі з умовами періодичного типу є ефективним прийомом, що дає змогу прямого дослідження цієї проблеми без переходу до системи рівнянь першого порядку. Оцінка функції Гріна крайової задачі дає змогу одержати умови збіжності ітераційного процесу. Методику може бути застосовано при дослідженні функціонально-диференціальних рівнянь.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Бохонов Ю.С. Про один підхід до знаходження періодичних розв'язків нелінійного звичайного диференціального рівняння другого порядку // Нелінійні коливання. — 2000. — Т. 3, № 3. — С. 308–314.
2. Наймарк М.А. Линейные дифференциальные операторы. — М.: Наука, 1969. — 526 с.

Надійшла 02.06.2010

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ,  
ВИСОКОПРОДУКТИВНІ КОМП'ЮТЕРНІ  
СИСТЕМИ

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES,  
HIGH-EFFICIENCY COMPUTER SYSTEMS

УДК 004.04,004.62

**Обработка научных данных в условиях информационного «бума» / Згуровский М.З., Петренко А.И.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2012. — № 2. — С. 7–25.

Современная наука (е-наука) базируется на обработке потенциально огромных объемов информации. Рассмотрены тенденции и перспективы развития е-науки в условиях информационного «бума», которые охватывают вопросы обеспечения качества и совместимости данных, использования метаданных и семантики данных, долгосрочного их сохранения, интеллектуальной обработки и поиска данных в существующих источниках, влияния данных на выбор платформы и ее сервисно-ориентированной архитектуры, перспективы объединения Грид и облачных вычислений, а также европейские инициативы по этой тематике. Рис.: 4. Табл.: 2. Библиогр.: 19 назв.

UDC 004.04,004.62

**Processing of scientific data in the conditions of the information «boom» / Zгурovsky M.Z., Petrenko A.I.** // System Research and Information Technologies. — 2012. — № 2. — P. 7–25.

Modern science (e-science) is based on treatment of potentially enormous volumes of information. Tendencies and prospects of information technologies development in the conditions of information «boom», which embrace the question of providing data quality and compatibility, metadata and data semantics usage, long-term data maintenance, intellectual processing of data (Data Mining), data search in existent sources taking into account the heterogeneity of these resources, data influence on choice of the platform and its service-oriented architecture, Grid and Cloud Integration Opportunities and also European initiatives on this subjects, are considered. Figs: 4. Tabl.: 2. Refs: 19 titles.

УДК 519.74

**Інгібіторна мережа Петрі, яка виконує довільну задану машину Тюрінга / Зайцев Д.А.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2012. — № 2. — С. 26–41.

Побудовано інгібіторну мережу Петрі з фіксованою структурою, яка виконує довільну задану машину Тюрінга. Стрічка машини Тюрінга, її програма та стани зашифровані маркуванням 10-ти виділених позицій мережі Петрі. Правила роботи машини Тюрінга закодовано одиночним потоком управління в мережі Петрі, яка скомпонована із операторів послідовності, розгалуження, циклу. Використано підмережі, що реалізують операції арифметики, порівняння, копіювання. Рис.: 5. Табл.: 3. Бібліогр.: 12 назв.

UDC 519.74

**Inhibitor Petri Net, which performs any given Turing machine / Zaitsev D.A.** // System Research and Information Technologies. — 2012. — № 2. — P. 26–41.

The inhibitor Petri net with a fixed structure that executes an arbitrary given Turing machine was constructed. The tape of the Turing machine, its program and states are encoded by the marking of 10 dedicated places of the Petri net. The rules of Turing machine work are encoded by a single control flow within the inhibitor Petri net, which is composed of the sequence operators, branching, and cycle. Subnets which implement arithmetic, comparison and copying operations are used. Figs: 5. Tabl.: 3. Refs: 12 titles.

УДК 004.822

**Модель подання знань на спеціалізованому Інтернет-порталі в області опору матеріалів / Глоба Л.С., Новогрудська Р.Л.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2012. — № 2. — С. 42–48.



Розглянуто підхід до побудови спеціалізованого Інтернет-порталу знань в області опору матеріалів. Для побудови моделі подання знань на порталі використано онтологію, яка забезпечує однакове подання знань та даних, а також їх семантичну зв'язність. За допомогою понять, визначених в онтології, побудовано внутрішні сховища порталу, організовано його інформаційне наповнення, навігацію та пошук. Рис.: 2. Табл.: 1. Бібліогр.: 6 назв.

UDC 004.822

**Knowledge representation model on specialized internet-portal in the field of materials strength / Globa L.S., Novogrudsca R.L.** // System Research and Information Technologies. — 2012. — № 2. — P. 42–48.

The technology of building the specialized knowledge Internet-portal in the field of materials strength is presented here. The ontology that provides the equal knowledge and data representation and also their semantic connectivity is used for knowledge representation model on the portal. Using the concepts determined in the ontology the inner storages of portal are built, as well as information filling, navigation and search are organized. Figs: 2. Tabl.: 1. Refs: 6 titles.

---

УДК 519.711

**Нечітке моделювання для оцінювання і прогнозування індексу стійкості соціального середовища / Абдулласва Н.А.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2012. — № 2. — С. 49–56.

Запропоновано нечіткий підхід до оцінювання індексу сталості соціального середовища та прогнозування стану індексу в наступному році за допомогою нечіткої Марківської моделі. Нечіткі методи застосовано на основі нової бази показників, що дозволяють відображати не тільки статистику, але й динаміку розвитку соціального середовища. Рис.: 3. Табл.: 4. Бібліогр.: 4 назв.

UDC 519.711

**Fuzzy modeling to assess and forecast the index of stability of the social environment / Abdullayeva N.A.** // System Research and Information Technologies. — 2012. — № 2. — P. 49–56.

The fuzzy approach to evaluate the index of social environment sustainability and forecast of the index condition in the future by fuzzy markov model is offered. Fuzzy methods are applied on the basis of a new database of the indicators, which allow to reflect not only a statics, but also dynamics of the social environment development. Figs: 3. Tabl.: 4. Refs: 4 titles.

---

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

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

УДК 519.161

**Метод ветвей и границ в гамильтоновой задаче о сельском почтальоне / Морозов А.В., Панишев А.В.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2012. — № 2. — С. 57–66.

Сформулирована гамильтоновая задача о сельском почтальоне, которая является обобщением гамильтоновой задачи коммивояжера. Предложена модификация классического метода ветвей и границ (метода Литтла), позволяющая находить точное решение гамильтоновой задачи о сельском почтальоне или корректно установить его отсутствие. Рис. 1. Библиогр.: 6 назв.

UDC 519.161

**The branch-and-bound method in Hamiltonian rural postman problem / Morozov A.V., Panishev A.V.** // System Research and Information Technologies. — 2012. — № 2. — P. 57–66.

The Hamiltonian Rural Postman Problem, which is generalization of the Hamiltonian Travelling Salesman Problem, is formulated. Modification of the classical branch-and-bound algorithm (Little's method) which allows to find exact solution of the Hamiltonian Rural Postman Problem or correctly determine lack of solution is offered. Figs: 1. Refs: 6 titles.

---

УДК 519.713: 631.411.6

**Решение задач управления экологической безопасностью на основе реализации концепции корпорационной экологической системы / Козуля Т.В., Шаронова Н.В. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2012. — № 2. — С. 67–77.**

Предоставлены теоретико-практические основы формирования оценки экологического риска техногенно-нагруженных территорий и состояния здоровья населения на корпорационной основе формирования системы исследования, определены преимущества концепции корпорационной экологической системы (КЕС). Предоставлены расчеты риска на основе вероятностно-термодинамических показателей состояния объектов исследования. Рис.: 6. Табл.: 2. Библиогр.: 11 назв.

UDC 519.713: 631.411.6

**Problem solving of environmental safety management on basis of corporate ecological system concept realization / Kozulja T.V., Sharonova N.V. // System Research and Information Technologies. — 2012. — № 2. — P. 67–77.**

Theoretical practical basis of forming the estimations of anthropogenic loaded territories ecological risk and population health state rating on the corporative basis of research system forming are given. Corporative ecological system (CES) concept advantages are determined. The calculations of risk on the basis of a thermodynamic condition of the research objects are given. Figs: 6. Tabl.: 2. Refs: 11 titles.

---

УДК 656.013

**Оптимизации поиска путей по графу в динамической задаче коммивояжера методом модифицированного муравьиного алгоритма / Данчук В.Д., Сватко В.В. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2012. — № 2. — С. 78–86.**

Предложен метод решения задачи поиска минимального пути графа на основании применения модифицированного муравьиного алгоритма, в котором длина ребер двунаправленного ориентированного графа — переменная величина. С целью оптимизации параметров вероятностно-пропорционального поиска минимальной длины ребер по графу используется метод локального поиска. Рис. 2. Табл.: 4. Библиогр.: 12 назв.

UDC 656.013

**Optimization of ways search by a graph in the dynamic task of traveling salesman by the method of the modified ant algorithm / Danchuk V.D., Svatko V.V. // System Research and Information Technologies. — 2012. — № 2. — P. 78–86.**

The method of solving the task of minimum graph way search on the basis of using the modified ant algorithm, in which the length of ribs of bidirectional oriented graph is variable, is offered. The method of local search is used in order to optimize the parameters of probabilistic-proportional search of minimum ribs distance for a graph. Figs: 2. Tabl.: 4. Refs: 12 titles.

---

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ, ОПТИМАЛЬНЕ  
УПРАВЛІННЯ І ТЕОРІЯ ІГОР

METHODS OF OPTIMIZATION, OPTIMUM  
CONTROL AND THEORY OF GAMES

УДК 519.874

**Розбиття на підмножини і побудова допустимих та оптимальних послідовностей виконання множин завдань на декількох машинах / Зак Ю.О. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2012. — № 2. — С. 87–101.**

Досліджено властивості задач побудови допустимих та оптимальних розкладів виконання  $N$  завдань на  $m$  машинах за умов втрат часу на переналагодження. На основі встановлених якостей конструюються оператори включення із розгляду підмножин описів, які не містять допустимих рішень. Запропоновано алгоритми обчислення нижніх оцінок різних критеріїв оптимальності, а також алгоритми вирішення задач, що розглядаються послідовними алгоритмами оптимізації. Бібліогр.: 14 назв.

UDC 519.874

**Partition into subsets and building admissible and optimal sequence of the tasks set performance on multiple machines / Zak Yu.A.** // System Research and Information Technologies. — 2012. — № 2. — P. 87–101.

The properties of the problems of building the admissible and optimal schedules for implementation of  $N$  tasks on the  $m$  machines under the condition of a loss of time on changeovers are investigated. On the basis of the established properties the operators of the inclusions are constructed from a consideration of the descriptions subsets, which do not contain admissible solutions. The algorithms for computing lower bounds for various optimality criteria and algorithms for solving the problems, which are considered by sequential algorithm optimization are proposed. Refs: 14 titles.

---

МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ, МОДЕЛІ, ПРОБЛЕМИ І  
ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНИХ  
СИСТЕМ

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

УДК 004.056

**Алгоритми заміни контейнерів-ключів при потоковому шифруванні інформації методом непрямого шифрування / Алішов Н.І., Марченко В.А., Міщенко О.М.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2012. — № 2. — С. 102–110.

Описано новий підхід побудови систем потокового шифрування з використанням методу непрямої стенографії. Наведено алгоритми різних реалізацій запропонованого підходу. Рис.: 3. Бібліогр.: 9 назв.

UDC 004.056

**Algorithms for replacement of keys-containers during streaming encoding information using indirect encryptions / Alishov N.I., Marchenko V.A., Mischenko A.N.** // System Research and Information Technologies. — 2012. — № 2. — P. 102–110.

A new approach of building streaming encoding systems using the indirect method of stenography is described. The algorithms of various implementations of the proposed approach are shown.. Figs: 3. Refs: 9 titles.

---

МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА УПРАВЛІННЯ  
СИСТЕМАМИ В УМОВАХ РИЗИКУ І  
НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

METHODS OF SYSTEM ANALYSIS AND  
CONTROL IN CONDITONS OF RISK AND  
UNCERTAINTY CONDITIONS

УДК 518.9

**Комплексний аналіз ризику банкрутства корпорацій в умовах невизначеності. Частина 2 / Згуровський М.З., Зайченко Ю.П.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2012. — № 2. — С. 111–124.

Запропоновано різні моделі та методи аналізу ризику банкрутства підприємств із використанням нечітких нейронних мереж (ННМ) з алгоритмами виводу Мамдані та Цукамото. Проведено експериментальні дослідження чіткого методу Альтмана, нечітко-множинного методу Недосекіна і ННМ у задачах аналізу ризику банкрутства, які розглянуто на прикладі підприємств України. Оцінено їхню ефективність та визначено найадекватніший метод. Рис.: 14. Табл.: 7. Бібліогр.: 7 назв.

UDC 518.9

**Complex bankruptcy risk analysis of the enterprises under uncertainty. Part 2 / Zgurovsky M.Z., Zaychenko Yu.P.** // System Research and Information Technologies. — 2012. — № 2. — P. 111–124.

Different methods of enterprise bankruptcy risk analysis with application of fuzzy neural networks with the algorithms of finding Mamdani and Zukamoto are proposed. Experimental research of a clear method of Altman, fuzzy multi-method of Nedosekin and FNN in problems of analysis of risk of bankruptcy, which are considered on the example of the enterprises of Ukraine, are carried out, their efficiency is estimated and the most adequate method for Ukrainian economy was determined. Figs: 14. Tabl.: 7. Refs: 7 titles.

---

УДК 517.7+004=001.8

**Построение сценариев развития мировой экономики к 2030 г. в контексте больших экономических циклов Кондратьева / Кологривов Я.И.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2012. — № 2. — С. 125–137.

Для поиска и выявления научно-технологических направлений, которые составляют основу 6-го технологического уклада, использована методология предвидения (foresight) и ее инструментарии. Исследован потенциал развития мировой экономики в меняющихся экономических, социальных, политических и экологических условиях. Выявлены приоритетные научно-технологические (S&T) направления, которые составляют основу 6-го технологического уклада и построены несколько вариантов сценариев развития мировой экономики на период до 2030 г. Табл.: 1. Библиогр.: 26 назв.

UDC 517.7+004=001.8

**Building of scenarios of the world economy development by 2030, in the context of large economic cycles by Kondratiev / Kologrivov Ya.I.** // System Research and Information Technologies. — 2012. — № 2. — P. 125–137.

For the search and identification of the science and technology areas that constitute the basis of the 6-th technological mode, the foresight methodology and its toolsets are used. The potential of the world economy development in the changing economical, social, political and ecological conditions is investigated. The priority science and technology (S&T) areas which constitute the basis of the 6th technological mode are identified and several variants of scenarios of the world economy development for the period up to 2030. Tabl.: 1. Refs: 26 titles.

---

НОВІ МЕТОДИ В СИСТЕМНОМУ АНАЛІЗІ,  
ІНФОРМАЦІЇ ТА ТЕОРІЇ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

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

УДК 517.94

**Об одном подходе к нахождению периодических решений нелинейного обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка / Бохонов Ю.Е.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2012. — № 2. — С. 138–143.

Предложен подход к нахождению периодических решений нелинейного дифференциального уравнения второго порядка, который базируется на построении функции Грина для дифференциального оператора, который определен на функциях, которые удовлетворяют периодическим краевым условиям. Приведено необходимые и достаточные условия существования периодических решений уравнения. Библиогр.: 2 назв.

UDC 517.94

**About one approach to determination of periodic solutions of a nonlinear ordinary differential equation of the second order / Bokhonov Ju.Ye.** // System Research and Information Technologies. — 2012. — № 2. — P. 138–143.

The approach to determining of periodic solutions of the nonlinear differential second order equation is proposed. The approach is based on construction of the Green's function for differential operator defined on the functions, which satisfy boundary conditions. Necessary and sufficient conditions for the existence of periodic solutions of the equation are shown. Refs: 2 titles.

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Абдуллаєва Нігяр Акрамівна,**

спеціаліст відділу захисту праці та соціально-економічних інтересів працівників Конфедерації профсоюзів Азербайджану, Азербайджанська Республіка, Баку

**Алішов Надір Ісмаїл-огли,**

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Інституту кібернетики НАН України, Київ

**Бохонов Юрій Євгенович,**

кандидат фізико-математичних наук, доцент Навчально-наукового комплексу «Інститут прикладного системного аналізу» НТУУ «КПІ» МОН та НАН України, Київ

**Глоба Лариса Сергіївна,**

професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри інформаційно-телекомунікаційних мереж Інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «КПІ», Україна, Київ

**Данчук Віктор Дмитрович,**

професор, доктор фізико-математичних наук, завідувач кафедри електроніки та обчислювальної техніки Національного транспортного університету, Україна, Київ

**Зайцев Дмитро Анатолійович,**

доктор технічних наук, професор Міжнародного гуманітарного університету, Україна, Одеса

**Зайченко Юрій Петрович,**

професор, доктор технічних наук, професор Навчально-наукового комплексу «Інститут прикладного системного аналізу» Національного технічного університету України «КПІ» МОН та НАН України, Україна, Київ

**Зак Юрій Олександрович,**

доктор технічних наук, науковий співробітник Європейського центру з мехатроніки, Німеччина, Аахен

**Згуровський Михайло Захарович,**

академік НАН України, професор, доктор технічних наук, ректор Національного технічного університету України «КПІ», директор Навчально-наукового комплексу «Інститут прикладного системного аналізу» НТУУ «КПІ» МОН та НАН України, Київ

**Кологривов Ярослав Ігорович,**

аспірант Навчально-наукового комплексу «Інститут прикладного системного аналізу» НТУУ «КПІ» МОН та НАН України, Київ

**Козуля Тетяна Володимирівна,**

кандидат географічних наук, доцент кафедри автоматизованих систем управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Україна, Харків

**Петренко Анатолій Іванович,**

професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри системного проектування Навчально-наукового комплексу «Інститут прикладного системного аналізу» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Україна, Київ

**Сватко Віталій Володимирович,**

аспірант кафедри електроніки та обчислювальної техніки Національного транспортного університету, Україна, Київ

**Марченко Віталій Анатолійович,**

кандидат технічних наук, науковий співробітник Інституту кібернетики НАН України, Київ

**Міщенко Олександр Миколайович,**

аспірант Інституту кібернетики НАН України, Київ

**Морозов Андрій Васильович,**

кандидат технічних наук, завідувач кафедри інформатики та комп'ютерного моделювання Житомирського державного технологічного університету, Україна, Житомир

**Новогрудська Ріна Леонідівна,**

аспірант Інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «КПІ», Україна, Київ

**Панішев Анатолій Васильович,**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення обчислювальної техніки Житомирського державного технологічного університету, Україна, Житомир

**Шаронова Наталія Валеріївна,**

доктор технічних наук, завідувач кафедри інтелектуальних систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Україна, Харків